
разыскивается художник-график.

... способный рисовать в таком духе: [1](#), [2](#), [3](#), [4](#).

Это для другой опен-сорсной бесплатной книги, которая вряд ли будет печататься/издаваться/-продаваться, но возможно это кого-то заинтересует это, как самореклама...

Присылайте свои работы: dennis@yurichev.com.

*Эта книга посвящается
компьютеру Intertec Superbrain II*

Reverse Engineering для начинающих

(Понимание языка ассемблера)



Денис Юричев

Reverse Engineering для начинающих

(Понимание языка ассемблера)

Почему два названия? Читайте здесь: (стр. [xiii](#)).

Денис Юричев
<dennis@yurichev.com>



©2013-2016, Денис Юричев.

Это произведение доступно по лицензии Creative Commons «Attribution-ShareAlike 4.0 International» (CC BY-SA 4.0). Чтобы увидеть копию этой лицензии, посетите <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>.

Версия этого текста (26 августа 2018 г.).

Самая новая версия текста (а также англоязычная версия) доступна на сайте [beginners.re](#).

Обложка нарисована Андреем Нечаевским: [facebook](#).

Нужны переводчики!

Возможно, вы захотите мне помочь с переводом этой работы на другие языки, кроме английского и русского. Просто пришлите мне любой фрагмент переведенного текста (не важно, насколько короткий), и я добавлю его в исходный код на LaTeX.

[Читайте здесь](#).

Уже есть кое-что на [немецком](#), [французском](#), и чуть-чуть на [итальянском](#), [португальском](#) и [польском](#).

Скорость не важна, потому что это опен-сорсный проект все-таки. Ваше имя будет указано в числе участников проекта. Корейский, китайский и персидский языки зарезервированы издателями. Английскую и русскую версии я делаю сам, но английский у меня все еще ужасный, так что я буду очень признателен за коррективы, итд. Даже мой русский несовершенный, так что я благодарен за коррективы и русского текста!

Не стесняйтесь писать мне: dennis@yurichev.com.

Краткое оглавление

1 Образцы кода	1
2 Важные фундаментальные вещи	437
3 Более сложные примеры	459
4 Java	638
5 Поиск в коде того что нужно	677
6 Специфичное для ОС	713
7 Инструменты	768
8 Примеры из практики	771
9 Примеры разбора закрытых (proprietary) форматов файлов	910
10 Прочее	973
11 Что стоит почитать	987
12 Сообщества	990
Послесловие	992
Приложение	994
Список принятых сокращений	1023
Глоссарий	1028
Предметный указатель	1030

Оглавление

1 Образцы кода	1
1.1 Метод	1
1.2 Некоторые базовые понятия	2
1.2.1 Краткое введение в CPU	2
1.2.2 Представление чисел	3
1.3 Пустая функция	5
1.3.1 x86	5
1.3.2 ARM	6
1.3.3 MIPS	6
1.3.4 Пустые функции на практике	6
1.4 Возврат значения	7
1.4.1 x86	7
1.4.2 ARM	8
1.4.3 MIPS	8
1.4.4 На практике	8
1.5 Hello, world!	9
1.5.1 x86	9
1.5.2 x86-64	14
1.5.3 GCC — ещё кое-что	18
1.5.4 ARM	19
1.5.5 MIPS	25
1.5.6 Вывод	29
1.5.7 Упражнения	30
1.6 Пролог и эпилог функций	30
1.6.1 Рекурсия	30
1.7 Стек	30
1.7.1 Почему стек растёт в обратную сторону?	31
1.7.2 Для чего используется стек?	31
1.7.3 Разметка типичного стека	38
1.7.4 Мусор в стеке	38
1.7.5 Упражнения	42
1.8 printf() с несколькими аргументами	42
1.8.1 x86	42
1.8.2 ARM	53
1.8.3 MIPS	59
1.8.4 Вывод	65
1.8.5 Кстати	66
1.9 scanf()	66
1.9.1 Простой пример	66
1.9.2 Глобальные переменные	75
1.9.3 Проверка результата scanf()	85
1.9.4 Упражнение	97
1.10 Доступ к переданным аргументам	98
1.10.1 x86	98
1.10.2 x64	100
1.10.3 ARM	103
1.10.4 MIPS	106
1.11 Ещё о возвращаемых результатах	107
1.11.1 Попытка использовать результат функции возвращающей <i>void</i>	107
1.11.2 Что если не использовать результат функции?	108
1.11.3 Возврат структуры	109
1.12 Указатели	110
1.13 Оператор GOTO	110

1.13.1 Мертвый код	113
1.13.2 Упражнение	114
1.14 Условные переходы	114
1.14.1 Простой пример	114
1.14.2 Вычисление абсолютной величины	131
1.14.3 Тернарный условный оператор	133
1.14.4 Поиск минимального и максимального значения	136
1.14.5 Вывод	141
1.14.6 Упражнение	142
1.15 switch()/case/default	142
1.15.1 Если вариантов мало	142
1.15.2 И если много	156
1.15.3 Когда много case в одном блоке	168
1.15.4 Fall-through	172
1.15.5 Упражнения	174
1.16 Циклы	174
1.16.1 Простой пример	174
1.16.2 Функция копирования блоков памяти	185
1.16.3 Проверка условия	188
1.16.4 Вывод	189
1.16.5 Упражнения	190
1.17 Еще кое-что о строках	190
1.17.1 strlen()	190
1.18 Замена одних арифметических инструкций на другие	202
1.18.1 Умножение	202
1.18.2 Деление	207
1.18.3 Упражнение	208
1.19 Работа с FPU	208
1.19.1 IEEE 754	208
1.19.2 x86	208
1.19.3 ARM, MIPS, x86/x64 SIMD	209
1.19.4 Си/Си++	209
1.19.5 Простой пример	209
1.19.6 Передача чисел с плавающей запятой в аргументах	220
1.19.7 Пример со сравнением	223
1.19.8 Некоторые константы	257
1.19.9 Копирование	257
1.19.10 Стек, калькуляторы и обратная польская запись	257
1.19.11 80 бит?	257
1.19.12 x64	257
1.19.13 Упражнения	258
1.20 Массивы	258
1.20.1 Простой пример	258
1.20.2 Переполнение буфера	265
1.20.3 Защита от переполнения буфера	273
1.20.4 Еще немного о массивах	276
1.20.5 Массив указателей на строки	277
1.20.6 Многомерные массивы	284
1.20.7 Набор строк как двухмерный массив	291
1.20.8 Вывод	295
1.21 Кстати	295
1.21.1 Упражнения	295
1.22 Работа с отдельными битами	295
1.22.1 Проверка какого-либо бита	295
1.22.2 Установка и сброс отдельного бита	299
1.22.3 Сдвиги	308
1.22.4 Установка и сброс отдельного бита: пример с FPU ¹	308
1.22.5 Подсчет выставленных бит	312
1.22.6 Вывод	327
1.22.7 Упражнения	329
1.23 Линейный конгруэнтный генератор	329
1.23.1 x86	330
1.23.2 x64	331

¹Floating-Point Unit

1.23.3 32-bit ARM	332
1.23.4 MIPS	332
1.23.5 Версия этого примера для многопоточной среды	335
1.24 Структуры	335
1.24.1 MSVC: Пример SYSTEMTIME	335
1.24.2 Выделяем место для структуры через malloc()	339
1.24.3 UNIX: struct tm	340
1.24.4 Упаковка полей в структуре	350
1.24.5 Вложенные структуры	357
1.24.6 Работа с битовыми полями в структуре	360
1.24.7 Упражнения	367
1.25 Объединения (union)	367
1.25.1 Пример генератора случайных чисел	367
1.25.2 Вычисление машинного эпсилона	372
1.25.3 Быстрое вычисление квадратного корня	373
1.26 Указатели на функции	374
1.26.1 MSVC	375
1.26.2 GCC	382
1.26.3 Опасность указателей на ф-ции	386
1.27 64-битные значения в 32-битной среде	386
1.27.1 Возврат 64-битного значения	386
1.27.2 Передача аргументов, сложение, вычитание	387
1.27.3 Умножение, деление	391
1.27.4 Сдвиг вправо	394
1.27.5 Конвертирование 32-битного значения в 64-битное	395
1.28 SIMD	396
1.28.1 Векторизация	397
1.28.2 Реализация strlen() при помощи SIMD	407
1.29 64 бита	410
1.29.1 x86-64	410
1.29.2 ARM	417
1.29.3 Числа с плавающей запятой	417
1.29.4 Критика 64-битной архитектуры	417
1.30 Работа с числами с плавающей запятой (SIMD)	418
1.30.1 Простой пример	418
1.30.2 Передача чисел с плавающей запятой в аргументах	425
1.30.3 Пример со сравнением	426
1.30.4 Вычисление машинного эпсилона: x64 и SIMD	428
1.30.5 И снова пример генератора случайных чисел	429
1.30.6 Итог	430
1.31 Кое-что специфичное для ARM	430
1.31.1 Знак номера (#) перед числом	430
1.31.2 Режимы адресации	430
1.31.3 Загрузка констант в регистр	431
1.31.4 Релоки в ARM64	433
1.32 Кое-что специфичное для MIPS	434
1.32.1 Загрузка 32-битной константы в регистр	434
1.32.2 Книги и прочие материалы о MIPS	436
2 Важные фундаментальные вещи	437
2.1 Целочисленные типы данных	438
2.1.1 Бит	438
2.1.2 Ниббл AKA nibble AKA nybble	438
2.1.3 Байт	439
2.1.4 Wide char	440
2.1.5 Знаковые целочисленные и беззнаковые	440
2.1.6 Слово (word)	440
2.1.7 Регистр адреса	441
2.1.8 Числа	442
2.2 Представление знака в числах	444
2.2.1 Использование IMUL вместо MUL	445
2.2.2 Еще кое-что о дополнительном коде	446
2.3 Целочисленное переполнение (integer overflow)	447
2.4 AND	448

2.4.1 Проверка того, находится ли значение на границе 2^n	448
2.4.2 Кириллическая кодировка KOI-8R	448
2.5 И и ИЛИ как вычитание и сложение	449
2.5.1 Текстовые строки в ПЗУ ² ZX Spectrum	449
2.6 XOR (исключающее ИЛИ)	452
2.6.1 Бытовая речь	452
2.6.2 Шифрование	452
2.6.3 RAID ³	452
2.6.4 Алгоритм обмена значений при помощи исключающего ИЛИ	452
2.6.5 Список связанный при помощи XOR	453
2.6.6 Хэширование Зобриста / табуляционное хэширование	453
2.6.7 Кстати	454
2.6.8 AND/OR/XOR как MOV	454
2.7 Подсчет бит	454
2.8 Endianness (порядок байт)	455
2.8.1 Big-endian (от старшего к младшему)	455
2.8.2 Little-endian (от младшего к старшему)	455
2.8.3 Пример	455
2.8.4 Bi-endian (переключаемый порядок)	456
2.8.5 Конвертирование	456
2.9 Память	456
2.10 CPU	457
2.10.1 Предсказатели переходов	457
2.10.2 Зависимости между данными	457
2.11 Хеш-функции	457
2.11.1 Как работает односторонняя функция?	458
3 Более сложные примеры	459
3.1 Двойное отрицание	459
3.2 Пример strstr()	460
3.3 Конвертирование температуры	460
3.3.1 Целочисленные значения	460
3.3.2 Числа с плавающей запятой	462
3.4 Числа Фибоначчи	464
3.4.1 Пример #1	465
3.4.2 Пример #2	468
3.4.3 Итог	471
3.5 Пример вычисления CRC32	472
3.6 Пример вычисления адреса сети	475
3.6.1 calc_network_address()	476
3.6.2 form_IP()	477
3.6.3 print_as_IP()	478
3.6.4 form_netmask() и set_bit()	479
3.6.5 Итог	480
3.7 Циклы: несколько итераторов	480
3.7.1 Три итератора	481
3.7.2 Два итератора	481
3.7.3 Случай Intel C++ 2011	483
3.8 Duff's device	484
3.8.1 Нужно ли использовать развернутые циклы?	487
3.9 Деление используя умножение	487
3.9.1 x86	487
3.9.2 Как это работает	489
3.9.3 ARM	489
3.9.4 MIPS	490
3.9.5 Упражнение	491
3.10 Конверсия строки в число (atoi())	491
3.10.1 Простой пример	491
3.10.2 Немного расширенный пример	495
3.10.3 Упражнение	497
3.11 Inline-функции	498
3.11.1 Функции работы со строками и памятью	498

²Постоянное запоминающее устройство³Redundant Array of Independent Disks

3.12 C99 restrict	506
3.13 Функция <i>abs()</i> без переходов	509
3.13.1 Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64	509
3.13.2 Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64	510
3.14 Функции с переменным количеством аргументов	510
3.14.1 Вычисление среднего арифметического	510
3.14.2 Случай с функцией <i>vprintf()</i>	514
3.14.3 Случай с <i>Pin</i>	515
3.14.4 Эксплуатация строки формата	515
3.15 Обрезка строк	516
3.15.1 x64: Оптимизирующий MSVC 2013	517
3.15.2 x64: Неоптимизирующий GCC 4.9.1	519
3.15.3 x64: Оптимизирующий GCC 4.9.1	520
3.15.4 ARM64: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9	521
3.15.5 ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9	522
3.15.6 ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)	523
3.15.7 ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)	523
3.15.8 MIPS	524
3.16 Функция <i>toupper()</i>	525
3.16.1 x64	526
3.16.2 ARM	527
3.16.3 Используя битовые операции	529
3.16.4 Итог	529
3.17 Обфускация	530
3.17.1 Текстовые строки	530
3.17.2 Исполняемый код	530
3.17.3 Виртуальная машина / псевдо-код	532
3.17.4 Еще кое-что	532
3.17.5 Упражнение	532
3.18 Си++	533
3.18.1 Классы	533
3.18.2 <i>ostream</i>	549
3.18.3 <i>References</i>	550
3.18.4 <i>STL</i>	551
3.18.5 Память	584
3.19 Отрицательные индексы массивов	585
3.19.1 Адресация строки с конца	585
3.19.2 Адресация некоторого блока с конца	585
3.19.3 Массивы начинающиеся с 1	586
3.20 Больше об указателях	588
3.20.1 Работа с адресами вместо указателей	588
3.20.2 Передача значений как указателей; тэггированные объединения	591
3.20.3 Издевательство над указателями в ядре Windows	591
3.20.4 Нулевые указатели	596
3.20.5 Массив как аргумент функции	600
3.20.6 Указатель на функцию	600
3.20.7 Указатель как идентификатор объекта	601
3.21 Оптимизации циклов	602
3.21.1 Странная оптимизация циклов	602
3.21.2 Еще одна оптимизация циклов	603
3.22 Еще о структурах	605
3.22.1 Иногда вместо массива можно использовать структуру в Си	605
3.22.2 Безразмерный массив в структуре Си	606
3.22.3 Версия структуры в Си	608
3.22.4 Файл с рекордами в игре «Block out» и примитивная сериализация	609
3.23 <i>memmove()</i> и <i>memcpy()</i>	614
3.23.1 Анти-отладочный прием	614
3.24 <i>setjmp/longjmp</i>	615
3.25 Другие нездоровые хаки связанные со стеком	617
3.25.1 Доступ к аргументам и локальным переменным вызывающей ф-ции	617
3.25.2 Возврат строки	619
3.26 OpenMP	620
3.26.1 MSVC	622
3.26.2 GCC	624

3.27 Windows 16-bit	626
3.27.1 Пример #1	626
3.27.2 Пример #2	627
3.27.3 Пример #3	627
3.27.4 Пример #4	628
3.27.5 Пример #5	631
3.27.6 Пример #6	634
4 Java	638
4.1 Java	638
4.1.1 Введение	638
4.1.2 Возврат значения	638
4.1.3 Простая вычисляющая функция	643
4.1.4 Модель памяти в JVM ⁴	645
4.1.5 Простой вызов функций	646
4.1.6 Вызов beer()	647
4.1.7 Линейный конгруэнтный ГПСЧ ⁵	648
4.1.8 Условные переходы	649
4.1.9 Передача аргументов	651
4.1.10 Битовые поля	652
4.1.11 Циклы	653
4.1.12 switch()	655
4.1.13 Массивы	656
4.1.14 Строки	664
4.1.15 Исключения	666
4.1.16 Классы	669
4.1.17 Простейшая модификация	671
4.1.18 Итоги	676
5 Поиск в коде того что нужно	677
5.1 Идентификация исполняемых файлов	678
5.1.1 Microsoft Visual C++	678
5.1.2 GCC	678
5.1.3 Intel Fortran	678
5.1.4 Watcom, OpenWatcom	679
5.1.5 Borland	679
5.1.6 Другие известные DLL	680
5.2 Связь с внешним миром (на уровне функции)	680
5.3 Связь с внешним миром (win32)	680
5.3.1 Часто используемые функции Windows API	681
5.3.2 Расширение триального периода	681
5.3.3 Удаление nag-окна	681
5.3.4 tracer: Перехват всех функций в отдельном модуле	682
5.4 Строки	682
5.4.1 Текстовые строки	682
5.4.2 Поиск строк в бинарном файле	687
5.4.3 Сообщения об ошибках и отладочные сообщения	688
5.4.4 Подозрительные магические строки	688
5.5 Вызовы assert()	689
5.6 Константы	690
5.6.1 Магические числа	690
5.6.2 Специфические константы	692
5.6.3 Поиск констант	692
5.7 Поиск нужных инструкций	692
5.8 Подозрительные паттерны кода	694
5.8.1 Инструкции XOR	694
5.8.2 Вручную написанный код на ассемблере	694
5.9 Использование magic numbers для трассировки	695
5.10 Циклы	695
5.10.1 Некоторые паттерны в бинарных файлах	696
5.10.2 Сравнение «снимков» памяти	703

⁴Java Virtual Machine⁵Генератор псевдослучайных чисел

5.11 Определение ISA ⁶	704
5.11.1 Неверно дизассемблированный код	704
5.11.2 Корректно дизассемблированный код	709
5.12 Текстовые строки прямо посреди сжатых данных	710
5.13 Прочее	711
5.13.1 Общая идея	711
5.13.2 Порядок функций в бинарном коде	711
5.13.3 Крохотные функции	711
5.13.4 Си++	712
6 Специфичное для ОС	713
6.1 Способы передачи аргументов при вызове функций	713
6.1.1 cdecl	713
6.1.2 stdcall	713
6.1.3 fastcall	714
6.1.4 thiscall	716
6.1.5 x86-64	716
6.1.6 Возвращение переменных типа <i>float</i> , <i>double</i>	719
6.1.7 Модификация аргументов	719
6.1.8 Указатель на аргумент функции	720
6.2 Thread Local Storage	721
6.2.1 Вернемся к линейному конгруэнтному генератору	722
6.3 Системные вызовы (syscall-ы)	726
6.3.1 Linux	727
6.3.2 Windows	727
6.4 Linux	727
6.4.1 Адресно-независимый код	727
6.4.2 Трюк с <i>LD_PRELOAD</i> в Linux	730
6.5 Windows NT	732
6.5.1 CRT (win32)	732
6.5.2 Win32 PE	736
6.5.3 Windows SEH	744
6.5.4 Windows NT: Критические секции	766
7 Инструменты	768
7.1 Дизассемблеры	768
7.1.1 IDA	768
7.2 Отладчики	768
7.2.1 OllyDbg	768
7.2.2 GDB	768
7.2.3 tracer	768
7.3 Трассировка системных вызовов	769
7.4 Декомпиляторы	769
7.5 Прочие инструменты	769
7.5.1 Калькуляторы	769
7.6 Чего-то здесь недостает?	770
8 Примеры из практики	771
8.1 Шутка с task manager (Windows Vista)	772
8.1.1 Использование LEA для загрузки значений	775
8.2 Шутка с игрой Color Lines	777
8.3 Сапёр (Windows XP)	780
8.3.1 Автоматический поиск массива	785
8.3.2 Упражнения	786
8.4 Хакаем часы в Windows	786
8.5 Донглы	793
8.5.1 Пример #1: MacOS Classic и PowerPC	793
8.5.2 Пример #2: SCO OpenServer	800
8.5.3 Пример #3: MS-DOS	810
8.6 «QR9»: Любительская криптосистема, вдохновленная кубиком Рубика	815
8.7 Случай с зашифрованной БД #1	842
8.7.1 Base64 и энтропия	842
8.7.2 Данные сжаты?	844

⁶Instruction Set Architecture (Архитектура набора команд)

8.7.3 Данные зашифрованы?	845
8.7.4 CryptoPP	846
8.7.5 Режим обратной связи по шифротексту	848
8.7.6 Инициализирующий вектор	849
8.7.7 Структура буфера	850
8.7.8 Шум в конце	852
8.7.9 Вывод	853
8.7.10 Post Scriptum: перебор всех IV ⁷	853
8.8 Разгон майнера биткоинов Cointerra	853
8.9 SAP	858
8.9.1 Касательно сжимания сетевого трафика в клиенте SAP	858
8.9.2 Функции проверки пароля в SAP 6.0	869
8.10 Oracle RDBMS	873
8.10.1 Таблица V\$VERSION в Oracle RDBMS	873
8.10.2 Таблица X\$KSMLRU в Oracle RDBMS	881
8.10.3 Таблица V\$TIMER в Oracle RDBMS	882
8.11 Вручную написанный на ассемблере код	886
8.11.1 Тестовый файл EICAR	886
8.12 Демо	887
8.12.1 10 PRINT CHR\$(205.5+RND(1)); : GOTO 10	887
8.12.2 Множество Мандельброта	890
8.13 "Прикуп" в игре "Марьяж"	900
8.13.1 Упражнение	909
8.14 Другие примеры	909
9 Примеры разбора закрытых (proprietary) форматов файлов	910
9.1 Примитивное XOR-шифрование	910
9.1.1 Norton Guide: простейшее однобайтное XOR-шифрование	911
9.1.2 Простейшее четырехбайтное XOR-шифрование	914
9.1.3 Простое шифрование используя XOR-маску	918
9.1.4 Простое шифрование используя XOR-маску, второй случай	925
9.2 Информационная энтропия	930
9.2.1 Анализирование энтропии в Mathematica	931
9.2.2 Вывод	940
9.2.3 Инструменты	940
9.2.4 Кое-что о примитивном шифровании как XOR	941
9.2.5 Еще об энтропии исполняемого кода	941
9.2.6 ГПСЧ	941
9.2.7 Еще примеры	941
9.2.8 Энтропия различных файлов	942
9.2.9 Понижение уровня энтропии	943
9.3 Файл сохранения состояния в игре Millenium	943
9.4 Файл с индексами в программе <i>fortune</i>	950
9.4.1 Хакинг	955
9.4.2 Файлы	955
9.5 Oracle RDBMS: .SYM-файлы	956
9.6 Oracle RDBMS: .MSB-файлы	965
9.6.1 Вывод	972
9.7 Упражнения	972
9.8 Дальнейшее чтение	972
10 Прочее	973
10.1 Модификация исполняемых файлов	973
10.1.1 Текстовые строки	973
10.1.2 x86-код	973
10.2 Статистика количества аргументов функций	974
10.3 Compiler intrinsic	974
10.4 Аномалии компиляторов	975
10.4.1 Oracle RDBMS 11.2 and Intel C++ 10.1	975
10.4.2 MSVC 6.0	975
10.4.3 Итог	976
10.5 Itanium	976
10.6 Модель памяти в 8086	978

⁷Initialization Vector

10.7 Перестановка basic block-ов	979
10.7.1 Profile-guided optimization	979
10.8 Мой опыт с Hex-Rays 2.2.0	980
10.8.1 Ошибки	980
10.8.2 Странности	982
10.8.3 Безмолвие	983
10.8.4 Запятая	985
10.8.5 Типы данных	986
10.8.6 Длинные и запутанные выражения	986
10.8.7 Мой план	986
10.8.8 Итог	986
11 Что стоит почитать	987
11.1 Книги и прочие материалы	987
11.1.1 Reverse Engineering	987
11.1.2 Windows	987
11.1.3 Си/Си++	987
11.1.4 x86 / x86-64	988
11.1.5 ARM	988
11.1.6 Язык ассемблера	988
11.1.7 Java	988
11.1.8 UNIX	988
11.1.9 Программирование	989
11.1.10 Криптография	989
12 Сообщества	990
Послесловие	992
12.1 Вопросы?	992
Приложение	994
.1 x86	994
.1.1 Терминология	994
.1.2 Регистры общего пользования	994
.1.3 FPU регистры	998
.1.4 SIMD регистры	1000
.1.5 Отладочные регистры	1000
.1.6 Инструкции	1001
.1.7 prad	1013
.2 ARM	1015
.2.1 Терминология	1015
.2.2 Версии	1015
.2.3 32-битный ARM (AArch32)	1015
.2.4 64-битный ARM (AArch64)	1016
.2.5 Инструкции	1017
.3 MIPS	1017
.3.1 Регистры	1017
.3.2 Инструкции	1018
.4 Некоторые библиотечные функции GCC	1019
.5 Некоторые библиотечные функции MSVC	1019
.6 Cheatsheets	1019
.6.1 IDA	1019
.6.2 OllyDbg	1020
.6.3 MSVC	1020
.6.4 GCC	1021
.6.5 GDB	1021
Список принятых сокращений	1023
Глоссарий	1028
Предметный указатель	1030

Почему два названия?

В 2014-2018 книга называлась “Reverse Engineering для начинающих”, но я всегда подозревал что это слишком сужает аудиторию.

Люди от инфобезопасности знают о “reverse engineering”, но я от них редко слышу слово “ассемблер”.

Точно также, термин “reverse engineering” слишком незнакомый для общей аудитории программистов, но они знают про “ассемблер”.

В июле 2018, для эксперимента, я заменил название на “Assembly Language for Beginners” и записал ссылку на сайт Hacker News⁸, и книгу приняли, в общем, хорошо.

Так что, пусть так и будет, у книги будет два названия.

Хотя, я поменял второе название на “Understanding Assembly Language” (“Понимание языка ассемблера”), потому что кто-то уже написал книгу “Assembly Language for Beginners”. Также, люди говорят что “для начинающих” уже звучит немного саркастично для книги объемом в ~1000 страниц.

Книги отличаются только названием, именем файла (UAL-XX.pdf и RE4B-XX.pdf), URL-ом и парой первых страниц.

О reverse engineering

У термина «[reverse engineering](#)» несколько популярных значений: 1) исследование скомпилированных программ; 2) сканирование трехмерной модели для последующего копирования; 3) восстановление структуры СУБД. Настоящий сборник заметок связан с первым значением.

Желательные знания перед началом чтения

Очень желательно базовое знание [ЯП](#)⁹ Си. Рекомендуемые материалы: [11.1.3](#) (стр. 987).

Упражнения и задачи

...все перемещены на отдельный сайт: <http://challenges.re>.

Об авторе



Денис Юричев — опытный reverse engineer и программист. С ним можно контактировать по емейлу: dennis@yurichev.com.

⁸<https://news.ycombinator.com/item?id=17549050>

⁹Язык Программирования

- «Now that Dennis Yurichev has made this book free (libre), it is a contribution to the world of free knowledge and free education.» Richard M. Stallman, Основатель GNU, активист в области свободного ПО.
- «It's very well done .. and for free .. amazing.»¹⁰ Daniel Bilar, Siege Technologies, LLC.
- «... excellent and free»¹¹ Pete Finnigan, гурп по безопасности Oracle RDBMS.
- «... [the] book is interesting, great job!» Michael Sikorski, автор книги *Practical Malware Analysis: The Hands-On Guide to Dissecting Malicious Software*.
- «... my compliments for the very nice tutorial!» Herbert Bos, профессор университета Vrije Universiteit Amsterdam, соавтор *Modern Operating Systems (4th Edition)*.
- «... It is amazing and unbelievable.» Luis Rocha, CISSP / ISSAP, Technical Manager, Network & Information Security at Verizon Business.
- «Thanks for the great work and your book.» Joris van de Vis, специалист по SAP Netweaver & Security .
- «... [a] reasonable intro to some of the techniques.»¹² Mike Stay, преподаватель в Federal Law Enforcement Training Center, Georgia, US.
- «I love this book! I have several students reading it at the moment, [and] plan to use it in graduate course.»¹³ Сергей Братусь , Research Assistant Professor в отделе Computer Science в Dartmouth College
- «Dennis @Yurichev has published an impressive (and free!) book on reverse engineering»¹⁴ Tanel Poder, эксперт по настройке производительности Oracle RDBMS .
- «This book is a kind of Wikipedia to beginners...» Archer, Chinese Translator, IT Security Researcher.
- «Прочел Вашу книгу — отличная работа, рекомендую на своих курсах студентам в качестве учебного пособия». Николай Ильин, преподаватель в ФТИ НТУУ «КПИ» и DefCon-UA
- «[A] first-class reference for people wanting to learn reverse engineering. And it's free for all.» Mikko Hyppönen, F-Secure.

Благодарности

Тем, кто много помогал мне отвечая на массу вопросов: Андрей «hermlt» Баранович, Слава «Avid» Казаков, SkullC0DEr.

Тем, кто присылал замечания об ошибках и неточностях: Станислав «Beaver» Бобрицкий, Александр Лысенко, Александр «Solar Designer» Песляк, Федерико Рамондино, Марк Уилсон, Ксения Галинская, Разихова Мейрамгуль Кайратовна, Анатолий Прокофьев, Костя Бегунец, Валентин “netch” Нечаев, Александр Плахов, Артем Метла, Александр Ястребов, Влад Головкин¹⁵, Shell Rocket, Zhu Ruijin, Changmin Heo, Vitor Vidal, Stijn Crevits, Jean-Gregoire Foulon¹⁶, Ben L., Etienne Khan, Norbert Szeti¹⁷, Marc Remy, Michael Hansen, Derk Barten, The Renaissance¹⁸, Hugo Chan, Emil Mursalimov..

Просто помогали разными способами: Андрей Зубинский, Arnaud Patard (rtp на #debian-arm IRC), noshadow на #gcc IRC, Александр Автаев, Mohsen Mostafa Jokar.

Переводчикам на китайский язык: Antiy Labs (antiy.cn), Archer.

Переводчику на корейский язык: Byungho Min.

Переводчику на голландский язык: Cedric Sambre (AKA Midas).

Переводчикам на испанский язык: Diego Boy, Luis Alberto Espinosa Calvo, Fernando Guida, Diogo Mussi, Patricio Galdames.

¹⁰twitter.com/daniel_bilar/status/436578617221742593

¹¹twitter.com/petefinnigan/status/400551705797869568

¹²[reddit](https://www.reddit.com/r/ReverseEngineering/comments/5055903/26560833536/)

¹³twitter.com/sergeybratus/status/505590326560833536

¹⁴twitter.com/TanelPoder/status/524668104065159169

¹⁵[goto-vlad@github](https://github.com/goto-vlad)

¹⁶<https://github.com/pixjuan>

¹⁷<https://github.com/73696e65>

¹⁸<https://github.com/TheRenaissance>

Переводчикам на португальский язык: Thales Stevan de A. Gois, Diogo Mussi, Luiz Filipe.

Переводчикам на итальянский язык: Federico Ramondino¹⁹, Paolo Stivanin²⁰, twyK.

Переводчикам на французский язык: Florent Besnard²¹, Marc Remy²², Baudouin Landais, Téo Dacquet²³, BlueSkeye@GitHub²⁴.

Переводчикам на немецкий язык: Dennis Siekmeier²⁵, Julius Angres²⁶, Dirk Loser²⁷, Clemens Tamme.

Переводчикам на польский язык: Kateryna Rozanova, Aleksander Mistewicz, Wiktoria Lewicka.

Переводчикам на японский язык: shmz@github²⁸.

Корректорам: Александр «Lstar» Черненький, Владимир Ботов, Андрей Бражук, Марк “Logxen” Купер, Yuan Jochen Kang, Mal Malakov, Lewis Porter, Jarle Thorsen, Hong Xie.

Васил Колев²⁹ сделал очень много исправлений и указал на многие ошибки.

За иллюстрации и обложку: Андрей Нечаевский.

И ещё всем тем на github.com кто присылал замечания и исправления³⁰.

Было использовано множество пакетов \LaTeX . Их авторов я также хотел бы поблагодарить.

Жертвователи

Тем, кто поддерживал меня во время написания этой книги:

2 * Oleg Vygovsky (50+100 UAH), Daniel Bilar (\$50), James Truscott (\$4.5), Luis Rocha (\$63), Joris van de Vis (\$127), Richard S Shultz (\$20), Jang Minchang (\$20), Shade Atlas (5 AUD), Yao Xiao (\$10), Pawel Szczur (40 CHF), Justin Simms (\$20), Shawn the Rock (\$27), Ki Chan Ahn (\$50), Triop AB (100 SEK), Ange Albertini (€10+50), Sergey Lukianov (300 RUR), Ludvig Gislason (200 SEK), Gérard Labadie (€40), Sergey Volchkov (10 AUD), Vankayala Vigneswararao (\$50), Philippe Teuwen (\$4), Martin Haeberli (\$10), Victor Cazacov (€5), Tobias Sturzenegger (10 CHF), Sonny Thai (\$15), Bayna AlZaabi (\$75), Redfive B.V. (€25), Joona Oskari Heikkilä (€5), Marshall Bishop (\$50), Nicolas Werner (€12), Jeremy Brown (\$100), Alexandre Borges (\$25), Vladimir Dikovski (€50), Jiarui Hong (100.00 SEK), Jim Di (500 RUR), Tan Vincent (\$30), Sri Harsha Kandrakota (10 AUD), Pillay Harish (10 SGD), Timur Valiev (230 RUR), Carlos Garcia Prado (€10), Salikov Alexander (500 RUR), Oliver Whitehouse (30 GBP), Katy Moe (\$14), Maxim Dyakonov (\$3), Sebastian Aguilera (€20), Hans-Martin Münch (€15), Jarle Thorsen (100 NOK), Vitaly Osipov (\$100), Yuri Romanov (1000 RUR), Aliaksandr Autayeu (€10), Tudor Azoitei (\$40), Z0vsky (€10), Yu Dai (\$10), Anonymous (\$15), Vladislav Chelnokov (\$25), Nenad Noveljic (\$50), Ryan Smith (\$25), Andreas Schommer (€5).

Огромное спасибо каждому!

mini-ЧаВО

Q: Что необходимо знать перед чтением книги?

A: Желательно иметь базовое понимание Си/Си++.

Q: Должен ли я изучать сразу x86/x64/ARM и MIPS? Это не многовато?

A: Думаю, для начала, вы можете читать только о x86/x64, пропуская/пролистывая части о ARM/MIPS.

Q: Возможно ли купить русскую/английскую бумажную книгу?

A: К сожалению нет, пока ни один издатель не заинтересовался в издании русской или английской версии. А пока вы можете распечатать/переплести её в вашем любимом копи-шопе или копи-центре.

¹⁹<https://github.com/pinkrab>

²⁰<https://github.com/paolostivanin>

²¹<https://github.com/besnardf>

²²<https://github.com/mremy>

²³<https://github.com/T30rix>

²⁴<https://github.com/BlueSkeye>

²⁵<https://github.com/DSiekmeier>

²⁶<https://github.com/JAngres>

²⁷<https://github.com/PolymathMonkey>

²⁸<https://github.com/shmz>

²⁹<https://vasil.ludost.net/>

³⁰<https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/graphs/contributors>

Q: Существует ли версия erub/mobi?

A: Книга очень сильно завязана на специфические для TeX/LaTeX хаки, поэтому преобразование в HTML (erub/mobi это набор HTML) легким не будет.

Q: Зачем в наше время нужно изучать язык ассемблера?

A: Если вы не разработчик [OC³¹](#), вам наверное не нужно писать на ассемблере: современные компиляторы (2010-ые) оптимизируют код намного лучше человека [32](#).

К тому же, современные [CPU³³](#) это крайне сложные устройства и знание ассемблера вряд ли поможет узнать их внутренности.

Но все-таки остается по крайней мере две области, где знание ассемблера может хорошо помочь: 1) исследование malware (зловредов) с целью анализа; 2) лучшее понимание вашего скомпилированного кода в процессе отладки. Таким образом, эта книга предназначена для тех, кто хочет скорее понимать ассемблер, нежели писать на нем, и вот почему здесь масса примеров, связанных с результатами работы компиляторов.

Q: Я кликнул на ссылку внутри PDF-документа, как теперь вернуться назад?

A: В Adobe Acrobat Reader нажмите сочетание Alt+LeftArrow. В Evince кликните на "<".

Q: Могу ли я распечатать эту книгу? Использовать её для обучения?

A: Конечно, поэтому книга и лицензирована под лицензией Creative Commons (CC BY-SA 4.0).

Q: Почему эта книга бесплатная? Вы проделали большую работу. Это подозрительно, как и многие другие бесплатные вещи.

A: По моему опыту, авторы технической литературы делают это, в основном ради саморекламы. Такой работой заработать приличные деньги невозможно.

Q: Как можно найти работу reverse engineer-а?

A: На reddit, посвященному RE³⁴, время от времени бывают hiring thread ([2016](#)). Посмотрите там.

В смежном субреддите «netsec» имеется похожий тред: [2016](#).

Q: Как научиться программированию вообще?

A: Если вы можете хорошо освоить и Си и LISP, это делает жизнь программиста значительно легче. Я бы порекомендовал решать задачи из [Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)] и [SICP³⁵](#).

Q: У меня есть вопрос...

A: Напишите мне его емейлом (dennis@yurichev.com).

Как научиться программированию

Многие люди спрашивают об этом.

Легких путей нет, но есть пути быстрые и эффективные.

Из моего опыта, это просто: решать задачи из:

- Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)
- Харольд Абельсон, Джеральд Сассман – Структура и интерпретация компьютерных программ
- Дональд Э. Кнут, *Искусство программирования*
- Книги Никласа Вирта
- Brian W. Kernighan, Rob Pike, *Practice of Programming*, (1999)

... на чистом Си и Лиспе. В будущем, возможно, вы не будете использовать эти языки вообще. Большинство коммерческих программистов не используют. Но опыт программирования на Си и Лиспе помогает очень сильно в долгосрочной перспективе.

³¹Операционная Система

³²Очень хороший текст на эту тему: [Agner Fog, *The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs*, (2016)]

³³Central Processing Unit

³⁴reddit.com/r/ReverseEngineering/

³⁵Структура и интерпретация компьютерных программ (Structure and Interpretation of Computer Programs)

Также, вы можете не читать сами книги, просто листайте, тогда, когда вы чувствуете, что вы не можете чего-то понять для решения задачи.

В лучшем случае, это занимает годы, или всю жизнь, но это все же намного быстрее, чем метаться между очередными модными штуками.

Успех этих книг вероятно связан с тем, что их авторы – преподаватели, и весь материал был в начале отточен на студентах.

Насчет Лиспа, я бы рекомендовал Racket (диалект Scheme). Но это дело вкуса, так или иначе.

Некоторые люди говорят, что понимание ассемблера очень помогает, даже если вы не будете использовать его. Это верно. Но это уже путь для наиболее посвященных гиков, и для начала это можно отложить на будущее.

Также, очень частая проблема самоучек (включая автора этих строк), это то, что они слишком часто хватаются за слишком трудные проблемы, пропуская более легкие. Это большая ошибка. Сравните со спортом или музыкой – никто не начинает с попыток поднимать сразу 100 кг, или же сразу пытаться играть Капризы Паганини. Я бы сказал так – браться за задачу можно тогда, когда вы заранее, в уме, можете примерно прикинуть решение.

I think the art of doing research consists largely of asking questions, and sometimes answering them. Learn how to repeatedly pose miniquestions that represent special cases of the big questions you are hoping to solve.

When you begin to explore some area, you take baby steps at first, building intuition about that territory. Play with many small examples, trying to get a complete understanding of particular parts of the general situation.

In that way you learn many properties that are true and many properties that are false. That gives guidance about directions that are fruitful versus directions to avoid.

Eventually your brain will have learned how to take larger and larger steps. And shazam, you'll be ready to take some giant steps and solve the big problem.

But don't stop there! At this point you'll be one of very few people in the world who have ever understood your problem area so well. It will therefore be your responsibility to discover what else is true, in the neighborhood of that problem, using the same or similar methods to what your brain can now envision. Take your results to their "natural boundary" (in a sense analogous to the natural boundary where a function of a complex variable ceases to be analytic).

My little book *Surreal Numbers* provides an authentic example of research as it is happening. The characters in that story make false starts and useful discoveries in exactly the same order as I myself made those false starts and useful discoveries, when I first studied John Conway's fascinating axioms about number systems — his amazingly simple axioms that go significantly beyond real-valued numbers.

(One of the characters in that book tends to succeed or fail by brute force and patience; the other is more introspective, and able to see a bigger picture. Both of them represent aspects of my own activities while doing research. With that book I hoped to teach research skills "by osmosis", as readers observe a detailed case study.)

Surreal Numbers deals with a purely mathematical topic, not especially close to computer science; it features algebra and logic, not algorithms. When algorithms become part of the research, a beautiful new dimension also comes into play: Algorithms can be implemented on computers!

I strongly recommend that you look for every opportunity to write programs that carry out all or a part of whatever algorithms relate to your research. In my experience the very act of writing such a program never fails to deepen my understanding of the problem area.

(Дональд Э. Кнут – <https://theorydish.blog/2018/02/01/donald-knuth-on-doing-research/>)

Удачи!

О переводе на корейский язык

В январе 2015, издательство Asorn в Южной Корее сделало много работы в переводе и издании моей книги (по состоянию на август 2014) на корейский язык. Она теперь доступна на [их сайте](#).

Переводил Byungho Min ([twitter/tais9](#)). Обложку нарисовал мой хороший знакомый художник Андрей Нечаевский [facebook/andydinka](#). Они также имеют права на издание книги на корейском языке.

ке. Так что если вы хотите иметь *настоящую* книгу на полке на корейском языке и хотите поддержать мою работу, вы можете купить её.

О переводе на персидский язык (фарси)

В 2016 году книга была переведена Mohsen Mostafa Jokar (который также известен иранскому сообществу по переводу руководства Radare³⁶). Книга доступна на сайте издательства³⁷ (Pendare Pars).

Первые 40 страниц: <https://beginners.re/farsi.pdf>.

Регистрация книги в Национальной Библиотеке Ирана: <http://opac.nlai.ir/opac-prod/bibliographic/4473995>.

О переводе на китайский язык

В апреле 2017, перевод на китайский был закончен китайским издательством PTPress. Они также имеют права на издание книги на китайском языке.

Она доступна для заказа здесь: <http://www.epubit.com.cn/book/details/4174>. Что-то вроде рецензии и история о переводе: <http://www.cptoday.cn/news/detail/3155>.

Основным переводчиком был Archer, перед которым я теперь в долгу. Он был крайне дотошным (в хорошем смысле) и сообщил о большинстве известных ошибок и баг, что крайне важно для литературы вроде этой книги. Я буду рекомендовать его услуги всем остальным авторам!

Ребята из [Anti Labs](#) также помогли с переводом. [Здесь предисловие](#) написанное ими.

³⁶<http://rada.re/get/radare2book-persian.pdf>

³⁷<http://goo.gl/2Tzx0H>

Глава 1

Образцы кода

1.1. Метод

Когда автор этой книги учил Си, а затем Си++, он просто писал небольшие фрагменты кода, компилировал и смотрел, что получилось на ассемблере. Так было намного проще понять¹. Он делал это такое количество раз, что связь между кодом на Си/Си++ и тем, что генерирует компилятор, вбилась в его подсознание достаточно глубоко. После этого не трудно, глядя на код на ассемблере, сразу в общих чертах понимать, что там было написано на Си. Возможно это поможет кому-то ещё.

Иногда здесь используются достаточно древние компиляторы, чтобы получить самый короткий (или простой) фрагмент кода.

Кстати, есть очень неплохой вебсайт где можно делать всё то же самое, с разными компиляторами, вместо того чтобы устанавливать их у себя. Вы можете использовать и его: <http://godbolt.org/>.

Упражнения

Когда автор этой книги учил ассемблер, он также часто компилировал короткие функции на Си и затем постепенно переписывал их на ассемблер, с целью получить как можно более короткий код. Наверное, этим не стоит заниматься в наше время на практике (потому что конкурировать с современными компиляторами в плане эффективности очень трудно), но это очень хороший способ разобраться в ассемблере лучше. Так что вы можете взять любой фрагмент кода на ассемблере в этой книге и постараться сделать его короче. Но не забывайте о тестировании своих результатов.

Уровни оптимизации и отладочная информация

Исходный код можно компилировать различными компиляторами с различными уровнями оптимизации. В типичном компиляторе этих уровней около трёх, где нулевой уровень — отключить оптимизацию. Различают также уровни оптимизации кода по размеру и по скорости. Неоптимизирующий компилятор работает быстрее, генерирует более понятный (хотя и более объемный) код. Оптимизирующий компилятор работает медленнее и старается сгенерировать более быстрый (хотя и не обязательно краткий) код. Наряду с уровнями оптимизации компилятор может включать в конечный файл отладочную информацию, производя таким образом код, который легче отлаживать. Одна очень важная черта отладочного кода в том, что он может содержать связи между каждой строкой в исходном коде и адресом в машинном коде. Оптимизирующие компиляторы обычно генерируют код, где целые строки из исходного кода могут быть оптимизированы и не присутствовать в итоговом машинном коде. Практикующий reverse engineer обычно сталкивается с обеими версиями, потому что некоторые разработчики включают оптимизацию, некоторые другие — нет. Вот почему мы постараемся поработать с примерами для обеих версий.

¹Честно говоря, он и до сих пор так делает, когда не понимает, как работает некий код.

1.2. Некоторые базовые понятия

1.2.1. Краткое введение в CPU

CPU это устройство исполняющее все программы.

Немного терминологии:

Инструкция : примитивная команда **CPU**. Простейшие примеры: перемещение между регистрами, работа с памятью, примитивные арифметические операции. Как правило, каждый **CPU** имеет свой набор инструкций (**ISA**).

Машинный код : код понимаемый **CPU**. Каждая инструкция обычно кодируется несколькими байтами.

Язык ассемблера : машинный код плюс некоторые расширения, призванные облегчить труд программиста: макросы, имена, итд.

Регистр CPU : Каждый **CPU** имеет некоторый фиксированный набор регистров общего назначения (**GPR**²). ≈ 8 в x86, ≈ 16 в x86-64, ≈ 16 в ARM. Проще всего понимать регистр как временную переменную без типа. Можно представить, что вы пишете на **ЯП** высокого уровня и у вас только 8 переменных шириной 32 (или 64) бита. Можно сделать очень много используя только их!

Откуда взялась разница между машинным кодом и **ЯП** высокого уровня? Ответ в том, что люди и **CPU**-ы отличаются друг от друга — человеку проще писать на **ЯП** высокого уровня вроде Си/Си++, Java, Python, а **CPU** проще работать с абстракциями куда более низкого уровня. Возможно, можно было бы придумать **CPU** исполняющий код **ЯП** высокого уровня, но он был бы значительно сложнее, чем те, что мы имеем сегодня. И наоборот, человеку очень неудобно писать на ассемблере из-за его низкоуровневости, к тому же, крайне трудно обойтись без мелких ошибок. Программа, переводящая код из **ЯП** высокого уровня в ассемблер называется *компилятором*³.

Несколько слов о разнице между **ISA**

x86 всегда был архитектурой с инструкциями переменной длины, так что когда пришла 64-битная эра, расширения x64 не очень сильно повлияли на **ISA**. ARM это **RISC**⁴-процессор разработанный с учетом инструкций одинаковой длины, что было некоторым преимуществом в прошлом. Так что в самом начале все инструкции ARM кодировались 4-мя байтами⁵. Это то, что сейчас называется «режим ARM». Потом они подумали, что это не очень экономично. На самом деле, самые используемые инструкции⁶ процессора на практике могут быть закодированы с использованием меньшего количества информации. Так что они добавили другую **ISA** с названием Thumb, где каждая инструкция кодируется всего лишь 2-мя байтами. Теперь это называется «режим Thumb». Но не все инструкции ARM могут быть закодированы в двух байтах, так что набор инструкций Thumb ограниченный. Код, скомпилированный для режима ARM и Thumb может сосуществовать в одной программе. Затем создатели ARM решили, что Thumb можно расширить: так появился Thumb-2 (в ARMv7). Thumb-2 это всё ещё двухбайтные инструкции, но некоторые новые инструкции имеют длину 4 байта. Распространено заблуждение, что Thumb-2 — это смесь ARM и Thumb. Это не верно. Режим Thumb-2 был дополнен до более полной поддержки возможностей процессора и теперь может легко конкурировать с режимом ARM. Основное количество приложений для iPod/iPhone/iPad скомпилировано для набора инструкций Thumb-2, потому что Xcode делает так по умолчанию. Потом появился 64-битный ARM. Это **ISA** снова с 4-байтными инструкциями, без дополнительного режима Thumb. Но 64-битные требования повлияли на **ISA**, так что теперь у нас 3 набора инструкций ARM: режим ARM, режим Thumb (включая Thumb-2) и ARM64. Эти наборы инструкций частично пересекаются, но можно сказать, это скорее разные наборы, нежели вариации одного. Следовательно, в этой книге постараемся добавлять фрагменты кода на всех трех ARM **ISA**. Существует ещё много **RISC ISA** с инструкциями фиксированной 32-битной длины — это как минимум MIPS, PowerPC и Alpha AXP.

²General Purpose Registers (регистры общего пользования)

³В более старой русскоязычной литературе также часто встречается термин «транслятор».

⁴Reduced Instruction Set Computing

⁵Кстати, инструкции фиксированного размера удобны тем, что всегда можно легко узнать адрес следующей (или предыдущей) инструкции. Эта особенность будет рассмотрена в секции об операторе switch() (1.15.2 (стр. 163)).

⁶А это MOV/PUSH/CALL/Jcc

1.2.2. Представление чисел

Люди привыкли к десятичной системе счисления вероятно потому что почти у каждого есть по 10 пальцев. Тем не менее, число 10 не имеет особого значения в науке и математике. Двоичная система естественна для цифровой электроники: 0 означает отсутствие тока в проводе и 1 — его присутствие. 10 в двоичной системе это 2 в десятичной; 100 в двоичной это 4 в десятичной, итд.

Если в системе счисления есть 10 цифр, её *основание* или *radix* это 10. Двоичная система имеет *основание 2*.

Важные вещи, которые полезно вспомнить: 1) *число* это число, в то время как *цифра* это термин из системы письменности, и это обычно один символ; 2) само число не меняется, когда конвертируется из одного основания в другое: меняется способ его записи (или представления в памяти).

Как сконвертировать число из одного основания в другое?

Позиционная нотация используется почти везде, это означает, что всякая цифра имеет свой вес, в зависимости от её расположения внутри числа. Если 2 расположена в самом последнем месте справа, это 2. Если она расположена в месте перед последним, это 20.

Что означает 1234?

$$10^3 \cdot 1 + 10^2 \cdot 2 + 10^1 \cdot 3 + 1 \cdot 4 = 1234 \text{ или } 1000 \cdot 1 + 100 \cdot 2 + 10 \cdot 3 + 4 = 1234$$

Та же история и для двоичных чисел, только основание там 2 вместо 10. Что означает 0b101011?

$$2^5 \cdot 1 + 2^4 \cdot 0 + 2^3 \cdot 1 + 2^2 \cdot 0 + 2^1 \cdot 1 + 2^0 \cdot 1 = 43 \text{ или } 32 \cdot 1 + 16 \cdot 0 + 8 \cdot 1 + 4 \cdot 0 + 2 \cdot 1 + 1 = 43$$

Позиционную нотацию можно противопоставить непозиционной нотации, такой как римская система записи чисел⁷. Вероятно, человечество перешло на позиционную нотацию, потому что так проще работать с числами (сложение, умножение, итд) на бумаге, в ручную.

Действительно, двоичные числа можно складывать, вычитать, итд, точно также, как этому обычно обучают в школах, только доступны лишь 2 цифры.

Двоичные числа громоздки, когда их используют в исходных кодах и дампах, так что в этих случаях применяется шестнадцатеричная система. Используются цифры 0..9 и еще 6 латинских букв: A..F. Каждая шестнадцатеричная цифра занимает 4 бита или 4 двоичных цифры, так что конвертировать из двоичной системы в шестнадцатеричную и назад, можно легко вручную, или даже в уме.

шестнадцатеричная	двоичная	десятичная
0	0000	0
1	0001	1
2	0010	2
3	0011	3
4	0100	4
5	0101	5
6	0110	6
7	0111	7
8	1000	8
9	1001	9
A	1010	10
B	1011	11
C	1100	12
D	1101	13
E	1110	14
F	1111	15

Как понять, какое основание используется в конкретном месте?

Десятичные числа обычно записываются как есть, т.е., 1234. Но некоторые ассемблеры позволяют подчеркивать этот факт для ясности, и это число может быть дополнено суффиксом "d": 1234d.

К двоичным числам иногда спереди добавляют префикс "0b": 0b100110111 (В GCC⁸ для этого

⁷Об эволюции способов записи чисел, см.также: [Donald E. Knuth, *The Art of Computer Programming*, Volume 2, 3rd ed., (1997), 195–213.]

⁸GNU Compiler Collection

1.2. НЕКОТОРЫЕ БАЗОВЫЕ ПОНЯТИЯ

есть нестандартное расширение языка ⁹). Есть также еще один способ: суффикс "b", например: 100110111b. В этой книге я буду пытаться придерживаться префикса "0b" для двоичных чисел.

Шестнадцатеричные числа имеют префикс "0x" в Си/Си++ и некоторых других ЯП: 0x1234ABCD. Либо они имеют суффикс "h": 1234ABCDh — обычно так они представляются в ассемблерах и отладчиках. Если число начинается с цифры A..F, перед ним добавляется 0: 0ABCDEFh. Во времена 8-битных домашних компьютеров, был также способ записи чисел используя префикс \$, например, \$ABCD. В книге я попытаюсь придерживаться префикса "0x" для шестнадцатеричных чисел.

Нужно ли учиться конвертировать числа в уме? Таблицу шестнадцатеричных чисел из одной цифры легко запомнить. А запоминать большие числа, наверное, не стоит.

Наверное, чаще всего шестнадцатеричные числа можно увидеть в URL¹⁰-ах. Так кодируются буквы не из числа латинских. Например: <https://en.wiktionary.org/wiki/na%C3%AFvet%C3%A9> это URL страницы в Wiktionary о слове «naïveté».

Восьмеричная система

Еще одна система, которая в прошлом много использовалась в программировании это восьмеричная: есть 8 цифр (0..7) и каждая описывает 3 бита, так что легко конвертировать числа туда и назад. Она почти везде была заменена шестнадцатеричной, но удивительно, в *NIX имеется утилита использующаяся многими людьми, которая принимает на вход восьмеричное число: chmod.

Как знают многие пользователи *NIX, аргумент chmod это число из трех цифр. Первая цифра это права владельца файла, вторая это права группы (которой файл принадлежит), третья для всех остальных. И каждая цифра может быть представлена в двоичном виде:

десятичная	двоичная	значение
7	111	rwX
6	110	rw-
5	101	r-X
4	100	r--
3	011	-wX
2	010	-w-
1	001	--X
0	000	---

Так что каждый бит привязан к флагу: read/write/execute (чтение/запись/исполнение).

И вот почему я вспомнил здесь о chmod, это потому что всё число может быть представлено как число в восьмеричной системе. Для примера возьмем 644. Когда вы запускаете chmod 644 file, выставляете права read/write для владельца, права read для группы, и снова, read для всех остальных. Сконвертируем число 644 из восьмеричной системы в двоичную, это будет 110100100, или (в группах по 3 бита) 110 100 100.

Теперь мы видим, что каждая тройка описывает права для владельца/группы/остальных: первая это rw-, вторая это r-- и третья это r--.

Восьмеричная система была также популярная на старых компьютерах вроде PDP-8, потому что слово там могло содержать 12, 24 или 36 бит, и эти числа делятся на 3, так что выбор восьмеричной системы в той среде был логичен. Сейчас, все популярные компьютеры имеют размер слова/адреса 16, 32 или 64 бита, и эти числа делятся на 4, так что шестнадцатеричная система здесь удобнее.

Восьмеричная система поддерживается всеми стандартными компиляторами Си/Си++. Это иногда источник недоумения, потому что восьмеричные числа кодируются с нулем вперед, например, 0377 это 255. И иногда, вы можете сделать опечатку, и написать "09" вместо 9, и компилятор выдаст ошибку. GCC может выдать что-то вроде:
error: invalid digit "9" in octal constant.

Также, восьмеричная система популярна в Java: когда IDA показывает строку с непечатаемыми символами, они кодируются в восьмеричной системе вместо шестнадцатеричной. Точно также себя ведет декомпилятор с Java JAD.

⁹<https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Binary-constants.html>

¹⁰Uniform Resource Locator

Делимость

Когда вы видите десятичное число вроде 120, вы можете быстро понять что оно делится на 10, потому что последняя цифра это 0. Точно также, 123400 делится на 100, потому что две последних цифры это нули.

Точно также, шестнадцатеричное число 0x1230 делится на 0x10 (или 16), 0x123000 делится на 0x1000 (или 4096), итд.

Двоичное число 0b1000101000 делится на 0b1000 (8), итд.

Это свойство можно часто использовать, чтобы быстро понять, что длина какого-либо блока в памяти выровнена по некоторой границе. Например, секции в PE¹¹-файлах почти всегда начинаются с адресов заканчивающихся 3 шестнадцатеричными нулями: 0x41000, 0x10001000, итд. Причина в том, что почти все секции в PE выровнены по границе 0x1000 (4096) байт.

Арифметика произвольной точности и основание

Арифметика произвольной точности (multi-precision arithmetic) может использовать огромные числа, которые могут храниться в нескольких байтах. Например, ключи RSA, и открытые и закрытые, могут занимать до 4096 бит и даже больше.

В [Donald E. Knuth, *The Art of Computer Programming*, Volume 2, 3rd ed., (1997), 265] можно найти такую идею: когда вы сохраняете число произвольной точности в нескольких байтах, всё число может быть представлено как имеющую систему счисления по основанию $2^8 = 256$, и каждая цифра находится в соответствующем байте. Точно также, если вы сохраняете число произвольной точности в нескольких 32-битных целочисленных значениях, каждая цифра отправляется в каждый 32-битный слот, и вы можете считать что это число записано в системе с основанием 2^{32} .

Произношение

Числа в недесятичных системах счисления обычно произносятся по одной цифре: “один-ноль-ноль-один-один-...”. Слова вроде “десять”, “тысяча”, итд, обычно не произносятся, потому что тогда можно спутать с десятичной системой.

Числа с плавающей запятой

Чтобы отличать числа с плавающей запятой от целочисленных, часто, в конце добавляют “.0”, например 0.0, 123.0, итд.

1.3. Пустая функция

Простейшая функция из всех возможных, это функция, которая ничего не делает:

Листинг 1.1: Код на Си/Си++

```
void f()
{
    return;
};
```

Скомпилируем!

1.3.1. x86

Для x86 и MSVC и GCC делает одинаковый код:

¹¹Portable Executable

1.3. ПУСТАЯ ФУНКЦИЯ

Листинг 1.2: Оптимизирующий GCC/MSVC (вывод на ассемблере)

```
f:
    ret
```

Тут только одна инструкция: RET, которая возвращает управление в [вызывающую ф-цию](#).

1.3.2. ARM

Листинг 1.3: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM) ASM Output

```
f      PROC
      BX      lr
      ENDP
```

Адрес возврата ([RA¹²](#)) в ARM не сохраняется в локальном стеке, а в регистре [LR¹³](#). Так что инструкция BX LR делает переход по этому адресу, и это то же самое что и вернуть управление в вызывающую ф-цию.

1.3.3. MIPS

Есть два способа называть регистры в мире MIPS. По номеру (от \$0 до \$31) или по псевдоимени (\$V0, \$A0, итд.).

Вывод на ассемблере в GCC показывает регистры по номерам:

Листинг 1.4: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
j      $31
nop
```

...а [IDA¹⁴](#) — по псевдоименам:

Листинг 1.5: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
j      $ra
nop
```

Первая инструкция — это инструкция перехода (J или JR), которая возвращает управление в [вызывающую ф-цию](#), переходя по адресу в регистре \$31 (или \$RA).

Это аналог регистра [LR](#) в ARM.

Вторая инструкция это [NOP¹⁵](#), которая ничего не делает. Пока что мы можем её игнорировать.

Еще кое-что об именах инструкций и регистров в MIPS

Имена регистров и инструкций в мире MIPS традиционно пишутся в нижнем регистре. Но мы будем использовать верхний регистр, потому что имена инструкций и регистров других [ISA](#) в этой книге так же в верхнем регистре.

1.3.4. Пустые функции на практике

Не смотря на то, что пустые функции бесполезны, они довольно часто встречаются в низкоуровневом коде.

Во-первых, популярны функции, выводящие информацию в отладочный лог, например:

¹²Адрес возврата

¹³Link Register

¹⁴ Интерактивный дизассемблер и отладчик, разработан [Hex-Rays](#)

¹⁵No Operation

Листинг 1.6: Код на Си/Си++

```

void dbg_print (const char *fmt, ...)
{
#ifdef _DEBUG
    // open log file
    // write to log file
    // close log file
#endif
};

void some_function()
{
    ...

    dbg_print ("we did something\n");

    ...
};

```

В не-отладочной сборке (например, “release”), `_DEBUG` не определен, так что функция `dbg_print()`, не смотря на то, что будет продолжаться вызываться в процессе исполнения, будет пустой.

Во-вторых, популярный способ защиты ПО это компиляция нескольких сборок: одной для легальных покупателей, второй — демонстрационной. Демонстрационная сборка может не иметь каких-то важных функций, например:

Листинг 1.7: Код на Си/Си++

```

void save_file ()
{
#ifdef DEMO
    // actual saving code
#endif
};

```

Функция `save_file()` может быть вызвана, когда пользователь кликает меню `File->Save`. Демо-версия может поставляться с отключенным пунктом меню, но даже если кракер разрешит этот пункт, будет вызываться пустая функция, в которой полезного кода нет.

IDA маркирует такие функции именами вроде `nullsub_00`, `nullsub_01`, итд.

1.4. Возврат значения

Еще одна простейшая функция это та, что возвращает некоторую константу:

Вот, например:

Листинг 1.8: Код на Си/Си++

```

int f()
{
    return 123;
};

```

Скомпилируем её.

1.4.1. x86

И вот что делает оптимизирующий GCC:

Листинг 1.9: Оптимизирующий GCC/MSVC (вывод на ассемблере)

```

f:
    mov     eax, 123
    ret

```


1.4. ВОЗВРАТ ЗНАЧЕНИЯ

Здесь только две инструкции. Первая помещает значение 123 в регистр EAX, который используется для передачи возвращаемых значений. Вторая это RET, которая возвращает управление в вызывающую функцию.

Вызывающая функция возьмет результат из регистра EAX.

1.4.2. ARM

А что насчет ARM?

Листинг 1.10: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM) ASM Output

```
f      PROC
      MOV     r0,#0x7b ; 123
      BX      lr
      ENDP
```

ARM использует регистр R0 для возврата значений, так что здесь 123 помещается в R0.

Нужно отметить, что название инструкции MOV в x86 и ARM сбивает с толку.

На самом деле, данные не *перемещаются*, а скорее *копируются*.

1.4.3. MIPS

Вывод на ассемблере в GCC показывает регистры по номерам:

Листинг 1.11: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
j      $31
li      $2,123          # 0x7b
```

...а IDA— по псевдоименам:

Листинг 1.12: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
jr      $ra
li      $v0, 0x7B
```

Так что регистр \$2 (или \$V0) используется для возврата значений. LI это “Load Immediate”, и это эквивалент MOV в MIPS.

Другая инструкция это инструкция перехода (J или JR), которая возвращает управление в **вызывающую ф-цию**.

Но почему инструкция загрузки (LI) и инструкция перехода (J или JR) поменяны местами? Это артефакт **RISC** и называется он “branch delay slot”.

На самом деле, нам не нужно вникать в эти детали. Нужно просто запомнить: в MIPS инструкция после инструкции перехода выполняется *перед* инструкцией перехода.

Таким образом, инструкция перехода всегда поменяна местами с той, которая должна быть исполнена перед ней.

1.4.4. На практике

На практике крайне часто встречаются ф-ции, которые возвращают 1 (*true*) или 0 (*false*).

Самые маленькие утилиты UNIX, `/bin/true` и `/bin/false` возвращают 0 и 1 соответственно, как код возврата (ноль как код возврата обычно означает успех, не ноль означает ошибку).

1.5. Hello, world!

Продолжим, используя знаменитый пример из книги [Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)]:

Листинг 1.13: код на Си/Си++

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("hello, world\n");
    return 0;
}
```

1.5.1. x86

MSVC

Компилируем в MSVC 2010:

```
cl 1.cpp /Fa1.asm
```

(Ключ /Fa означает сгенерировать листинг на ассемблере)

Листинг 1.14: MSVC 2010

```
CONST    SEGMENT
$SG3830 DB      'hello, world', 0AH, 00H
CONST    ENDS
PUBLIC   _main
EXTRN    _printf:PROC
; Function compile flags: /Odtp
_TEXT    SEGMENT
_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    OFFSET $SG3830
    call    _printf
    add     esp, 4
    xor     eax, eax
    pop     ebp
    ret     0
_main    ENDP
_TEXT    ENDS
```

MSVC выдает листинги в синтаксисе Intel. Разница между синтаксисом Intel и AT&T будет рассмотрена немного позже:

Компилятор сгенерировал файл 1.obj, который впоследствии будет слинкован линкером в 1.exe. В нашем случае этот файл состоит из двух сегментов: CONST (для данных-констант) и _TEXT (для кода).

Строка hello, world в Си/Си++ имеет тип const char[][Bjarne Stroustrup, *The C++ Programming Language, 4th Edition*, (2013)p176, 7.3.2], однако не имеет имени. Но компилятору нужно как-то с ней работать, поэтому он дает ей внутреннее имя \$SG3830.

Поэтому пример можно было бы переписать вот так:

```
#include <stdio.h>

const char $SG3830[]="hello, world\n";

int main()
{
    printf($SG3830);
    return 0;
}
```

1.5. HELLO, WORLD!

Вернемся к листингу на ассемблере. Как видно, строка заканчивается нулевым байтом — это требования стандарта Си/Си++ для строк. Больше о строках в Си/Си++: [5.4.1](#) (стр. 682).

В сегменте кода `_TEXT` находится пока только одна функция: `main()`. Функция `main()`, как и практически все функции, начинается с пролога и заканчивается эпилогом ¹⁶.

Далее следует вызов функции `printf()`: `CALL _printf`. Перед этим вызовом адрес строки (или указатель на неё) с нашим приветствием ("Hello, world!") при помощи инструкции `PUSH` помещается в стек.

После того, как функция `printf()` возвращает управление в функцию `main()`, адрес строки (или указатель на неё) всё ещё лежит в стеке. Так как он больше не нужен, то [указатель стека](#) (регистр `ESP`) корректируется.

`ADD ESP, 4` означает прибавить 4 к значению в регистре `ESP`.

Почему 4? Так как это 32-битный код, для передачи адреса нужно 4 байта. В x64-коде это 8 байт. `ADD ESP, 4` эквивалентно `POP` регистр, но без использования какого-либо регистра ¹⁷.

Некоторые компиляторы, например, Intel C++ Compiler, в этой же ситуации могут вместо `ADD` сгенерировать `POP ECX` (подобное можно встретить, например, в коде Oracle RDBMS, им скомпилированном), что почти то же самое, только портится значение в регистре `ECX`. Возможно, компилятор применяет `POP ECX`, потому что эта инструкция короче (1 байт у `POP` против 3 у `ADD`).

Вот пример использования `POP` вместо `ADD` из Oracle RDBMS:

Листинг 1.15: Oracle RDBMS 10.2 Linux (файл `app.o`)

<code>.text:0800029A</code>	<code>push</code>	<code>ebx</code>
<code>.text:0800029B</code>	<code>call</code>	<code>qksfroChild</code>
<code>.text:080002A0</code>	<code>pop</code>	<code>ecx</code>

После вызова `printf()` в оригинальном коде на Си/Си++ указано `return 0` — вернуть 0 в качестве результата функции `main()`.

В сгенерированном коде это обеспечивается инструкцией `XOR EAX, EAX`.

`XOR`, как легко догадаться — «исключающее ИЛИ» ¹⁸, но компиляторы часто используют его вместо простого `MOV EAX, 0` — снова потому, что опкод короче (2 байта у `XOR` против 5 у `MOV`).

Некоторые компиляторы генерируют `SUB EAX, EAX`, что значит *отнять значение в EAX от значения в EAX*, что в любом случае даст 0 в результате.

Самая последняя инструкция `RET` возвращает управление в вызывающую функцию. Обычно это код Си/Си++ [CRT](#) ¹⁹, который, в свою очередь, вернёт управление в [ОС](#).

GCC

Теперь скомпилируем то же самое компилятором GCC 4.4.1 в Linux: `gcc 1.c -o 1`. Затем при помощи [IDA](#) посмотрим как скомпилировалась функция `main()`. [IDA](#), как и `MSVC`, показывает код в синтаксисе Intel ²⁰.

Листинг 1.16: код в [IDA](#)

<code>main</code>	<code>proc near</code>
<code>var_10</code>	<code>= dword ptr -10h</code>
	<code>push ebp</code>
	<code>mov ebp, esp</code>
	<code>and esp, 0FFFFFFFh</code>
	<code>sub esp, 10h</code>
	<code>mov eax, offset aHelloWorld ; "hello, world\n"</code>
	<code>mov [esp+10h+var_10], eax</code>
	<code>call _printf</code>

¹⁶Об этом смотрите подробнее в разделе о прологе и эпилоге функции ([1.6](#) (стр. 30)).

¹⁷Флаги процессора, впрочем, модифицируются

¹⁸[wikipedia](#)

¹⁹C Runtime library

²⁰Мы также можем заставить GCC генерировать листинги в этом формате при помощи ключей `-S -masm=intel`.

1.5. HELLO, WORLD!

```
main    mov     eax, 0
        leave
        retn
        endp
```

Почти то же самое. Адрес строки `hello, world`, лежащей в сегменте данных, вначале сохраняется в `EAX`, затем записывается в стек. А ещё в прологе функции мы видим `AND ESP, 0FFFFFFF0h` — эта инструкция выравнивает значение в `ESP` по 16-байтной границе, делая все значения в стеке также выровненными по этой границе (процессор более эффективно работает с переменными, расположенными в памяти по адресам кратным 4 или 16)²¹.

`SUB ESP, 10h` выделяет в стеке 16 байт. Хотя, как будет видно далее, здесь достаточно только 4.

Это происходит потому, что количество выделяемого места в локальном стеке тоже выровнено по 16-байтной границе.

Адрес строки (или указатель на строку) затем записывается прямо в стек без помощи инструкции `PUSH`. `var_10` одновременно и локальная переменная и аргумент для `printf()`. Подробнее об этом будет ниже.

Затем вызывается `printf()`.

В отличие от `MSVC`, `GCC` в компиляции без включенной оптимизации генерирует `MOV EAX, 0` вместо более короткого опкода.

Последняя инструкция `LEAVE` — это аналог команд `MOV ESP, EBP` и `POP EBP` — то есть возврат [указателя стека](#) и регистра `EBP` в первоначальное состояние. Это необходимо, т.к. в начале функции мы модифицировали регистры `ESP` и `EBP` (при помощи `MOV EBP, ESP / AND ESP, ...`).

GCC: Синтаксис AT&T

Попробуем посмотреть, как выглядит то же самое в синтаксисе AT&T языка ассемблера. Этот синтаксис больше распространен в UNIX-мире.

Листинг 1.17: компилируем в GCC 4.7.3

```
gcc -S 1_1.c
```

Получим такой файл:

Листинг 1.18: GCC 4.7.3

```
.file "1_1.c"
.section .rodata
.LC0:
.string "hello, world\n"
.text
.globl main
.type main, @function
main:
.LFB0:
.cfi_startproc
pushl %ebp
.cfi_def_cfa_offset 8
.cfi_offset 5, -8
movl %esp, %ebp
.cfi_def_cfa_register 5
andl $-16, %esp
subl $16, %esp
movl $.LC0, (%esp)
call printf
movl $0, %eax
leave
.cfi_restore 5
.cfi_def_cfa 4, 4
ret
.cfi_endproc
```

²¹[Wikipedia: Выравнивание данных](#)

1.5. HELLO, WORLD!

```
.LFE0:
    .size    main, .-main
    .ident   "GCC: (Ubuntu/Linaro 4.7.3-1ubuntu1) 4.7.3"
    .section .note.GNU-stack,"",@progbits
```

Здесь много макросов (начинающихся с точки). Они нам пока не интересны.

Пока что, ради упрощения, мы можем их игнорировать (кроме макроса *.string*, при помощи которого кодируется последовательность символов, оканчивающихся нулем — такие же строки как в Си). И тогда получится следующее ²²:

Листинг 1.19: GCC 4.7.3

```
.LC0:
    .string "hello, world\n"
main:
    pushl    %ebp
    movl     %esp, %ebp
    andl     $-16, %esp
    subl     $16, %esp
    movl     $.LC0, (%esp)
    call     printf
    movl     $0, %eax
    leave
    ret
```

Основные отличия синтаксиса Intel и AT&T следующие:

- Операнды записываются наоборот.

В Intel-синтаксисе:

<инструкция> <операнд назначения> <операнд-источник>.

В AT&T-синтаксисе:

<инструкция> <операнд-источник> <операнд назначения>.

Чтобы легче понимать разницу, можно запомнить следующее: когда вы работаете с синтаксисом Intel — можете в уме ставить знак равенства (=) между операндами, а когда с синтаксисом AT&T — мысленно ставьте стрелку направо (→) ²³.

- AT&T: Перед именами регистров ставится символ процента (%), а перед числами символ доллара (\$). Вместо квадратных скобок используются круглые.
- AT&T: К каждой инструкции добавляется специальный символ, определяющий тип данных:
 - q — quad (64 бита)
 - l — long (32 бита)
 - w — word (16 бит)
 - b — byte (8 бит)

Возвращаясь к результату компиляции: он идентичен тому, который мы посмотрели в IDA. Одна мелочь: 0FFFFFFF0h записывается как \$-16. Это то же самое: 16 в десятичной системе это 0x10 в шестнадцатеричной. -0x10 будет как раз 0xFFFFFFF0 (в рамках 32-битных чисел).

Возвращаемый результат устанавливается в 0 обычной инструкцией MOV, а не XOR. MOV просто загружает значение в регистр. Её название не очень удачное (данные не перемещаются, а копируются). В других архитектурах подобная инструкция обычно носит название «LOAD» или «STORE» или что-то в этом роде.

Коррекция (патчинг) строки (Win32)

Мы можем легко найти строку “hello, world” в исполняемом файле при помощи Hiew:

²²Кстати, для уменьшения генерации «лишних» макросов, можно использовать такой ключ GCC: *-fno-asynchronous-unwind-tables*

²³Кстати, в некоторых стандартных функциях библиотеки Си (например, *memcpy()*, *strcpy()*) также применяется расстановка аргументов как в синтаксисе Intel: вначале указатель в памяти на блок назначения, затем указатель на блок-источник.

1.5. HELLO, WORLD!

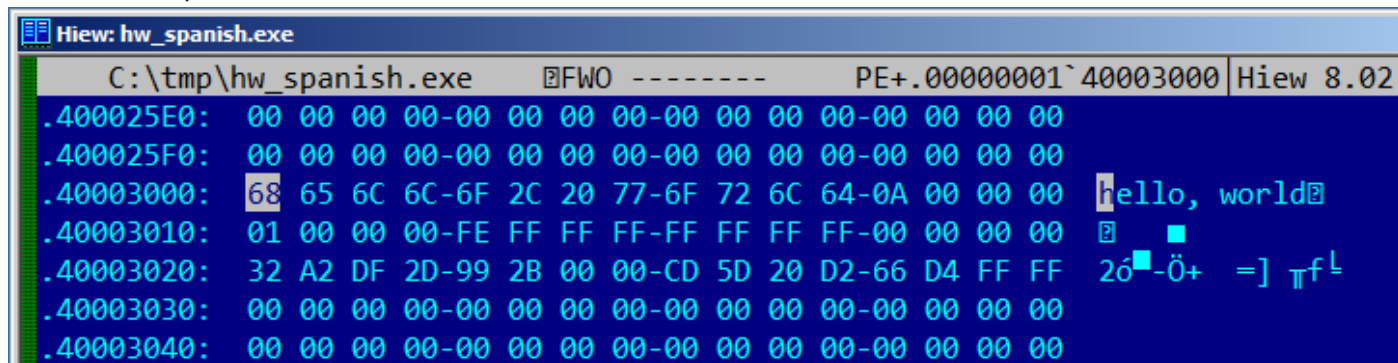


Рис. 1.1: Hiew

Можем перевести наше сообщение на испанский язык:

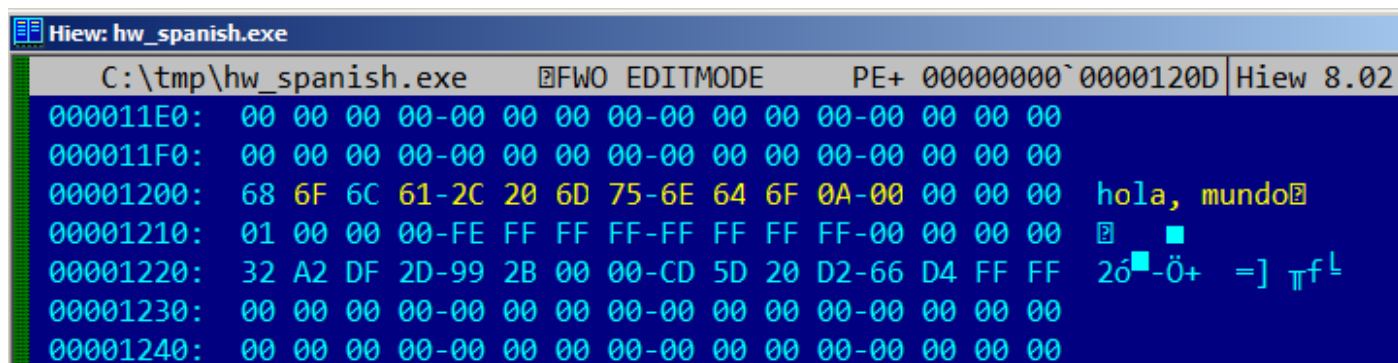


Рис. 1.2: Hiew

Испанский текст на 1 байт короче английского, так что добавляем в конце байт 0x0A (\n) и нулевой байт.

Работает.

Что если мы хотим вставить более длинное сообщение? После оригинального текста на английском есть какие-то нулевые байты. Трудно сказать, можно ли их перезаписывать: они могут где-то использоваться в [CRT](#)-коде, а может и нет. Так или иначе, вы можете их перезаписывать, только если вы действительно знаете, что делаете.

Коррекция строки (Linux x64)

Попробуем пропатчить исполняемый файл для Linux x64 используя rada.re:

Листинг 1.20: Сессия в rada.re

```
dennis@bigbox ~/tmp % gcc hw.c

dennis@bigbox ~/tmp % radare2 a.out
-- SHALL WE PLAY A GAME?
[0x00400430]> / hello
Searching 5 bytes from 0x00400000 to 0x00601040: 68 65 6c 6c 6f
Searching 5 bytes in [0x400000-0x601040]
hits: 1
0x004005c4 hit0_0 .HHhello, world;0.

[0x00400430]> s 0x004005c4

[0x004005c4]> px
- offset - 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 A B C D E F 0123456789ABCDEF
0x004005c4 6865 6c6c 6f2c 2077 6f72 6c64 0000 0000 hello, world....
0x004005d4 011b 033b 3000 0000 0500 0000 1cfe ffff ...;0.....
0x004005e4 7c00 0000 5cfe ffff 4c00 0000 52ff ffff |...\...L...R...
```

1.5. HELLO, WORLD!

```
0x004005f4 a400 0000 6cff ffff c400 0000 dcff ffff ....l.....
0x00400604 0c01 0000 1400 0000 0000 0000 017a 5200 .....zR.
0x00400614 0178 1001 1b0c 0708 9001 0710 1400 0000 .x.....
0x00400624 1c00 0000 08fe ffff 2a00 0000 0000 0000 .....*.
0x00400634 0000 0000 1400 0000 0000 0000 017a 5200 .....zR.
0x00400644 0178 1001 1b0c 0708 9001 0000 2400 0000 .x.....$.
0x00400654 1c00 0000 98fd ffff 3000 0000 000e 1046 .....0.....F
0x00400664 0e18 4a0f 0b77 0880 003f 1a3b 2a33 2422 ..J..w...?.;*3$
0x00400674 0000 0000 1c00 0000 4400 0000 a6fe ffff .....D.....
0x00400684 1500 0000 0041 0e10 8602 430d 0650 0c07 .....A....C..P..
0x00400694 0800 0000 4400 0000 6400 0000 a0fe ffff ....D...d.....
0x004006a4 6500 0000 0042 0e10 8f02 420e 188e 0345 e....B....B....E
0x004006b4 0e20 8d04 420e 288c 0548 0e30 8606 480e . . .B.(. .H.0..H.
```

```
[0x004005c4]> oo+
File a.out reopened in read-write mode
```

```
[0x004005c4]> w hola, mundo\x00
```

```
[0x004005c4]> q
```

```
dennis@bigbox ~/tmp % ./a.out
hola, mundo
```

Что я здесь делаю: ищу строку «hello» используя команду `/`, я затем я выставляю *курсор* (*seek* в терминах `rada.re`) на этот адрес. Потом я хочу удостовериться, что это действительно нужное место: `rx` выводит байты по этому адресу. `oo+` переключает `rada.re` в режим *чтения-записи*. `w` записывает ASCII-строку на месте курсора (*seek*). Нужно отметить `\00` в конце — это нулевой байт. `q` заканчивает работу.

Локализация ПО во времена MS-DOS

Описанный способ был очень распространен для перевода ПО под MS-DOS на русский язык в 1980-е и 1990-е. Русские слова и предложения обычно немного длиннее английских, так что *локализованное* ПО содержало массу странных акронимов и труднопонятных сокращений.

Вероятно, так было и с другими языками в других странах.

1.5.2. x86-64

MSVC: x86-64

Попробуем также 64-битный MSVC:

Листинг 1.21: MSVC 2012 x64

```
$SG2989 DB      'hello, world', 0AH, 00H

main PROC
    sub     rsp, 40
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2989
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 40
    ret     0
main ENDP
```

В x86-64 все регистры были расширены до 64-х бит и теперь имеют префикс R-. Чтобы поменьше задействовать стек (иными словами, поменьше обращаться к кэшу и внешней памяти), уже давно имелся довольно популярный метод передачи аргументов функции через регистры (*fastcall*) [6.1.3](#) (стр. [714](#)). Т.е. часть аргументов функции передается через регистры и часть — через стек. В Win64 первые 4 аргумента функции передаются через регистры RCX, RDX, R8, R9. Это мы здесь и видим: указатель на строку в `printf()` теперь передается не через стек, а через регистр RCX. Указатели теперь 64-битные, так что они передаются через 64-битные части регистров (имеющие префикс R-). Но для обратной совместимости можно обращаться и к нижним 32 битам регистров используя префикс E-. Вот как выглядит регистр RAX/EAX/AX/AL в x86-64:

1.5. HELLO, WORLD!

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RAX ^{x64}							
				EAX			
						AX	
						AH	AL

Функция `main()` возвращает значение типа `int`, который в Си/Си++, надо полагать, для лучшей совместимости и переносимости, оставили 32-битным. Вот почему в конце функции `main()` обнуляется не RAX, а EAX, т.е. 32-битная часть регистра. Также видно, что 40 байт выделяются в локальном стеке. Это «shadow space» которое мы будем рассматривать позже: [1.10.2](#) (стр. 101).

GCC: x86-64

Попробуем GCC в 64-битном Linux:

Листинг 1.22: GCC 4.4.6 x64

```
.string "hello, world\n"
main:
    sub    rsp, 8
    mov    edi, OFFSET FLAT:.LC0 ; "hello, world\n"
    xor    eax, eax ; количество переданных векторных регистров
    call   printf
    xor    eax, eax
    add    rsp, 8
    ret
```

В Linux, *BSD и Mac OS X для x86-64 также принят способ передачи аргументов функции через регистры [Michael Matz, Jan Hubicka, Andreas Jaeger, Mark Mitchell, *System V Application Binary Interface. AMD64 Architecture Processor Supplement*, (2013)] ²⁴.

6 первых аргументов передаются через регистры RDI, RSI, RDX, RCX, R8, R9, а остальные — через стек.

Так что указатель на строку передается через EDI (32-битную часть регистра). Но почему не через 64-битную часть, RDI?

Важно запомнить, что в 64-битном режиме все инструкции MOV, записывающие что-либо в младшую 32-битную часть регистра, обнуляют старшие 32-бита (это можно найти в документации от Intel: [11.1.4](#) (стр. 988)). То есть, инструкция MOV EAX, 011223344h корректно запишет это значение в RAX, старшие биты сбросятся в ноль.

Если посмотреть в IDA скомпилированный объектный файл (.o), увидим также опкоды всех инструкций ²⁵:

Листинг 1.23: GCC 4.4.6 x64

```
.text:00000000004004D0      main  proc near
.text:00000000004004D0  48 83 EC 08      sub    rsp, 8
.text:00000000004004D4  BF E8 05 40 00  mov    edi, offset format ; "hello, world\n"
.text:00000000004004D9  31 C0           xor    eax, eax
.text:00000000004004DB  E8 D8 FE FF FF  call   _printf
.text:00000000004004E0  31 C0           xor    eax, eax
.text:00000000004004E2  48 83 C4 08      add    rsp, 8
.text:00000000004004E6      retn
.text:00000000004004E6      main  endp
```

Как видно, инструкция, записывающая в EDI по адресу 0x4004D4, занимает 5 байт. Та же инструкция, записывающая 64-битное значение в RDI, занимает 7 байт. Возможно, GCC решил немного сэкономить. К тому же, вероятно, он уверен, что сегмент данных, где хранится строка, никогда не будет расположен в адресах выше 4GiB.

Здесь мы также видим обнуление регистра EAX перед вызовом `printf()`. Это делается потому что по упомянутому выше стандарту передачи аргументов в *NIX для x86-64 в EAX передается количество задействованных векторных регистров.

²⁴Также доступно здесь: <https://software.intel.com/sites/default/files/article/402129/mpx-linux64-abi.pdf>

²⁵Это нужно задать в **Options** → **Disassembly** → **Number of opcode bytes**

Коррекция (патчинг) адреса (Win64)

[illegible]

Рис. 1.3: Hiew

В качестве эксперимента, мы можем **инкрементировать** адрес на 1:

1.5. HELLO, WORLD!

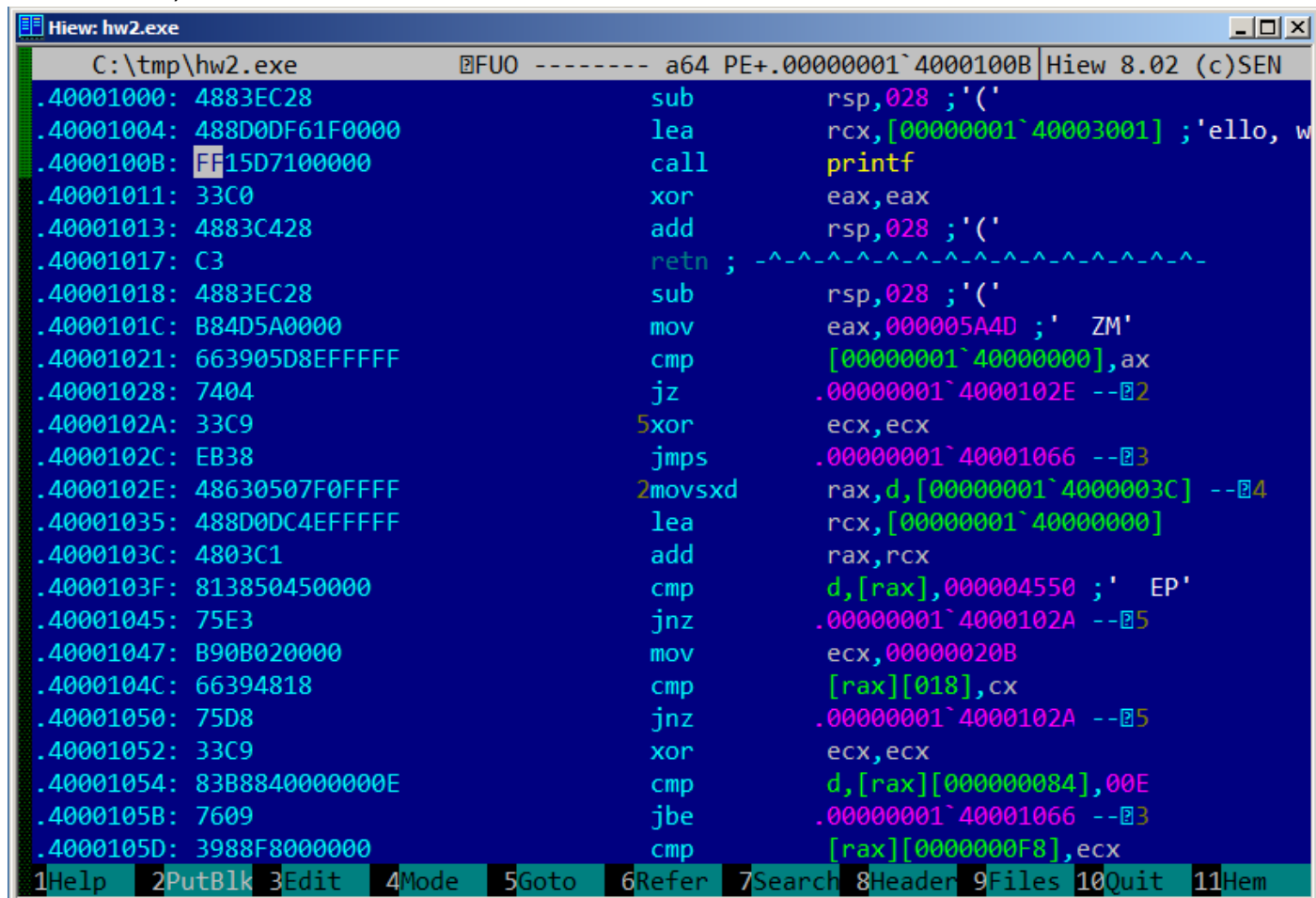


Рис. 1.4: Hiew

Hiew показывает строку «ello, world». И когда мы запускаем исполняемый файл, именно эта строка и выводится.

Выбор другой строки из исполняемого файла (Linux x64)

Исполняемый файл, если скомпилировать используя GCC 5.4.0 на Linux x64, имеет множество других строк: в основном, это имена импортированных ф-ций и имена библиотек.

Запускаю objdump, чтобы посмотреть содержимое всех секций скомпилированного файла:

```
% objdump -s a.out

a.out:      file format elf64-x86-64

Contents of section .interp:
400238 2f6c6962 36342f6c 642d6c69 6e75782d /lib64/ld-linux-
400248 7838362d 36342e73 6f2e3200 x86-64.so.2.
Contents of section .note.ABI-tag:
400254 04000000 10000000 01000000 474e5500 .....GNU.
400264 00000000 02000000 06000000 20000000 .....
Contents of section .note.gnu.build-id:
400274 04000000 14000000 03000000 474e5500 .....GNU.
400284 fe461178 5bb710b4 bbf2aca8 5ec1ec10 .F.x[.....^...
400294 cf3f7ae4      .?z.
...
```

Не проблема передать адрес текстовой строки «/lib64/ld-linux-x86-64.so.2» в вызов printf():

```
#include <stdio.h>
```

1.5. HELLO, WORLD!

```
int main()
{
    printf(0x400238);
    return 0;
}
```

Трудно поверить, но этот код печатает вышеуказанную строку.

Измените адрес на 0x400260, и напечатается строка «GNU». Адрес точен для конкретной версии GCC, GNU toolset, итд. На вашей системе, исполняемый файл может быть немного другой, и все адреса тоже будут другими. Также, добавление/удаление кода из исходных кодов, скорее всего, сдвинет все адреса вперед или назад.

1.5.3. GCC — ещё кое-что

Тот факт, что *анонимная* Си-строка имеет тип *const* (1.5.1 (стр. 9)), и тот факт, что выделенные в сегменте констант Си-строки гарантировано неизменяемые (*immutable*), ведет к интересному следствию: компилятор может использовать определенную часть строки.

Вот простой пример:

```
#include <stdio.h>

int f1()
{
    printf ("world\n");
}

int f2()
{
    printf ("hello world\n");
}

int main()
{
    f1();
    f2();
}
```

Среднестатистический компилятор с Си/Си++ (включая MSVC) выделит место для двух строк, но вот что делает GCC 4.8.1:

Листинг 1.24: GCC 4.8.1 + листинг в IDA

```
f1      proc near
s       = dword ptr -1Ch

        sub     esp, 1Ch
        mov     [esp+1Ch+s], offset s ; "world\n"
        call    _puts
        add     esp, 1Ch
        retn
f1      endp

f2      proc near
s       = dword ptr -1Ch

        sub     esp, 1Ch
        mov     [esp+1Ch+s], offset aHello ; "hello "
        call    _puts
        add     esp, 1Ch
        retn
f2      endp

aHello  db 'hello '
s       db 'world',0xa,0
```

1.5. HELLO, WORLD!

Действительно, когда мы выводим строку «hello world», эти два слова расположены в памяти вплотную друг к другу и `puts()`, вызываясь из функции `f2()`, вообще не знает, что эти строки разделены. Они и не разделены на самом деле, они разделены только «виртуально», в нашем листинге.

Когда `puts()` вызывается из `f1()`, он использует строку «world» плюс нулевой байт. `puts()` не знает, что там ещё есть какая-то строка перед этой!

Этот трюк часто используется (по крайней мере в GCC) и может сэкономить немного памяти. Это близко к *string interning*.

Еще один связанный с этим пример находится здесь: [3.2](#) (стр. 460).

1.5.4. ARM

Для экспериментов с процессором ARM было использовано несколько компиляторов:

- Популярный в embedded-среде Keil Release 6/2013.
- Apple Xcode 4.6.3 с компилятором LLVM-GCC 4.2 ²⁶.
- GCC 4.9 (Linaro) (для ARM64), доступный в виде исполняемого файла для win32 на <http://go.yurichev.com/17325>.

Везде в этой книге, если не указано иное, идет речь о 32-битном ARM (включая режимы Thumb и Thumb-2). Когда речь идет о 64-битном ARM, он называется здесь ARM64.

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Для начала скомпилируем наш пример в Keil:

```
armcc.exe --arm --c90 -O0 1.c
```

Компилятор *armcc* генерирует листинг на ассемблере в формате Intel. Этот листинг содержит некоторые высокоуровневые макросы, связанные с ARM ²⁷, а нам важнее увидеть инструкции «как есть», так что посмотрим скомпилированный результат в IDA.

Листинг 1.25: Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM) IDA

```
.text:00000000      main
.text:00000000 10 40 2D E9      STMFD     SP!, {R4,LR}
.text:00000004 1E 0E 8F E2      ADR      R0, aHelloWorld ; "hello, world"
.text:00000008 15 19 00 EB      BL      __2printf
.text:0000000C 00 00 A0 E3      MOV     R0, #0
.text:00000010 10 80 BD E8      LDMFD     SP!, {R4,PC}

.text:000001EC 68 65 6C 6C+aHelloWorld DCB "hello, world",0 ; DATA XREF: main+4
```

В вышеприведённом примере можно легко увидеть, что каждая инструкция имеет размер 4 байта. Действительно, ведь мы же компилировали наш код для режима ARM, а не Thumb.

Самая первая инструкция, `STMFD SP!, {R4,LR}`²⁸, работает как инструкция `PUSH` в x86, записывая значения двух регистров (R4 и LR) в стек. Действительно, в выдаваемом листинге на ассемблере компилятор *armcc* для упрощения указывает здесь инструкцию `PUSH {r4,lr}`. Но это не совсем точно, инструкция `PUSH` доступна только в режиме Thumb, поэтому, во избежание путаницы, я предложил работать в IDA.

Итак, эта инструкция уменьшает `SP`³⁰, чтобы он указывал на место в стеке, свободное для записи новых значений, затем записывает значения регистров R4 и LR по адресу в памяти, на который указывает измененный регистр SP.

Эта инструкция, как и инструкция `PUSH` в режиме Thumb, может сохранить в стеке одновременно несколько значений регистров, что может быть очень удобно. Кстати, такого в x86 нет. Также следует заметить, что `STMFD` — генерализация инструкции `PUSH` (то есть расширяет её возможности),

²⁶Это действительно так: Apple Xcode 4.6.3 использует open-сорсный GCC как компилятор переднего плана и кодогенератор LLVM

²⁷например, он показывает инструкции `PUSH/POP`, отсутствующие в режиме ARM

²⁸`STMFD`²⁹

³⁰`stack pointer`. SP/ESP/RSP в x86/x64. SP в ARM.

1.5. HELLO, WORLD!

потому что может работать с любым регистром, а не только с [SP](#). Другими словами, STMFD можно использовать для записи набора регистров в указанном месте памяти.

Инструкция ADR R0, aHelloWorld прибавляет или отнимает значение регистра [PC](#)³¹ к смещению, где хранится строка hello, world. Причем здесь [PC](#), можно спросить? Притом, что это так называемый «адресно-независимый код»³². Он предназначен для исполнения будучи не привязанным к каким-либо адресам в памяти. Другими словами, это относительная от [PC](#) адресация. В опкоде инструкции ADR указывается разница между адресом этой инструкции и местом, где хранится строка. Эта разница всегда будет постоянной, вне зависимости от того, куда был загружен [OC](#) наш код. Поэтому всё, что нужно — это прибавить адрес текущей инструкции (из [PC](#)), чтобы получить текущий абсолютный адрес нашей Си-строки.

Инструкция BL __2printf³³ вызывает функцию printf(). Работа этой инструкции состоит из двух фаз:

- записать адрес после инструкции BL (0xC) в регистр [LR](#);
- передать управление в printf(), записав адрес этой функции в регистр [PC](#).

Ведь когда функция printf() закончит работу, нужно знать, куда вернуть управление, поэтому закончив работу, всякая функция передает управление по адресу, записанному в регистре [LR](#).

В этом разница между «чистыми» [RISC](#)-процессорами вроде ARM и [CISC](#)³⁴-процессорами как x86, где адрес возврата обычно записывается в стек ([1.7](#) (стр. 30)).

Кстати, 32-битный абсолютный адрес (либо смещение) невозможно закодировать в 32-битной инструкции BL, в ней есть место только для 24-х бит. Поскольку все инструкции в режиме ARM имеют длину 4 байта (32 бита) и инструкции могут находиться только по адресам кратным 4, то последние 2 бита (всегда нулевых) можно не кодировать. В итоге имеем 26 бит, при помощи которых можно закодировать $current_PC \pm \approx 32M$.

Следующая инструкция MOV R0, #0³⁵ просто записывает 0 в регистр R0. Ведь наша Си-функция возвращает 0, а возвращаемое значение всякая функция оставляет в R0.

Последняя инструкция LDMFD SP!, R4, PC³⁶. Она загружает из стека (или любого другого места в памяти) значения для сохранения их в R4 и [PC](#), увеличивая [указатель стека SP](#). Здесь она работает как аналог POP.

N.B. Самая первая инструкция STMFD сохранила в стеке R4 и [LR](#), а *восстанавливаются* во время исполнения LDMFD регистры R4 и [PC](#).

Как мы уже знаем, в регистре [LR](#) обычно сохраняется адрес места, куда нужно всякой функции вернуть управление. Самая первая инструкция сохраняет это значение в стеке, потому что наша функция main() позже будет сама пользоваться этим регистром в момент вызова printf(). А затем, в конце функции, это значение можно сразу записать прямо в [PC](#), таким образом, передав управление туда, откуда была вызвана наша функция.

Так как функция main() обычно самая главная в Си/Си++, управление будет возвращено в загрузчик [OC](#), либо куда-то в [CRT](#) или что-то в этом роде.

Всё это позволяет избавиться от инструкции BX LR в самом конце функции.

DCB — директива ассемблера, описывающая массивы байт или ASCII-строк, аналог директивы DB в x86-ассемблере.

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Скомпилируем тот же пример в Keil для режима Thumb:

```
armcc.exe --thumb --c90 -O0 1.c
```

Получим (в [IDA](#)):

Листинг 1.26: Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb) + [IDA](#)

```
.text:00000000      main
```

³¹Program Counter. IP/EIP/RIP в x86/64. PC в ARM.

³²Читайте больше об этом в соответствующем разделе ([6.4.1](#) (стр. 727))

³³Branch with Link

³⁴Complex Instruction Set Computing

³⁵Означает MOVE

³⁶LDMFD³⁷ — это инструкция, обратная STMFD

1.5. HELLO, WORLD!

```
.text:00000000 10 B5      PUSH    {R4,LR}
.text:00000002 C0 A0      ADR     R0, aHelloWorld ; "hello, world"
.text:00000004 06 F0 2E F9  BL      __2printf
.text:00000008 00 20      MOVVS   R0, #0
.text:0000000A 10 BD      POP     {R4,PC}

.text:00000304 68 65 6C 6C+aHelloWorld DCB "hello, world",0 ; DATA XREF: main+2
```

Сразу бросаются в глаза двухбайтные (16-битные) опкоды — это, как уже было отмечено, Thumb.

Кроме инструкции BL. Но на самом деле она состоит из двух 16-битных инструкций. Это потому что в одном 16-битном опкоде слишком мало места для задания смещения, по которому находится функция printf(). Так что первая 16-битная инструкция загружает старшие 10 бит смещения, а вторая — младшие 11 бит смещения.

Как уже было упомянуто, все инструкции в Thumb-режиме имеют длину 2 байта (или 16 бит). Поэтому невозможна такая ситуация, когда Thumb-инструкция начинается по нечетному адресу.

Учитывая сказанное, последний бит адреса можно не кодировать. Таким образом, в Thumb-инструкции BL можно закодировать адрес $current_PC \pm \approx 2M$.

Остальные инструкции в функции (PUSH и POP) здесь работают почти так же, как и описанные STMFD/LDMFD, только регистр SP здесь не указывается явно. ADR работает так же, как и в предыдущем примере. MOVVS записывает 0 в регистр R0 для возврата нуля.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Xcode 4.6.3 без включенной оптимизации выдает слишком много лишнего кода, поэтому включим оптимизацию компилятора (ключ -O3), потому что там меньше инструкций.

Листинг 1.27: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```
__text:000028C4      _hello_world
__text:000028C4 80 40 2D E9      STMFD    SP!, {R7,LR}
__text:000028C8 86 06 01 E3      MOV     R0, #0x1686
__text:000028CC 0D 70 A0 E1      MOV     R7, SP
__text:000028D0 00 00 40 E3      MOVLT   R0, #0
__text:000028D4 00 00 8F E0      ADD     R0, PC, R0
__text:000028D8 C3 05 00 EB      BL      _puts
__text:000028DC 00 00 A0 E3      MOV     R0, #0
__text:000028E0 80 80 BD E8      LDMFD   SP!, {R7,PC}

__cstring:00003F62 48 65 6C 6C+aHelloWorld_0 DCB "Hello world!",0
```

Инструкции STMFD и LDMFD нам уже знакомы.

Инструкция MOV просто записывает число 0x1686 в регистр R0 — это смещение, указывающее на строку «Hello world!».

Регистр R7 (по стандарту, принятому в [iOS ABI Function Call Guide, (2010)]³⁸) это frame pointer, о нем будет рассказано позже.

Инструкция MOVT R0, #0 (MOVE Top) записывает 0 в старшие 16 бит регистра. Дело в том, что обычная инструкция MOV в режиме ARM может записывать какое-либо значение только в младшие 16 бит регистра, ведь в ней нельзя закодировать больше. Помните, что в режиме ARM опкоды всех инструкций ограничены длиной в 32 бита. Конечно, это ограничение не касается перемещений данных между регистрами.

Поэтому для записи в старшие биты (с 16-го по 31-й включительно) существует дополнительная команда MOVT. Впрочем, здесь её использование избыточно, потому что инструкция MOV R0, #0x1686 выше и так обнулила старшую часть регистра. Возможно, это недочет компилятора.

Инструкция ADD R0, PC, R0 прибавляет PC к R0 для вычисления действительного адреса строки «Hello world!». Как нам уже известно, это «адресно-независимый код», поэтому такая корректура необходима.

Инструкция BL вызывает puts() вместо printf().

³⁸Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17276>

1.5. HELLO, WORLD!

Компилятор заменил вызов `printf()` на `puts()`. Действительно, `printf()` с одним аргументом это почти аналог `puts()`.

Почти, если принять условие, что в строке не будет управляющих символов `printf()`, начинающихся со знака процента. Тогда эффект от работы этих двух функций будет разным ³⁹.

Зачем компилятор заменил один вызов на другой? Наверное потому что `puts()` работает быстрее ⁴⁰. Видимо потому что `puts()` проталкивает символы в `stdout` не сравнивая каждый со знаком процента.

Далее уже знакомая инструкция `MOV R0, #0`, служащая для установки в 0 возвращаемого значения функции.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

По умолчанию Xcode 4.6.3 генерирует код для режима Thumb-2 примерно в такой манере:

Листинг 1.28: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```
__text:00002B6C                __hello_world
__text:00002B6C 80 B5          PUSH      {R7,LR}
__text:00002B6E 41 F2 D8 30    MOVW      R0, #0x13D8
__text:00002B72 6F 46          MOV       R7, SP
__text:00002B74 C0 F2 00 00    MOVT.W   R0, #0
__text:00002B78 78 44          ADD      R0, PC
__text:00002B7A 01 F0 38 EA    BLX      __puts
__text:00002B7E 00 20          MOVS     R0, #0
__text:00002B80 80 BD          POP      {R7,PC}

...

__cstring:00003E70 48 65 6C 6C 6F 20+aHelloWorld DCB "Hello world!",0xA,0
```

Инструкции `BL` и `BLX` в Thumb, как мы помним, кодируются как пара 16-битных инструкций, а в Thumb-2 эти суррогатные опкоды расширены так, что новые инструкции кодируются здесь как 32-битные инструкции. Это можно заметить по тому что опкоды Thumb-2 инструкций всегда начинаются с `0xFx` либо с `0xEh`. Но в листинге IDA байты опкода переставлены местами. Это из-за того, что в процессоре ARM инструкции кодируются так: в начале последний байт, потом первый (для Thumb и Thumb-2 режима), либо, (для инструкций в режиме ARM) в начале четвертый байт, затем третий, второй и первый (т.е. другой *endianness*).

Вот так байты следуют в листингах IDA:

- для режимов ARM и ARM64: 4-3-2-1;
- для режима Thumb: 2-1;
- для пары 16-битных инструкций в режиме Thumb-2: 2-1-4-3.

Так что мы видим здесь что инструкции `MOVW`, `MOVT.W` и `BLX` начинаются с `0xFx`.

Одна из Thumb-2 инструкций это `MOVW R0, #0x13D8` — она записывает 16-битное число в младшую часть регистра `R0`, очищая старшие биты.

Ещё `MOVT.W R0, #0` — эта инструкция работает так же, как и `MOVT` из предыдущего примера, но она работает в Thumb-2.

Помимо прочих отличий, здесь используется инструкция `BLX` вместо `BL`. Отличие в том, что помимо сохранения адреса возврата в регистре `LR` и передаче управления в функцию `puts()`, происходит смена режима процессора с Thumb/Thumb-2 на режим ARM (либо назад). Здесь это нужно потому, что инструкция, куда ведет переход, выглядит так (она закодирована в режиме ARM):

```
__symbolstub1:00003FEC __puts      ; CODE XREF: __hello_world+E
__symbolstub1:00003FEC 44 F0 9F E5    LDR PC,=__imp__puts
```

Это просто переход на место, где записан адрес `puts()` в секции импортов. Итак, внимательный читатель может задать справедливый вопрос: почему бы не вызывать `puts()` сразу в том же месте кода, где он нужен? Но это не очень выгодно из-за экономии места и вот почему.

³⁹Также нужно заметить, что `puts()` не требует символа перевода строки `'\n'` в конце строки, поэтому его здесь нет.

⁴⁰ciselant.de/projects/gcc_printf/gcc_printf.html

1.5. HELLO, WORLD!

Практически любая программа использует внешние динамические библиотеки (будь то DLL в Windows, .so в *NIX либо .dylib в Mac OS X). В динамических библиотеках находятся часто используемые библиотечные функции, в том числе стандартная функция Си `puts()`.

В исполняемом бинарном файле (Windows PE .exe, ELF либо Mach-O) имеется секция импортов, список символов (функций либо глобальных переменных) импортируемых из внешних модулей, а также названия самих модулей. Загрузчик ОС загружает необходимые модули и, перебирая импортируемые символы в основном модуле, предоставляет правильные адреса каждого символа. В нашем случае, `__imp_puts` это 32-битная переменная, куда загрузчик ОС запишет правильный адрес этой же функции во внешней библиотеке. Так что инструкция LDR просто берет 32-битное значение из этой переменной, и, записывая его в регистр PC, просто передает туда управление. Чтобы уменьшить время работы загрузчика ОС, нужно чтобы ему пришлось записать адрес каждого символа только один раз, в соответствующее, выделенное для них, место.

К тому же, как мы уже убедились, нельзя одной инструкцией загрузить в регистр 32-битное число без обращений к памяти. Так что наиболее оптимально выделить отдельную функцию, работающую в режиме ARM, чья единственная цель — передавать управление дальше, в динамическую библиотеку. И затем ссылаться на эту короткую функцию из одной инструкции (так называемую **thunk-функцию**) из Thumb-кода.

Кстати, в предыдущем примере (скомпилированном для режима ARM), переход при помощи инструкции BL ведет на такую же **thunk-функцию**, однако режим процессора не переключается (отсюда отсутствие «X» в мнемонике инструкции).

Еще о thunk-функциях

Thunk-функции трудновато понять, скорее всего, из-за путаницы в терминах. Проще всего представлять их как адаптеры-переходники из одного типа разъемов в другой. Например, адаптер, позволяющий вставить в американскую розетку британскую вилку, или наоборот. Thunk-функции также иногда называются *wrapper-ами*. *Wrap* в английском языке это *обертывать, завертывать*. Вот еще несколько описаний этих функций:

“A piece of coding which provides an address:”, according to P. Z. Ingerman, who invented thunks in 1961 as a way of binding actual parameters to their formal definitions in Algol-60 procedure calls. If a procedure is called with an expression in the place of a formal parameter, the compiler generates a thunk which computes the expression and leaves the address of the result in some standard location.

...
Microsoft and IBM have both defined, in their Intel-based systems, a “16-bit environment” (with bletcherous segment registers and 64K address limits) and a “32-bit environment” (with flat addressing and semi-real memory management). The two environments can both be running on the same computer and OS (thanks to what is called, in the Microsoft world, WOW which stands for Windows On Windows). MS and IBM have both decided that the process of getting from 16- to 32-bit and vice versa is called a “thunk”; for Windows 95, there is even a tool, THUNK.EXE, called a “thunk compiler”.

([The Jargon File](#))

Еще один пример мы можем найти в библиотеке LAPACK — (“Linear Algebra PACKage”) написанная на FORTRAN. Разработчики на Си/Си++ также хотят использовать LAPACK, но переписывать её на Си/Си++, а затем поддерживать несколько версий, это безумие. Так что имеются короткие функции на Си вызываемые из Си/Си++-среды, которые, в свою очередь, вызывают функции на FORTRAN, и почти ничего больше не делают:

```
double Blas_Dot_Prod(const LaVectorDouble &dx, const LaVectorDouble &dy)
{
    assert(dx.size()==dy.size());
    integer n = dx.size();
    integer incx = dx.inc(), incy = dy.inc();

    return F77NAME(ddot)(&n, &dx(0), &incx, &dy(0), &incy);
}
```

Такие ф-ции еще называют “wrappers” (т.е., “обертка”).

Компилируем пример в GCC 4.8.1 для ARM64:

Листинг 1.29: Неоптимизирующий GCC 4.8.1 + objdump

```

1 0000000000400590 <main>:
2   400590:    a9bf7bfd      stp     x29, x30, [sp,#-16]!
3   400594:    910003fd      mov     x29, sp
4   400598:    90000000      adrp    x0, 400000 <_init-0x3b8>
5   40059c:    91192000      add     x0, x0, #0x648
6   4005a0:    97ffffa0      bl      400420 <puts@plt>
7   4005a4:    52800000      mov     w0, #0x0                                // #0
8   4005a8:    a8c17bfd      ldp     x29, x30, [sp],#16
9   4005ac:    d65f03c0      ret
10
11 ...
12
13 Contents of section .rodata:
14 400640 01000200 00000000 48656c6c 6f210a00 .....Hello!..

```

В ARM64 нет режима Thumb и Thumb-2, только ARM, так что тут только 32-битные инструкции.

Регистров тут в 2 раза больше: [2.4](#) (стр. [1016](#)). 64-битные регистры теперь имеют префикс X-, а их 32-битные части — W-.

Инструкция STP (*Store Pair*) сохраняет в стеке сразу два регистра: X29 и X30. Конечно, эта инструкция может сохранять эту пару где угодно в памяти, но здесь указан регистр SP, так что пара сохраняется именно в стеке.

Регистры в ARM64 64-битные, каждый имеет длину в 8 байт, так что для хранения двух регистров нужно именно 16 байт.

Восклицательный знак (“!”) после операнда означает, что сначала от SP будет отнято 16 и только затем значения из пары регистров будут записаны в стек.

Это называется *pre-index*. Больше о разнице между *post-index* и *pre-index* описано здесь: [1.31.2](#) (стр. [430](#)).

Таким образом, в терминах более знакомого всем процессора x86, первая инструкция — это просто аналог пары инструкций PUSH X29 и PUSH X30. X29 в ARM64 используется как FP⁴¹, а X30 как LR, поэтому они сохраняются в прологе функции и восстанавливаются в эпилоге.

Вторая инструкция копирует SP в X29 (или FP). Это нужно для установки стекового фрейма функции.

Инструкции ADRP и ADD нужны для формирования адреса строки «Hello!» в регистре X0, ведь первый аргумент функции передается через этот регистр. Но в ARM нет инструкций, при помощи которых можно записать в регистр длинное число (потому что сама длина инструкции ограничена 4-я байтами. Больше об этом здесь: [1.31.3](#) (стр. [431](#))). Так что нужно использовать несколько инструкций. Первая инструкция (ADRP) записывает в X0 адрес 4-килобайтной страницы где находится строка, а вторая (ADD) просто прибавляет к этому адресу остаток. Читайте больше об этом: [1.31.4](#) (стр. [433](#)).

$0x400000 + 0x648 = 0x400648$, и мы видим, что в секции данных .rodata по этому адресу как раз находится наша Си-строка «Hello!».

Затем при помощи инструкции BL вызывается puts(). Это уже рассматривалось ранее: [1.5.4](#) (стр. [21](#)).

Инструкция MOV записывает 0 в W0. W0 это младшие 32 бита 64-битного регистра X0:

Старшие 32 бита	младшие 32 бита
X0	
	W0

А результат функции возвращается через X0, и main() возвращает 0, так что вот так готовится возвращаемый результат.

Почему именно 32-битная часть? Потому что в ARM64, как и в x86-64, тип *int* оставили 32-битным, для лучшей совместимости.

⁴¹Frame Pointer

1.5. HELLO, WORLD!

Следовательно, раз уж функция возвращает 32-битный *int*, то нужно заполнить только 32 младших бита регистра X0.

Для того, чтобы удостовериться в этом, немного отредактируем этот пример и перекомпилируем его.

Теперь `main()` возвращает 64-битное значение:

Листинг 1.30: `main()` возвращающая значение типа `uint64_t`

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint64_t main()
{
    printf ("Hello!\n");
    return 0;
}
```

Результат точно такой же, только MOV в той строке теперь выглядит так:

Листинг 1.31: Неоптимизирующий GCC 4.8.1 + objdump

4005a4:	d2800000	mov	x0, #0x0	// #0
---------	----------	-----	----------	-------

Далее при помощи инструкции LDP (*Load Pair*) восстанавливаются регистры X29 и X30.

Восклицательного знака после инструкции нет. Это означает, что сначала значения достаются из стека, и только потом SP увеличивается на 16.

Это называется *post-index*.

В ARM64 есть новая инструкция: RET. Она работает так же как и BX LR, но там добавлен специальный бит, подсказывающий процессору, что это именно выход из функции, а не просто переход, чтобы процессор мог более оптимально исполнять эту инструкцию.

Из-за простоты этой функции оптимизирующий GCC генерирует точно такой же код.

1.5.5. MIPS

О «глобальном указателе» («global pointer»)

«Глобальный указатель» («global pointer») — это важная концепция в MIPS. Как мы уже возможно знаем, каждая инструкция в MIPS имеет размер 32 бита, поэтому невозможно закодировать 32-битный адрес внутри одной инструкции. Вместо этого нужно использовать пару инструкций (как это сделал GCC для загрузки адреса текстовой строки в нашем примере). С другой стороны, используя только одну инструкцию, возможно загружать данные по адресам в пределах *register – 32768...register + 32767*, потому что 16 бит знакового смещения можно закодировать в одной инструкции). Так мы можем выделить какой-то регистр для этих целей и ещё выделить буфер в 64KiB для самых часто используемых данных. Выделенный регистр называется «глобальный указатель» («global pointer») и он указывает на середину области 64KiB. Эта область обычно содержит глобальные переменные и адреса импортированных функций вроде `printf()`, потому что разработчики GCC решили, что получение адреса функции должно быть как можно более быстрой операцией, исполняющейся за одну инструкцию вместо двух. В ELF-файле эта 64KiB-область находится частично в секции `.sbss` («small BSS⁴²») для неинициализированных данных и в секции `.sdata` («small data») для инициализированных данных. Это значит что программист может выбирать, к чему нужен как можно более быстрый доступ, и затем расположить это в секциях `.sdata/.sbss`. Некоторые программисты «старой школы» могут вспомнить модель памяти в MS-DOS 10.6 (стр. 978) или в менеджерах памяти вроде XMS/EMS, где вся память делилась на блоки по 64KiB.

Эта концепция применяется не только в MIPS. По крайней мере PowerPC также использует эту технику.

⁴²Block Started by Symbol

Рассмотрим следующий пример, иллюстрирующий концепцию «глобального указателя».

Листинг 1.32: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```

1 $LC0:
2 ; \000 это ноль в восьмеричной системе:
3 .ascii "Hello, world!\012\000"
4 main:
5 ; пролог функции
6 ; установить GP:
7     lui     $28,%hi(__gnu_local_gp)
8     addiu   $sp,$sp,-32
9     addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
10 ; сохранить RA в локальном стеке:
11     sw      $31,28($sp)
12 ; загрузить адрес функции puts() из GP в $25:
13     lw      $25,%call16(puts)($28)
14 ; загрузить адрес текстовой строки в $4 ($a0):
15     lui     $4,%hi($LC0)
16 ; перейти на puts(), сохранив адрес возврата в link-регистре:
17     jalr    $25
18     addiu   $4,$4,%lo($LC0) ; branch delay slot
19 ; восстановить RA:
20     lw      $31,28($sp)
21 ; скопировать 0 из $zero в $v0:
22     move    $2,$0
23 ; вернуть управление сделав переход по адресу в RA:
24     j       $31
25 ; эпилог функции:
26     addiu   $sp,$sp,32 ; branch delay slot + освободить стек от локальных переменных

```

Как видно, регистр \$GP в прологе функции выставляется в середину этой области. Регистр [RA](#) сохраняется в локальном стеке. Здесь также используется puts() вместо printf(). Адрес функции puts() загружается в \$25 инструкцией LW («Load Word»). Затем адрес текстовой строки загружается в \$4 парой инструкций LUI («Load Upper Immediate») и ADDIU («Add Immediate Unsigned Word»). LUI устанавливает старшие 16 бит регистра (поэтому в имени инструкции присутствует «upper») и ADDIU прибавляет младшие 16 бит к адресу. ADDIU следует за JALR (помните о *branch delay slots*?). Регистр \$4 также называется \$A0, который используется для передачи первого аргумента функции ⁴³. JALR («Jump and Link Register») делает переход по адресу в регистре \$25 (там адрес puts()) при этом сохраняя адрес следующей инструкции (LW) в [RA](#). Это так же как и в ARM. И ещё одна важная вещь: адрес сохраняемый в [RA](#) это адрес не следующей инструкции (потому что это *delay slot* и выполняется перед инструкцией перехода), а инструкции после неё (после *delay slot*). Таким образом во время исполнения JALR в [RA](#) записывается PC+8. В нашем случае это адрес инструкции LW следующей после ADDIU.

LW («Load Word») в строке 20 восстанавливает [RA](#) из локального стека (эта инструкция скорее часть эпилога функции).

MOVE в строке 22 копирует значение из регистра \$0 (\$ZERO) в \$2 (\$V0).

В MIPS есть *константный* регистр, всегда содержащий ноль. Должно быть, разработчики MIPS решили, что 0 это самая востребованная константа в программировании, так что пусть будет использоваться регистр \$0, всякий раз, когда будет нужен 0. Другой интересный факт: в MIPS нет инструкции, копирующей значения из регистра в регистр. На самом деле, MOVE DST, SRC это ADD DST, SRC, \$ZERO ($DST = SRC + 0$), которая делает тоже самое. Очевидно, разработчики MIPS хотели сделать как можно более компактную таблицу опкодов. Это не значит, что сложение происходит во время каждой инструкции MOVE. Скорее всего, эти псевдоинструкции оптимизируются в [CPU](#) и [АЛУ](#)⁴⁴ никогда не используется.

J в строке 24 делает переход по адресу в [RA](#), и это работает как выход из функции. ADDIU после J на самом деле выполняется перед J (помните о *branch delay slots*?) и это часть эпилога функции.

Вот листинг сгенерированный [IDA](#). Каждый регистр имеет свой псевдоним:

Листинг 1.33: Оптимизирующий GCC 4.4.5 ([IDA](#))

⁴³Таблица регистров в MIPS доступна в приложении [.3.1](#) (стр. [1017](#))

⁴⁴Арифметико-логическое устройство

1.5. HELLO, WORLD!

```
1 .text:00000000 main:
2 .text:00000000
3 .text:00000000 var_10          = -0x10
4 .text:00000000 var_4          = -4
5 .text:00000000
6 ; пролог функции
7 ; установить GP:
8 .text:00000000                lui      $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
9 .text:00000004                addiu    $sp, -0x20
10 .text:00000008               la       $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
11 ; сохранить RA в локальном стеке:
12 .text:0000000C               sw       $ra, 0x20+var_4($sp)
13 ; сохранить GP в локальном стеке:
14 ; по какой-то причине, этой инструкции не было в ассемблерном выводе в GCC:
15 .text:00000010               sw       $gp, 0x20+var_10($sp)
16 ; загрузить адрес функции puts() из GP в $t9:
17 .text:00000014               lw       $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
18 ; сформировать адрес текстовой строки в $a0:
19 .text:00000018               lui      $a0, ($LC0 >> 16) # "Hello, world!"
20 ; перейти на puts(), сохранив адрес возврата в link-регистре:
21 .text:0000001C               jalr     $t9
22 .text:00000020               la       $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "Hello, world!"
23 ; восстановить RA:
24 .text:00000024               lw       $ra, 0x20+var_4($sp)
25 ; скопировать 0 из $zero в $v0:
26 .text:00000028               move     $v0, $zero
27 ; вернуть управление сделав переход по адресу в RA:
28 .text:0000002C               jr       $ra
29 ; эпилог функции:
30 .text:00000030               addiu    $sp, 0x20
```

Инструкция в строке 15 сохраняет GP в локальном стеке. Эта инструкция мистическим образом отсутствует в листинге от GCC, может быть из-за ошибки в самом GCC⁴⁵. Значение GP должно быть сохранено, потому что всякая функция может работать со своим собственным окном данных размером 64KiB. Регистр, содержащий адрес функции puts() называется \$T9, потому что регистры с префиксом T- называются «temporaries» и их содержимое можно не сохранять.

Неоптимизирующий GCC

Неоптимизирующий GCC более многословный.

Листинг 1.34: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
1 $LC0:
2 .ascii "Hello, world!\012\000"
3 main:
4 ; пролог функции
5 ; сохранить RA ($31) и FP в стеке:
6     addiu    $sp,$sp,-32
7     sw       $31,28($sp)
8     sw       $fp,24($sp)
9 ; установить FP (указатель стекового фрейма):
10    move     $fp,$sp
11 ; установить GP:
12    lui      $28,%hi(__gnu_local_gp)
13    addiu     $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
14 ; загрузить адрес текстовой строки:
15    lui      $2,%hi($LC0)
16    addiu     $4,$2,%lo($LC0)
17 ; загрузить адрес функции puts() используя GP:
18    lw       $2,%call16(puts)($28)
19    nop
20 ; вызвать puts():
21    move     $25,$2
22    jalr     $25
23    nop ; branch delay slot
```

⁴⁵Очевидно, функция вывода листингов не так критична для пользователей GCC, поэтому там вполне могут быть неисправленные ошибки.

1.5. HELLO, WORLD!

```
24
25 ; восстановить GP из локального стека:
26     lw      $28,16($fp)
27 ; установить регистр $2 ($V0) в ноль:
28     move    $2,$0
29 ; эпилог функции.
30 ; восстановить SP:
31     move    $sp,$fp
32 ; восстановить RA:
33     lw      $31,28($sp)
34 ; восстановить FP:
35     lw      $fp,24($sp)
36     addiu   $sp,$sp,32
37 ; переход на RA:
38     j       $31
39     nop    ; branch delay slot
```

Мы видим, что регистр FP используется как указатель на фрейм стека. Мы также видим 3 **NOP**-а. Второй и третий следуют за инструкциями перехода. Видимо, компилятор GCC всегда добавляет **NOP**-ы (из-за *branch delay slots*) после инструкций переходов и затем, если включена оптимизация, от них может избавляться. Так что они остались здесь.

Вот также листинг от **IDA**:

Листинг 1.35: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (**IDA**)

```
1  .text:00000000 main:
2  .text:00000000
3  .text:00000000 var_10          = -0x10
4  .text:00000000 var_8           = -8
5  .text:00000000 var_4           = -4
6  .text:00000000
7  ; пролог функции
8  ; сохранить RA и FP в стеке:
9  .text:00000000                addiu   $sp, -0x20
10 .text:00000004                sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
11 .text:00000008                sw      $fp, 0x20+var_8($sp)
12 ; установить FP (указатель стекового фрейма):
13 .text:0000000C                move    $fp, $sp
14 ; установить GP:
15 .text:00000010                la      $gp, __gnu_local_gp
16 .text:00000018                sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
17 ; загрузить адрес текстовой строки:
18 .text:0000001C                lui     $v0, (aHelloWorld >> 16) # "Hello, world!"
19 .text:00000020                addiu   $a0, $v0, (aHelloWorld & 0xFFFF) # "Hello, world!"
20 ; загрузить адрес функции puts() используя GP:
21 .text:00000024                lw      $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
22 .text:00000028                or      $at, $zero ; NOP
23 ; вызвать puts():
24 .text:0000002C                move    $t9, $v0
25 .text:00000030                jalr    $t9
26 .text:00000034                or      $at, $zero ; NOP
27 ; восстановить GP из локального стека:
28 .text:00000038                lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
29 ; установить регистр $2 ($V0) в ноль:
30 .text:0000003C                move    $v0, $zero
31 ; эпилог функции.
32 ; восстановить SP:
33 .text:00000040                move    $sp, $fp
34 ; восстановить RA:
35 .text:00000044                lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
36 ; восстановить FP:
37 .text:00000048                lw      $fp, 0x20+var_8($sp)
38 .text:0000004C                addiu   $sp, 0x20
39 ; переход на RA:
40 .text:00000050                jr      $ra
41 .text:00000054                or      $at, $zero ; NOP
```

Интересно что **IDA** распознала пару инструкций LUI/ADDIU и собрала их в одну псевдоинструкцию LA («Load Address») в строке 15. Мы также видим, что размер этой псевдоинструкции 8 байт! Это

1.5. HELLO, WORLD!

псевдоинструкция (или *макрос*), потому что это не настоящая инструкция MIPS, а скорее просто удобное имя для пары инструкций.

Ещё кое что: **IDA** не распознала **NOP**-инструкции в строках 22, 26 и 41.

Это **OR \$AT, \$ZERO**. По своей сути это инструкция, применяющая операцию *ИЛИ* к содержимому регистра **\$AT** с нулем, что, конечно же, холостая операция. MIPS, как и многие другие **ISA**, не имеет отдельной **NOP**-инструкции.

Роль стекового фрейма в этом примере

Адрес текстовой строки передается в регистре. Так зачем устанавливать локальный стек? Причина в том, что значения регистров **RA** и **GP** должны быть сохранены где-то (потому что вызывается `printf()`) и для этого используется локальный стек.

Если бы это была **leaf function**, тогда можно было бы избавиться от пролога и эпилога функции. Например: 1.4.3 (стр. 8).

Оптимизирующий GCC: загрузим в GDB

Листинг 1.36: пример сессии в GDB

```
root@debian-mips:~# gcc hw.c -O3 -o hw

root@debian-mips:~# gdb hw
GNU gdb (GDB) 7.0.1-debian
...
Reading symbols from /root/hw...(no debugging symbols found)...done.
(gdb) b main
Breakpoint 1 at 0x400654
(gdb) run
Starting program: /root/hw

Breakpoint 1, 0x00400654 in main ()
(gdb) set step-mode on
(gdb) disas
Dump of assembler code for function main:
0x00400640 <main+0>:   lui      gp,0x42
0x00400644 <main+4>:   addiu   sp,sp,-32
0x00400648 <main+8>:   addiu   gp,gp,-30624
0x0040064c <main+12>:  sw      ra,28(sp)
0x00400650 <main+16>:  sw      gp,16(sp)
0x00400654 <main+20>:  lw      t9,-32716(gp)
0x00400658 <main+24>:  lui      a0,0x40
0x0040065c <main+28>:  jalr    t9
0x00400660 <main+32>:  addiu   a0,a0,2080
0x00400664 <main+36>:  lw      ra,28(sp)
0x00400668 <main+40>:  move    v0,zero
0x0040066c <main+44>:  jr      ra
0x00400670 <main+48>:  addiu   sp,sp,32
End of assembler dump.
(gdb) s
0x00400658 in main ()
(gdb) s
0x0040065c in main ()
(gdb) s
0x2ab2de60 in printf () from /lib/libc.so.6
(gdb) x/s $a0
0x400820:      "hello, world"
(gdb)
```

1.5.6. Вывод

Основная разница между кодом x86/ARM и x64/ARM64 в том, что указатель на строку теперь 64-битный. Действительно, ведь для того современные **CPU** и стали 64-битными, потому что подеше-

1.6. ПРОЛОГ И ЭПИЛОГ ФУНКЦИЙ

вела память, её теперь можно поставить в компьютер намного больше, и чтобы её адресовать, 32-х бит уже недостаточно. Поэтому все указатели теперь 64-битные.

1.5.7. Упражнения

- <http://challenges.re/48>
- <http://challenges.re/49>

1.6. Пролог и эпилог функций

Пролог функции это инструкции в самом начале функции. Как правило, это что-то вроде такого фрагмента кода:

```
push    ebp
mov     ebp, esp
sub     esp, X
```

Эти инструкции делают следующее: сохраняют значение регистра EBP на будущее, выставляют EBP равным ESP, затем подготавливают место в стеке для хранения локальных переменных.

EBP сохраняет свое значение на протяжении всей функции, он будет использоваться здесь для доступа к локальным переменным и аргументам. Можно было бы использовать и ESP, но он постоянно меняется и это не очень удобно.

Эпилог функции аннулирует выделенное место в стеке, восстанавливает значение EBP на старое и возвращает управление в вызывающую функцию:

```
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
```

Пролог и эпилог функции обычно находятся в дизассемблерах для отделения функций друг от друга.

1.6.1. Рекурсия

Наличие эпилога и пролога может несколько ухудшить эффективность рекурсии.

Больше о рекурсии в этой книге: [3.4.3](#) (стр. [471](#)).

1.7. Стек

Стек в компьютерных науках — это одна из наиболее фундаментальных структур данных ⁴⁶. АКА⁴⁷ LIFO⁴⁸.

Технически это просто блок памяти в памяти процесса + регистр ESP в x86 или RSP в x64, либо SP в ARM, который указывает где-то в пределах этого блока.

Часто используемые инструкции для работы со стеком — это PUSH и POP (в x86 и Thumb-режиме ARM). PUSH уменьшает ESP/RSP/SP на 4 в 32-битном режиме (или на 8 в 64-битном), затем записывает по адресу, на который указывает ESP/RSP/SP, содержимое своего единственного операнда.

POP это обратная операция — сначала достает из [указателя стека](#) значение и помещает его в операнд (который очень часто является регистром) и затем увеличивает указатель стека на 4 (или 8).

⁴⁶wikipedia.org/wiki/Call_stack

⁴⁷ - (Также известный как)

⁴⁸Last In First Out (последним вошел, первым вышел)

1.7. СТЕК

В самом начале **регистр-указатель** указывает на конец стека. Конец стека находится в начале блока памяти, выделенного под стек. Это странно, но это так. PUSH уменьшает **регистр-указатель**, а POP — увеличивает.

В процессоре ARM, тем не менее, есть поддержка стеков, растущих как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

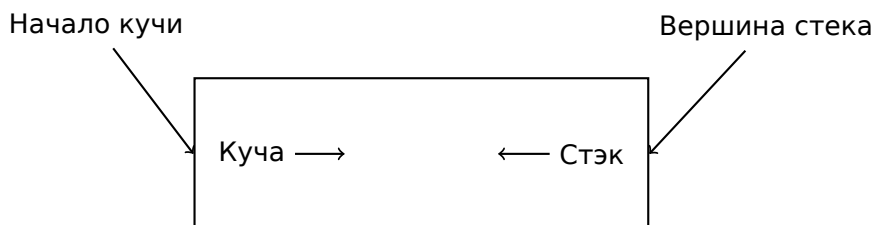
Например, инструкции **STMFD/LDMFD**, **STMED⁴⁹/LDMED⁵⁰** предназначены для descending-стека (растет назад, начиная с высоких адресов в сторону низких).

Инструкции **STMFA⁵¹/LDMFA⁵²**, **STMEA⁵³/LDMEA⁵⁴** предназначены для ascending-стека (растет вперед, начиная с низких адресов в сторону высоких).

1.7.1. Почему стек растет в обратную сторону?

Интуитивно мы можем подумать, что, как и любая другая структура данных, стек мог бы расти вперед, т.е. в сторону увеличения адресов.

Причина, почему стек растет назад, видимо, историческая. Когда компьютеры были большие и занимали целую комнату, было очень легко разделить сегмент на две части: для **кучи** и для стека. Заранее было неизвестно, насколько большой может быть **куча** или стек, так что это решение было самым простым.



В [D. M. Ritchie and K. Thompson, *The UNIX Time Sharing System*, (1974)]⁵⁵ можно прочитать:

The user-core part of an image is divided into three logical segments. The program text segment begins at location 0 in the virtual address space. During execution, this segment is write-protected and a single copy of it is shared among all processes executing the same program. At the first 8K byte boundary above the program text segment in the virtual address space begins a nonshared, writable data segment, the size of which may be extended by a system call. Starting at the highest address in the virtual address space is a stack segment, which automatically grows downward as the hardware's stack pointer fluctuates.

Это немного напоминает как некоторые студенты пишут два конспекта в одной тетрадке: первый конспект начинается обычным образом, второй пишется с конца, перевернув тетрадку. Конспекты могут встретиться где-то посередине, в случае недостатка свободного места.

1.7.2. Для чего используется стек?

Сохранение адреса возврата управления

x86

При вызове другой функции через CALL сначала в стек записывается адрес, указывающий на место после инструкции CALL, затем делается безусловный переход (почти как JMP) на адрес, указанный в операнде.

CALL — это аналог пары инструкций `PUSH address_after_call / JMP`.

⁴⁹Store Multiple Empty Descending (инструкция ARM)

⁵⁰Load Multiple Empty Descending (инструкция ARM)

⁵¹Store Multiple Full Ascending (инструкция ARM)

⁵²Load Multiple Full Ascending (инструкция ARM)

⁵³Store Multiple Empty Ascending (инструкция ARM)

⁵⁴Load Multiple Empty Ascending (инструкция ARM)

⁵⁵Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17270>

1.7. CTEK

RET вытаскивает из стека значение и передает управление по этому адресу — это аналог пары инструкций POP tmp / JMP tmp.

Крайне легко устроить переполнение стека, запустив бесконечную рекурсию:

```
void f()
{
    f();
};
```

MSVC 2008 предупреждает о проблеме:

```
c:\tmp6>cl ss.cpp /Fass.asm
Microsoft (R) 32-bit C/C++ Optimizing Compiler Version 15.00.21022.08 for 80x86
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

ss.cpp
c:\tmp6\ss.cpp(4) : warning C4717: 'f' : recursive on all control paths, function will cause ↵
↳ runtime stack overflow
```

...но, тем не менее, создает нужный код:

```
?f@@YAXXZ PROC                ; f
; File c:\tmp6\ss.cpp
; Line 2
    push    ebp
    mov     ebp, esp
; Line 3
    call    ?f@@YAXXZ          ; f
; Line 4
    pop     ebp
    ret     0
?f@@YAXXZ ENDP                ; f
```

...причем, если включить оптимизацию (/Ox), то будет даже интереснее, без переполнения стека, но работать будет *корректно*⁵⁶:

```
?f@@YAXXZ PROC                ; f
; File c:\tmp6\ss.cpp
; Line 2
$LL3@f:
; Line 3
    jmp     SHORT $LL3@f
?f@@YAXXZ ENDP                ; f
```

GCC 4.4.1 генерирует точно такой же код в обоих случаях, хотя и не предупреждает о проблеме.

ARM

Программы для ARM также используют стек для сохранения [RA](#), куда нужно вернуться, но несколько иначе. Как уже упоминалось в секции «Hello, world!» ([1.5.4](#) (стр. 19)), [RA](#) записывается в регистр [LR](#) ([link register](#)). Но если есть необходимость вызывать какую-то другую функцию и использовать регистр [LR](#) ещё раз, его значение желательно сохранить.

Обычно это происходит в прологе функции, часто мы видим там инструкцию вроде PUSH {R4-R7, LR}, а в эпилоге POP {R4-R7, PC} — так сохраняются регистры, которые будут использоваться в текущей функции, в том числе [LR](#).

Тем не менее, если некая функция не вызывает никаких более функций, в терминологии [RISC](#) она называется [leaf function](#)⁵⁷. Как следствие, «leaf»-функция не сохраняет регистр [LR](#) (потому что не изменяет его). А если эта функция небольшая, использует мало регистров, она может не использовать стек вообще. Таким образом, в ARM возможен вызов небольших leaf-функций не используя стек. Это может быть быстрее чем в старых x86, ведь внешняя память для стека не используется

⁵⁶Здесь ирония

⁵⁷infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.faqs/ka13785.html

1.7. СТЕК

⁵⁸ Либо это может быть полезным для тех ситуаций, когда память для стека ещё не выделена, либо недоступна,

Некоторые примеры таких функций: [1.10.3](#) (стр. 104), [1.10.3](#) (стр. 104), [1.274](#) (стр. 306), [1.290](#) (стр. 324), [1.22.5](#) (стр. 324), [1.182](#) (стр. 200), [1.180](#) (стр. 198), [1.199](#) (стр. 216).

Передача параметров функции

Самый распространенный способ передачи параметров в x86 называется «cdecl»:

```
push arg3
push arg2
push arg1
call f
add esp, 12 ; 4*3=12
```

Вызываемая функция получает свои параметры также через указатель стека.

Следовательно, так расположены значения в стеке перед исполнением самой первой инструкции функции `f()`:

ESP	адрес возврата
ESP+4	аргумент#1, маркируется в IDA как <code>arg_0</code>
ESP+8	аргумент#2, маркируется в IDA как <code>arg_4</code>
ESP+0xC	аргумент#3, маркируется в IDA как <code>arg_8</code>
...	...

См. также в соответствующем разделе о других способах передачи аргументов через стек ([6.1](#) (стр. 713)).

Кстати, вызываемая функция не имеет информации о количестве переданных ей аргументов. Функции Си с переменным количеством аргументов (как `printf()`) определяют их количество по спецификаторам строки формата (начинающиеся со знака %).

Если написать что-то вроде:

```
printf("%d %d %d", 1234);
```

`printf()` выведет 1234, затем ещё два случайных числа⁵⁹, которые волею случая оказались в стеке рядом.

Вот почему не так уж и важно, как объявлять функцию `main()`:

как `main()`, `main(int argc, char *argv[])`

либо `main(int argc, char *argv[], char *envp[])`.

В реальности, CRT-код вызывает `main()` примерно так:

```
push envp
push argv
push argc
call main
...
```

Если вы объявляете `main()` без аргументов, они, тем не менее, присутствуют в стеке, но не используются. Если вы объявите `main()` как `main(int argc, char *argv[])`, вы можете использовать два первых аргумента, а третий останется для вашей функции «невидимым». Более того, можно даже объявить `main(int argc)`, и это будет работать.

Альтернативные способы передачи аргументов

Важно отметить, что, в общем, никто не заставляет программистов передавать параметры именно через стек, это не является требованием к исполняемому коду. Вы можете делать это совершенно иначе, не используя стек вообще.

⁵⁸Когда-то, очень давно, на PDP-11 и VAX на инструкцию CALL (вызов других функций) могло тратиться вплоть до 50% времени (возможно из-за работы с памятью), поэтому считалось, что много небольших функций это [анти-паттерн](#) [Eric S. Raymond, *The Art of UNIX Programming*, (2003)Chapter 4, Part II].

⁵⁹В строгом смысле, они не случайны, скорее, непредсказуемы: [1.7.4](#) (стр. 38)

1.7. СТЕК

В каком-то смысле, популярный метод среди начинающих использовать язык ассемблера, это передавать аргументы в глобальных переменных, например:

Листинг 1.37: Код на ассемблере

```
...  
mov     X, 123  
mov     Y, 456  
call    do_something  
  
...  
X       dd     ?  
Y       dd     ?  
  
do_something proc near  
        ; take X  
        ; take Y  
        ; do something  
        retn  
do_something endp
```

Но у этого метода есть очевидный недостаток: ф-ция *do_something()* не сможет вызвать саму себя рекурсивно (либо, через какую-то стороннюю ф-цию), потому что тогда придется затереть свои собственные аргументы. Та же история с локальными переменными: если хранить их в глобальных переменных, ф-ция не сможет вызывать сама себя. К тому же, этот метод не безопасный для мультитредовой среды⁶⁰. Способ хранения подобной информации в стеке заметно всё упрощает — он может хранить столько аргументов ф-ций и/или значений вообще, сколько в нем есть места.

В [Donald E. Knuth, *The Art of Computer Programming*, Volume 1, 3rd ed., (1997), 189] можно прочитать про еще более странные схемы передачи аргументов, которые были очень удобны на IBM System/360.

В MS-DOS был метод передачи аргументов через регистры, например, этот фрагмент кода для древней 16-битной MS-DOS выводит "Hello, world!":

```
mov  dx, msg      ; адрес сообщения  
mov  ah, 9        ; 9 означает ф-цию "вывод строки"  
int  21h          ; DOS "syscall"  
  
mov  ah, 4ch      ; ф-ция "закончить программу"  
int  21h          ; DOS "syscall"  
  
msg  db 'Hello, World!\$'
```

Это очень похоже на метод 6.1.3 (стр. 714). И еще на метод вызовов сисколлов в Linux (6.3.1 (стр. 727)) и Windows.

Если ф-ция в MS-DOS возвращает булево значение (т.е., один бит, обычно сигнализирующий об ошибке), часто использовался флаг CF.

Например:

```
mov  ah, 3ch      ; создать файл  
lea  dx, filename  
mov  cl, 1  
int  21h  
jc   error  
mov  file_handle, ax  
...  
error:  
...
```

В случае ошибки, флаг CF будет выставлен. Иначе, хэндл только что созданного файла возвращается в AX.

Этот метод до сих пор используется программистами на ассемблере. В исходных кодах Windows Research Kernel (который очень похож на Windows 2003) мы можем найти такое (файл *base/ntos/ke/i386/cpu.asm*):

⁶⁰При корректной реализации, каждый тред будет иметь свой собственный стек со своими аргументами/переменными.

```

    public Get386Stepping
Get386Stepping proc

    call MultiplyTest        ; Perform multiplication test
    jnc short G3s00          ; if nc, muttest is ok
    mov ax, 0
    ret

G3s00:
    call Check386B0          ; Check for B0 stepping
    jnc short G3s05          ; if nc, it's B1/later
    mov ax, 100h             ; It is B0/earlier stepping
    ret

G3s05:
    call Check386D1          ; Check for D1 stepping
    jc short G3s10           ; if c, it is NOT D1
    mov ax, 301h             ; It is D1/later stepping
    ret

G3s10:
    mov ax, 101h             ; assume it is B1 stepping
    ret

    ...

MultiplyTest proc

    xor cx, cx               ; 64K times is a nice round number
mlt00: push cx
    call Multiply            ; does this chip's multiply work?
    pop cx
    jc short mltx            ; if c, No, exit
    loop mlt00               ; if nc, YEs, loop to try again
    clc

mltx:
    ret

MultiplyTest endp

```

Хранение локальных переменных

Функция может выделить для себя некоторое место в стеке для локальных переменных, просто отодвинув [указатель стека](#) глубже к концу стека.

Это очень быстро вне зависимости от количества локальных переменных. Хранить локальные переменные в стеке не является необходимым требованием. Вы можете хранить локальные переменные где угодно. Но по традиции всё сложилось так.

x86: Функция `alloca()`

Интересен случай с функцией `alloca()` ⁶¹. Эта функция работает как `malloc()`, но выделяет память прямо в стеке. Память освобождать через `free()` не нужно, так как эпилог функции (1.6 (стр. 30)) вернет ESP в изначальное состояние и выделенная память просто *выкидывается*. Интересна реализация функции `alloca()`. Эта функция, если упрощенно, просто сдвигает ESP вглубь стека на столько байт, сколько вам нужно и возвращает ESP в качестве указателя на выделенный блок.

Попробуем:

```

#ifdef __GNUC__
#include <alloca.h> // GCC
#else
#include <malloc.h> // MSVC

```

⁶¹В MSVC, реализацию функции можно посмотреть в файлах `alloca16.asm` и `chkstk.asm` в `C:\Program Files (x86)\Microsoft Visual Studio 10.0\VC\crt\src\intel`

1.7. CTEK

```
#endif
#include <stdio.h>

void f()
{
    char *buf=(char*)alloca (600);
#ifdef __GNUC__
    snprintf (buf, 600, "hi! %d, %d, %d\n", 1, 2, 3); // GCC
#else
    _snprintf (buf, 600, "hi! %d, %d, %d\n", 1, 2, 3); // MSVC
#endif

    puts (buf);
};
```

Функция `_snprintf()` работает так же, как и `printf()`, только вместо выдачи результата в [stdout](#) (т.е. на терминал или в консоль), записывает его в буфер `buf`. Функция `puts()` выдает содержимое буфера `buf` в [stdout](#). Конечно, можно было бы заменить оба этих вызова на один `printf()`, но здесь нужно проиллюстрировать использование небольшого буфера.

MSVC

Компилируем (MSVC 2010):

Листинг 1.38: MSVC 2010

```
...

mov     eax, 600 ; 00000258H
call    __alloca_probe_16
mov     esi, esp

push    3
push    2
push    1
push    OFFSET $SG2672
push    600 ; 00000258H
push    esi
call    __snprintf

push    esi
call    _puts
add     esp, 28

...
```

Единственный параметр в `alloca()` передается через EAX, а не как обычно через стек [62](#).

GCC + Синтаксис Intel

А GCC 4.4.1 обходится без вызова других функций:

Листинг 1.39: GCC 4.7.3

```
.LC0:
.string "hi! %d, %d, %d\n"

f:
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ebx
    sub     esp, 660
    lea     ebx, [esp+39]
```

⁶²Это потому, что `alloca()` — это не сколько функция, сколько т.н. *compiler intrinsic* ([10.3](#) (стр. 974)) Одна из причин, почему здесь нужна именно функция, а не несколько инструкций прямо в коде в том, что в реализации функции `alloca()` от [MSVC](#)⁶³ есть также код, читающий из только что выделенной памяти, чтобы [OC](#) подключила физическую память к этому региону [VM](#)⁶⁴. После вызова `alloca()` ESP указывает на блок в 600 байт, который мы можем использовать под `buf`.

1.7. CTEK

```
and    ebx, -16                ; выровнять указатель по 16-байтной границе
mov     DWORD PTR [esp], ebx    ; s
mov     DWORD PTR [esp+20], 3
mov     DWORD PTR [esp+16], 2
mov     DWORD PTR [esp+12], 1
mov     DWORD PTR [esp+8], OFFSET FLAT:.LC0 ; "hi! %d, %d, %d\n"
mov     DWORD PTR [esp+4], 600   ; maxlen
call    _snprintf
mov     DWORD PTR [esp], ebx     ; s
call    puts
mov     ebx, DWORD PTR [ebp-4]
leave
ret
```

GCC + Синтаксис AT&T

Посмотрим на тот же код, только в синтаксисе AT&T:

Листинг 1.40: GCC 4.7.3

```
.LC0:
.string "hi! %d, %d, %d\n"
f:
    pushl    %ebp
    movl     %esp, %ebp
    pushl    %ebx
    subl     $660, %esp
    leal     39(%esp), %ebx
    andl     $-16, %ebx
    movl     %ebx, (%esp)
    movl     $3, 20(%esp)
    movl     $2, 16(%esp)
    movl     $1, 12(%esp)
    movl     $.LC0, 8(%esp)
    movl     $600, 4(%esp)
    call     _snprintf
    movl     %ebx, (%esp)
    call     puts
    movl     -4(%ebp), %ebx
    leave
    ret
```

Всё то же самое, что и в прошлом листинге.

Кстати, `movl $3, 20(%esp)` — это аналог `mov DWORD PTR [esp+20], 3` в синтаксисе Intel. Адресация памяти в виде *регистр+смещение* записывается в синтаксисе AT&T как *смещение(%регистр)*.

(Windows) SEH

В стеке хранятся записи [SEH⁶⁵](#) для функции (если они присутствуют). Читайте больше о нем здесь: [\(6.5.3 \(стр. 744\)\)](#).

Защита от переполнений буфера

Здесь больше об этом ([1.20.2 \(стр. 265\)](#)).

Автоматическое освобождение данных в стеке

Возможно, причина хранения локальных переменных и SEH-записей в стеке в том, что после выхода из функции, всё эти данные освобождаются автоматически, используя только одну инструкцию

⁶⁵Structured Exception Handling

1.7. СТЕК

корректирования указателя стека (часто это ADD). Аргументы функций, можно сказать, тоже освобождаются автоматически в конце функции. А всё что хранится в куче (*heap*) нужно освобождать явно.

1.7.3. Разметка типичного стека

Разметка типичного стека в 32-битной среде перед исполнением самой первой инструкции функции выглядит так:

...	...
ESP-0xC	локальная переменная#2, маркируется в IDA как var_8
ESP-8	локальная переменная#1, маркируется в IDA как var_4
ESP-4	сохраненное значениеEBP
ESP	Адрес возврата
ESP+4	аргумент#1, маркируется в IDA как arg_0
ESP+8	аргумент#2, маркируется в IDA как arg_4
ESP+0xC	аргумент#3, маркируется в IDA как arg_8
...	...

1.7.4. Мусор в стеке

When one says that something seems random, what one usually means in practice is that one cannot see any regularities in it.

Stephen Wolfram, A New Kind of Science.

Часто в этой книге говорится о «шуме» или «мусоре» в стеке или памяти. Откуда он берется? Это то, что осталось там после исполнения предыдущих функций.

Короткий пример:

```
#include <stdio.h>

void f1()
{
    int a=1, b=2, c=3;
};

void f2()
{
    int a, b, c;
    printf ("%d, %d, %d\n", a, b, c);
};

int main()
{
    f1();
    f2();
};
```

Компилируем...

Листинг 1.41: Неоптимизирующий MSVC 2010

```
$SG2752 DB      '%d, %d, %d', 0aH, 00H

_c$ = -12      ; size = 4
_b$ = -8       ; size = 4
_a$ = -4       ; size = 4
_f1          PROC
    push      ebp
    mov       ebp, esp
    sub       esp, 12
    mov       DWORD PTR _a$[ebp], 1
    mov       DWORD PTR _b$[ebp], 2
```

1.7. CTEK

```
        mov     DWORD PTR _c$[ebp], 3
        mov     esp, ebp
        pop     ebp
        ret     0
_f1     ENDP

_c$ = -12      ; size = 4
_b$ = -8       ; size = 4
_a$ = -4       ; size = 4
_f2     PROC
        push    ebp
        mov     ebp, esp
        sub     esp, 12
        mov     eax, DWORD PTR _c$[ebp]
        push    eax
        mov     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
        push    ecx
        mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp]
        push    edx
        push    OFFSET $SG2752 ; '%d, %d, %d'
        call    DWORD PTR __imp__printf
        add     esp, 16
        mov     esp, ebp
        pop     ebp
        ret     0
_f2     ENDP

_main   PROC
        push    ebp
        mov     ebp, esp
        call    _f1
        call    _f2
        xor     eax, eax
        pop     ebp
        ret     0
_main   ENDP
```

Компилятор поворчит немного...

```
c:\Polygon>cl st.c /Fast.asm /MD
Microsoft (R) 32-bit C/C++ Optimizing Compiler Version 16.00.40219.01 for 80x86
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

st.c
c:\polygon\c\st.c(11) : warning C4700: uninitialized local variable 'c' used
c:\polygon\c\st.c(11) : warning C4700: uninitialized local variable 'b' used
c:\polygon\c\st.c(11) : warning C4700: uninitialized local variable 'a' used
Microsoft (R) Incremental Linker Version 10.00.40219.01
Copyright (C) Microsoft Corporation. All rights reserved.

/out:st.exe
st.obj
```

Но когда мы запускаем...

```
c:\Polygon>st
1, 2, 3
```

Ох. Вот это странно. Мы ведь не устанавливали значения никаких переменных в `f2()`. Эти значения — это «привидения», которые всё ещё в стеке.

1.7. CTEK

Загрузим пример в OllyDbg:

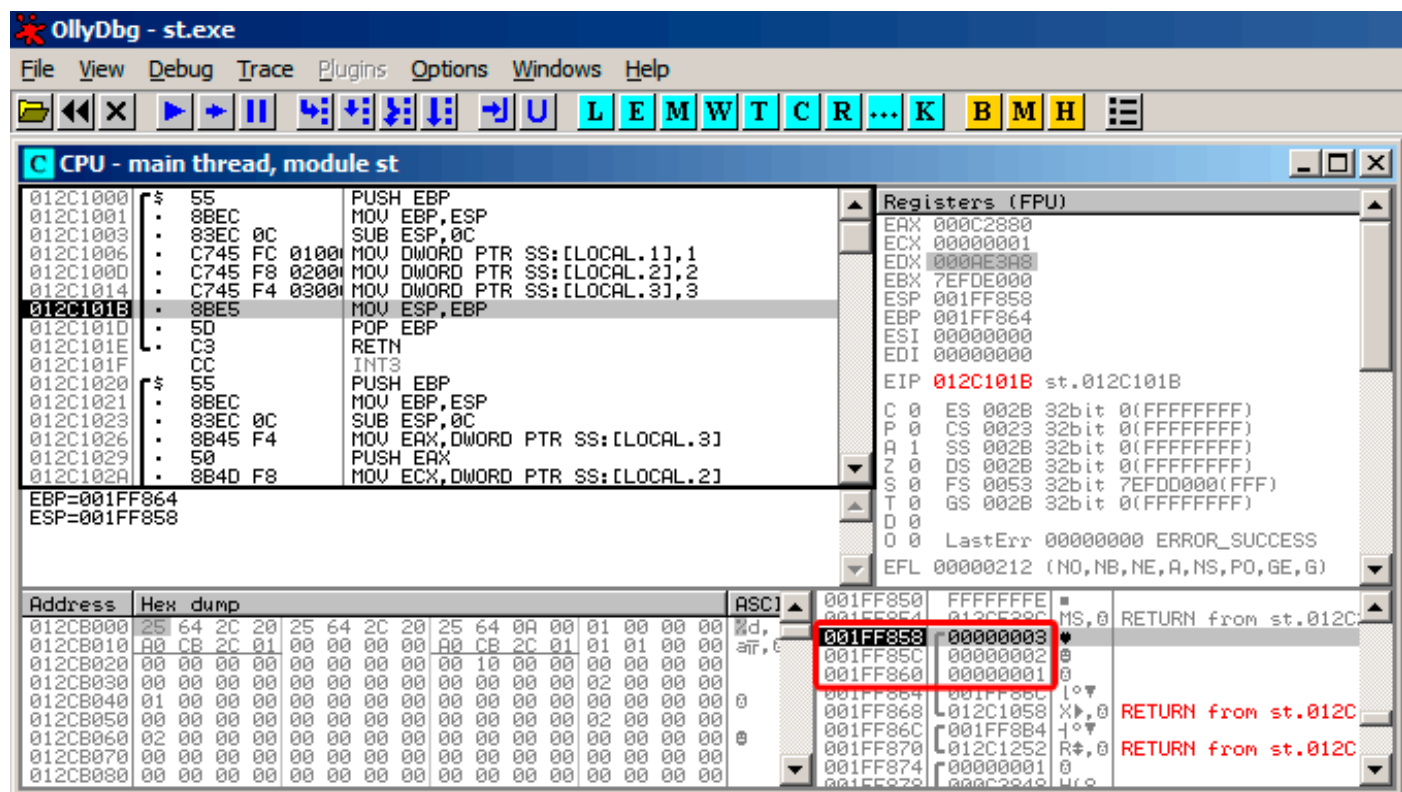


Рис. 1.5: OllyDbg: f1()

Когда f1() заполняет переменные *a*, *b* и *c* они сохраняются по адресу 0x1FF860, итд.

1.7. CTEK

А когда выполняется f2():

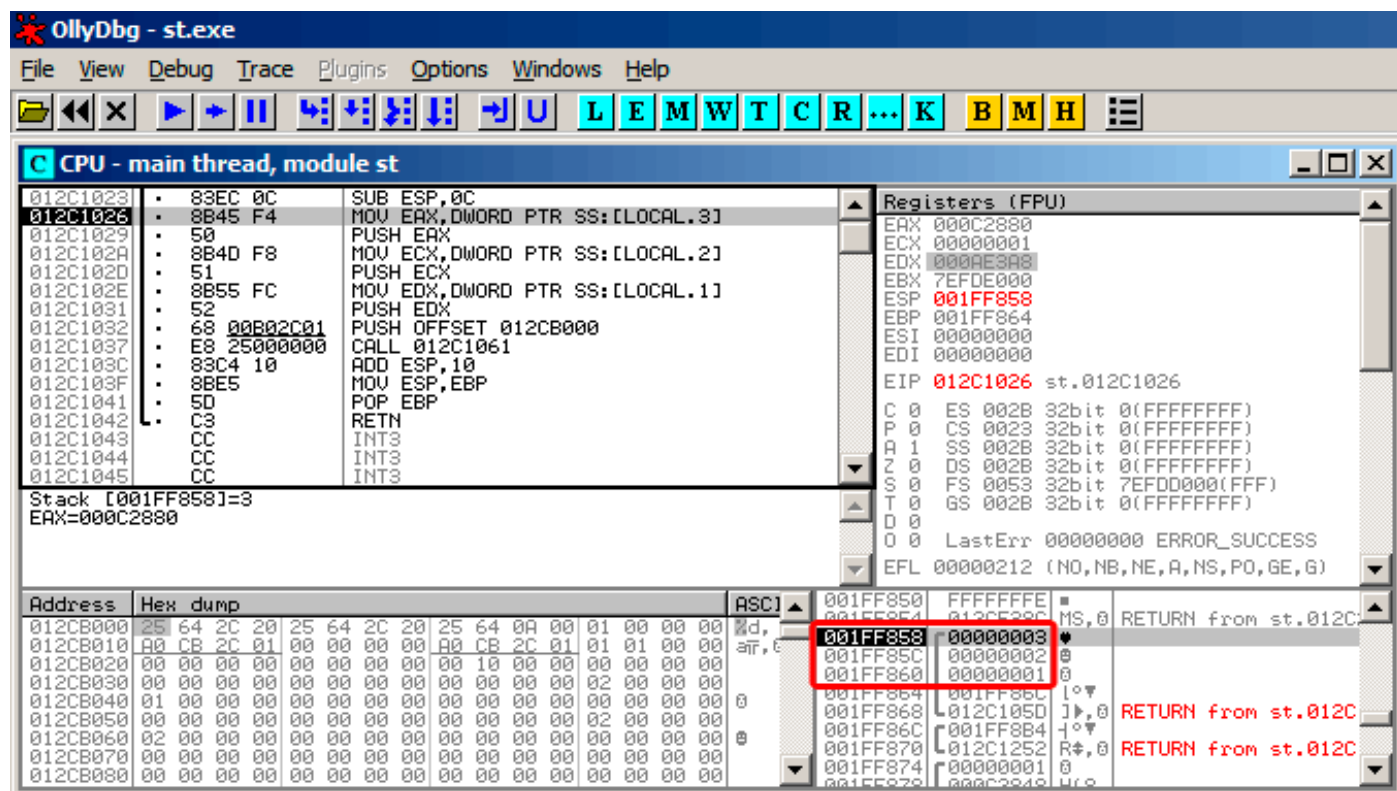


Рис. 1.6: OllyDbg: f2()

... *a*, *b* и *c* в функции f2() находятся по тем же адресам! Пока никто не перезаписал их, так что они здесь в нетронутом виде. Для создания такой странной ситуации несколько функций должны выполняться друг за другом и *SP* должен быть одинаковым при входе в функции, т.е. у функций должно быть равное количество аргументов). Тогда локальные переменные будут расположены в том же месте стека. Подводя итоги, все значения в стеке (да и памяти вообще) это значения оставшиеся от исполнения предыдущих функций. Строго говоря, они не случайны, они скорее непредсказуемы. А как иначе? Можно было бы очищать части стека перед исполнением каждой функции, но это слишком много лишней (и ненужной) работы.

MSVC 2013

Этот пример был скомпилирован в MSVC 2010. Но один читатель этой книги сделал попытку скомпилировать пример в MSVC 2013, запустил и увидел 3 числа в обратном порядке:

```
c:\Polygon\c>st
3, 2, 1
```

Почему? Я также попробовал скомпилировать этот пример в MSVC 2013 и увидел это:

Листинг 1.42: MSVC 2013

```
_a$ = -12      ; size = 4
_b$ = -8       ; size = 4
_c$ = -4       ; size = 4
_f2          PROC

...

_f2          ENDP

_c$ = -12      ; size = 4
_b$ = -8       ; size = 4
_a$ = -4       ; size = 4
_f1          PROC
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
...  
_f1      ENDP
```

В отличие от MSVC 2010, MSVC 2013 разместил переменные a/b/c в функции f2() в обратном порядке. И это полностью корректно, потому что в стандартах Си/Си++ нет правила, в каком порядке локальные переменные должны быть размещены в локальном стеке, если вообще. Разница есть из-за того что MSVC 2010 делает это одним способом, а в MSVC 2013, вероятно, что-то немного изменили во внутренностях компилятора, так что он ведет себя слегка иначе.

1.7.5. Упражнения

- <http://challenges.re/51>
- <http://challenges.re/52>

1.8. printf() с несколькими аргументами

Попробуем теперь немного расширить пример *Hello, world!* (1.5 (стр. 9)), написав в теле функции main():

```
#include <stdio.h>  
  
int main()  
{  
    printf("a=%d; b=%d; c=%d", 1, 2, 3);  
    return 0;  
};
```

1.8.1. x86

x86: 3 аргумента

MSVC

Компилируем при помощи MSVC 2010 Express, и в итоге получим:

```
$SG3830 DB      'a=%d; b=%d; c=%d', 00H  
  
...  
  
    push     3  
    push     2  
    push     1  
    push     OFFSET $SG3830  
    call     _printf  
    add      esp, 16
```

Всё почти то же, за исключением того, что теперь видно, что аргументы для printf() заталкиваются в стек в обратном порядке: самый первый аргумент заталкивается последним.

Кстати, вспомним, что переменные типа *int* в 32-битной системе, как известно, имеют ширину 32 бита, это 4 байта.

Итак, у нас всего 4 аргумента. $4 * 4 = 16$ — именно 16 байт занимают в стеке указатель на строку плюс ещё 3 числа типа *int*.

Когда при помощи инструкции ADD ESP, X корректируется [указатель стека](#) ESP после вызова какой-либо функции, зачастую можно сделать вывод о том, сколько аргументов у вызываемой функции было, разделив X на 4.

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

Конечно, это относится только к cdecl-методу передачи аргументов через стек, и только для 32-битной среды.

См. также в соответствующем разделе о способах передачи аргументов через стек ([6.1](#) (стр. [713](#))).

Иногда бывает так, что подряд идут несколько вызовов разных функций, но стек корректируется только один раз, после последнего вызова:

```
push a1
push a2
call ...
...
push a1
call ...
...
push a1
push a2
push a3
call ...
add esp, 24
```

Вот пример из реальной жизни:

Листинг 1.43: x86

```
.text:100113E7    push     3
.text:100113E9    call     sub_100018B0 ; берет один аргумент (3)
.text:100113EE    call     sub_100019D0 ; не имеет аргументов вообще
.text:100113F3    call     sub_10006A90 ; не имеет аргументов вообще
.text:100113F8    push     1
.text:100113FA    call     sub_100018B0 ; берет один аргумент (1)
.text:100113FF    add      esp, 8      ; выбрасывает из стека два аргумента
```

MSVC и OllyDbg

Попробуем этот же пример в OllyDbg. Это один из наиболее популярных win32-отладчиков пользовательского режима. Мы можем компилировать наш пример в MSVC 2012 с опцией /MD что означает линковать с библиотекой MSVCRT*.DLL, чтобы импортируемые функции были хорошо видны в отладчике.

Затем загружаем исполняемый файл в OllyDbg. Самая первая точка останова в ntdll.dll, нажмите F9 (запустить). Вторая точка останова в **CRT**-коде. Теперь мы должны найти функцию main().

Найдите этот код, прокрутив окно кода до самого верха (MSVC располагает функцию main() в самом начале секции кода):

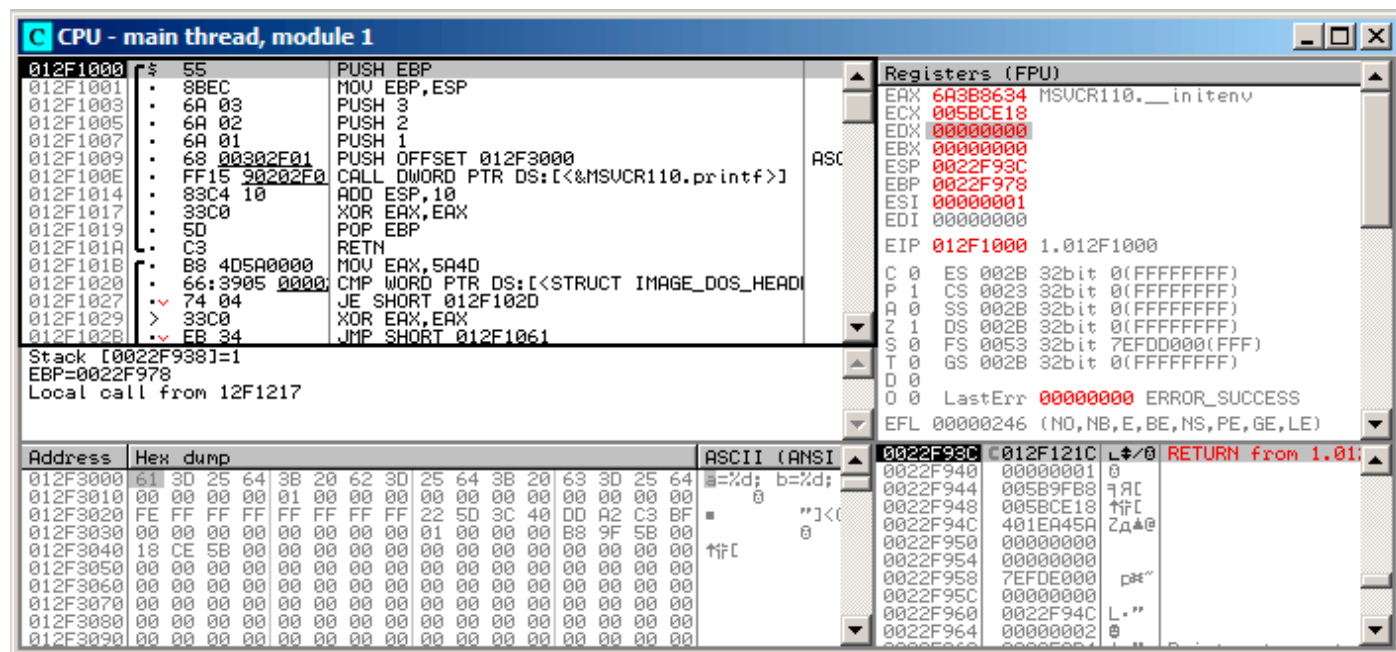


Рис. 1.7: OllyDbg: самое начало функции main()

Кликните на инструкции PUSH EBP, нажмите F2 (установка точки останова) и нажмите F9 (запустить). Нам нужно произвести все эти манипуляции, чтобы пропустить **CRT**-код, потому что нам он пока не интересен.

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

Нажмите F8 (сделать шаг, не входя в функцию) 6 раз, т.е. пропустить 6 инструкций:

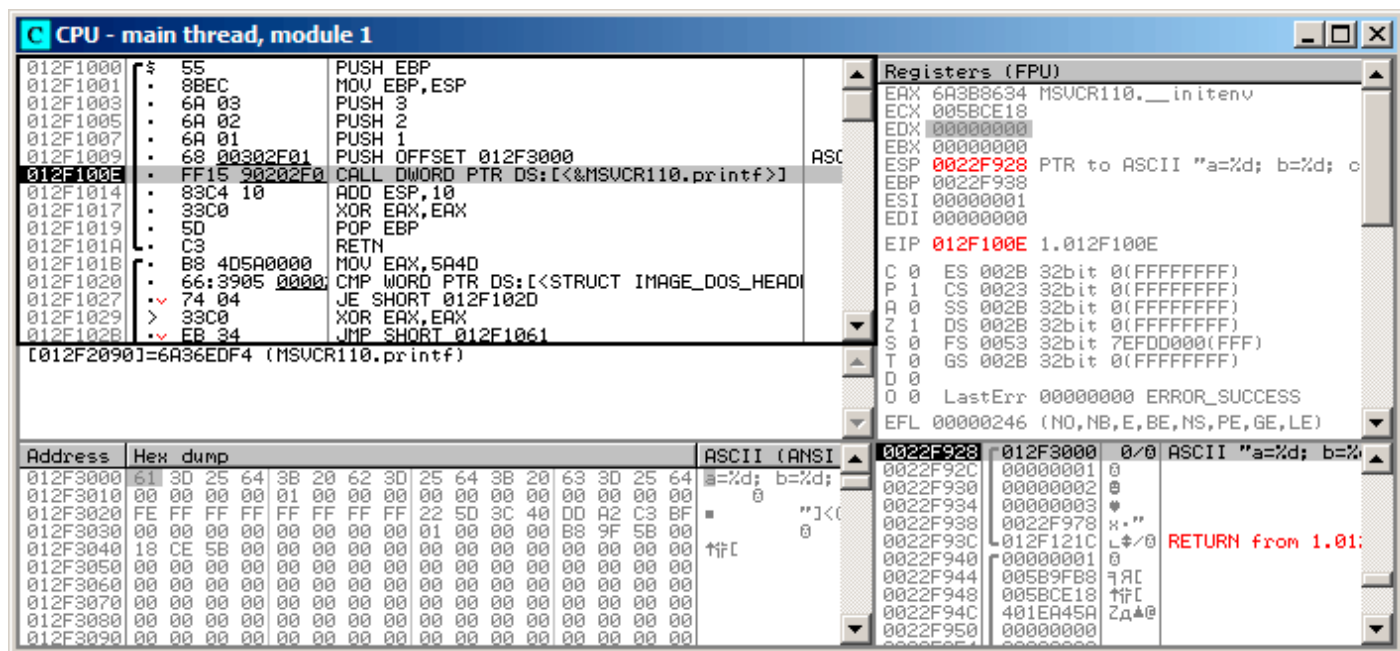


Рис. 1.8: OllyDbg: перед исполнением printf()

Теперь **PC** указывает на инструкцию `CALL printf`. OllyDbg, как и другие отладчики, подсвечивает регистры со значениями, которые изменились. Поэтому каждый раз когда мы нажимаем F8, EIP изменяется и его значение подсвечивается красным. ESP также меняется, потому что значения заталкиваются в стек.

Где находятся эти значения в стеке? Посмотрите на правое нижнее окно в отладчике:

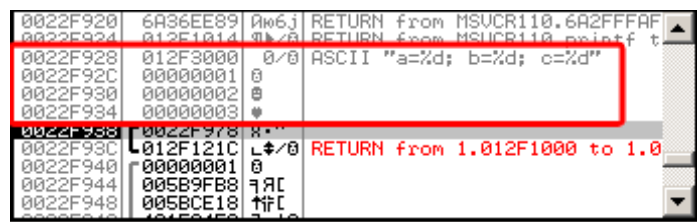


Рис. 1.9: OllyDbg: стек с сохраненными значениями (красная рамка добавлена в графическом редакторе)

Здесь видно 3 столбца: адрес в стеке, значение в стеке и ещё дополнительный комментарий от OllyDbg. OllyDbg понимает printf()-строки, так что он показывает здесь и строку и 3 значения привязанных к ней.

Можно кликнуть правой кнопкой мыши на строке формата, кликнуть на «Follow in dump» и строка формата появится в окне слева внизу, где всегда виден какой-либо участок памяти. Эти значения в памяти можно редактировать. Можно изменить саму строку формата, и тогда результат работы нашего примера будет другой. В данном случае пользы от этого немного, но для упражнения это полезно, чтобы начать чувствовать как тут всё работает.

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

Нажмите F8 (сделать шаг, не входя в функцию).

В консоли мы видим вывод:

```
a=1; b=2; c=3
```

Посмотрим как изменились регистры и состояние стека:

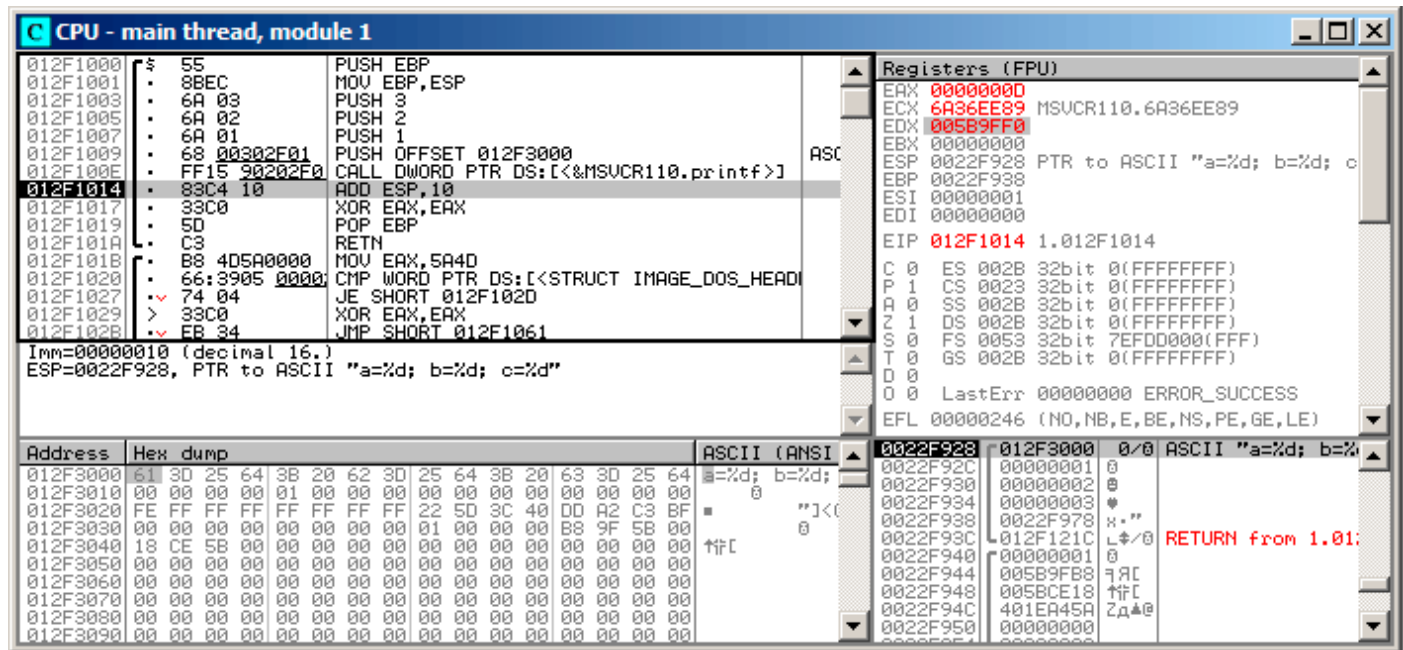


Рис. 1.10: OllyDbg после исполнения printf()

Регистр EAX теперь содержит 0xD (13). Всё верно: printf() возвращает количество выведенных символов. Значение EIP изменилось. Действительно, теперь здесь адрес инструкции после CALL printf. Значения регистров ECX и EDI также изменились. Очевидно, внутренности функции printf() используют их для каких-то своих нужд.

Очень важно то, что значение ESP не изменилось. И аргументы-значения в стеке также! Мы ясно видим здесь и строку формата и соответствующие ей 3 значения, они всё ещё здесь. Действительно, по соглашению вызовов *cdecl*, вызываемая функция не возвращает ESP назад. Это должна делать вызывающая функция (*caller*).

1.8. PRINTF() С НЕКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

Нажмите F8 снова, чтобы исполнилась инструкция ADD ESP, 10:

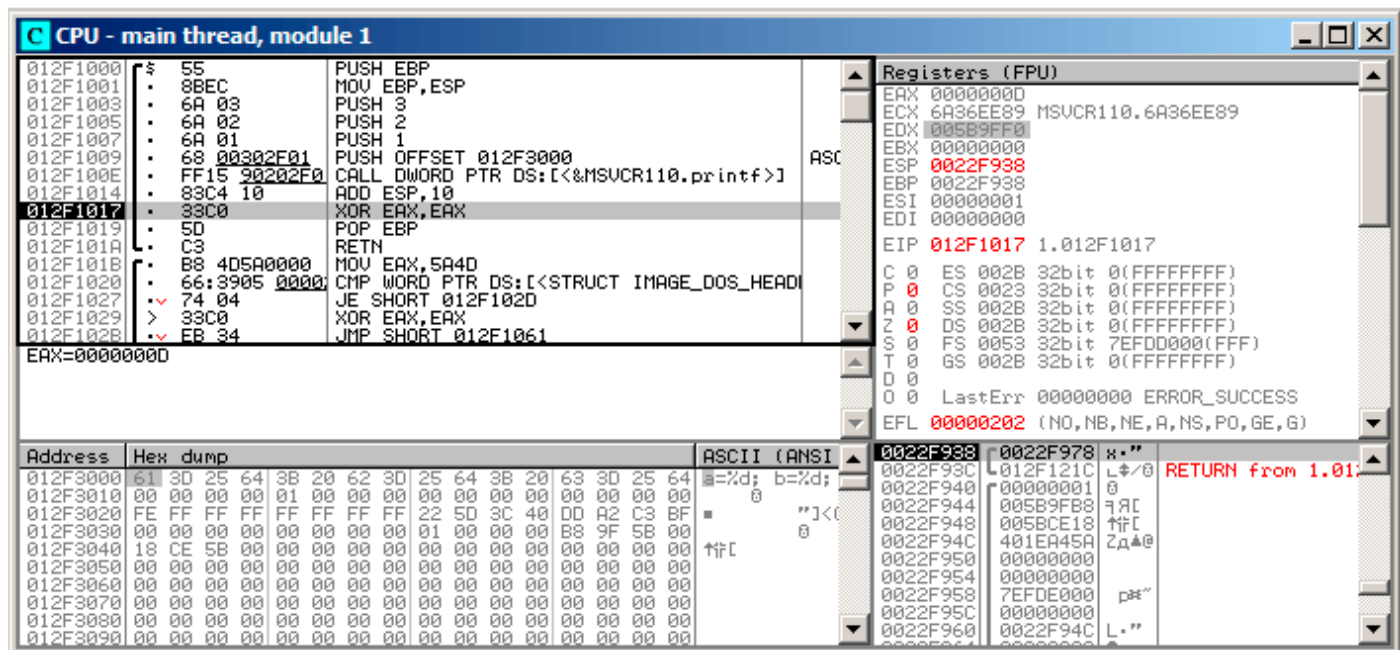


Рис. 1.11: OllyDbg: после исполнения инструкции ADD ESP, 10

ESP изменился, но значения всё ещё в стеке! Конечно, никому не нужно заполнять эти значения нулями или что-то в этом роде. Всё что выше указателя стека (SP) это *шум* или *мусор* и не имеет особой ценности. Было бы очень затратно по времени очищать ненужные элементы стека, к тому же, никому это и не нужно.

GCC

Скомпилируем то же самое в Linux при помощи GCC 4.4.1 и посмотрим на результат в [IDA](#):

```
main      proc near

var_10    = dword ptr -10h
var_C     = dword ptr -0Ch
var_8     = dword ptr -8
var_4     = dword ptr -4

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        and     esp, 0FFFFFFF0h
        sub     esp, 10h
        mov     eax, offset aADBD CD ; "a=%d; b=%d; c=%d"
        mov     [esp+10h+var_4], 3
        mov     [esp+10h+var_8], 2
        mov     [esp+10h+var_C], 1
        mov     [esp+10h+var_10], eax
        call    _printf
        mov     eax, 0
        leave
        retn
main      endp
```

Можно сказать, что этот короткий код, созданный GCC, отличается от кода MSVC только способом помещения значений в стек. Здесь GCC снова работает со стеком напрямую без PUSH/POP.

GCC и GDB

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

Попробуем также этот пример и в [GDB⁶⁶](#) в Linux.

-g означает генерировать отладочную информацию в выходном исполняемом файле.

```
$ gcc 1.c -g -o 1
```

```
$ gdb 1
GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
...
Reading symbols from /home/dennis/polygon/1...done.
```

Листинг 1.44: установим точку останова на printf()

```
(gdb) b printf
Breakpoint 1 at 0x80482f0
```

Запускаем. У нас нет исходного кода функции, поэтому [GDB](#) не может его показать.

```
(gdb) run
Starting program: /home/dennis/polygon/1

Breakpoint 1, __printf (format=0x80484f0 "a=%d; b=%d; c=%d") at printf.c:29
29      printf.c: No such file or directory.
```

Выдать 10 элементов стека. Левый столбец — это адрес в стеке.

```
(gdb) x/10w $esp
0xbffff11c:    0x0804844a    0x080484f0    0x00000001    0x00000002
0xbffff12c:    0x00000003    0x08048460    0x00000000    0x00000000
0xbffff13c:    0xb7e29905    0x00000001
```

Самый первый элемент это [RA](#) (0x0804844a). Мы можем удостовериться в этом, дизассемблируя память по этому адресу:

```
(gdb) x/5i 0x0804844a
0x0804844a <main+45>: mov     $0x0,%eax
0x0804844f <main+50>: leave
0x08048450 <main+51>: ret
0x08048451:    xchg    %ax,%ax
0x08048453:    xchg    %ax,%ax
```

Две инструкции XCHG это холостые инструкции, аналогичные [NOP](#).

Второй элемент (0x080484f0) это адрес строки формата:

```
(gdb) x/s 0x080484f0
0x080484f0:    "a=%d; b=%d; c=%d"
```

Остальные 3 элемента (1, 2, 3) это аргументы функции printf(). Остальные элементы это может быть и мусор в стеке, но могут быть и значения от других функций, их локальные переменные, итд. Пока что мы можем игнорировать их.

Исполняем «finish». Это значит исполнять все инструкции до самого конца функции. В данном случае это означает исполнять до завершения printf().

```
(gdb) finish
Run till exit from #0  __printf (format=0x80484f0 "a=%d; b=%d; c=%d") at printf.c:29
main () at 1.c:6
6      return 0;
Value returned is $2 = 13
```

[GDB](#) показывает, что вернула printf() в EAX (13). Это, так же как и в примере с OllyDbg, количество напечатанных символов.

А ещё мы видим «return 0;» и что это выражение находится в файле 1.c в строке 6. Действительно, файл 1.c лежит в текущем директории и [GDB](#) находит там эту строку. Как [GDB](#) знает, какая строка Си-кода сейчас исполняется? Компилятор, генерируя отладочную информацию, также сохраняет

⁶⁶GNU Debugger

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

информацию о соответствии строк в исходном коде и адресов инструкций. GDB это всё-таки отладчик уровня исходных текстов.

Посмотрим регистры. 13 в EAX:

```
(gdb) info registers
eax             0xd         13
ecx             0x0         0
edx             0x0         0
ebx             0xb7fc0000   -1208221696
esp             0xbffff120   0xbffff120
ebp             0xbffff138   0xbffff138
esi             0x0         0
edi             0x0         0
eip             0x804844a     0x804844a <main+45>
...
```

Попробуем дизассемблировать текущие инструкции. Стрелка указывает на инструкцию, которая будет исполнена следующей.

```
(gdb) disas
Dump of assembler code for function main:
0x0804841d <+0>:    push    %ebp
0x0804841e <+1>:    mov     %esp,%ebp
0x08048420 <+3>:    and     $0xffffffff,%esp
0x08048423 <+6>:    sub     $0x10,%esp
0x08048426 <+9>:    movl    $0x3,0xc(%esp)
0x0804842e <+17>:   movl    $0x2,0x8(%esp)
0x08048436 <+25>:   movl    $0x1,0x4(%esp)
0x0804843e <+33>:   movl    $0x80484f0,(%esp)
0x08048445 <+40>:   call    0x80482f0 <printf@plt>
=> 0x0804844a <+45>:   mov     $0x0,%eax
0x0804844f <+50>:   leave
0x08048450 <+51>:   ret
End of assembler dump.
```

По умолчанию GDB показывает дизассемблированный листинг в формате AT&T. Но можно также переключиться в формат Intel:

```
(gdb) set disassembly-flavor intel
(gdb) disas
Dump of assembler code for function main:
0x0804841d <+0>:    push    ebp
0x0804841e <+1>:    mov     ebp,esp
0x08048420 <+3>:    and     esp,0xffffffff
0x08048423 <+6>:    sub     esp,0x10
0x08048426 <+9>:    mov     DWORD PTR [esp+0xc],0x3
0x0804842e <+17>:   mov     DWORD PTR [esp+0x8],0x2
0x08048436 <+25>:   mov     DWORD PTR [esp+0x4],0x1
0x0804843e <+33>:   mov     DWORD PTR [esp],0x80484f0
0x08048445 <+40>:   call    0x80482f0 <printf@plt>
=> 0x0804844a <+45>:   mov     eax,0x0
0x0804844f <+50>:   leave
0x08048450 <+51>:   ret
End of assembler dump.
```

Исполняем следующую инструкцию. GDB покажет закрывающуюся скобку, означая, что это конец блока в функции.

```
(gdb) step
7      };
```

Посмотрим регистры после исполнения инструкции MOV EAX, 0. EAX здесь уже действительно ноль.

```
(gdb) info registers
eax             0x0         0
ecx             0x0         0
edx             0x0         0
ebx             0xb7fc0000   -1208221696
esp             0xbffff120   0xbffff120
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

ebp	0xbffff138	0xbffff138
esi	0x0	0
edi	0x0	0
eip	0x804844f	0x804844f <main+50>
...		

x64: 8 аргументов

Для того чтобы посмотреть, как остальные аргументы будут передаваться через стек, изменим пример ещё раз, увеличив количество передаваемых аргументов до 9 (строка формата `printf()` и 8 переменных типа `int`):

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n", 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8);
    return 0;
};
```

MSVC

Как уже было сказано ранее, первые 4 аргумента в Win64 передаются в регистрах RCX, RDX, R8, R9, а остальные — через стек. Здесь мы это и видим. Впрочем, инструкция `PUSH` не используется, вместо неё при помощи `MOV` значения сразу записываются в стек.

Листинг 1.45: MSVC 2012 x64

```
$SG2923 DB      'a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d', 0aH, 00H

main      PROC
          sub     rsp, 88

          mov     DWORD PTR [rsp+64], 8
          mov     DWORD PTR [rsp+56], 7
          mov     DWORD PTR [rsp+48], 6
          mov     DWORD PTR [rsp+40], 5
          mov     DWORD PTR [rsp+32], 4
          mov     r9d, 3
          mov     r8d, 2
          mov     edx, 1
          lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2923
          call    printf

          ; возврат 0
          xor     eax, eax

          add     rsp, 88
          ret     0
main      ENDP
_TEXT    ENDS
END
```

Наблюдательный читатель может спросить, почему для значений типа `int` отводится 8 байт, ведь нужно только 4? Да, это нужно запомнить: для значений всех типов более коротких чем 64-бита, отводится 8 байт. Это сделано для удобства: так всегда легко рассчитать адрес того или иного аргумента. К тому же, все они расположены по выровненным адресам в памяти. В 32-битных средах точно также: для всех типов резервируется 4 байта в стеке.

GCC

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

В *NIX-системах для x86-64 ситуация похожая, вот только первые 6 аргументов передаются через RDI, RSI, RDX, RCX, R8, R9. Остальные — через стек. GCC генерирует код, записывающий указатель на строку в EDI вместо RDI — это мы уже рассмотрели чуть раньше: [1.5.2](#) (стр. 15).

Почему перед вызовом printf() очищается регистр EAX мы уже рассмотрели ранее [1.5.2](#) (стр. 15).

Листинг 1.46: Оптимизирующий GCC 4.4.6 x64

```
.LC0:
    .string "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"

main:
    sub     rsp, 40

    mov     r9d, 5
    mov     r8d, 4
    mov     ecx, 3
    mov     edx, 2
    mov     esi, 1
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC0
    xor     eax, eax ; количество переданных векторных регистров
    mov     DWORD PTR [rsp+16], 8
    mov     DWORD PTR [rsp+8], 7
    mov     DWORD PTR [rsp], 6
    call    printf

    ; возврат 0

    xor     eax, eax
    add     rsp, 40
    ret
```

GCC + GDB

Попробуем этот пример в [GDB](#).

```
$ gcc -g 2.c -o 2
```

```
$ gdb 2
GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
...
Reading symbols from /home/dennis/polygon/2...done.
```

Листинг 1.47: ставим точку останова на printf(), запускаем

```
(gdb) b printf
Breakpoint 1 at 0x400410
(gdb) run
Starting program: /home/dennis/polygon/2

Breakpoint 1, __printf (format=0x400628 "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n") at ↵
↳ printf.c:29
29     printf.c: No such file or directory.
```

В регистрах RSI/RDX/RCX/R8/R9 всё предсказуемо. А RIP содержит адрес самой первой инструкции функции printf().

```
(gdb) info registers
rax             0x0          0
rbx             0x0          0
rcx             0x3          3
rdx             0x2          2
rsi             0x1          1
rdi             0x400628 4195880
rbp             0x7fffffffdf60 0x7fffffffdf60
rsp             0x7fffffffdf38 0x7fffffffdf38
r8              0x4          4
r9              0x5          5
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
r10      0xffffffffdce0    140737488346336
r11      0xffffffff7a65f60  140737348263776
r12      0x400440 4195392
r13      0xfffffffffe040    140737488347200
r14      0x0              0
r15      0x0              0
rip      0x7ffff7a65f60    0x7ffff7a65f60 <__printf>
...
```

Листинг 1.48: смотрим на строку формата

```
(gdb) x/s $rdi
0x400628:      "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"
```

Дампим стек на этот раз с командой `x/g` — `g` означает *giant words*, т.е. 64-битные слова.

```
(gdb) x/10g $rsp
0x7ffffffffffdf38: 0x00000000000400576      0x00000000000000006
0x7ffffffffffdf48: 0x00000000000000007      0x000007fff00000008
0x7ffffffffffdf58: 0x00000000000000000      0x00000000000000000
0x7ffffffffffdf68: 0x000007ffff7a33de5      0x00000000000000000
0x7ffffffffffdf78: 0x000007ffffffffffe048  0x00000000100000000
```

Самый первый элемент стека, как и в прошлый раз, это [RA](#). Через стек также передаются 3 значения: 6, 7, 8. Видно, что 8 передается с неочищенной старшей 32-битной частью: `0x000007fff00000008`. Это нормально, ведь передаются числа типа `int`, а они 32-битные. Так что в старшей части регистра или памяти стека остался «случайный мусор».

GDB показывает всю функцию `main()`, если попытаться посмотреть, куда вернется управление после исполнения `printf()`.

```
(gdb) set disassembly-flavor intel
(gdb) disas 0x00000000000400576
Dump of assembler code for function main:
   0x0000000000040052d <+0>:      push    rbp
   0x0000000000040052e <+1>:      mov     rbp, rsp
   0x00000000000400531 <+4>:      sub     rsp, 0x20
   0x00000000000400535 <+8>:      mov     DWORD PTR [rsp+0x10], 0x8
   0x0000000000040053d <+16>:     mov     DWORD PTR [rsp+0x8], 0x7
   0x00000000000400545 <+24>:     mov     DWORD PTR [rsp], 0x6
   0x0000000000040054c <+31>:     mov     r9d, 0x5
   0x00000000000400552 <+37>:     mov     r8d, 0x4
   0x00000000000400558 <+43>:     mov     ecx, 0x3
   0x0000000000040055d <+48>:     mov     edx, 0x2
   0x00000000000400562 <+53>:     mov     esi, 0x1
   0x00000000000400567 <+58>:     mov     edi, 0x400628
   0x0000000000040056c <+63>:     mov     eax, 0x0
   0x00000000000400571 <+68>:     call   0x400410 <printf@plt>
   0x00000000000400576 <+73>:     mov     eax, 0x0
   0x0000000000040057b <+78>:     leave
   0x0000000000040057c <+79>:     ret
End of assembler dump.
```

Заканчиваем исполнение `printf()`, исполняем инструкцию обнуляющую `EAX`, удостоверяемся что в регистре `EAX` именно ноль. `RIP` указывает сейчас на инструкцию `LEAVE`, т.е. предпоследнюю в функции `main()`.

```
(gdb) finish
Run till exit from #0  __printf (format=0x400628 "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n") at printf.c:29
↳ d\n")
a=1; b=2; c=3; d=4; e=5; f=6; g=7; h=8
main () at 2.c:6
6      return 0;
Value returned is $1 = 39
(gdb) next
7      };
(gdb) info registers
rax      0x0              0
rbx      0x0              0
rcx      0x26             38
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

rdx	0x7ffff7dd59f0	140737351866864
rsi	0x7fffffd9	2147483609
rdi	0x0 0	
rbp	0x7ffffffffffdf60	0x7ffffffffffdf60
rsp	0x7ffffffffffdf40	0x7ffffffffffdf40
r8	0x7ffff7dd26a0	140737351853728
r9	0x7ffff7a60134	140737348239668
r10	0x7ffffffffffd5b0	140737488344496
r11	0x7ffff7a95900	140737348458752
r12	0x400440 4195392	
r13	0x7ffffffffffe040	140737488347200
r14	0x0 0	
r15	0x0 0	
rip	0x40057b 0x40057b <main+78>	
...		

1.8.2. ARM

ARM: 3 аргумента

В ARM традиционно принята такая схема передачи аргументов в функцию: 4 первых аргумента через регистры R0-R3; а остальные — через стек. Это немного похоже на то, как аргументы передаются в fastcall (6.1.3 (стр. 714)) или win64 (6.1.5 (стр. 716)).

32-битный ARM

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.49: Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:00000000 main
.text:00000000 10 40 2D E9 STMFD SP!, {R4,LR}
.text:00000004 03 30 A0 E3 MOV R3, #3
.text:00000008 02 20 A0 E3 MOV R2, #2
.text:0000000C 01 10 A0 E3 MOV R1, #1
.text:00000010 08 00 8F E2 ADR R0, aADBDCD ; "a=%d; b=%d; c=%d"
.text:00000014 06 00 00 EB BL __2printf
.text:00000018 00 00 A0 E3 MOV R0, #0 ; return 0
.text:0000001C 10 80 BD E8 LDMFD SP!, {R4,PC}
```

Итак, первые 4 аргумента передаются через регистры R0-R3, по порядку: указатель на формат-строку для printf() в R0, затем 1 в R1, 2 в R2 и 3 в R3.

Инструкция на 0x18 записывает 0 в R0 — это выражение в Си *return 0*. Пока что здесь нет ничего необычного. Оптимизирующий Keil 6/2013 генерирует точно такой же код.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.50: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
.text:00000000 main
.text:00000000 10 B5 PUSH {R4,LR}
.text:00000002 03 23 MOVVS R3, #3
.text:00000004 02 22 MOVVS R2, #2
.text:00000006 01 21 MOVVS R1, #1
.text:00000008 02 A0 ADR R0, aADBDCD ; "a=%d; b=%d; c=%d"
.text:0000000A 00 F0 0D F8 BL __2printf
.text:0000000E 00 20 MOVVS R0, #0
.text:00000010 10 BD POP {R4,PC}
```

Здесь нет особых отличий от неоптимизированного варианта для режима ARM.

Немного переделаем пример, убрав *return 0*:

```
#include <stdio.h>

void main()
{
    printf("a=%d; b=%d; c=%d", 1, 2, 3);
};
```

Результат получится необычным:

Листинг 1.51: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:00000014 main
.text:00000014 03 30 A0 E3    MOV     R3, #3
.text:00000018 02 20 A0 E3    MOV     R2, #2
.text:0000001C 01 10 A0 E3    MOV     R1, #1
.text:00000020 1E 0E 8F E2    ADR     R0, aADBDCD      ; "a=%d; b=%d; c=%d\n"
.text:00000024 CB 18 00 EA    B       __2printf
```

Это оптимизированная версия (-O3) для режима ARM, и здесь мы видим последнюю инструкцию B вместо привычной нам BL. Отличия между этой оптимизированной версией и предыдущей, скомпилированной без оптимизации, ещё и в том, что здесь нет пролога и эпилога функции (инструкций, сохраняющих состояние регистров R0 и LR). Инструкция B просто переходит на другой адрес, без манипуляций с регистром LR, то есть это аналог JMP в x86. Почему это работает нормально? Потому что этот код эквивалентен предыдущему.

Основных причин две: 1) стек не модифицируется, как и [указатель стека SP](#); 2) вызов функции printf() последний, после него ничего не происходит. Функция printf(), отработав, просто возвращает управление по адресу, записанному в LR.

Но в LR находится адрес места, откуда была вызвана наша функция! А следовательно, управление из printf() вернется сразу туда.

Значит нет нужды сохранять LR, потому что нет нужды модифицировать LR. А нет нужды модифицировать LR, потому что нет иных вызовов функций, кроме printf(), к тому же, после этого вызова не нужно ничего здесь больше делать! Поэтому такая оптимизация возможна.

Эта оптимизация часто используется в функциях, где последнее выражение — это вызов другой функции.

Ещё один похожий пример описан здесь: [1.15.1](#) (стр. 144).

ARM64

Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Листинг 1.52: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
.LC1:
    .string "a=%d; b=%d; c=%d"
f2:
; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
    stp     x29, x30, [sp, -16]!
; установить стековый фрейм (FP=SP):
    add     x29, sp, 0
    adrp    x0, .LC1
    add     x0, x0, :lo12:.LC1
    mov     w1, 1
    mov     w2, 2
    mov     w3, 3
    bl      printf
    mov     w0, 0
; восстановить FP и LR
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
ldp    x29, x30, [sp], 16
ret
```

Итак, первая инструкция STP (Store Pair) сохраняет FP (X29) и LR (X30) в стеке. Вторая инструкция ADD X29, SP, #0 формирует стековый фрейм. Это просто запись значения SP в X29.

Далее уже знакомая пара инструкций ADRP/ADD формирует указатель на строку.

lo12 означает младшие 12 бит, т.е., линкер запишет младшие 12 бит адреса метки LC1 в опкод инструкции ADD. %d в формате printf() это 32-битный int, так что 1, 2 и 3 заносятся в 32-битные части регистров. Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9 генерирует почти такой же код.

ARM: 8 аргументов

Снова воспользуемся примером с 9-ю аргументами из предыдущей секции: 1.8.1 (стр. 50).

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n", 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8);
    return 0;
};
```

Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим ARM

```
.text:00000028      main
.text:00000028
.text:00000028      var_18 = -0x18
.text:00000028      var_14 = -0x14
.text:00000028      var_4  = -4
.text:00000028
.text:00000028 04 E0 2D E5  STR    LR, [SP,#var_4]!
.text:0000002C 14 D0 4D E2  SUB    SP, SP, #0x14
.text:00000030 08 30 A0 E3  MOV    R3, #8
.text:00000034 07 20 A0 E3  MOV    R2, #7
.text:00000038 06 10 A0 E3  MOV    R1, #6
.text:0000003C 05 00 A0 E3  MOV    R0, #5
.text:00000040 04 C0 8D E2  ADD    R12, SP, #0x18+var_14
.text:00000044 0F 00 8C E8  STMIA  R12, {R0-R3}
.text:00000048 04 00 A0 E3  MOV    R0, #4
.text:0000004C 00 00 8D E5  STR    R0, [SP,#0x18+var_18]
.text:00000050 03 30 A0 E3  MOV    R3, #3
.text:00000054 02 20 A0 E3  MOV    R2, #2
.text:00000058 01 10 A0 E3  MOV    R1, #1
.text:0000005C 6E 0F 8F E2  ADR    R0, aADBDCDDDEDFDGD ; "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=
    ↪ =%"...
.text:00000060 BC 18 00 EB  BL     __2printf
.text:00000064 14 D0 8D E2  ADD    SP, SP, #0x14
.text:00000068 04 F0 9D E4  LDR    PC, [SP+4+var_4],#4
```

Этот код можно условно разделить на несколько частей:

- Пролог функции:

Самая первая инструкция STR LR, [SP,#var_4]! сохраняет в стеке LR, ведь нам придется использовать этот регистр для вызова printf(). Восклицательный знак в конце означает *pre-index*. Это значит, что в начале SP должно быть уменьшено на 4, затем по адресу в SP должно быть записано значение LR.

Это аналог знакомой в x86 инструкции PUSH. Читайте больше об этом: 1.31.2 (стр. 430).

Вторая инструкция SUB SP, SP, #0x14 уменьшает указатель стека SP, но, на самом деле, эта процедура нужна для выделения в локальном стеке места размером 0x14 (20) байт. Действительно, нам нужно передать 5 32-битных значений через стек в printf(). Каждое значение занимает 4 байта, все вместе — $5 * 4 = 20$. Остальные 4 32-битных значения будут переданы через регистры.

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

- Передача 5, 6, 7 и 8 через стек: они записываются в регистры R0, R1, R2 и R3 соответственно. Затем инструкция `ADD R12, SP, #0x18+var_14` записывает в регистр R12 адрес места в стеке, куда будут помещены эти 4 значения. `var_14` — это макрос ассемблера, равный `-0x14`. Такие макросы создает [IDA](#), чтобы удобнее было показывать, как код обращается к стеку.

Макросы `var_?`, создаваемые [IDA](#), отражают локальные переменные в стеке. Так что в R12 будет записано `SP+4`.

Следующая инструкция `STMIA R12, R0-R3` записывает содержимое регистров R0-R3 по адресу в памяти, на который указывает R12.

Инструкция `STMIA` означает *Store Multiple Increment After*.

Increment After означает, что R12 будет увеличиваться на 4 после записи каждого значения регистра.

- Передача 4 через стек: 4 записывается в R0, затем инструкция `STR R0, [SP, #0x18+var_18]` записывает его в стек. `var_18` равен `-0x18`, смещение будет 0, так что значение из регистра R0 (4) запишется туда, куда указывает [SP](#).

- Передача 1, 2 и 3 через регистры:

Значения для первых трех чисел (a, b, c) (1, 2, 3 соответственно) передаются в регистрах R1, R2 и R3 перед самым вызовом `printf()`, а остальные 5 значений передаются через стек, и вот как:

- Вызов `printf()`.

- Эпилог функции:

Инструкция `ADD SP, SP, #0x14` возвращает [SP](#) на прежнее место, аннулируя таким образом всё, что было записано в стек. Конечно, то что было записано в стек, там пока и останется, но всё это будет многократно перезаписано во время исполнения последующих функций.

Инструкция `LDR PC, [SP+4+var_4], #4` загружает в [PC](#) сохраненное значение [LR](#) из стека, обеспечивая таким образом выход из функции.

Здесь нет восклицательного знака — действительно, сначала [PC](#) загружается из места, куда указывает [SP](#) ($4 + var_4 = 4 + (-4) = 0$), так что эта инструкция аналогична `LDR PC, [SP], #4`), затем [SP](#) увеличивается на 4. Это называется *post-index*⁶⁷. Почему [IDA](#) показывает инструкцию именно так? Потому что она хочет показать разметку стека и тот факт, что `var_4` выделена в локальном стеке именно для сохраненного значения [LR](#). Эта инструкция в каком-то смысле аналогична `POP PC` в x86 ⁶⁸.

Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим Thumb

```
.text:0000001C      printf_main2
.text:0000001C
.text:0000001C      var_18 = -0x18
.text:0000001C      var_14 = -0x14
.text:0000001C      var_8  = -8
.text:0000001C
.text:0000001C 00 B5      PUSH    {LR}
.text:0000001E 08 23      MOVES   R3, #8
.text:00000020 85 B0      SUB     SP, SP, #0x14
.text:00000022 04 93      STR     R3, [SP, #0x18+var_8]
.text:00000024 07 22      MOVES   R2, #7
.text:00000026 06 21      MOVES   R1, #6
.text:00000028 05 20      MOVES   R0, #5
.text:0000002A 01 AB      ADD     R3, SP, #0x18+var_14
.text:0000002C 07 C3      STMIA   R3!, {R0-R2}
.text:0000002E 04 20      MOVES   R0, #4
.text:00000030 00 90      STR     R0, [SP, #0x18+var_18]
.text:00000032 03 23      MOVES   R3, #3
.text:00000034 02 22      MOVES   R2, #2
.text:00000036 01 21      MOVES   R1, #1
.text:00000038 A0 A0      ADR     R0, aADBDCDDDEDFDGD ; "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; \
    ↪ g=%" ...
.text:0000003A 06 F0 D9 F8 BL      __2printf
```

⁶⁷Читайте больше об этом: [1.31.2](#) (стр. 430).

⁶⁸В x86 невозможно установить значение IP/EIP/RIP используя `POP`, но будем надеяться, вы поняли аналогию.

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
.text:0000003E
.text:0000003E      loc_3E      ; CODE XREF: example13_f+16
.text:0000003E 05 B0      ADD      SP, SP, #0x14
.text:00000040 00 BD      POP      {PC}
```

Это почти то же самое что и в предыдущем примере, только код для Thumb и значения помещаются в стек немного иначе: сначала 8 за первый раз, затем 5, 6, 7 за второй раз и 4 за третий раз.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM): Режим ARM

```
__text:0000290C      _printf_main2
__text:0000290C
__text:0000290C      var_1C = -0x1C
__text:0000290C      var_C  = -0xC
__text:0000290C
__text:0000290C 80 40 2D E9      STMFD    SP!, {R7,LR}
__text:00002910 0D 70 A0 E1      MOV      R7, SP
__text:00002914 14 D0 4D E2      SUB      SP, SP, #0x14
__text:00002918 70 05 01 E3      MOV      R0, #0x1570
__text:0000291C 07 C0 A0 E3      MOV      R12, #7
__text:00002920 00 00 40 E3      MOVT     R0, #0
__text:00002924 04 20 A0 E3      MOV      R2, #4
__text:00002928 00 00 8F E0      ADD      R0, PC, R0
__text:0000292C 06 30 A0 E3      MOV      R3, #6
__text:00002930 05 10 A0 E3      MOV      R1, #5
__text:00002934 00 20 8D E5      STR      R2, [SP,#0x1C+var_1C]
__text:00002938 0A 10 8D E9      STMFA    SP, {R1,R3,R12}
__text:0000293C 08 90 A0 E3      MOV      R9, #8
__text:00002940 01 10 A0 E3      MOV      R1, #1
__text:00002944 02 20 A0 E3      MOV      R2, #2
__text:00002948 03 30 A0 E3      MOV      R3, #3
__text:0000294C 10 90 8D E5      STR      R9, [SP,#0x1C+var_C]
__text:00002950 A4 05 00 EB      BL       _printf
__text:00002954 07 D0 A0 E1      MOV      SP, R7
__text:00002958 80 80 BD E8      LDMFD    SP!, {R7,PC}
```

Почти то же самое, что мы уже видели, за исключением того, что STMFA (Store Multiple Full Ascending) — это синоним инструкции STMIB (Store Multiple Increment Before). Эта инструкция увеличивает [SP](#) и только затем записывает в память значение очередного регистра, но не наоборот.

Далее бросается в глаза то, что инструкции как будто бы расположены случайно. Например, значение в регистре R0 подготавливается в трех местах, по адресам 0x2918, 0x2920 и 0x2928, когда это можно было бы сделать в одном месте. Однако, у оптимизирующего компилятора могут быть свои доводы о том, как лучше составлять инструкции друг с другом для лучшей эффективности исполнения. Процессор обычно пытается исполнять одновременно идущие друг за другом инструкции. К примеру, инструкции MOVT R0, #0 и ADD R0, PC, R0 не могут быть исполнены одновременно, потому что обе инструкции модифицируют регистр R0. А вот инструкции MOVT R0, #0 и MOV R2, #4 легко можно исполнить одновременно, потому что эффекты от их исполнения никак не конфликтуют друг с другом. Вероятно, компилятор старается генерировать код именно таким образом там, где это возможно.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM): Режим Thumb-2

```
__text:00002BA0      _printf_main2
__text:00002BA0
__text:00002BA0      var_1C = -0x1C
__text:00002BA0      var_18 = -0x18
__text:00002BA0      var_C  = -0xC
__text:00002BA0
__text:00002BA0 80 B5      PUSH     {R7,LR}
__text:00002BA2 6F 46      MOV      R7, SP
__text:00002BA4 85 B0      SUB      SP, SP, #0x14
__text:00002BA6 41 F2 D8 20      MOVW     R0, #0x12D8
__text:00002BAA 4F F0 07 0C      MOV.W    R12, #7
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
__text:00002BAE C0 F2 00 00    MOVT.W    R0, #0
__text:00002BB2 04 22          MOVVS     R2, #4
__text:00002BB4 78 44          ADD      R0, PC    ; char *
__text:00002BB6 06 23          MOVVS     R3, #6
__text:00002BB8 05 21          MOVVS     R1, #5
__text:00002BBA 0D F1 04 0E    ADD.W     LR, SP, #0x1C+var_18
__text:00002BBE 00 92          STR      R2, [SP,#0x1C+var_1C]
__text:00002BC0 4F F0 08 09    MOV.W     R9, #8
__text:00002BC4 8E E8 0A 10    STMIA.W   LR, {R1,R3,R12}
__text:00002BC8 01 21          MOVVS     R1, #1
__text:00002BCA 02 22          MOVVS     R2, #2
__text:00002BCC 03 23          MOVVS     R3, #3
__text:00002BCE CD F8 10 90    STR.W     R9, [SP,#0x1C+var_C]
__text:00002BD2 01 F0 0A EA    BLX       _printf
__text:00002BD6 05 B0          ADD      SP, SP, #0x14
__text:00002BD8 80 BD          POP      {R7,PC}
```

Почти то же самое, что и в предыдущем примере, лишь за тем исключением, что здесь используются Thumb-инструкции.

ARM64

Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Листинг 1.53: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
.LC2:
.string "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"
f3:
; выделить больше места в стеке:
sub    sp, sp, #32
; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
stp    x29, x30, [sp,16]
; установить стековый фрейм (FP=SP):
add    x29, sp, 16
adrp   x0, .LC2 ; "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"
add    x0, x0, :lo12:.LC2
mov    w1, 8          ; 9-й аргумент
str    w1, [sp]        ; сохранить 9-й аргумент в стеке
mov    w1, 1
mov    w2, 2
mov    w3, 3
mov    w4, 4
mov    w5, 5
mov    w6, 6
mov    w7, 7
bl     printf
sub    sp, x29, #16
; восстановить FP и LR
ldp    x29, x30, [sp,16]
add    sp, sp, 32
ret
```

Первые 8 аргументов передаются в X- или W-регистрах: [Procedure Call Standard for the ARM 64-bit Architecture (AArch64), (2013)]⁶⁹. Указатель на строку требует 64-битного регистра, так что он передается в X0. Все остальные значения имеют 32-битный тип *int*, так что они записываются в 32-битные части регистров (W-). Девятый аргумент (8) передается через стек. Действительно, невозможно передать большое количество аргументов в регистрах, потому что количество регистров ограничено.

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9 генерирует почти такой же код.

⁶⁹Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17287>

1.8.3. MIPS**3 аргумента****Оптимизирующий GCC 4.4.5**

Главное отличие от примера «Hello, world!» в том, что здесь на самом деле вызывается printf() вместо puts() и ещё три аргумента передаются в регистрах \$5...\$7 (или \$A0...\$A2). Вот почему эти регистры имеют префикс A-. Это значит, что они используются для передачи аргументов.

Листинг 1.54: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
    .ascii  "a=%d; b=%d; c=%d\000"
main:
; пролог функции:
    lui     $28,%hi(__gnu_local_gp)
    addiu   $sp,$sp,-32
    addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
    sw      $31,28($sp)
; загрузить адрес printf():
    lw      $25,%call16 printf($28)
; загрузить адрес текстовой строки и установить первый аргумент printf():
    lui     $4,%hi($LC0)
    addiu   $4,$4,%lo($LC0)
; установить второй аргумент printf():
    li      $5,1                # 0x1
; установить третий аргумент printf():
    li      $6,2                # 0x2
; вызов printf():
    jalr    $25
; установить четвертый аргумент printf() (branch delay slot):
    li      $7,3                # 0x3

; эпилог функции:
    lw      $31,28($sp)
; установить возвращаемое значение в 0:
    move    $2,$0
; возврат
    j       $31
    addiu   $sp,$sp,32 ; branch delay slot
```

Листинг 1.55: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:00000000 main:
.text:00000000
.text:00000000 var_10          = -0x10
.text:00000000 var_4          = -4
.text:00000000
; пролог функции:
.text:00000000                lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
.text:00000004                addiu   $sp, -0x20
.text:00000008                la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
.text:0000000C                sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000010                sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; загрузить адрес printf():
.text:00000014                lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
; загрузить адрес текстовой строки и установить первый аргумент printf():
.text:00000018                la      $a0, $LC0          # "a=%d; b=%d; c=%d"
; установить второй аргумент printf():
.text:00000020                li      $a1, 1
; установить третий аргумент printf():
.text:00000024                li      $a2, 2
; вызов printf():
.text:00000028                jalr    $t9
; установить четвертый аргумент printf() (branch delay slot):
.text:0000002C                li      $a3, 3
; эпилог функции:
.text:00000030                lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
; установить возвращаемое значение в 0:
.text:00000034          move    $v0, $zero
; возврат
.text:00000038          jr      $ra
.text:0000003C          addiu   $sp, 0x20 ; branch delay slot
```

IDA объединила пару инструкций LUI и ADDIU в одну псевдоинструкцию LA. Вот почему здесь нет инструкции по адресу 0x1C: потому что LA занимает 8 байт.

Неоптимизирующий GCC 4.4.5

Неоптимизирующий GCC более многословен:

Листинг 1.56: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
    .ascii "a=%d; b=%d; c=%d\000"
main:
; пролог функции:
    addiu   $sp,$sp,-32
    sw      $31,28($sp)
    sw      $fp,24($sp)
    move    $fp,$sp
    lui     $28,%hi(__gnu_local_gp)
    addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
; загрузить адрес текстовой строки:
    lui     $2,%hi($LC0)
    addiu   $2,$2,%lo($LC0)
; установить первый аргумент printf():
    move    $4,$2
; установить второй аргумент printf():
    li      $5,1          # 0x1
; установить третий аргумент printf():
    li      $6,2          # 0x2
; установить четвертый аргумент printf():
    li      $7,3          # 0x3
; получить адрес printf():
    lw      $2,%call16(printf)($28)
    nop
; вызов printf():
    move    $25,$2
    jalr    $25
    nop
; эпилог функции:
    lw      $28,16($fp)
; установить возвращаемое значение в 0:
    move    $2,$0
    move    $sp,$fp
    lw      $31,28($sp)
    lw      $fp,24($sp)
    addiu   $sp,$sp,32
; возврат
    j       $31
    nop
```

Листинг 1.57: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:00000000 main:
.text:00000000
.text:00000000 var_10      = -0x10
.text:00000000 var_8       = -8
.text:00000000 var_4       = -4
.text:00000000
; пролог функции:
.text:00000000          addiu   $sp, -0x20
.text:00000004          sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000008          sw      $fp, 0x20+var_8($sp)
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
.text:0000000C      move    $fp, $sp
.text:00000010      la      $gp, __gnu_local_gp
.text:00000018      sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; загрузить адрес текстовой строки:
.text:0000001C      la      $v0, aADBDCD      # "a=%d; b=%d; c=%d"
; установить первый аргумент printf():
.text:00000024      move    $a0, $v0
; установить второй аргумент printf():
.text:00000028      li      $a1, 1
; установить третий аргумент printf():
.text:0000002C      li      $a2, 2
; установить четвертый аргумент printf():
.text:00000030      li      $a3, 3
; получить адрес printf():
.text:00000034      lw      $v0, (printf & 0xFFFF)($gp)
.text:00000038      or      $at, $zero
; вызов printf():
.text:0000003C      move    $t9, $v0
.text:00000040      jalr    $t9
.text:00000044      or      $at, $zero ; NOP
; эпилог функции:
.text:00000048      lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
; установить возвращаемое значение в 0:
.text:0000004C      move    $v0, $zero
.text:00000050      move    $sp, $fp
.text:00000054      lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000058      lw      $fp, 0x20+var_8($sp)
.text:0000005C      addiu   $sp, 0x20
; возврат
.text:00000060      jr      $ra
.text:00000064      or      $at, $zero ; NOP
```

8 аргументов

Снова воспользуемся примером с 9-ю аргументами из предыдущей секции: [1.8.1](#) (стр. 50).

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf("a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n", 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8);
    return 0;
};
```

Оптимизирующий GCC 4.4.5

Только 4 первых аргумента передаются в регистрах \$A0 ...\$A3, так что остальные передаются через стек.

Это соглашение о вызовах O32 (самое популярное в мире MIPS). Другие соглашения о вызовах (например N32) могут наделять регистры другими функциями.

SW означает «Store Word» (записать слово из регистра в память). В MIPS нет инструкции для записи значения в память, так что для этого используется пара инструкций (LI/SW).

Листинг 1.58: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
    .ascii "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\012\000"
main:
; пролог функции:
    lui    $28,%hi(__gnu_local_gp)
    addiu   $sp,$sp,-56
    addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
    sw      $31,52($sp)
; передать 5-й аргумент в стеке:
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```

        li      $2,4                # 0x4
        sw      $2,16($sp)
; передать 6-й аргумент в стеке:
        li      $2,5                # 0x5
        sw      $2,20($sp)
; передать 7-й аргумент в стеке:
        li      $2,6                # 0x6
        sw      $2,24($sp)
; передать 8-й аргумент в стеке:
        li      $2,7                # 0x7
        lw      $25,%call16(sprintf)($28)
        sw      $2,28($sp)
; передать 1-й аргумент в $a0:
        lui     $4,%hi($LC0)
; передать 9-й аргумент в стеке:
        li      $2,8                # 0x8
        sw      $2,32($sp)
        addiu   $4,$4,%lo($LC0)
; передать 2-й аргумент в $a1:
        li      $5,1                # 0x1
; передать 3-й аргумент в $a2:
        li      $6,2                # 0x2
; вызов printf():
        jalr    $25
; передать 4-й аргумент в $a3 (branch delay slot):
        li      $7,3                # 0x3

; эпилог функции:
        lw      $31,52($sp)
; установить возвращаемое значение в 0:
        move    $2,$0
; возврат
        j       $31
        addiu   $sp,$sp,56 ; branch delay slot

```

Листинг 1.59: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

.text:00000000 main:
.text:00000000
.text:00000000 var_28                = -0x28
.text:00000000 var_24                = -0x24
.text:00000000 var_20                = -0x20
.text:00000000 var_1C                = -0x1C
.text:00000000 var_18                = -0x18
.text:00000000 var_10                = -0x10
.text:00000000 var_4                 = -4
.text:00000000
; пролог функции:
.text:00000000                lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
.text:00000004                addiu   $sp, -0x38
.text:00000008                la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
.text:0000000C                sw      $ra, 0x38+var_4($sp)
.text:00000010                sw      $gp, 0x38+var_10($sp)
; передать 5-й аргумент в стеке:
.text:00000014                li      $v0, 4
.text:00000018                sw      $v0, 0x38+var_28($sp)
; передать 6-й аргумент в стеке:
.text:0000001C                li      $v0, 5
.text:00000020                sw      $v0, 0x38+var_24($sp)
; передать 7-й аргумент в стеке:
.text:00000024                li      $v0, 6
.text:00000028                sw      $v0, 0x38+var_20($sp)
; передать 8-й аргумент в стеке:
.text:0000002C                li      $v0, 7
.text:00000030                lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
.text:00000034                sw      $v0, 0x38+var_1C($sp)
; готовить 1-й аргумент в $a0:
.text:00000038                lui     $a0, ($LC0 >> 16) # "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d\
        ↵ ; g=%"...
; передать 9-й аргумент в стеке:

```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
.text:0000003C      li      $v0, 8
.text:00000040      sw      $v0, 0x38+var_18($sp)
; передать 1-й аргумент в $a0:
.text:00000044      la      $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"
; передать 2-й аргумент в $a1:
.text:00000048      li      $a1, 1
; передать 3-й аргумент в $a2:
.text:0000004C      li      $a2, 2
; вызов printf():
.text:00000050      jalr     $t9
; передать 4-й аргумент в $a3 (branch delay slot):
.text:00000054      li      $a3, 3
; эпилог функции:
.text:00000058      lw      $ra, 0x38+var_4($sp)
; установить возвращаемое значение в 0:
.text:0000005C      move    $v0, $zero
; возврат
.text:00000060      jr      $ra
.text:00000064      addiu   $sp, 0x38 ; branch delay slot
```

Неоптимизирующий GCC 4.4.5

Неоптимизирующий GCC более многословен:

Листинг 1.60: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
.ascii "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d\n"
main:
; пролог функции:
    addiu   $sp,$sp,-56
    sw      $31,52($sp)
    sw      $fp,48($sp)
    move    $fp,$sp
    lui     $28,%hi(__gnu_local_gp)
    addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
    lui     $2,%hi($LC0)
    addiu   $2,$2,%lo($LC0)
; передать 5-й аргумент в стеке:
    li      $3,4          # 0x4
    sw      $3,16($sp)
; передать 6-й аргумент в стеке:
    li      $3,5          # 0x5
    sw      $3,20($sp)
; передать 7-й аргумент в стеке:
    li      $3,6          # 0x6
    sw      $3,24($sp)
; передать 8-й аргумент в стеке:
    li      $3,7          # 0x7
    sw      $3,28($sp)
; передать 9-й аргумент в стеке:
    li      $3,8          # 0x8
    sw      $3,32($sp)
; передать 1-й аргумент в $a0:
    move    $4,$2
; передать 2-й аргумент в $a1:
    li      $5,1          # 0x1
; передать 3-й аргумент в $a2:
    li      $6,2          # 0x2
; передать 4-й аргумент в $a3:
    li      $7,3          # 0x3
; вызов printf():
    lw      $2,%call16(printf)($28)
    nop
    move    $25,$2
    jalr    $25
    nop
```


1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

```
; эпилог функции:
    lw      $28,40($fp)
; установить возвращаемое значение в 0:
    move    $2,$0
    move    $sp,$fp
    lw      $31,52($sp)
    lw      $fp,48($sp)
    addiu   $sp,$sp,56
; возврат
    j       $31
    nop
```

Листинг 1.61: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:00000000 main:
.text:00000000
.text:00000000 var_28          = -0x28
.text:00000000 var_24          = -0x24
.text:00000000 var_20          = -0x20
.text:00000000 var_1C          = -0x1C
.text:00000000 var_18          = -0x18
.text:00000000 var_10          = -0x10
.text:00000000 var_8           = -8
.text:00000000 var_4           = -4
.text:00000000
; пролог функции:
.text:00000000                addiu   $sp, -0x38
.text:00000004                sw      $ra, 0x38+var_4($sp)
.text:00000008                sw      $fp, 0x38+var_8($sp)
.text:0000000C                move    $fp, $sp
.text:00000010                la      $gp, __gnu_local_gp
.text:00000018                sw      $gp, 0x38+var_10($sp)
.text:0000001C                la      $v0, aADBDCDDDEDFDGD # "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d; e=%d; f=%d; g=%d; h=%d; i=%d; j=%d; k=%d; l=%d; m=%d; n=%d; o=%d; p=%d; q=%d; r=%d; s=%d; t=%d; u=%d; v=%d; w=%d; x=%d; y=%d; z=%d; \n"
; передать 5-й аргумент в стеке:
.text:00000024                li      $v1, 4
.text:00000028                sw      $v1, 0x38+var_28($sp)
; передать 6-й аргумент в стеке:
.text:0000002C                li      $v1, 5
.text:00000030                sw      $v1, 0x38+var_24($sp)
; передать 7-й аргумент в стеке:
.text:00000034                li      $v1, 6
.text:00000038                sw      $v1, 0x38+var_20($sp)
; передать 8-й аргумент в стеке:
.text:0000003C                li      $v1, 7
.text:00000040                sw      $v1, 0x38+var_1C($sp)
; передать 9-й аргумент в стеке:
.text:00000044                li      $v1, 8
.text:00000048                sw      $v1, 0x38+var_18($sp)
; передать 1-й аргумент в $a0:
.text:0000004C                move    $a0, $v0
; передать 2-й аргумент в $a1:
.text:00000050                li      $a1, 1
; передать 3-й аргумент в $a2:
.text:00000054                li      $a2, 2
; передать 4-й аргумент в $a3:
.text:00000058                li      $a3, 3
; вызов printf():
.text:0000005C                lw      $v0, (printf & 0xFFFF)($gp)
.text:00000060                or      $at, $zero
.text:00000064                move    $t9, $v0
.text:00000068                jalr   $t9
.text:0000006C                or      $at, $zero ; NOP
; эпилог функции:
.text:00000070                lw      $gp, 0x38+var_10($fp)
; установить возвращаемое значение в 0:
.text:00000074                move    $v0, $zero
.text:00000078                move    $sp, $fp
.text:0000007C                lw      $ra, 0x38+var_4($sp)
.text:00000080                lw      $fp, 0x38+var_8($sp)
```

1.8. PRINTF() С НЕСКОЛЬКИМИ АРГУМЕНТАМИ

.text:00000084	addiu	\$sp, 0x38
; возврат		
.text:00000088	jr	\$ra
.text:0000008C	or	\$at, \$zero ; NOP

1.8.4. Вывод

Вот примерный скелет вызова функции:

Листинг 1.62: x86

...
PUSH третий аргумент
PUSH второй аргумент
PUSH первый аргумент
CALL функция
; модифицировать указатель стека (если нужно)

Листинг 1.63: x64 (MSVC)

MOV RCX, первый аргумент
MOV RDX, второй аргумент
MOV R8, третий аргумент
MOV R9, 4-й аргумент
...
PUSH 5-й, 6-й аргумент, и т.д. (если нужно)
CALL функция
; модифицировать указатель стека (если нужно)

Листинг 1.64: x64 (GCC)

MOV RDI, первый аргумент
MOV RSI, второй аргумент
MOV RDX, третий аргумент
MOV RCX, 4-й аргумент
MOV R8, 5-й аргумент
MOV R9, 6-й аргумент
...
PUSH 7-й, 8-й аргумент, и т.д. (если нужно)
CALL функция
; модифицировать указатель стека (если нужно)

Листинг 1.65: ARM

MOV R0, первый аргумент
MOV R1, второй аргумент
MOV R2, третий аргумент
MOV R3, 4-й аргумент
; передать 5-й, 6-й аргумент, и т.д., в стеке (если нужно)
BL функция
; модифицировать указатель стека (если нужно)

Листинг 1.66: ARM64

MOV X0, первый аргумент
MOV X1, второй аргумент
MOV X2, третий аргумент
MOV X3, 4-й аргумент
MOV X4, 5-й аргумент
MOV X5, 6-й аргумент
MOV X6, 7-й аргумент
MOV X7, 8-й аргумент
; передать 9-й, 10-й аргумент, и т.д., в стеке (если нужно)
BL функция
; модифицировать указатель стека (если нужно)

```

LI $4, первый аргумент ; АКА $A0
LI $5, второй аргумент ; АКА $A1
LI $6, третий аргумент ; АКА $A2
LI $7, 4-й аргумент ; АКА $A3
; передать 5-й, 6-й аргумент, и т.д., в стеке (если нужно)
LW temp_reg, адрес функции
JALR temp_reg

```

1.8.5. Кстати

Кстати, разница между способом передачи параметров принятая в x86, x64, fastcall, ARM и MIPS неплохо иллюстрирует тот важный момент, что процессору, в общем, всё равно, как будут передаваться параметры функций. Можно создать гипотетический компилятор, который будет передавать их при помощи указателя на структуру с параметрами, не пользуясь стеком вообще.

Регистры \$A0...\$A3 в MIPS так названы только для удобства (это соглашение о вызовах O32). Программисты могут использовать любые другие регистры (может быть, только кроме \$ZERO) для передачи данных или любое другое соглашение о вызовах.

[CPU](#) не знает о соглашениях о вызовах вообще.

Можно также вспомнить, что начинающие программисты на ассемблере передают параметры в другие функции обычно через регистры, без всякого явного порядка, или даже через глобальные переменные. И всё это нормально работает.

1.9. scanf()

Теперь попробуем использовать `scanf()`.

1.9.1. Простой пример

```

#include <stdio.h>

int main()
{
    int x;
    printf ("Enter X:\n");

    scanf ("%d", &x);

    printf ("You entered %d...\n", x);

    return 0;
};

```

Использовать `scanf()` в наши времена для того, чтобы спросить у пользователя что-то — не самая хорошая идея. Но так мы проиллюстрируем передачу указателя на переменную типа `int`.

Об указателях

Это одна из фундаментальных вещей в программировании. Часто большой массив, структуру или объект передавать в другую функцию путем копирования данных невыгодно, а передать адрес массива, структуры или объекта куда проще. Например, если вы собираетесь вывести в консоль текстовую строку, достаточно только передать её адрес в ядро [OC](#).

К тому же, если вызываемая функция ([callee](#)) должна изменить что-то в этом большом массиве или структуре, то возвращать её полностью так же абсурдно. Так что самое простое, что можно сделать, это передать в функцию [callee](#) адрес массива или структуры, и пусть [callee](#) что-то там изменит.

1.9. SCANF()

Указатель в Си/Си++ — это просто адрес какого-либо места в памяти.

В x86 адрес представляется в виде 32-битного числа (т.е. занимает 4 байта), а в x86-64 как 64-битное число (занимает 8 байт). Кстати, отсюда негодование некоторых людей, связанное с переходом на x86-64 — на этой архитектуре все указатели занимают в 2 раза больше места, в том числе и в “дорогой” кэш-памяти.

При некотором упорстве можно работать только с безтиповыми указателями (`void*`), например, стандартная функция `memcpy()`, копирующая блок из одного места памяти в другое принимает на вход 2 указателя типа `void*`, потому что нельзя заранее предугадать, какого типа блок вы собираетесь копировать. Для копирования тип данных не важен, важен только размер блока.

Также указатели широко используются, когда функции нужно вернуть более одного значения (мы ещё вернемся к этому в будущем (3.20 (стр. 588))).

Функция `scanf()` — это как раз такой случай.

Помимо того, что этой функции нужно показать, сколько значений было прочитано успешно, ей ещё и нужно вернуть сами значения.

Тип указателя в Си/Си++ нужен только для проверки типов на стадии компиляции.

Внутри, в скомпилированном коде, никакой информации о типах указателей нет вообще.

x86

MSVC

Что получаем на ассемблере, компилируя в MSVC 2010:

```
CONST    SEGMENT
$SG3831  DB    'Enter X:', 0aH, 00H
$SG3832  DB    '%d', 00H
$SG3833  DB    'You entered %d...', 0aH, 00H
CONST    ENDS
PUBLIC   _main
EXTRN   _scanf:PROC
EXTRN   _printf:PROC
; Function compile flags: /Odtp
_TEXT    SEGMENT
_x$ = -4                                ; size = 4
_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    push    OFFSET $SG3831 ; 'Enter X:'
    call    _printf
    add     esp, 4
    lea     eax, DWORD PTR _x$[ebp]
    push    eax
    push    OFFSET $SG3832 ; '%d'
    call    _scanf
    add     esp, 8
    mov     ecx, DWORD PTR _x$[ebp]
    push    ecx
    push    OFFSET $SG3833 ; 'You entered %d...'
    call    _printf
    add     esp, 8

    ; возврат 0
    xor     eax, eax
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
_TEXT     ENDS
```

Переменная `x` является локальной.

1.9. SCANF()

По стандарту Си/Си++ она доступна только из этой же функции и нигде более. Так получилось, что локальные переменные располагаются в стеке. Может быть, можно было бы использовать и другие варианты, но в x86 это традиционно так.

Следующая после пролога инструкция PUSH ECX не ставит своей целью сохранить значение регистра ECX. (Заметьте отсутствие соответствующей инструкции POP ECX в конце функции).

Она на самом деле выделяет в стеке 4 байта для хранения *x* в будущем.

Доступ к *x* будет осуществляться при помощи объявленного макроса `_x$` (он равен -4) и регистра EBP указывающего на текущий фрейм.

Во всё время исполнения функции EBP указывает на текущий **фрейм** и через EBP+смещение можно получить доступ как к локальным переменным функции, так и аргументам функции.

Можно было бы использовать ESP, но он во время исполнения функции часто меняется, а это не удобно. Так что можно сказать, что EBP это *замороженное состояние* ESP на момент начала исполнения функции.

Разметка типичного стекового **фрейма** в 32-битной среде:

...	...
EBP-8	локальная переменная #2, маркируется в IDA как var_8
EBP-4	локальная переменная #1, маркируется в IDA как var_4
EBP	сохраненное значение EBP
EBP+4	адрес возврата
EBP+8	аргумент#1, маркируется в IDA как arg_0
EBP+0xC	аргумент#2, маркируется в IDA как arg_4
EBP+0x10	аргумент#3, маркируется в IDA как arg_8
...	...

У функции `scanf()` в нашем примере два аргумента.

Первый — указатель на строку, содержащую `%d` и второй — адрес переменной *x*.

Вначале адрес *x* помещается в регистр EAX при помощи инструкции `lea eax, DWORD PTR _x$[ebp]`.

Инструкция LEA означает *load effective address*, и часто используется для формирования адреса чего-либо ([1.6](#) (стр. 1003)).

Можно сказать, что в данном случае LEA просто помещает в EAX результат суммы значения в регистре EBP и макроса `_x$`.

Это тоже что и `lea eax, [ebp-4]`.

Итак, от значения EBP отнимается 4 и помещается в EAX. Далее значение EAX заталкивается в стек и вызывается `scanf()`.

После этого вызывается `printf()`. Первый аргумент вызова строка: `You entered %d...\n`.

Второй аргумент: `mov ecx, [ebp-4]`. Эта инструкция помещает в ECX не адрес переменной *x*, а её значение.

Далее значение ECX заталкивается в стек и вызывается `printf()`.

Попробуем этот же пример в OllyDbg. Загружаем, нажимаем F8 (сделать шаг, не входя в функцию) до тех пор, пока не окажемся в своем исполняемом файле, а не в ntdll.dll. Прокручиваем вверх до тех пор, пока не найдем main(). Щелкаем на первой инструкции (PUSH EBP), нажимаем F2 (set a breakpoint), затем F9 (Run) и точка останова срабатывает на начале main().

Трассируем до того места, где готовится адрес переменной x:

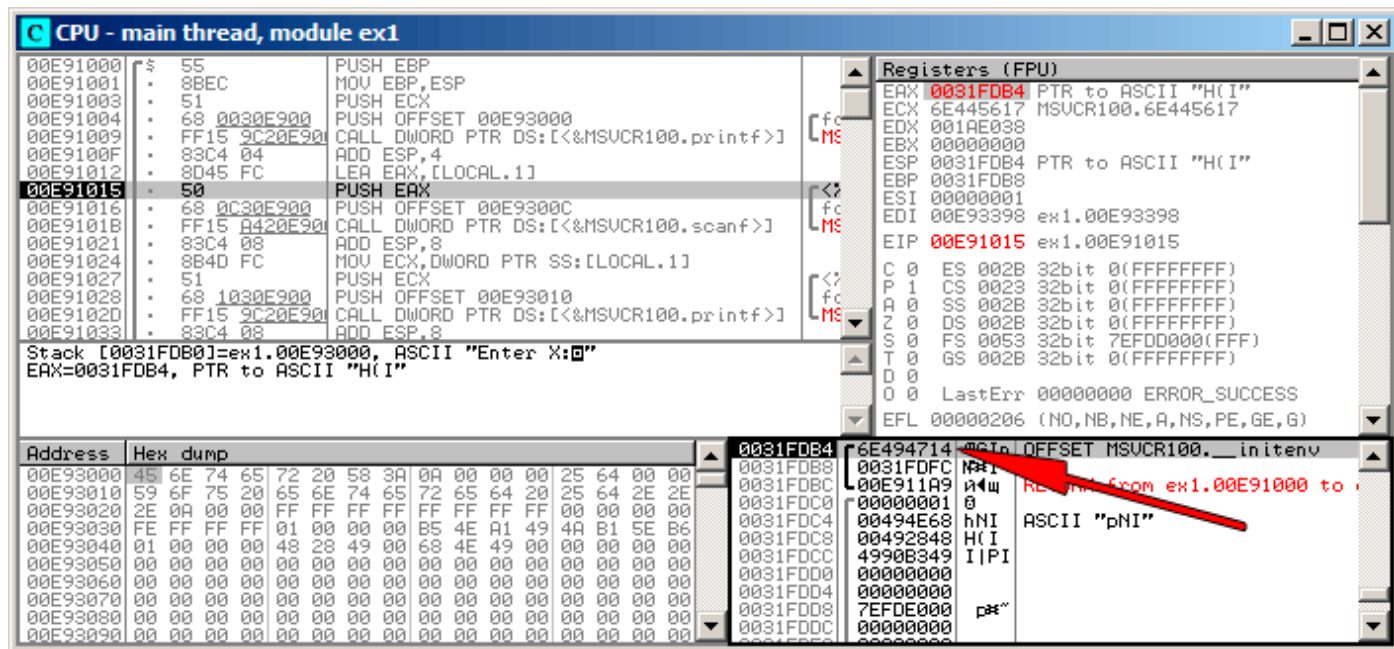


Рис. 1.12: OllyDbg: вычисляется адрес локальной переменной

На EAX в окне регистров можно нажать правой кнопкой и далее выбрать «Follow in stack». Этот адрес покажется в окне стека.

Смотрите, это переменная в локальном стеке. Там дорисована красная стрелка. И там сейчас какой-то мусор (0x6E494714). Адрес этого элемента стека сейчас, при помощи PUSH запишется в этот же стек рядом. Трассируем при помощи F8 вплоть до конца исполнения scanf(). А пока scanf() выполняется, в консольном окне, вводим, например, 123:

```
Enter X:
123
```

1.9. SCANF()

Вот тут scanf() отработал:

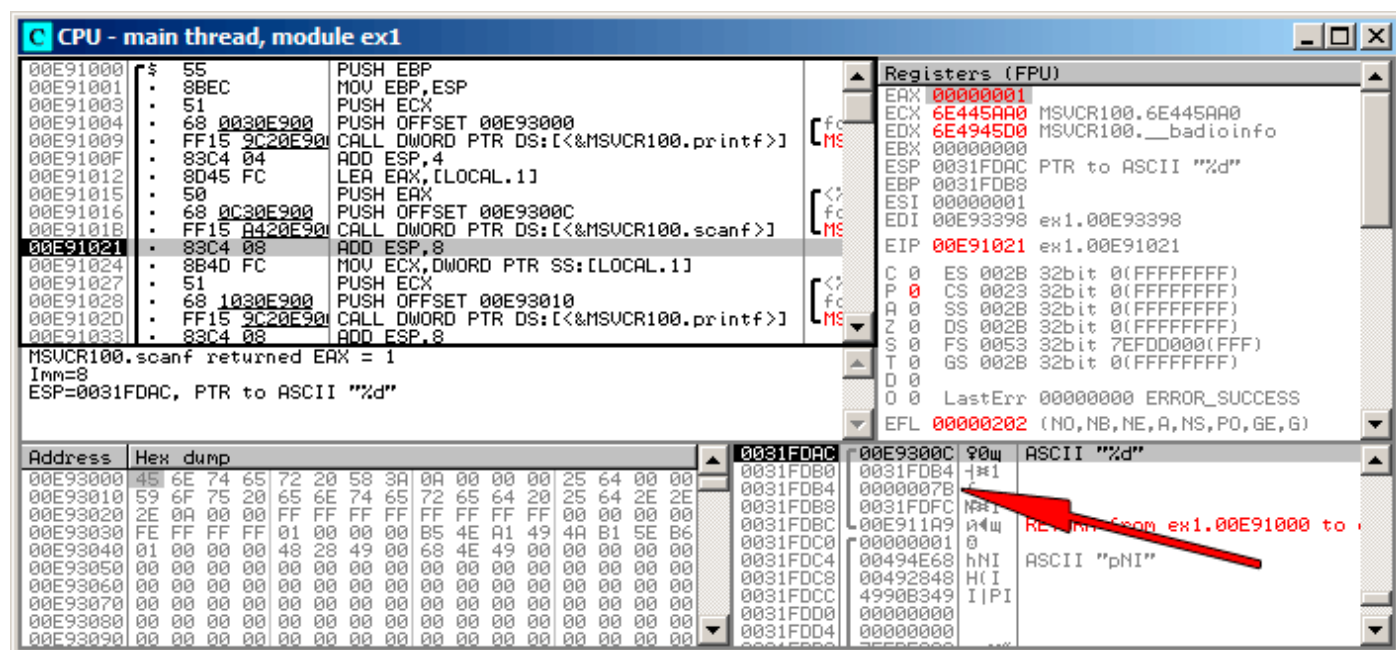


Рис. 1.13: OllyDbg: scanf() исполнилась

scanf() вернул 1 в EAX, что означает, что он успешно прочитал одно значение. В наблюдаемом нами элементе стека теперь 0x7B (123).

1.9. SCANF()

Чуть позже это значение копируется из стека в регистр ECX и передается в printf():

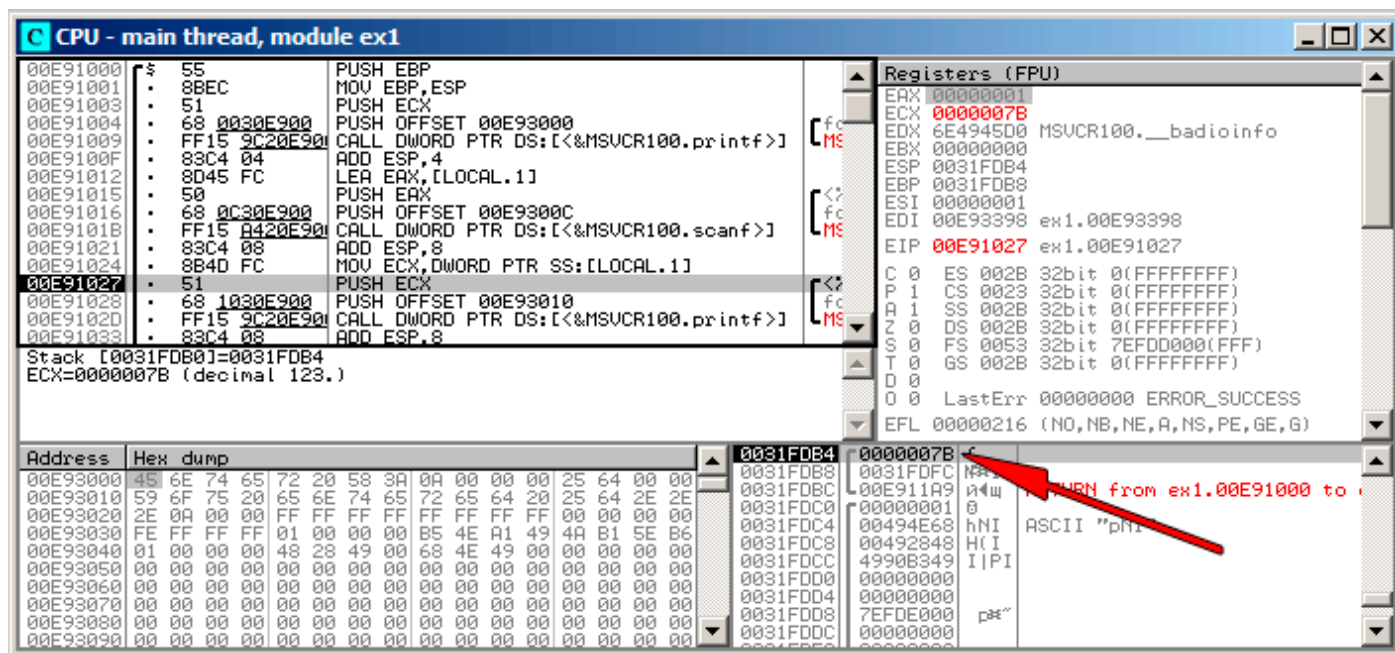


Рис. 1.14: OllyDbg: готовим значение для передачи в printf()

GCC

Попробуем тоже самое скомпилировать в Linux при помощи GCC 4.4.1:

```
main      proc near
var_20    = dword ptr -20h
var_1C    = dword ptr -1Ch
var_4     = dword ptr -4

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, 0FFFFFFF0h
    sub     esp, 20h
    mov     [esp+20h+var_20], offset aEnterX ; "Enter X:"
    call    _puts
    mov     eax, offset aD ; "%d"
    lea     edx, [esp+20h+var_4]
    mov     [esp+20h+var_1C], edx
    mov     [esp+20h+var_20], eax
    call    __isoc99_scanf
    mov     edx, [esp+20h+var_4]
    mov     eax, offset aYouEnteredD__ ; "You entered %d...\n"
    mov     [esp+20h+var_1C], edx
    mov     [esp+20h+var_20], eax
    call    _printf
    mov     eax, 0
    leave
    retn
main      endp
```

GCC заменил первый вызов printf() на puts(). Почему это было сделано, уже было описано ранее (1.5.4 (стр. 21)).

Далее всё как и прежде — параметры заталкиваются через стек при помощи MOV.

Кстати

1.9. scanf()

Этот простой пример иллюстрирует то обстоятельство, что компилятор преобразует список выражений в Си/Си++-блоке просто в последовательный набор инструкций. Между выражениями в Си/Си++ ничего нет, и в итоговом машинном коде между ними тоже ничего нет, управление переходит от одной инструкции к следующей за ней.

x64

Всё то же самое, только используются регистры вместо стека для передачи аргументов функций.

MSVC

Листинг 1.68: MSVC 2012 x64

```
_DATA    SEGMENT
$SG1289 DB      'Enter X:', 0aH, 00H
$SG1291 DB      '%d', 00H
$SG1292 DB      'You entered %d...', 0aH, 00H
_DATA    ENDS

_TEXT    SEGMENT
x$ = 32
main     PROC
$LN3:
    sub     rsp, 56
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG1289 ; 'Enter X:'
    call    printf
    lea     rdx, QWORD PTR x$[rsp]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG1291 ; '%d'
    call    scanf
    mov     edx, DWORD PTR x$[rsp]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG1292 ; 'You entered %d...'
    call    printf

    ; возврат 0
    xor     eax, eax
    add     rsp, 56
    ret     0
main     ENDP
_TEXT    ENDS
```

GCC

Листинг 1.69: Оптимизирующий GCC 4.4.6 x64

```
.LC0:
.string "Enter X:"
.LC1:
.string "%d"
.LC2:
.string "You entered %d...\n"

main:
    sub     rsp, 24
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC0 ; "Enter X:"
    call    puts
    lea     rsi, [rsp+12]
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC1 ; "%d"
    xor     eax, eax
    call    __isoc99_scanf
    mov     esi, DWORD PTR [rsp+12]
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC2 ; "You entered %d...\n"
    xor     eax, eax
    call    printf
```

1.9. scanf()

```
; возврат 0
xor     eax, eax
add     rsp, 24
ret
```

ARM

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
.text:00000042      scanf_main
.text:00000042
.text:00000042      var_8          = -8
.text:00000042
.text:00000042 08 B5      PUSH    {R3,LR}
.text:00000044 A9 A0      ADR     R0, aEnterX ; "Enter X:\n"
.text:00000046 06 F0 D3 F8 BL      __2printf
.text:0000004A 69 46      MOV     R1, SP
.text:0000004C AA A0      ADR     R0, aD ; "%d"
.text:0000004E 06 F0 CD F8 BL      __0scanf
.text:00000052 00 99      LDR     R1, [SP,#8+var_8]
.text:00000054 A9 A0      ADR     R0, aYouEnteredD___ ; "You entered %d...\n"
.text:00000056 06 F0 CB F8 BL      __2printf
.text:0000005A 00 20      MOVS    R0, #0
.text:0000005C 08 BD      POP     {R3,PC}
```

Чтобы `scanf()` мог вернуть значение, ему нужно передать указатель на переменную типа *int*. *int* — 32-битное значение, для его хранения нужно только 4 байта, и оно помещается в 32-битный регистр.

Место для локальной переменной *x* выделяется в стеке, IDA наименовала её *var_8*. Впрочем, место для неё выделять не обязательно, т.к. [указатель стека SP](#) уже указывает на место, свободное для использования. Так что значение указателя [SP](#) копируется в регистр R1, и вместе с *format*-строкой, передается в `scanf()`.

Позже, при помощи инструкции LDR, это значение перемещается из стека в регистр R1, чтобы быть переданным в `printf()`.

ARM64

Листинг 1.70: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
1 .LC0:
2     .string "Enter X:"
3 .LC1:
4     .string "%d"
5 .LC2:
6     .string "You entered %d...\n"
7 scanf_main:
8 ; вычесть 32 из SP, затем сохранить FP и LR в стековом фрейме:
9     stp     x29, x30, [sp, -32]!
10 ; установить стековый фрейм (FP=SP)
11     add     x29, sp, 0
12 ; загрузить указатель на строку "Enter X:"
13     adrp    x0, .LC0
14     add     x0, x0, :lo12:LC0
15 ; X0=указатель на строку "Enter X:"
16 ; вывести её:
17     bl      puts
18 ; загрузить указатель на строку "%d":
19     adrp    x0, .LC1
20     add     x0, x0, :lo12:LC1
21 ; найти место в стековом фрейме для переменной "x" (X1=FP+28):
22     add     x1, x29, 28
23 ; X1=адрес переменной "x"
24 ; передать адрес в scanf() и вызвать её:
```

1.9. SCANF()

```
25      bl      __isoc99_scanf
26 ; загрузить 2-битное значение из переменной в стековом фрейме:
27      ldr     w1, [x29,28]
28 ; W1=x
29 ; загрузить указатель на строку "You entered %d...\n"
30 ; printf() возьмет текстовую строку из X0 и переменную "x" из X1 (или W1)
31      adrp    x0, .LC2
32      add     x0, x0, :lo12:.LC2
33      bl      printf
34 ; возврат 0
35      mov     w0, 0
36 ; восстановить FP и LR, затем прибавить 32 к SP:
37      ldp     x29, x30, [sp], 32
38      ret
```

Под стековый фрейм выделяется 32 байта, что больше чем нужно. Может быть, это связано с выравниваем по границе памяти? Самая интересная часть — это поиск места под переменную *x* в стековом фрейме (строка 22). Почему 28? Почему-то, компилятор решил расположить эту переменную в конце стекового фрейма, а не в начале. Адрес потом передается в `scanf()`, которая просто сохраняет значение, введенное пользователем, в памяти по этому адресу. Это 32-битное значение типа *int*. Значение загружается в строке 27 и затем передается в `printf()`.

MIPS

Для переменной *x* выделено место в стеке, и к нему будут производиться обращения как $\$sp + 24$.

Её адрес передается в `scanf()`, а значение прочитанное от пользователя загружается используя инструкцию LW («Load Word» — загрузить слово) и затем оно передается в `printf()`.

Листинг 1.71: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
    .ascii  "Enter X:\000"
$LC1:
    .ascii  "%d\000"
$LC2:
    .ascii  "You entered %d...\012\000"
main:
; пролог функции:
    lui     $28,%hi(__gnu_local_gp)
    addiu   $sp,$sp,-40
    addiu   $28,$28,%lo(__gnu_local_gp)
    sw      $31,36($sp)
; вызов puts():
    lw      $25,%call16(puts)($28)
    lui     $4,%hi($LC0)
    jalr    $25
    addiu   $4,$4,%lo($LC0) ; branch delay slot
; вызов scanf():
    lw      $28,16($sp)
    lui     $4,%hi($LC1)
    lw      $25,%call16(__isoc99_scanf)($28)
; установить второй аргумент для scanf(), $a1=$sp+24:
    addiu   $5,$sp,24
    jalr    $25
    addiu   $4,$4,%lo($LC1) ; branch delay slot

; вызов printf():
    lw      $28,16($sp)
; установить второй аргумент для printf(),
; загрузить слово по адресу $sp+24:
    lw      $5,24($sp)
    lw      $25,%call16(printf)($28)
    lui     $4,%hi($LC2)
    jalr    $25
    addiu   $4,$4,%lo($LC2) ; branch delay slot

; эпилог функции:
    lw      $31,36($sp)
```

1.9. SCANF()

```
; установить возвращаемое значение в 0:
    move    $2,$0
; возврат:
    j       $31
    addiu   $sp,$sp,40      ; branch delay slot
```

IDA показывает разметку стека следующим образом:

Листинг 1.72: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:00000000 main:
.text:00000000
.text:00000000 var_18    = -0x18
.text:00000000 var_10    = -0x10
.text:00000000 var_4     = -4
.text:00000000
; пролог функции:
.text:00000000          lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
.text:00000004          addiu   $sp, -0x28
.text:00000008          la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
.text:0000000C          sw      $ra, 0x28+var_4($sp)
.text:00000010          sw      $gp, 0x28+var_18($sp)
; вызов puts():
.text:00000014          lw      $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:00000018          lui     $a0, ($LC0 >> 16) # "Enter X:"
.text:0000001C          jalr    $t9
.text:00000020          la      $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "Enter X:" ; branch delay slot
; вызов scanf():
.text:00000024          lw      $gp, 0x28+var_18($sp)
.text:00000028          lui     $a0, ($LC1 >> 16) # "%d"
.text:0000002C          lw      $t9, (__isoc99_scanf & 0xFFFF)($gp)
; установить второй аргумент для scanf(), $a1=$sp+24:
.text:00000030          addiu   $a1, $sp, 0x28+var_10
.text:00000034          jalr    $t9 ; branch delay slot
.text:00000038          la      $a0, ($LC1 & 0xFFFF) # "%d"
; вызов printf():
.text:0000003C          lw      $gp, 0x28+var_18($sp)
; установить второй аргумент для printf(),
; загрузить слово по адресу $sp+24:
.text:00000040          lw      $a1, 0x28+var_10($sp)
.text:00000044          lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
.text:00000048          lui     $a0, ($LC2 >> 16) # "You entered %d...\n"
.text:0000004C          jalr    $t9
.text:00000050          la      $a0, ($LC2 & 0xFFFF) # "You entered %d...\n" ; branch delay slot
; эпилог функции:
.text:00000054          lw      $ra, 0x28+var_4($sp)
; установить возвращаемое значение в 0:
.text:00000058          move    $v0, $zero
; возврат:
.text:0000005C          jr      $ra
.text:00000060          addiu   $sp, 0x28 ; branch delay slot
```

1.9.2. Глобальные переменные

А что если переменная *x* из предыдущего примера будет глобальной переменной, а не локальной? Тогда к ней смогут обращаться из любого другого места, а не только из тела функции. Глобальные переменные считаются **анти-паттерном**, но ради примера мы можем себе это позволить.

```
#include <stdio.h>

// теперь x это глобальная переменная
int x;

int main()
{
    printf ("Enter X:\n");
```

1.9. SCANF()

```
scanf ("%d", &x);

printf ("You entered %d...\n", x);

return 0;
};
```

MSVC: x86

```
_DATA    SEGMENT
_COMM    _x:DWORD
$SG2456   DB    'Enter X:', 0aH, 00H
$SG2457   DB    '%d', 00H
$SG2458   DB    'You entered %d...', 0aH, 00H
_DATA    ENDS
PUBLIC    _main
EXTRN     _scanf:PROC
EXTRN     _printf:PROC
; Function compile flags: /Odtp
_TEXT    SEGMENT
_main     PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    OFFSET $SG2456
    call    _printf
    add     esp, 4
    push    OFFSET _x
    push    OFFSET $SG2457
    call    _scanf
    add     esp, 8
    mov     eax, DWORD PTR _x
    push    eax
    push    OFFSET $SG2458
    call    _printf
    add     esp, 8
    xor     eax, eax
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
_TEXT     ENDS
```

В целом ничего особенного. Теперь `x` объявлена в сегменте `_DATA`. Память для неё в стеке более не выделяется. Все обращения к ней происходит не через стек, а уже напрямую. Неинициализированные глобальные переменные не занимают места в исполняемом файле (и действительно, зачем в исполняемом файле нужно выделять место под изначально нулевые переменные?), но тогда, когда к этому месту в памяти кто-то обратится, [OC](#) подставит туда блок, состоящий из нулей⁷⁰.

Попробуем изменить объявление этой переменной:

```
int x=10; // значение по умолчанию
```

Выйдет в итоге:

```
_DATA    SEGMENT
_x        DD      0aH

...
```

Здесь уже по месту этой переменной записано `0xA` с типом `DD` (dword = 32 бита).

Если вы откроете скомпилированный `.exe`-файл в [IDA](#), то увидите, что `x` находится в начале сегмента `_DATA`, после этой переменной будут текстовые строки.

А вот если вы откроете в [IDA.exe](#) скомпилированный в прошлом примере, где значение `x` не определено, то вы увидите:

⁷⁰Так работает [VM](#)

Листинг 1.73: IDA

.data:0040FA80	_x	dd ?	; DATA XREF: _main+10
.data:0040FA80			; _main+22
.data:0040FA84	dword_40FA84	dd ?	; DATA XREF: _memset+1E
.data:0040FA84			; unknown_libname_1+28
.data:0040FA88	dword_40FA88	dd ?	; DATA XREF: __sbh_find_block+5
.data:0040FA88			; __sbh_free_block+2BC
.data:0040FA8C	; LPVOID lpMem		
.data:0040FA8C	lpMem	dd ?	; DATA XREF: __sbh_find_block+B
.data:0040FA8C			; __sbh_free_block+2CA
.data:0040FA90	dword_40FA90	dd ?	; DATA XREF: _V6_HeapAlloc+13
.data:0040FA90			; __calloc_impl+72
.data:0040FA94	dword_40FA94	dd ?	; DATA XREF: __sbh_free_block+2FE

_x обозначен как ?, наряду с другими переменными не требующими инициализации. Это означает, что при загрузке .exe в память, место под всё это выделено будет и будет заполнено нулевыми байтами [ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard), (2007)6.7.8p10]. Но в самом .exe ничего этого нет. Неинициализированные переменные не занимают места в исполняемых файлах. Это удобно для больших массивов, например.

Тут даже проще:

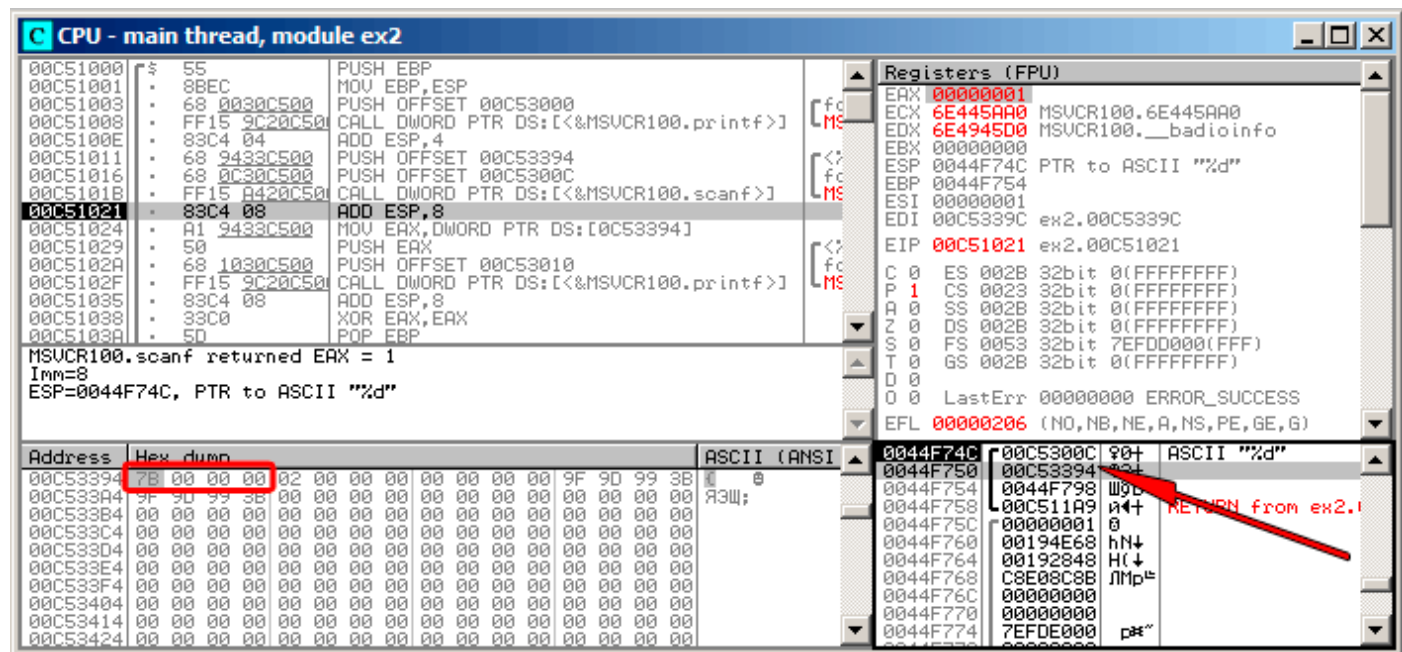


Рис. 1.15: OllyDbg: после исполнения scanf()

Переменная хранится в сегменте данных. Кстати, после исполнения инструкции PUSH (заталкивающей адрес x) адрес появится в стеке, и на этом элементе можно нажать правой кнопкой, выбрать «Follow in dump». И в окне памяти слева появится эта переменная.

После того как в консоли введем 123, здесь появится 0x7B.

Почему самый первый байт это 7B? По логике вещей, здесь должно было бы быть 00 00 00 7B. Это называется **endianness**, и в x86 принят формат *little-endian*. Это означает, что в начале записывается самый младший байт, а заканчивается самым старшим байтом. Больше об этом: 2.8 (стр. 455).

Позже из этого места в памяти 32-битное значение загружается в EAX и передается в printf().

Адрес переменной x в памяти 0x00C53394.

1.9. SCANF()

В OllyDbg мы можем посмотреть карту памяти процесса (Alt-M) и увидим, что этот адрес внутри PE-сегмента .data нашей программы:

Memory map									
Address	Size	Owner	Section	Contains	Type	Access	Initial	Mapped as	
00070000	00067000			Heap	Map	R	R	C:\Windows\System32\locale.nls	
00190000	00005000				Priv	RW	RW		
00209000	00007000				Priv	RW	Guar	Guar	
0044C000	00001000				Priv	RW	Guar	Guar	
0044D000	00003000			Stack of main thread	Priv	RW	RW		
00590000	00007000				Priv	RW	RW		
00750000	0000C000			Default heap	Priv	RW	RW		
00C50000	00001000	ex2		PE header	Img	R	RWE	Cop	
00C51000	00001000	ex2	.text	Code	Img	R E	RWE	Cop	
00C52000	00001000	ex2	.rdata	Imports	Img	R	RWE	Cop	
00C53000	00001000	ex2	.data	Data	Img	RW	RWE	Cop	
00C54000	00001000	ex2	.reloc	Relocations	Img	R	RWE	Cop	
6E3E0000	00001000	MSUCR100		PE header	Img	R	RWE	Cop	
6E3E1000	00002000	MSUCR100	.text	Code, imports, exports	Img	R E	RWE	Cop	
6E493000	00006000	MSUCR100	.data	Data	Img	RW	Cop	RWE	Cop
6E499000	00001000	MSUCR100	.rsrc	Resources	Img	R	RWE	Cop	
6E49A000	00005000	MSUCR100	.reloc	Relocations	Img	R	RWE	Cop	
755D0000	00001000	Mod_755D		PE header	Img	R	RWE	Cop	
755D1000	00003000				Img	R E	RWE	Cop	
755D4000	00001000				Img	RW	RWE	Cop	
755D5000	00003000				Img	R	RWE	Cop	
755E0000	00001000	Mod_755E		PE header	Img	R	RWE	Cop	
755E1000	00004000				Img	R E	RWE	Cop	
7562E000	00005000				Img	RW	Cop	RWE	Cop
75633000	00009000				Img	R	RWE	Cop	
75640000	00001000	Mod_7564		PE header	Img	R	RWE	Cop	
75641000	00003000				Img	R E	RWE	Cop	
75679000	00002000				Img	RW	RWE	Cop	
7567B000	00004000				Img	R	RWE	Cop	
76F50000	00010000	kernel32		PE header	Img	R	RWE	Cop	
76F60000	00000000	kernel32	.text	Code, imports, exports	Img	R E	RWE	Cop	
77030000	00010000	kernel32	.data	Data	Img	RW	Cop	RWE	Cop
77040000	00010000	kernel32	.rsrc	Resources	Img	R	RWE	Cop	
77050000	00008000	kernel32	.reloc	Relocations	Img	R	RWE	Cop	
77810000	00001000	KERNELBASE		PE header	Img	R	RWE	Cop	
77811000	00004000	KERNELBASE	.text	Code, imports, exports	Img	R E	RWE	Cop	
77851000	00002000	KERNELBASE	.data	Data	Img	RW	RWE	Cop	
77853000	00001000	KERNELBASE	.rsrc	Resources	Img	R	RWE	Cop	
77854000	00003000	KERNELBASE	.reloc	Relocations	Img	R	RWE	Cop	
77B20000	00001000	Mod_77B2		PE header	Img	R	RWE	Cop	
77B21000	00102000				Img	R E	RWE	Cop	
77C23000	0002F000				Img	R	RWE	Cop	
77C52000	0000C000				Img	RW	Cop	RWE	Cop
77C5E000	0000B000				Img	R	RWE	Cop	
77D00000	00001000	ntdll		PE header	Img	R	RWE	Cop	
77D10000	00006000	ntdll	.text	Code, exports	Img	R E	RWE	Cop	
77DF0000	00001000	ntdll	.rt	Code	Img	R E	RWE	Cop	
77E00000	00009000	ntdll	.data	Data	Img	RW	Cop	RWE	Cop

Рис. 1.16: OllyDbg: карта памяти процесса

GCC: x86

В Linux всё почти также. За исключением того, что если значение `x` не определено, то эта переменная будет находится в сегменте `_bss`. В [ELF⁷¹](#) этот сегмент имеет такие атрибуты:

```
; Segment type: Uninitialized
; Segment permissions: Read/Write
```

Ну а если сделать статическое присвоение этой переменной какого-либо значения, например, 10, то она будет находится в сегменте `_data`, это сегмент с такими атрибутами:

```
; Segment type: Pure data
; Segment permissions: Read/Write
```

MSVC: x64

Листинг 1.74: MSVC 2012 x64

```
_DATA SEGMENT
COMM x:DWORD
$SG2924 DB 'Enter X:', 0aH, 00H
$SG2925 DB '%d', 00H
$SG2926 DB 'You entered %d...', 0aH, 00H
_DATA ENDS
```

⁷¹Формат исполняемых файлов, использующийся в Linux и некоторых других *NIX

1.9. SCANF()

```
_TEXT    SEGMENT
main     PROC
$LN3:

    sub     rsp, 40

    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2924 ; 'Enter X:'
    call    printf
    lea     rdx, OFFSET FLAT:x
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2925 ; '%d'
    call    scanf
    mov     edx, DWORD PTR x
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2926 ; 'You entered %d...'
    call    printf

    ; возврат 0
    xor     eax, eax

    add     rsp, 40
    ret     0
main     ENDP
_TEXT    ENDS
```

Почти такой же код как и в x86. Обратите внимание что для `scanf()` адрес переменной *x* передается при помощи инструкции LEA, а во второй `printf()` передается само значение переменной при помощи MOV. DWORD PTR — это часть языка ассемблера (не имеющая отношения к машинным кодам) показывающая, что тип переменной в памяти именно 32-битный, и инструкция MOV должна быть здесь закодирована соответственно.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.75: IDA

```
.text:00000000 ; Segment type: Pure code
.text:00000000      AREA .text, CODE
...
.text:00000000 main
.text:00000000      PUSH     {R4,LR}
.text:00000002      ADR      R0, aEnterX ; "Enter X:\n"
.text:00000004      BL       __2printf
.text:00000008      LDR      R1, =x
.text:0000000A      ADR      R0, aD ; "%d"
.text:0000000C      BL       __0scanf
.text:00000010      LDR      R0, =x
.text:00000012      LDR      R1, [R0]
.text:00000014      ADR      R0, aYouEnteredD__ ; "You entered %d...\n"
.text:00000016      BL       __2printf
.text:0000001A      MOVSV    R0, #0
.text:0000001C      POP      {R4,PC}
...
.text:00000020 aEnterX DCB "Enter X:",0xA,0 ; DATA XREF: main+2
.text:0000002A      DCB      0
.text:0000002B      DCB      0
.text:0000002C off_2C DCD x ; DATA XREF: main+8
.text:0000002C ; main+10
.text:00000030 aD      DCB "%d",0 ; DATA XREF: main+A
.text:00000033      DCB      0
.text:00000034 aYouEnteredD__ DCB "You entered %d...",0xA,0 ; DATA XREF: main+14
.text:00000047      DCB      0
.text:00000047 ; .text ends
.text:00000047
...
.data:00000048 ; Segment type: Pure data
.data:00000048      AREA .data, DATA
.data:00000048 ; ORG 0x48
.data:00000048      EXPORT x
.data:00000048 x      DCD 0xA ; DATA XREF: main+8
.data:00000048 ; main+10
```

1.9. SCANF()

```
.data:00000048 ; .data ends
```

Итак, переменная `x` теперь глобальная, и она расположена, почему-то, в другом сегменте, а именно сегменте данных (`.data`). Можно спросить, почему текстовые строки расположены в сегменте кода (`.text`), а `x` нельзя было разместить тут же?

Потому что эта переменная, и как следует из определения, она может меняться. И может быть, меняться часто.

Ну а текстовые строки имеют тип констант, они не будут меняться, поэтому они располагаются в сегменте `.text`.

Сегмент кода иногда может быть расположен в ПЗУ микроконтроллера (не забывайте, мы сейчас имеем дело с встраиваемой (*embedded*) микроэлектроникой, где дефицит памяти — обычное дело), а изменяемые переменные — в ОЗУ.

Хранить в ОЗУ неизменяемые данные, когда в наличии есть ПЗУ, не экономно.

К тому же, сегмент данных в ОЗУ с константами нужно инициализировать перед работой, ведь, после включения ОЗУ, очевидно, она содержит в себе случайную информацию.

Далее мы видим в сегменте кода хранится указатель на переменную `x` (`off_2C`) и все операции с переменной происходят через этот указатель.

Это связано с тем, что переменная `x` может быть расположена где-то довольно далеко от данного участка кода, так что её адрес нужно сохранить в непосредственной близости к этому коду.

Инструкция `LDR` в Thumb-режиме может адресовать только переменные в пределах вплоть до 1020 байт от своего местоположения.

Эта же инструкция в ARM-режиме — переменные в пределах ± 4095 байт.

Таким образом, адрес глобальной переменной `x` нужно расположить в непосредственной близости, ведь нет никакой гарантии, что компоновщик⁷² сможет разместить саму переменную где-то рядом, она может быть даже в другом чипе памяти!

Ещё одна вещь: если переменную объявить, как *const*, то компилятор Keil разместит её в сегменте `.constdata`.

Должно быть, впоследствии компоновщик и этот сегмент сможет разместить в ПЗУ вместе с сегментом кода.

ARM64

Листинг 1.76: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
1      .comm    x,4,4
2  .LC0:
3      .string  "Enter X:"
4  .LC1:
5      .string  "%d"
6  .LC2:
7      .string  "You entered %d...\n"
8  f5:
9  ; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
10     stp      x29, x30, [sp, -16]!
11 ; установить стековый фрейм (FP=SP)
12     add      x29, sp, 0
13 ; загрузить указатель на строку "Enter X:":
14     adrp     x0, .LC0
15     add      x0, x0, :lo12:.LC0
16     bl       puts
17 ; загрузить указатель на строку "%d":
18     adrp     x0, .LC1
19     add      x0, x0, :lo12:.LC1
20 ; сформировать адрес глобальной переменной x:
21     adrp     x1, x
22     add      x1, x1, :lo12:x
23     bl       __isoc99_scanf
24 ; снова сформировать адрес глобальной переменной x:
```

⁷²linker в англоязычной литературе

1.9. SCANF()

```
25      adrp      x0, x
26      add      x0, x0, :lo12:x
27 ; загрузить значение из памяти по этому адресу:
28      ldr      w1, [x0]
29 ; загрузить указатель на строку "You entered %d...\n":
30      adrp      x0, .LC2
31      add      x0, x0, :lo12:.LC2
32      bl       printf
33 ; возврат 0
34      mov      w0, 0
35 ; восстановить FP и LR:
36      ldp      x29, x30, [sp], 16
37      ret
```

Теперь *x* это глобальная переменная, и её адрес вычисляется при помощи пары инструкций ADRP/ADD (строки 21 и 25).

MIPS

Неинициализированная глобальная переменная

Так что теперь переменная *x* глобальная. Сделаем исполняемый файл вместо объектного и загрузим его в [IDA](#). IDA показывает присутствие переменной *x* в ELF-секции `.sbss` (помните о «Global Pointer»? [1.5.5](#) (стр. 25)), так как переменная не инициализируется в самом начале.

Листинг 1.77: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:004006C0 main:
.text:004006C0
.text:004006C0 var_10          = -0x10
.text:004006C0 var_4          = -4
.text:004006C0
; пролог функции:
.text:004006C0          lui      $gp, 0x42
.text:004006C4          addiu   $sp, -0x20
.text:004006C8          li      $gp, 0x418940
.text:004006CC          sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:004006D0          sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; вызов puts():
.text:004006D4          la      $t9, puts
.text:004006D8          lui     $a0, 0x40
.text:004006DC          jalr    $t9 ; puts
.text:004006E0          la      $a0, aEnterX      # "Enter X:" ; branch delay slot
; вызов scanf():
.text:004006E4          lw      $gp, 0x20+var_10($sp)
.text:004006E8          lui     $a0, 0x40
.text:004006EC          la      $t9, __isoc99_scanf
; подготовить адрес x:
.text:004006F0          la      $a1, x
.text:004006F4          jalr    $t9 ; __isoc99_scanf
.text:004006F8          la      $a0, aD          # "%d"          ; branch delay slot
; вызов printf():
.text:004006FC          lw      $gp, 0x20+var_10($sp)
.text:00400700          lui     $a0, 0x40
; взять адрес x:
.text:00400704          la      $v0, x
.text:00400708          la      $t9, printf
; загрузить значение из переменной "x" и передать его в printf() в $a1:
.text:0040070C          lw      $a1, (x - 0x41099C)($v0)
.text:00400710          jalr    $t9 ; printf
.text:00400714          la      $a0, aYouEnteredD___ # "You entered %d...\n" ; branch
    ↪ delay slot
; эпилог функции:
.text:00400718          lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:0040071C          move    $v0, $zero
.text:00400720          jr      $ra
.text:00400724          addiu   $sp, 0x20 ; branch delay slot
```

1.9. SCANF()

```
...  
.sbss:0041099C # Segment type: Uninitialized  
.sbss:0041099C .sbss  
.sbss:0041099C .globl x  
.sbss:0041099C x: .space 4  
.sbss:0041099C
```

IDA уменьшает количество информации, так что сделаем также листинг используя objdump и добавим туда свои комментарии:

Листинг 1.78: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (objdump)

```
1 004006c0 <main>:  
2 ; пролог функции:  
3 4006c0: 3c1c0042 lui gp,0x42  
4 4006c4: 27bdffe0 addiu sp,sp,-32  
5 4006c8: 279c8940 addiu gp,gp,-30400  
6 4006cc: afbf001c sw ra,28(sp)  
7 4006d0: afbc0010 sw gp,16(sp)  
8 ; вызов puts():  
9 4006d4: 8f998034 lw t9,-32716(gp)  
10 4006d8: 3c040040 lui a0,0x40  
11 4006dc: 0320f809 jalr t9  
12 4006e0: 248408f0 addiu a0,a0,2288 ; branch delay slot  
13 ; вызов scanf():  
14 4006e4: 8fbc0010 lw gp,16(sp)  
15 4006e8: 3c040040 lui a0,0x40  
16 4006ec: 8f998038 lw t9,-32712(gp)  
17 ; подготовить адрес x:  
18 4006f0: 8f858044 lw a1,-32700(gp)  
19 4006f4: 0320f809 jalr t9  
20 4006f8: 248408fc addiu a0,a0,2300 ; branch delay slot  
21 ; вызов printf():  
22 4006fc: 8fbc0010 lw gp,16(sp)  
23 400700: 3c040040 lui a0,0x40  
24 ; взять адрес x:  
25 400704: 8f828044 lw v0,-32700(gp)  
26 400708: 8f99803c lw t9,-32708(gp)  
27 ; загрузить значение из переменной "x" и передать его в printf() в $a1:  
28 40070c: 8c450000 lw a1,0(v0)  
29 400710: 0320f809 jalr t9  
30 400714: 24840900 addiu a0,a0,2304 ; branch delay slot  
31 ; эпилог функции:  
32 400718: 8fbc001c lw ra,28(sp)  
33 40071c: 00001021 move v0,zero  
34 400720: 03e00008 jr ra  
35 400724: 27bd0020 addiu sp,sp,32 ; branch delay slot  
36 ; набор NOP-ов для выравнивания начала следующей ф-ции по 16-байтной границе:  
37 400728: 00200825 move at,at  
38 40072c: 00200825 move at,at
```

Теперь мы видим, как адрес переменной *x* берется из буфера 64KiB, используя GP и прибавление к нему отрицательного смещения (строка 18).

И даже более того: адреса трех внешних функций, используемых в нашем примере (`puts()`, `scanf()`, `printf()`) также берутся из буфера 64KiB используя GP (строки 9, 16 и 26).

GP указывает на середину буфера, так что такие смещения могут нам подсказать, что адреса всех трех функций, а также адрес переменной *x* расположены где-то в самом начале буфера. Действительно, ведь наш пример крохотный.

Ещё нужно отметить что функция заканчивается двумя **NOP**-ами (`MOVE $AT,$AT` — это холостая инструкция), чтобы выровнять начало следующей функции по 16-байтной границе.

Инициализированная глобальная переменная

Немного изменим наш пример и сделаем, чтобы у *x* было значение по умолчанию:

1.9. SCANF()

```
int x=10; // значение по умолчанию
```

Теперь IDA показывает что переменная *x* располагается в секции .data:

Листинг 1.79: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:004006A0 main:
.text:004006A0
.text:004006A0 var_10      = -0x10
.text:004006A0 var_8       = -8
.text:004006A0 var_4       = -4
.text:004006A0
.text:004006A0      lui      $gp, 0x42
.text:004006A4      addiu     $sp, -0x20
.text:004006A8      li       $gp, 0x418930
.text:004006AC      sw       $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:004006B0      sw       $s0, 0x20+var_8($sp)
.text:004006B4      sw       $gp, 0x20+var_10($sp)
.text:004006B8      la       $t9, puts
.text:004006BC      lui      $a0, 0x40
.text:004006C0      jalr     $t9 ; puts
.text:004006C4      la       $a0, aEnterX      # "Enter X:"
.text:004006C8      lw       $gp, 0x20+var_10($sp)
; подготовить старшую часть адреса x:
.text:004006CC      lui      $s0, 0x41
.text:004006D0      la       $t9, __isoc99_scanf
.text:004006D4      lui      $a0, 0x40
; прибавить младшую часть адреса x:
.text:004006D8      addiu     $a1, $s0, (x - 0x410000)
; теперь адрес x в $a1.
.text:004006DC      jalr     $t9 ; __isoc99_scanf
.text:004006E0      la       $a0, aD          # "%d"
.text:004006E4      lw       $gp, 0x20+var_10($sp)
; загрузить слово из памяти:
.text:004006E8      lw       $a1, x
; значение x теперь в $a1.
.text:004006EC      la       $t9, printf
.text:004006F0      lui      $a0, 0x40
.text:004006F4      jalr     $t9 ; printf
.text:004006F8      la       $a0, aYouEnteredD___ # "You entered %d...\n"
.text:004006FC      lw       $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00400700      move     $v0, $zero
.text:00400704      lw       $s0, 0x20+var_8($sp)
.text:00400708      jr       $ra
.text:0040070C      addiu     $sp, 0x20

...

.data:00410920      .globl x
.data:00410920 x:      .word 0xA
```

Почему не .sdata? Может быть, нужно было указать какую-то опцию в GCC? Тем не менее, *x* теперь в .data, а это уже общая память и мы можем посмотреть как происходит работа с переменными там.

Адрес переменной должен быть сформирован парой инструкций. В нашем случае это LUI («Load Upper Immediate» — загрузить старшие 16 бит) и ADDIU («Add Immediate Unsigned Word» — прибавить значение). Вот так же листинг сгенерированный objdump-ом для лучшего рассмотрения:

Листинг 1.80: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (objdump)

```
004006a0 <main>:
4006a0:      3c1c0042      lui      gp,0x42
4006a4:      27bdffe0      addiu     sp,sp,-32
4006a8:      279c8930      addiu     gp,gp,-30416
4006ac:      afbf001c      sw       ra,28(sp)
4006b0:      afb00018      sw       s0,24(sp)
4006b4:      afbc0010      sw       gp,16(sp)
4006b8:      8f998034      lw       t9,-32716(gp)
4006bc:      3c040040      lui      a0,0x40
```

1.9. SCANF()

```
4006c0:    0320f809    jalr    t9
4006c4:    248408d0    addiu   a0,a0,2256
4006c8:    8fbc0010    lw      gp,16(sp)
; подготовить старшую часть адреса x:
4006cc:    3c100041    lui     s0,0x41
4006d0:    8f998038    lw      t9,-32712(gp)
4006d4:    3c040040    lui     a0,0x40
; прибавить младшую часть адреса x:
4006d8:    26050920    addiu   a1,s0,2336
; теперь адрес x в $a1.
4006dc:    0320f809    jalr    t9
4006e0:    248408dc    addiu   a0,a0,2268
4006e4:    8fbc0010    lw      gp,16(sp)
; старшая часть адреса x всё ещё в $s0.
; прибавить младшую часть к ней и загрузить слово из памяти:
4006e8:    8e050920    lw      a1,2336(s0)
; значение x теперь в $a1.
4006ec:    8f99803c    lw      t9,-32708(gp)
4006f0:    3c040040    lui     a0,0x40
4006f4:    0320f809    jalr    t9
4006f8:    248408e0    addiu   a0,a0,2272
4006fc:    8fbf001c    lw      ra,28(sp)
400700:    00001021    move    v0,zero
400704:    8fb00018    lw      s0,24(sp)
400708:    03e00008    jr      ra
40070c:    27bd0020    addiu   sp,sp,32
```

Адрес формируется используя LUI и ADDIU, но старшая часть адреса всё ещё в регистре \$S0, и можно закодировать смещение в инструкции LW («Load Word»), так что одной LW достаточно для загрузки значения из переменной и передачи его в printf(). Регистры хранящие временные данные имеют префикс T-, но здесь есть также регистры с префиксом S-, содержимое которых должно быть сохранено в других функциях (т.е. «saved»).

Вот почему \$S0 был установлен по адресу 0x4006cc и затем был использован по адресу 0x4006e8 после вызова scanf().

Функция scanf() не изменяет это значение.

1.9.3. Проверка результата scanf()

Как уже было упомянуто, использовать scanf() в наше время слегка старомодно. Но если уж пришлось, нужно хотя бы проверять, сработал ли scanf() правильно или пользователь ввел вместо числа что-то другое, что scanf() не смог трактовать как число.

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int x;
    printf ("Enter X:\n");

    if (scanf ("%d", &x)==1)
        printf ("You entered %d...\n", x);
    else
        printf ("What you entered? Huh?\n");

    return 0;
};
```

По стандарту, scanf()⁷³ возвращает количество успешно полученных значений.

В нашем случае, если всё успешно и пользователь ввел таки некое число, scanf() вернет 1. А если нет, то 0 (или EOF⁷⁴).

Добавим код, проверяющий результат scanf() и в случае ошибки он сообщает пользователю что-то другое.

⁷³scanf, wscanf: [MSDN](#)

⁷⁴End of File (конец файла)

1.9. SCANF()

Это работает предсказуемо:

```
C:\...>ex3.exe
Enter X:
123
You entered 123...

C:\...>ex3.exe
Enter X:
ouch
What you entered? Huh?
```

MSVC: x86

Вот что выходит на ассемблере (MSVC 2010):

```
    lea     eax, DWORD PTR _x$[ebp]
    push    eax
    push    OFFSET $SG3833 ; '%d', 00H
    call    _scanf
    add     esp, 8
    cmp     eax, 1
    jne     SHORT $LN2@main
    mov     ecx, DWORD PTR _x$[ebp]
    push    ecx
    push    OFFSET $SG3834 ; 'You entered %d...', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 8
    jmp     SHORT $LN1@main
$LN2@main:
    push    OFFSET $SG3836 ; 'What you entered? Huh?', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN1@main:
    xor     eax, eax
```

Для того чтобы вызывающая функция имела доступ к результату вызываемой функции, вызываемая функция (в нашем случае `scanf()`) оставляет это значение в регистре EAX.

Мы проверяем его инструкцией `CMP EAX, 1` (*CoMPare*), то есть сравниваем значение в EAX с 1.

Следующий за инструкцией `CMP`: условный переход `JNE`. Это означает *Jump if Not Equal*, то есть условный переход если не равно.

Итак, если EAX не равен 1, то `JNE` заставит **CPU** перейти по адресу указанном в операнде `JNE`, у нас это `$LN2@main`. Передав управление по этому адресу, **CPU** начнет исполнять вызов `printf()` с аргументом `What you entered? Huh?`. Но если всё нормально, перехода не случится и исполнится другой `printf()` с двумя аргументами:

`'You entered %d...' и значением переменной x.`

Для того чтобы после этого вызова не исполнился сразу второй вызов `printf()`, после него есть инструкция `JMP`, безусловный переход, который отправит процессор на место после второго `printf()` и перед инструкцией `XOR EAX, EAX`, которая реализует `return 0`.

Итак, можно сказать, что в подавляющих случаях сравнение какой-либо переменной с чем-то другим происходит при помощи пары инструкций `CMP` и `Jcc`, где *cc* это *condition code*. `CMP` сравнивает два значения и выставляет флаги процессора⁷⁵. `Jcc` проверяет нужные ему флаги и выполняет переход по указанному адресу (или не выполняет).

Но на самом деле, как это не парадоксально поначалу звучит, `CMP` это почти то же самое что и инструкция `SUB`, которая отнимает числа одно от другого. Все арифметические инструкции также выставляют флаги в соответствии с результатом, не только `CMP`. Если мы сравним 1 и 1, от единицы отнимется единица, получится 0, и выставится флаг `ZF` (*zero flag*), означающий, что последний полученный результат был 0. Ни при каких других значениях EAX, флаг `ZF` не может быть выставлен, кроме тех, когда операнды равны друг другу. Инструкция `JNE` проверяет только флаг `ZF`, и совершает переход только если флаг не поднят. Фактически, `JNE` это синоним инструкции `JNZ` (*Jump if Not Zero*). Ассемблер транслирует обе инструкции в один и тот же опкод. Таким образом, можно

⁷⁵См. также о флагах x86-процессора: [wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/X86_registers#Flags).

1.9. SCANF()

CMP заменить на SUB и всё будет работать также, но разница в том, что SUB всё-таки испортит значение в первом операнде. CMP это *SUB* без сохранения результата, но изменяющая флаги.

MSVC: x86: IDA

Наверное, уже пора делать первые попытки анализа кода в IDA. Кстати, начинающим полезно компилировать в MSVC с ключом /MD, что означает, что все эти стандартные функции не будут скомпонованы с исполняемым файлом, а будут импортироваться из файла MSVCR*.DLL. Так будет легче увидеть, где какая стандартная функция используется.

Анализируя код в IDA, очень полезно делать пометки для себя (и других). Например, разбирая этот пример, мы сразу видим, что JNZ срабатывает в случае ошибки. Можно навести курсор на эту метку, нажать «n» и переименовать метку в «error». Ещё одну метку — в «exit». Вот как у меня получилось в итоге:

```
.text:00401000 _main proc near
.text:00401000
.text:00401000 var_4 = dword ptr -4
.text:00401000 argc = dword ptr 8
.text:00401000 argv = dword ptr 0Ch
.text:00401000 envp = dword ptr 10h
.text:00401000
.text:00401000     push    ebp
.text:00401001     mov     ebp, esp
.text:00401003     push    ecx
.text:00401004     push    offset Format ; "Enter X:\n"
.text:00401009     call    ds:printf
.text:0040100F     add     esp, 4
.text:00401012     lea     eax, [ebp+var_4]
.text:00401015     push    eax
.text:00401016     push    offset aD ; "%d"
.text:0040101B     call    ds:scanf
.text:00401021     add     esp, 8
.text:00401024     cmp     eax, 1
.text:00401027     jnz     short error
.text:00401029     mov     ecx, [ebp+var_4]
.text:0040102C     push    ecx
.text:0040102D     push    offset aYou ; "You entered %d...\n"
.text:00401032     call    ds:printf
.text:00401038     add     esp, 8
.text:0040103B     jmp     short exit
.text:0040103D
.text:0040103D error: ; CODE XREF: _main+27
.text:0040103D     push    offset aWhat ; "What you entered? Huh?\n"
.text:00401042     call    ds:printf
.text:00401048     add     esp, 4
.text:0040104B
.text:0040104B exit: ; CODE XREF: _main+3B
.text:0040104B     xor     eax, eax
.text:0040104D     mov     esp, ebp
.text:0040104F     pop     ebp
.text:00401050     retn
.text:00401050 _main endp
```

Так понимать код становится чуть легче. Впрочем, меру нужно знать во всем и комментировать каждую инструкцию не стоит.

В IDA также можно скрывать части функций: нужно выделить скрываемую часть, нажать «-» на цифровой клавиатуре и ввести текст.

Скроем две части и придумаем им названия:

```
.text:00401000 _text segment para public 'CODE' use32
.text:00401000     assume cs:_text
.text:00401000     ;org 401000h
.text:00401000 ; ask for X
.text:00401012 ; get X
.text:00401024     cmp     eax, 1
.text:00401027     jnz     short error
```


1.9. SCANF()

```
.text:00401029 ; print result
.text:0040103B      jmp  short exit
.text:0040103D
.text:0040103D error: ; CODE XREF: _main+27
.text:0040103D      push offset aWhat ; "What you entered? Huh?\n"
.text:00401042      call ds:printf
.text:00401048      add  esp, 4
.text:0040104B
.text:0040104B exit: ; CODE XREF: _main+3B
.text:0040104B      xor  eax, eax
.text:0040104D      mov  esp, ebp
.text:0040104F      pop  ebp
.text:00401050      retn
.text:00401050 _main endp
```

Раскрывать скрытые части функций можно при помощи «+» на цифровой клавиатуре.

1.9. SCANF()

Нажав «пробел», мы увидим, как IDA может представить функцию в виде графа:

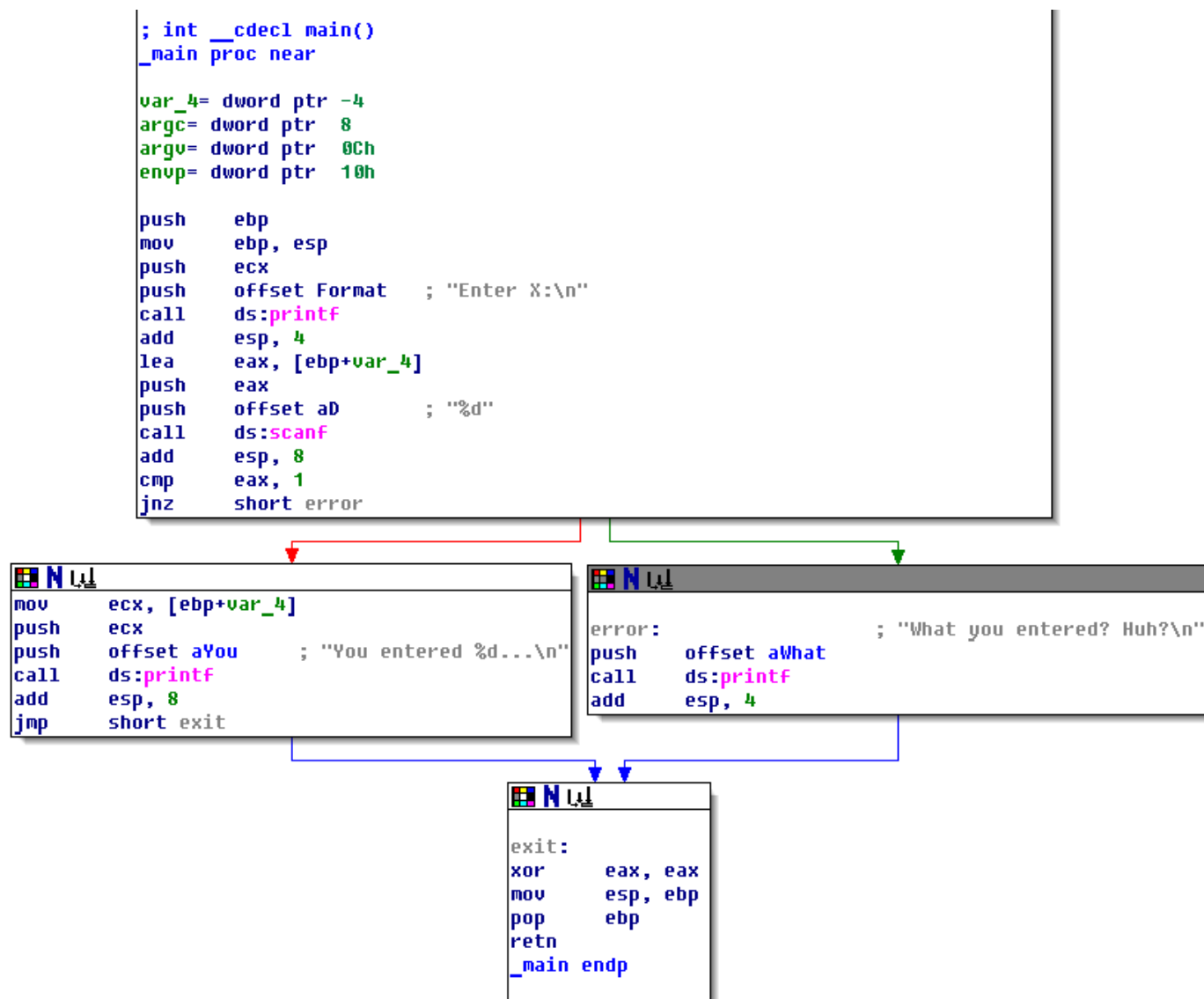


Рис. 1.17: Отображение функции в IDA в виде графа

После каждого условного перехода видны две стрелки: зеленая и красная. Зеленая ведет к тому блоку, который исполнится если переход работает, а красная — если не работает.

1.9. SCANF()

В этом режиме также можно сворачивать узлы и давать им названия («group nodes»). Сделаем это для трех блоков:

```
; int __cdecl main()
_main proc near

var_4= dword ptr -4
argc= dword ptr 8
argv= dword ptr 0Ch
envp= dword ptr 10h

push    ebp
mov     ebp, esp
push    ecx
push    offset Format    ; "Enter X:\n"
call    ds:printf
add     esp, 4
lea     eax, [ebp+var_4]
push    eax
push    offset aD        ; "%d"
call    ds:scanf
add     esp, 8
cmp     eax, 1
jnz     short error
```

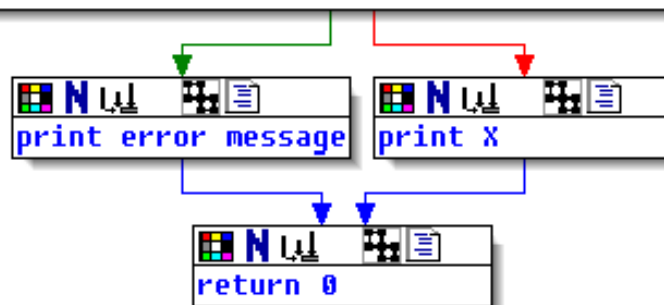


Рис. 1.18: Отображение в IDA в виде графа с тремя свернутыми блоками

Всё это очень полезно делать. Вообще, очень важная часть работы реверсера (да и любого исследователя) состоит в том, чтобы уменьшать количество имеющейся информации.

Попробуем в OllyDbg немного хакнуть программу и сделать вид, что `scanf()` срабатывает всегда без ошибок. Когда в `scanf()` передается адрес локальной переменной, изначально в этой переменной находится некий мусор. В данном случае это `0x6E494714`:

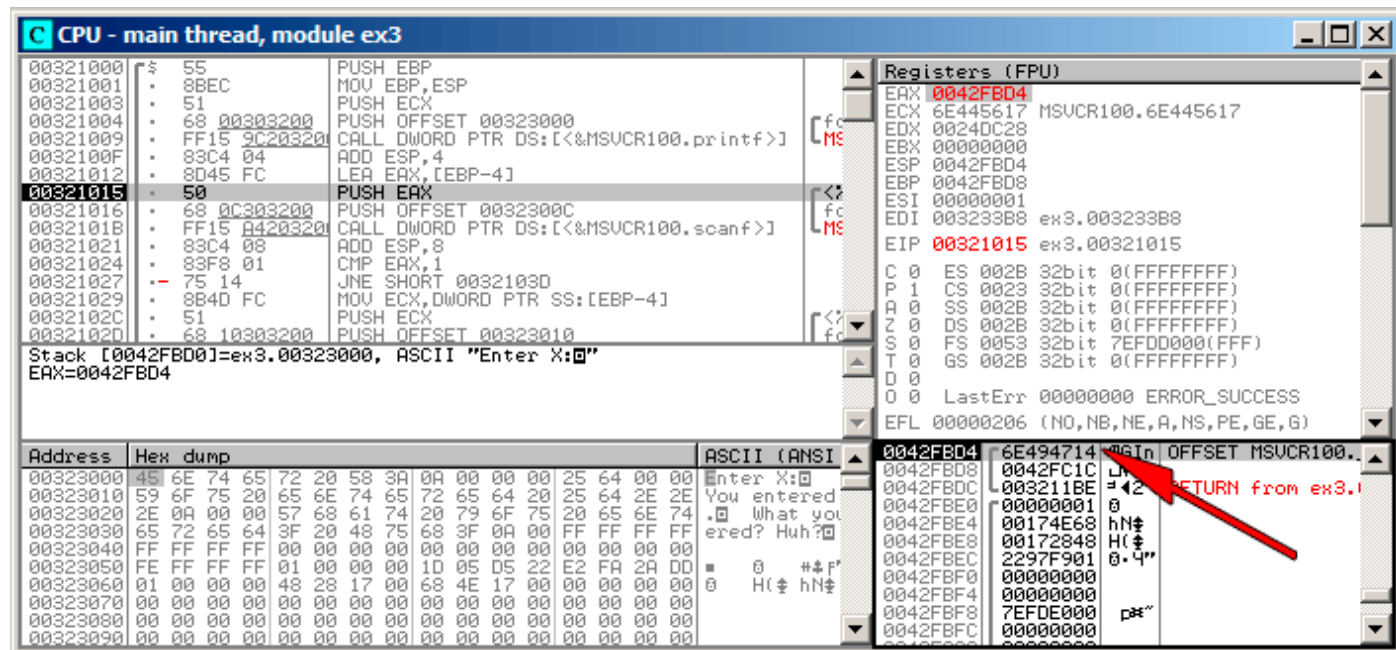


Рис. 1.19: OllyDbg: передача адреса переменной в `scanf()`

1.9. SCANF()

Когда `scanf()` запускается, вводим в консоли что-то непохожее на число, например «asdasd». `scanf()` заканчивается с 0 в EAX, что означает, что произошла ошибка:

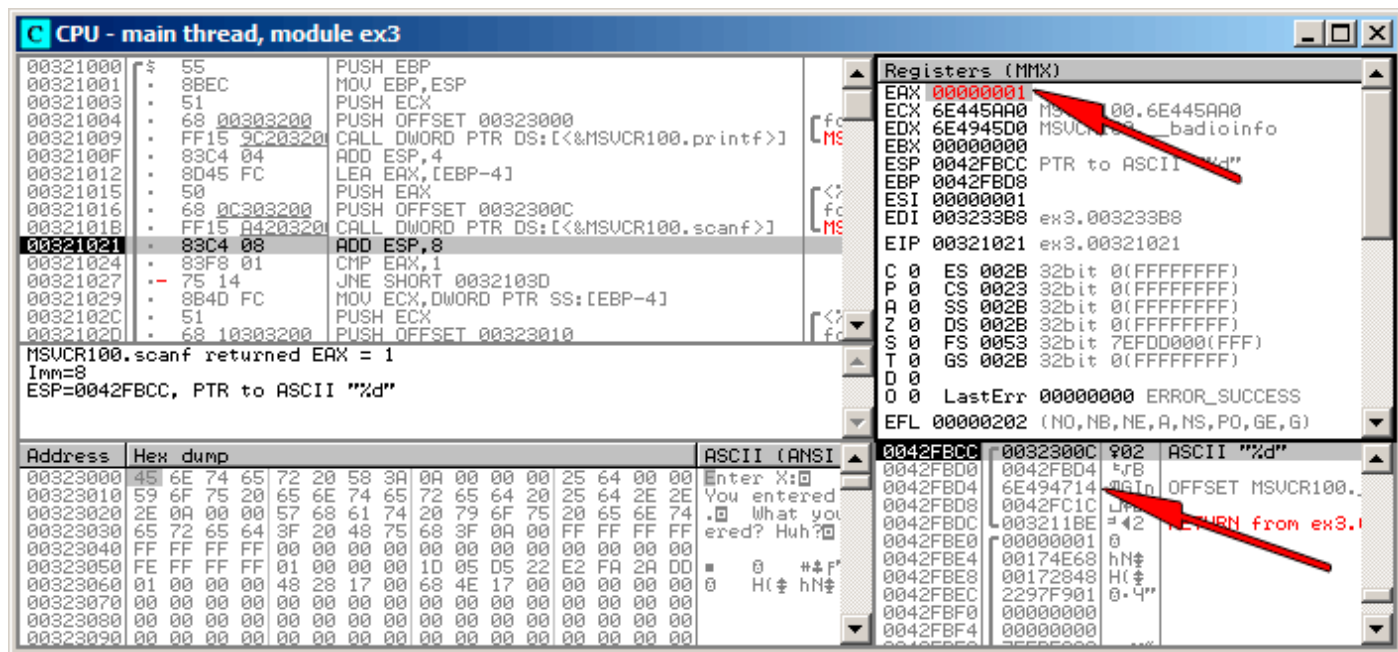


Рис. 1.20: OllyDbg: `scanf()` закончился с ошибкой

Вместе с этим мы можем посмотреть на локальную переменную в стеке — она не изменилась. Действительно, ведь что туда записала бы функция `scanf()`? Она не делала ничего кроме возвращения нуля. Попробуем ещё немного «хакнуть» нашу программу. Щелкнем правой кнопкой на EAX, там, в числе опций, будет также «Set to 1». Это нам и нужно.

В EAX теперь 1, последующая проверка пройдет как надо, и `printf()` выведет значение переменной из стека.

Запускаем (F9) и видим в консоли следующее:

Листинг 1.81: консоль

```
Enter X:
asdasd
You entered 1850296084...
```

Действительно, 1850296084 это десятичное представление числа в стеке (0x6E494714)!

Исполняемый файл скомпилирован с импортированием функций из MSVCRT*.DLL (т.е. с опцией /MD)⁷⁶, поэтому мы можем отыскать функцию `main()` в самом начале секции `.text`. Откроем исполняемый файл в Hiew, найдем самое начало секции `.text` (Enter, F8, F6, Enter, Enter).

C:\Polygon\ollydbg\ex3.exe		FR0	-----	a32 PE .00401000	Hi
.00401000:	55	push	ebp		
.00401001:	8BEC	mov	ebp,esp		
.00401003:	51	push	ecx		
.00401004:	6800304000	push	000403000 ; 'Enter X:' --01		
.00401009:	FF1594204000	call	printf		
.0040100F:	83C404	add	esp,4		
.00401012:	8D45FC	lea	eax,[ebp][-4]		
.00401015:	50	push	eax		
.00401016:	680C304000	push	00040300C --02		
.0040101B:	FF158C204000	call	scanf		
.00401021:	83C408	add	esp,8		
.00401024:	83F801	cmp	eax,1		
.00401027:	7514	jnz	.00040103D --03		
.00401029:	8B4DFC	mov	ecx,[ebp][-4]		
.0040102C:	51	push	ecx		
.0040102D:	6810304000	push	000403010 ; 'You entered %d...'		
.00401032:	FF1594204000	call	printf		
.00401038:	83C408	add	esp,8		
.0040103B:	EB0E	jmps	.00040104B --05		
.0040103D:	6824304000	3push	000403024 ; 'What you entered?'		
.00401042:	FF1594204000	call	printf		
.00401048:	83C404	add	esp,4		
.0040104B:	33C0	5xor	eax,ecx		
.0040104D:	8BE5	mov	esp,ebp		
.0040104F:	5D	pop	ebp		
.00401050:	C3	ret	;		
.00401051:	B84D5A0000	mov	eax,000005A4D ; ' ZM'		

1Global
2FileBlk
3CryBlk
4ReLoad
5OrdLdr
6String
7Direct
8Table
9byte
10Leave
11Nak

Hiew находит [ASCIIZ⁷⁷](#)-строки и показывает их, также как и имена импортируемых функций.

⁷⁷ASCII Zero (ASCII-строка заканчивающаяся нулем)


```

_DATA    SEGMENT
$SG2924 DB      'Enter X:', 0aH, 00H
$SG2926 DB      '%d', 00H
$SG2927 DB      'You entered %d...', 0aH, 00H
$SG2929 DB      'What you entered? Huh?', 0aH, 00H
_DATA    ENDS

_TEXT    SEGMENT
x$ = 32
main     PROC
$LN5:
    sub     rsp, 56
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2924 ; 'Enter X:'
    call    printf
    lea     rdx, QWORD PTR x$[rsp]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2926 ; '%d'
    call    scanf
    cmp     eax, 1
    jne     SHORT $LN2@main
    mov     edx, DWORD PTR x$[rsp]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2927 ; 'You entered %d...'
    call    printf
    jmp     SHORT $LN1@main
$LN2@main:
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2929 ; 'What you entered? Huh?'
    call    printf
$LN1@main:
    ; возврат 0
    xor     eax, eax
    add     rsp, 56
    ret     0
main     ENDP
_TEXT    ENDS
END

```

ARM

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.83: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)style

```

var_8    = -8

        PUSH    {R3,LR}
        ADR     R0, aEnterX      ; "Enter X:\n"
        BL      __2printf
        MOV     R1, SP
        ADR     R0, aD           ; "%d"
        BL      __0scanf
        CMP     R0, #1
        BEQ     loc_1E
        ADR     R0, aWhatYouEntered ; "What you entered? Huh?\n"
        BL      __2printf

loc_1A   ; CODE XREF: main+26
        MOVS    R0, #0
        POP     {R3,PC}

loc_1E   ; CODE XREF: main+12
        LDR     R1, [SP,#8+var_8]
        ADR     R0, aYouEnteredD__ ; "You entered %d...\n"
        BL      __2printf
        B       loc_1A

```


1.9. SCANF()

Здесь для нас есть новые инструкции: CMP и BEQ⁷⁸.

CMP аналогична той что в x86: она отнимает один аргумент от второго и сохраняет флаги.

BEQ совершает переход по другому адресу, если операнды при сравнении были равны, либо если результат последнего вычисления был 0, либо если флаг Z равен 1. То же что и JZ в x86.

Всё остальное просто: исполнение разветвляется на две ветки, затем они сходятся там, где в R0 записывается 0 как возвращаемое из функции значение и происходит выход из функции.

ARM64

Листинг 1.84: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
1 .LC0:
2     .string "Enter X:"
3 .LC1:
4     .string "%d"
5 .LC2:
6     .string "You entered %d...\n"
7 .LC3:
8     .string "What you entered? Huh?"
9 f6:
10 ; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
11     stp     x29, x30, [sp, -32]!
12 ; установить стековый фрейм (FP=SP)
13     add     x29, sp, 0
14 ; загрузить указатель на строку "Enter X:"
15     adrp    x0, .LC0
16     add     x0, x0, :lo12:LC0
17     bl      puts
18 ; загрузить указатель на строку "%d":
19     adrp    x0, .LC1
20     add     x0, x0, :lo12:LC1
21 ; вычислить адрес переменной x в локальном стеке
22     add     x1, x29, 28
23     bl      __isoc99_scanf
24 ; scanf() возвращает результат в W0.
25 ; проверяем его:
26     cmp     w0, 1
27 ; BNE это Branch if Not Equal (переход, если не равно)
28 ; так что если W0<>0, произойдет переход на L2
29     bne     .L2
30 ; в этот момент W0=1, означая, что ошибки не было
31 ; загрузить значение x из локального стека
32     ldr     w1, [x29,28]
33 ; загрузить указатель на строку "You entered %d...\n":
34     adrp    x0, .LC2
35     add     x0, x0, :lo12:LC2
36     bl      printf
37 ; пропустить код, печатающий строку "What you entered? Huh?" :
38     b       .L3
39 .L2:
40 ; загрузить указатель на строку "What you entered? Huh?" :
41     adrp    x0, .LC3
42     add     x0, x0, :lo12:LC3
43     bl      puts
44 .L3:
45 ; возврат 0
46     mov     w0, 0
47 ; восстановить FP и LR:
48     ldp     x29, x30, [sp], 32
49     ret
```

Исполнение здесь разветвляется, используя пару инструкций CMP/BNE (Branch if Not Equal: переход если не равно).

⁷⁸(PowerPC, ARM) Branch if Equal

Листинг 1.85: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

.text:004006A0 main:
.text:004006A0
.text:004006A0 var_18      = -0x18
.text:004006A0 var_10      = -0x10
.text:004006A0 var_4       = -4
.text:004006A0
.text:004006A0      lui      $gp, 0x42
.text:004006A4      addiu     $sp, -0x28
.text:004006A8      li        $gp, 0x418960
.text:004006AC      sw        $ra, 0x28+var_4($sp)
.text:004006B0      sw        $gp, 0x28+var_18($sp)
.text:004006B4      la        $t9, puts
.text:004006B8      lui      $a0, 0x40
.text:004006BC      jalr      $t9 ; puts
.text:004006C0      la        $a0, aEnterX      # "Enter X:"
.text:004006C4      lw        $gp, 0x28+var_18($sp)
.text:004006C8      lui      $a0, 0x40
.text:004006CC      la        $t9, __isoc99_scanf
.text:004006D0      la        $a0, aD          # "%d"
.text:004006D4      jalr      $t9 ; __isoc99_scanf
.text:004006D8      addiu     $a1, $sp, 0x28+var_10 # branch delay slot
.text:004006DC      li        $v1, 1
.text:004006E0      lw        $gp, 0x28+var_18($sp)
.text:004006E4      beq       $v0, $v1, loc_40070C
.text:004006E8      or        $at, $zero      # branch delay slot, NOP
.text:004006EC      la        $t9, puts
.text:004006F0      lui      $a0, 0x40
.text:004006F4      jalr      $t9 ; puts
.text:004006F8      la        $a0, aWhatYouEntered # "What you entered? Huh?"
.text:004006FC      lw        $ra, 0x28+var_4($sp)
.text:00400700      move      $v0, $zero
.text:00400704      jr        $ra
.text:00400708      addiu     $sp, 0x28

.text:0040070C loc_40070C:
.text:0040070C      la        $t9, printf
.text:00400710      lw        $a1, 0x28+var_10($sp)
.text:00400714      lui      $a0, 0x40
.text:00400718      jalr      $t9 ; printf
.text:0040071C      la        $a0, aYouEnteredD____ # "You entered %d...\n"
.text:00400720      lw        $ra, 0x28+var_4($sp)
.text:00400724      move      $v0, $zero
.text:00400728      jr        $ra
.text:0040072C      addiu     $sp, 0x28

```

scanf() возвращает результат своей работы в регистре \$V0 и он проверяется по адресу 0x004006E4 сравнивая значения в \$V0 и \$V1 (1 записан в \$V1 ранее, на 0x004006DC). BEQ означает «Branch Equal» (переход если равно). Если значения равны (т.е. в случае успеха), произойдет переход по адресу 0x0040070C.

Упражнение

Как мы можем увидеть, инструкцию JNE/JNZ можно вполне заменить на JE/JZ или наоборот (или BNE на BEQ и наоборот). Но при этом ещё нужно переставить базовые блоки местами. Попробуйте сделать это в каком-нибудь примере.

1.9.4. Упражнение

- <http://challenges.re/53>

1.10. Доступ к переданным аргументам

Как мы уже успели заметить, вызывающая функция передает аргументы для вызываемой через стек. А как вызываемая функция получает к ним доступ?

Листинг 1.86: простой пример

```
#include <stdio.h>

int f (int a, int b, int c)
{
    return a*b+c;
};

int main()
{
    printf ("%d\n", f(1, 2, 3));
    return 0;
};
```

1.10.1. x86

MSVC

Рассмотрим пример, скомпилированный в (MSVC 2010 Express):

Листинг 1.87: MSVC 2010 Express

```
_TEXT SEGMENT
_a$ = 8 ; size = 4
_b$ = 12 ; size = 4
_c$ = 16 ; size = 4
_f PROC
    push ebp
    mov ebp, esp
    mov eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    imul eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    add eax, DWORD PTR _c$[ebp]
    pop ebp
    ret 0
_f ENDP

_main PROC
    push ebp
    mov ebp, esp
    push 3 ; третий аргумент
    push 2 ; второй аргумент
    push 1 ; первый аргумент
    call _f
    add esp, 12
    push eax
    push OFFSET $SG2463 ; '%d', 0aH, 00H
    call _printf
    add esp, 8
    ; возврат 0
    xor eax, eax
    pop ebp
    ret 0
_main ENDP
```

Итак, здесь видно: в функции `main()` заталкиваются три числа в стек и вызывается функция `f(int, int, int)`.

Внутри `f()` доступ к аргументам, также как и к локальным переменным, происходит через макросы: `_a$ = 8`, но разница в том, что эти смещения со знаком *плюс*, таким образом если прибавить макрос `_a$` к указателю на EBP, то адресуется *внешняя* часть *фрейма* стека относительно EBP.

Далее всё более-менее просто: значение *a* помещается в EAX. Далее EAX умножается при помощи инструкции IMUL на то, что лежит в `_b`, и в EAX остается *произведение* этих двух значений.

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАННЫМ АРГУМЕНТАМ

Далее к регистру EAX прибавляется то, что лежит в `_c`.

Значение из EAX никуда не нужно перекладывать, оно уже лежит где надо. Возвращаем управление вызывающей функции — она возьмет значение из EAX и отправит его в `printf()`.

MSVC + OllyDbg

Проиллюстрируем всё это в OllyDbg. Когда мы протрассируем до первой инструкции в `f()`, которая использует какой-то из аргументов (первый), мы увидим, что EBP указывает на **фрейм стека**. Он выделен красным прямоугольником.

Самый первый элемент **фрейма стека** — это сохраненное значение EBP, затем **RA**. Третий элемент это первый аргумент функции, затем второй аргумент и третий.

Для доступа к первому аргументу функции нужно прибавить к EBP 8 (2 32-битных слова).

OllyDbg в курсе этого, так что он добавил комментарии к элементам стека вроде «RETURN from» и «Arg1 = ...», итд.

N.B.: аргументы функции являются членами фрейма стека вызывающей функции, а не текущей. Поэтому OllyDbg отметил элементы «Arg» как члены другого фрейма стека.

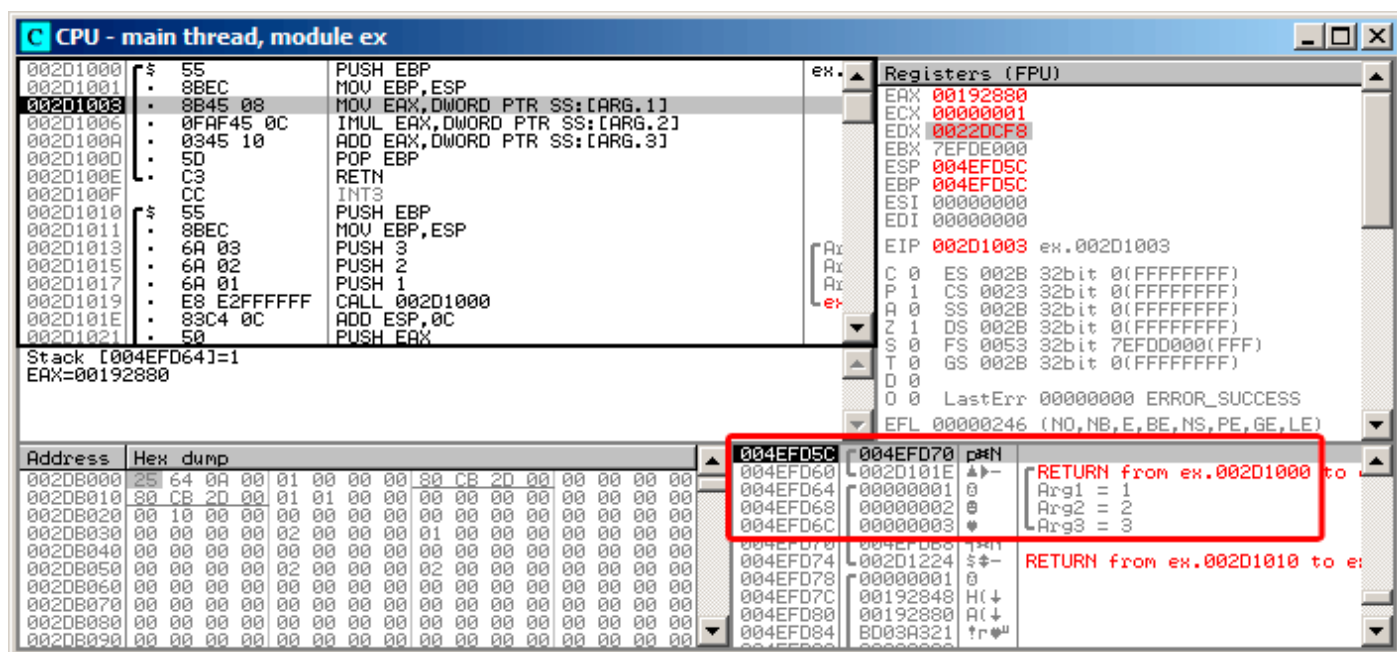


Рис. 1.23: OllyDbg: внутри функции `f()`

GCC

Скомпилируем то же в GCC 4.4.1 и посмотрим результат в IDA:

Листинг 1.88: GCC 4.4.1

```
public f
proc near f
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, [ebp+arg_0] ; первый аргумент
    imul    eax, [ebp+arg_4] ; второй аргумент
    add     eax, [ebp+arg_8] ; третий аргумент
    pop     ebp
    retn
```

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАНЫМ АРГУМЕНТАМ

```
f      endp

      public main
main   proc near

var_10 = dword ptr -10h
var_C  = dword ptr -0Ch
var_8  = dword ptr -8

      push    ebp
      mov     ebp, esp
      and     esp, 0FFFFFFF0h
      sub     esp, 10h
      mov     [esp+10h+var_8], 3 ; третий аргумент
      mov     [esp+10h+var_C], 2 ; второй аргумент
      mov     [esp+10h+var_10], 1 ; первый аргумент
      call    f
      mov     edx, offset aD ; "%d\n"
      mov     [esp+10h+var_C], eax
      mov     [esp+10h+var_10], edx
      call    _printf
      mov     eax, 0
      leave
      retn
main   endp
```

Практически то же самое, если не считать мелких отличий описанных ранее.

После вызова обеих функций [указатель стека](#) не возвращается назад, потому что предпоследняя инструкция LEAVE ([1.6](#) (стр. [1003](#))) делает это за один раз, в конце исполнения.

1.10.2. x64

В x86-64 всё немного иначе, здесь аргументы функции (4 или 6) передаются через регистры, а [callee](#) из читает их из регистров, а не из стека.

MSVC

Оптимизирующий MSVC:

Листинг 1.89: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
$SG2997 DB      '%d', 0aH, 00H

main   PROC
      sub     rsp, 40
      mov     edx, 2
      lea     r8d, QWORD PTR [rdx+1] ; R8D=3
      lea     ecx, QWORD PTR [rdx-1] ; ECX=1
      call    f
      lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2997 ; '%d'
      mov     edx, eax
      call    printf
      xor     eax, eax
      add     rsp, 40
      ret     0
main   ENDP

f      PROC
      ; ECX – первый аргумент
      ; EDX – второй аргумент
      ; R8D – третий аргумент
      imul    ecx, edx
      lea     eax, DWORD PTR [r8+rcx]
      ret     0
f      ENDP
```

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАННЫМ АРГУМЕНТАМ

Как видно, очень компактная функция `f()` берет аргументы прямо из регистров.

Инструкция `LEA` используется здесь для сложения чисел. Должно быть компилятор посчитал, что это будет эффективнее использования `ADD`.

В самой `main()` `LEA` также используется для подготовки первого и третьего аргумента: должно быть, компилятор решил, что `LEA` будет работать здесь быстрее, чем загрузка значения в регистр при помощи `MOV`.

Попробуем посмотреть вывод неоптимизирующего MSVC:

Листинг 1.90: MSVC 2012 x64

```
f                proc near
; область "shadow":
arg_0            = dword ptr  8
arg_8            = dword ptr 10h
arg_10           = dword ptr 18h

                ; ECX – первый аргумент
                ; EDX – второй аргумент
                ; R8D – третий аргумент
                mov     [rsp+arg_10], r8d
                mov     [rsp+arg_8], edx
                mov     [rsp+arg_0], ecx
                mov     eax, [rsp+arg_0]
                imul    eax, [rsp+arg_8]
                add     eax, [rsp+arg_10]
                retn
f                endp

main            proc near
                sub     rsp, 28h
                mov     r8d, 3 ; третий аргумент
                mov     edx, 2 ; второй аргумент
                mov     ecx, 1 ; первый аргумент
                call    f
                mov     edx, eax
                lea     rcx, $SG2931    ; "%d\n"
                call    printf

                ; возврат 0
                xor     eax, eax
                add     rsp, 28h
                retn
main            endp
```

Немного путаннее: все 3 аргумента из регистров зачем-то сохраняются в стеке.

Это называется «shadow space» ⁷⁹: каждая функция в Win64 может (хотя и не обязана) сохранять значения 4-х регистров там.

Это делается по крайней мере из-за двух причин: 1) в большой функции отвести целый регистр (а тем более 4 регистра) для входного аргумента слишком расточительно, так что к нему будет обращение через стек;

2) отладчик всегда знает, где найти аргументы функции в момент останова ⁸⁰.

Так что, какие-то большие функции могут сохранять входные аргументы в «shadow space» для использования в будущем, а небольшие функции, как наша, могут этого и не делать.

Место в стеке для «shadow space» выделяет именно `caller`.

GCC

Оптимизирующий GCC также делает понятный код:

⁷⁹[MSDN](#)

⁸⁰[MSDN](#)

```
f:
    ; EDI – первый аргумент
    ; ESI – второй аргумент
    ; EDX – третий аргумент
    imul    esi, edi
    lea     eax, [rdx+rsi]
    ret

main:
    sub     rsp, 8
    mov     edx, 3
    mov     esi, 2
    mov     edi, 1
    call    f
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC0 ; "%d\n"
    mov     esi, eax
    xor     eax, eax ; количество переданных векторных регистров
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 8
    ret
```

Неоптимизирующий GCC:

Листинг 1.92: GCC 4.4.6 x64

```
f:
    ; EDI – первый аргумент
    ; ESI – второй аргумент
    ; EDX – третий аргумент
    push    rbp
    mov     rbp, rsp
    mov     DWORD PTR [rbp-4], edi
    mov     DWORD PTR [rbp-8], esi
    mov     DWORD PTR [rbp-12], edx
    mov     eax, DWORD PTR [rbp-4]
    imul    eax, DWORD PTR [rbp-8]
    add     eax, DWORD PTR [rbp-12]
    leave
    ret

main:
    push    rbp
    mov     rbp, rsp
    mov     edx, 3
    mov     esi, 2
    mov     edi, 1
    call    f
    mov     edx, eax
    mov     eax, OFFSET FLAT:.LC0 ; "%d\n"
    mov     esi, edx
    mov     rdi, rax
    mov     eax, 0 ; количество переданных векторных регистров
    call    printf
    mov     eax, 0
    leave
    ret
```

В соглашении о вызовах System V *NIX ([Michael Matz, Jan Hubicka, Andreas Jaeger, Mark Mitchell, *System V Application Binary Interface. AMD64 Architecture Processor Supplement*, (2013)]⁸¹) нет «shadow space», но *callee* тоже иногда должен сохранять где-то аргументы, потому что, опять же, регистров может и не хватить на все действия. Что мы здесь и видим.

GCC: uint64_t вместо int

Наш пример работал с 32-битным *int*, поэтому использовались 32-битные части регистров с префиксом E-.

⁸¹Также доступно здесь: <https://software.intel.com/sites/default/files/article/402129/mpx-linux64-abi.pdf>

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАНЫМ АРГУМЕНТАМ

Его можно немного переделать, чтобы он заработал с 64-битными значениями:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint64_t f (uint64_t a, uint64_t b, uint64_t c)
{
    return a*b+c;
};

int main()
{
    printf ("%lld\n", f(0x1122334455667788,
                        0x1111111122222222,
                        0x3333333344444444));
    return 0;
};
```

Листинг 1.93: Оптимизирующий GCC 4.4.6 x64

```
f      proc near
      imul     rsi, rdi
      lea      rax, [rdx+rsi]
      retn
f      endp

main   proc near
      sub     rsp, 8
      mov     rdx, 3333333344444444h ; третий аргумент
      mov     rsi, 1111111122222222h ; второй аргумент
      mov     rdi, 1122334455667788h ; первый аргумент
      call    f
      mov     edi, offset format ; "%lld\n"
      mov     rsi, rax
      xor     eax, eax ; количество переданных векторных регистров
      call    _printf
      xor     eax, eax
      add     rsp, 8
      retn
main   endp
```

Собственно, всё то же самое, только используются регистры *целиком*, с префиксом R-.

1.10.3. ARM

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:000000A4 00 30 A0 E1      MOV     R3, R0
.text:000000A8 93 21 20 E0      MLA     R0, R3, R1, R2
.text:000000AC 1E FF 2F E1      BX      LR
...
.text:000000B0                main
.text:000000B0 10 40 2D E9      STMFD   SP!, {R4,LR}
.text:000000B4 03 20 A0 E3      MOV     R2, #3
.text:000000B8 02 10 A0 E3      MOV     R1, #2
.text:000000BC 01 00 A0 E3      MOV     R0, #1
.text:000000C0 F7 FF FF EB      BL      f
.text:000000C4 00 40 A0 E1      MOV     R4, R0
.text:000000C8 04 10 A0 E1      MOV     R1, R4
.text:000000CC 5A 0F 8F E2      ADR     R0, aD_0          ; "%d\n"
.text:000000D0 E3 18 00 EB      BL      __2printf
.text:000000D4 00 00 A0 E3      MOV     R0, #0
.text:000000D8 10 80 BD E8      LDMFD   SP!, {R4,PC}
```

В функции main() просто вызываются две функции, в первую (f()) передается три значения. Как уже было упомянуто, первые 4 значения в ARM обычно передаются в первых 4-х регистрах (R0-R3). Функция f(), как видно, использует три первых регистра (R0-R2) как аргументы.

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАННЫМ АРГУМЕНТАМ

Инструкция *MLA (Multiply Accumulate)* перемножает два первых операнда (R3 и R1), прибавляет к произведению третий операнд (R2) и помещает результат в нулевой регистр (R0), через который, по стандарту, возвращаются значения функций.

Умножение и сложение одновременно (*Fused multiply-add*) это часто применяемая операция. Кстати, аналогичной инструкции в x86 не было до появления FMA-инструкций в SIMD ⁸².

Самая первая инструкция *MOV R3, R0*, по-видимому, избыточна (можно было бы обойтись только одной инструкцией *MLA*). Компилятор не оптимизировал её, ведь, это компиляция без оптимизации.

Инструкция *BX* возвращает управление по адресу, записанному в *LR* и, если нужно, переключает режимы процессора с Thumb на ARM или наоборот. Это может быть необходимым потому, что, как мы видим, функции *f()* неизвестно, из какого кода она будет вызываться, из ARM или Thumb. Поэтому, если она будет вызываться из кода Thumb, *BX* не только возвращает управление в вызывающую функцию, но также переключает процессор в режим Thumb. Либо не переключит, если функция вызывалась из кода для режима ARM: [ARM(R) Architecture Reference Manual, ARMv7-A and ARMv7-R edition, (2012)A2.3.2].

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:00000098          f
.text:00000098 91 20 20 E0      MLA      R0, R1, R0, R2
.text:0000009C 1E FF 2F E1      BX      LR
```

А вот и функция *f()*, скомпилированная компилятором Keil в режиме полной оптимизации (-O3). Инструкция *MOV* была оптимизирована: теперь *MLA* использует все входящие регистры и помещает результат в R0, где вызываемая функция будет его читать и использовать.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
.text:0000005E 48 43      MULS      R0, R1
.text:00000060 80 18      ADDS      R0, R0, R2
.text:00000062 70 47      BX      LR
```

В режиме Thumb инструкция *MLA* недоступна, так что компилятору пришлось сгенерировать код, делающий обе операции по отдельности.

Первая инструкция *MULS* умножает R0 на R1, оставляя результат в R0. Вторая (*ADDS*) складывает результат и R2, оставляя результат в R0.

ARM64

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Тут всё просто. *MADD* это просто инструкция, производящая умножение и сложение одновременно (как *MLA*, которую мы уже видели). Все 3 аргумента передаются в 32-битных частях X-регистров. Действительно, типы аргументов это 32-битные *int*'ы. Результат возвращается в W0.

Листинг 1.94: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    madd    w0, w0, w1, w2
    ret

main:
; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
    stp     x29, x30, [sp, -16]!
    mov     w2, 3
    mov     w1, 2
    add     x29, sp, 0
    mov     w0, 1
    bl      f
```

⁸²[wikipedia](#)

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАНЫМ АРГУМЕНТАМ

```
    mov     w1, w0
    adrp    x0, .LC7
    add     x0, x0, :lo12:.LC7
    bl      printf
; возврат 0
    mov     w0, 0
; восстановить FP и LR
    ldp     x29, x30, [sp], 16
    ret

.LC7:
    .string "%d\n"
```

Также расширим все типы данных до 64-битных `uint64_t` и попробуем:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint64_t f (uint64_t a, uint64_t b, uint64_t c)
{
    return a*b*c;
};

int main()
{
    printf ("%lld\n", f(0x1122334455667788,
                        0x1111111122222222,
                        0x3333333344444444));
    return 0;
};
```

```
f:
    madd    x0, x0, x1, x2
    ret
main:
    mov     x1, 13396
    adrp    x0, .LC8
    stp     x29, x30, [sp, -16]!
    movk    x1, 0x27d0, lsl 16
    add     x0, x0, :lo12:.LC8
    movk    x1, 0x122, lsl 32
    add     x29, sp, 0
    movk    x1, 0x58be, lsl 48
    bl      printf
    mov     w0, 0
    ldp     x29, x30, [sp], 16
    ret

.LC8:
    .string "%lld\n"
```

Функция `f()` точно такая же, только теперь используются полные части 64-битных X-регистров. Длинные 64-битные значения загружаются в регистры по частям, это описано здесь: [1.31.3](#) (стр. 431).

Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Неоптимизирующий компилятор выдает немного лишнего кода:

```
f:
    sub     sp, sp, #16
    str     w0, [sp,12]
    str     w1, [sp,8]
    str     w2, [sp,4]
    ldr     w1, [sp,12]
    ldr     w0, [sp,8]
    mul     w1, w1, w0
    ldr     w0, [sp,4]
```

1.10. ДОСТУП К ПЕРЕДАНЫМ АРГУМЕНТАМ

```
add    w0, w1, w0
add    sp, sp, 16
ret
```

Код сохраняет входные аргументы в локальном стеке на случай если кому-то (или чему-то) в этой функции понадобится использовать регистры W0...W2, перезаписывая оригинальные аргументы функции, которые могут понадобиться в будущем. Это называется *Register Save Area*. ([*Procedure Call Standard for the ARM 64-bit Architecture (AArch64)*, (2013)]⁸³) Вызываемая функция не обязана сохранять их. Это то же что и «Shadow Space»: 1.10.2 (стр. 101).

Почему оптимизирующий GCC 4.9 убрал этот, сохраняющий аргументы, код?

Потому что он провел дополнительную работу по оптимизации и сделал вывод, что аргументы функции не понадобятся в будущем и регистры W0...W2 также не будут использоваться.

Также мы видим пару инструкций MUL/ADD вместо одной MADD.

1.10.4. MIPS

Листинг 1.95: Оптимизирующий GCC 4.4.5

```
.text:00000000 f:
; $a0=a
; $a1=b
; $a2=c
.text:00000000      mult    $a1, $a0
.text:00000004      mflo    $v0
.text:00000008      jr      $ra
.text:0000000C      addu    $v0, $a2, $v0      ; branch delay slot
; результат в $v0 во время выхода
.text:00000010 main:
.text:00000010
.text:00000010 var_10 = -0x10
.text:00000010 var_4  = -4
.text:00000010
.text:00000010      lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
.text:00000014      addiu   $sp, -0x20
.text:00000018      la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
.text:0000001C      sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000020      sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; установить c:
.text:00000024      li      $a2, 3
; установить a:
.text:00000028      li      $a0, 1
.text:0000002C      jal     f
; установить b:
.text:00000030      li      $a1, 2      ; branch delay slot
; результат сейчас в $v0
.text:00000034      lw      $gp, 0x20+var_10($sp)
.text:00000038      lui     $a0, ($LC0 >> 16)
.text:0000003C      lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
.text:00000040      la      $a0, ($LC0 & 0xFFFF)
.text:00000044      jalr    $t9
; взять результат ф-ции f() и передать его как второй аргумент в printf():
.text:00000048      move    $a1, $v0      ; branch delay slot
.text:0000004C      lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000050      move    $v0, $zero
.text:00000054      jr      $ra
.text:00000058      addiu   $sp, 0x20      ; branch delay slot
```

Первые 4 аргумента функции передаются в четырех регистрах с префиксами A-.

В MIPS есть два специальных регистра: HI и LO, которые выставляются в 64-битный результат умножения во время исполнения инструкции MULT.

К регистрам можно обращаться только используя инструкции MFL0 и MFHI. Здесь MFL0 берет младшую часть результата умножения и записывает в \$V0. Так что старшая 32-битная часть результата

⁸³Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17287>

1.11. ЕЩЁ О ВОЗВРАЩАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ

игнорируется (содержимое регистра HI не используется). Действительно, мы ведь работаем с 32-битным типом *int*.

И наконец, ADDU («Add Unsigned» — добавить беззнаковое) прибавляет значение третьего аргумента к результату.

В MIPS есть две разных инструкции сложения: ADD и ADDU. На самом деле, дело не в знаковых числах, а в исключениях: ADD может вызвать исключение во время переполнения. Это иногда полезно⁸⁴ и поддерживается, например, в ЯП Ada.

ADDU не вызывает исключения во время переполнения. А так как Си/Си++ не поддерживает всё это, мы видим здесь ADDU вместо ADD.

32-битный результат оставляется в \$V0.

В `main()` есть новая для нас инструкция: JAL («Jump and Link»). Разница между JAL и JALR в том, что относительное смещение кодируется в первой инструкции, а JALR переходит по абсолютному адресу, записанному в регистр («Jump and Link Register»).

Обе функции `f()` и `main()` расположены в одном объектном файле, так что относительный адрес `f()` известен и фиксирован.

1.11. Ещё о возвращаемых результатах

Результат выполнения функции в x86 обычно возвращается⁸⁵ через регистр EAX, а если результат имеет тип байт или символ (*char*), то в самой младшей части EAX — AL. Если функция возвращает число с плавающей запятой, то будет использован регистр FPU ST(0). В ARM обычно результат возвращается в регистре R0.

1.11.1. Попытка использовать результат функции возвращающей *void*

Кстати, что будет, если возвращаемое значение в функции `main()` объявлять не как *int*, а как *void*? Т.н. startup-код вызывает `main()` примерно так:

```
push envp
push argv
push argc
call main
push eax
call exit
```

Иными словами:

```
exit(main(argc,argv,envp));
```

Если вы объявите `main()` как *void*, и ничего не будете возвращать явно (при помощи выражения *return*), то в единственный аргумент `exit()` попадет то, что лежало в регистре EAX на момент выхода из `main()`. Там, скорее всего, будет какие-то случайное число, оставшееся от работы вашей функции. Так что код завершения программы будет псевдослучайным.

Мы можем это проиллюстрировать. Заметьте, что у функции `main()` тип возвращаемого значения именно *void*:

```
#include <stdio.h>

void main()
{
    printf ("Hello, world!\n");
};
```

Скомпилируем в Linux.

GCC 4.8.1 заменила `printf()` на `puts()` (мы видели это прежде: 1.5.4 (стр. 21)), но это нормально, потому что `puts()` возвращает количество выведенных символов, так же как и `printf()`. Обратите

⁸⁴<http://go.yurichev.com/17326>

⁸⁵См. также: MSDN: Return Values (C++): [MSDN](#)

1.11. ЕЩЁ О ВОЗВРАЩАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ

внимание на то, что EAX не обнуляется перед выходом из `main()`. Это значит что EAX перед выходом из `main()` содержит то, что `puts()` оставляет там.

Листинг 1.96: GCC 4.8.1

```
.LC0:
    .string "Hello, world!"
main:
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, -16
    sub     esp, 16
    mov     DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:.LC0
    call    puts
    leave
    ret
```

Напишем небольшой скрипт на `bash`, показывающий статус возврата («exit status» или «exit code»):

Листинг 1.97: tst.sh

```
#!/bin/sh
./hello_world
echo $?
```

И запустим:

```
$ tst.sh
Hello, world!
14
```

14 это как раз количество выведенных символов. Количество выведенных символов *проскальзывает* из `printf()` через EAX/RAX в «exit code».

Кстати, когда в Hex-Rays мы разбираем C++ код, нередко можно наткнуться на ф-цию, которая заканчивается деструктором какого-либо класса:

```
...
call    ??1CString@@QAE@XZ ; CString::~CString(void)
mov     ecx, [esp+30h+var_C]
pop     edi
pop     ebx
mov     large fs:0, ecx
add     esp, 28h
retn
```

По стандарту C++, деструкторы ничего не возвращают, но когда Hex-Rays об этом не знает, и думает что и деструктор, и эта ф-ция по умолчанию возвращает *int*, то на выходе получается такой код:

```
...
    return CString::~CString(&Str);
}
```

1.11.2. Что если не использовать результат функции?

`printf()` возвращает количество успешно выведенных символов, но результат работы этой функции редко используется на практике.

Можно даже явно вызывать функции, чей смысл именно в возвращаемых значениях, но явно не использовать их:

```
int f()
{
    // пропускаем первые 3 случайных значения:
    rand();
    rand();
    rand();
}
```

1.11. ЕЩЁ О ВОЗВРАЩАЕМЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ

```
// и используем 4-е:  
return rand();  
};
```

Результат работы `rand()` остается в `EAX` во всех четырех случаях. Но в первых трех случаях значение, лежащее в `EAX`, просто не используется.

1.11.3. Возврат структуры

Вернемся к тому факту, что возвращаемое значение остается в регистре `EAX`. Вот почему старые компиляторы Си не способны создавать функции, возвращающие нечто большее, нежели помещается в один регистр (обычно тип `int`), а когда нужно, приходится возвращать через указатели, указываемые в аргументах. Так что, как правило, если функция должна вернуть несколько значений, она возвращает только одно, а остальные — через указатели. Хотя позже и стало возможным, вернуть, скажем, целую структуру, но этот метод до сих пор не очень популярен. Если функция должна вернуть структуру, вызывающая функция должна сама, скрыто и прозрачно для программиста, выделить место и передать указатель на него в качестве первого аргумента. Это почти то же самое что и сделать это вручную, но компилятор прячет это.

Небольшой пример:

```
struct s  
{  
    int a;  
    int b;  
    int c;  
};  
  
struct s get_some_values (int a)  
{  
    struct s rt;  
  
    rt.a=a+1;  
    rt.b=a+2;  
    rt.c=a+3;  
  
    return rt;  
};
```

...получим (MSVC 2010 /Ox):

```
$T3853 = 8 ; size = 4  
_a$ = 12 ; size = 4  
?get_some_values@@YA?AUs@@H@Z PROC ; get_some_values  
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]  
    mov     eax, DWORD PTR $T3853[esp-4]  
    lea     edx, DWORD PTR [ecx+1]  
    mov     DWORD PTR [eax], edx  
    lea     edx, DWORD PTR [ecx+2]  
    add     ecx, 3  
    mov     DWORD PTR [eax+4], edx  
    mov     DWORD PTR [eax+8], ecx  
    ret     0  
?get_some_values@@YA?AUs@@H@Z ENDP ; get_some_values
```

`$T3853` это имя внутреннего макроса для передачи указателя на структуру.

Этот пример можно даже переписать, используя расширения C99:

```
struct s  
{  
    int a;  
    int b;  
    int c;  
};  
  
struct s get_some_values (int a)  
{
```

1.12. УКАЗАТЕЛИ

```
return (struct s){.a=a+1, .b=a+2, .c=a+3};
};
```

Листинг 1.98: GCC 4.8.1

```
_get_some_values proc near
ptr_to_struct    = dword ptr 4
a                = dword ptr 8

        mov     edx, [esp+a]
        mov     eax, [esp+ptr_to_struct]
        lea     ecx, [edx+1]
        mov     [eax], ecx
        lea     ecx, [edx+2]
        add     edx, 3
        mov     [eax+4], ecx
        mov     [eax+8], edx
        retn
_get_some_values endp
```

Как видно, функция просто заполняет поля в структуре, выделенной вызывающей функцией. Как если бы передавался просто указатель на структуру. Так что никаких проблем с эффективностью нет.

1.12. Указатели

1.13. Оператор GOTO

Оператор GOTO считается анти-паттерном, см: [Edgar Dijkstra, *Go To Statement Considered Harmful* (1968)⁸⁶]. Но тем не менее, его можно использовать в разумных пределах, см: [Donald E. Knuth, *Structured Programming with go to Statements* (1974)⁸⁷]⁸⁸.

Вот простейший пример:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf ("begin\n");
    goto exit;
    printf ("skip me!\n");
exit:
    printf ("end\n");
};
```

Вот что мы получаем в MSVC 2012:

Листинг 1.99: MSVC 2012

```
$SG2934 DB      'begin', 0aH, 00H
$SG2936 DB      'skip me!', 0aH, 00H
$SG2937 DB      'end', 0aH, 00H

_main  PROC
        push    ebp
        mov     ebp, esp
        push    OFFSET $SG2934 ; 'begin'
        call    _printf
        add     esp, 4
        jmp     SHORT $exit$3
        push    OFFSET $SG2936 ; 'skip me!'
        call    _printf
```

⁸⁶<http://yurichev.com/mirrors/Dijkstra68.pdf>

⁸⁷<http://yurichev.com/mirrors/KnuthStructuredProgrammingGoTo.pdf>

⁸⁸В [Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++*] также есть примеры.

1.13. ОПЕРАТОР GOTO

```
        add     esp, 4
$exit$3:
        push    OFFSET $SG2937 ; 'end'
        call    _printf
        add     esp, 4
        xor     eax, eax
        pop     ebp
        ret     0
_main   ENDP
```

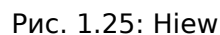
Выражение *goto* заменяется инструкцией JMP, которая работает точно также: безусловный переход в другое место. Вызов второго printf() может исполниться только при помощи человеческого вмешательства, используя отладчик или модифицирование кода.

Это также может быть простым упражнением на модификацию кода.

C:\Polygon\goto.exe		FR0	-----	a32 PE .00401000
.00401000:	55	push	ebp	
.00401001:	8BEC	mov	ebp,esp	
.00401003:	6800304000	push	000403000	; 'begin' --01
.00401008:	FF1590204000	call	printf	
.0040100E:	83C404	add	esp,4	
.00401011:	EB0E	jmps	.000401021	--02
.00401013:	6808304000	push	000403008	; 'skip me!' --03
.00401018:	FF1590204000	call	printf	
.0040101E:	83C404	add	esp,4	
.00401021:	6814304000	2push	000403014	--04
.00401026:	FF1590204000	call	printf	
.0040102C:	83C404	add	esp,4	
.0040102F:	33C0	xor	eax, eax	
.00401031:	5D	pop	ebp	
.00401032:	C3	ret	; ^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.^.	

112

Поместите курсор по адресу JMP (0x410), нажмите F3 (редактирование), нажмите два нуля, так что опкод становится EB 00:



Листинг 1.100: Результат

Подобного же эффекта можно достичь, если заменить инструкцию JMP на две инструкции NOP. NOP имеет опкод 0x90 и длину в 1 байт, так что нужно 2 инструкции для замены.

Листинг 1.101: Оптимизирующий MSVC 2012

Впрочем, строку «skip me!» компилятор убрать забыл.

1.13.2. Упражнение

Попробуйте добиться того же самого в вашем любимом компиляторе и отладчике.

1.14. Условные переходы**1.14.1. Простой пример**

```
#include <stdio.h>

void f_signed (int a, int b)
{
    if (a>b)
        printf ("a>b\n");
    if (a==b)
        printf ("a==b\n");
    if (a<b)
        printf ("a<b\n");
};

void f_unsigned (unsigned int a, unsigned int b)
{
    if (a>b)
        printf ("a>b\n");
    if (a==b)
        printf ("a==b\n");
    if (a<b)
        printf ("a<b\n");
};

int main()
{
    f_signed(1, 2);
    f_unsigned(1, 2);
    return 0;
};
```

x86**x86 + MSVC**

Имеем в итоге функцию f_signed():

Листинг 1.102: Неоптимизирующий MSVC 2010

```
_a$ = 8
_b$ = 12
_f_signed PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    cmp     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    jle     SHORT $LN3@f_signed
    push    OFFSET $SG737          ; 'a>b'
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN3@f_signed:
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
    cmp     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    jne     SHORT $LN2@f_signed
    push    OFFSET $SG739          ; 'a==b'
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN2@f_signed:
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp]
cmp     edx, DWORD PTR _b$[ebp]
jge     SHORT $LN4@f_signed
push    OFFSET $SG741      ; 'a<b'
call    _printf
add     esp, 4
$LN4@f_signed:
pop     ebp
ret     0
_f_signed ENDP
```

Первая инструкция JLE значит *Jump if Less or Equal*. Если второй операнд больше первого или равен ему, произойдет переход туда, где будет следующая проверка.

А если это условие не срабатывает (то есть второй операнд меньше первого), то перехода не будет, и работает первый printf().

Вторая проверка это JNE: *Jump if Not Equal*. Переход не произойдет, если операнды равны.

Третья проверка JGE: *Jump if Greater or Equal* — переход если первый операнд больше второго или равен ему. Кстати, если все три условных перехода сработают, ни один printf() не вызовется. Но без внешнего вмешательства это невозможно.

Функция f_unsigned() точно такая же, за тем исключением, что используются инструкции JBE и JAE вместо JLE и JGE:

Листинг 1.103: GCC

```
_a$ = 8 ; size = 4
_b$ = 12 ; size = 4
_f_unsigned PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    cmp     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    jbe     SHORT $LN3@f_unsigned
    push    OFFSET $SG2761      ; 'a>b'
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN3@f_unsigned:
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
    cmp     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    jne     SHORT $LN2@f_unsigned
    push    OFFSET $SG2763      ; 'a==b'
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN2@f_unsigned:
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp]
    cmp     edx, DWORD PTR _b$[ebp]
    jae     SHORT $LN4@f_unsigned
    push    OFFSET $SG2765      ; 'a<b'
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN4@f_unsigned:
    pop     ebp
    ret     0
_f_unsigned ENDP
```

Здесь всё то же самое, только инструкции условных переходов немного другие:

JBE — *Jump if Below or Equal* и JAE — *Jump if Above or Equal*. Эти инструкции (JA/JAE/JB/JBE) отличаются от JG/JGE/JL/JLE тем, что работают с беззнаковыми переменными.

Отступление: смотрите также секцию о представлении знака в числах (2.2 (стр. 444)). Таким образом, увидев где используется JG/JL вместо JA/JB и наоборот, можно сказать почти уверенно насчет того, является ли тип переменной знаковым (signed) или беззнаковым (unsigned).

Далее функция main(), где ничего нового для нас нет:

Листинг 1.104: main()

```
_main PROC
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    2
    push    1
    call    _f_signed
    add     esp, 8
    push    2
    push    1
    call    _f_unsigned
    add     esp, 8
    xor     eax, eax
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
```

Если попробовать этот пример в OllyDbg, можно увидеть, как выставляются флаги. Начнем с функции `f_unsigned()`, которая работает с беззнаковыми числами.

В целом в каждой функции CMP выполняется три раза, но для одних и тех же аргументов, так что флаги все три раза будут одинаковы.

Результат первого сравнения:

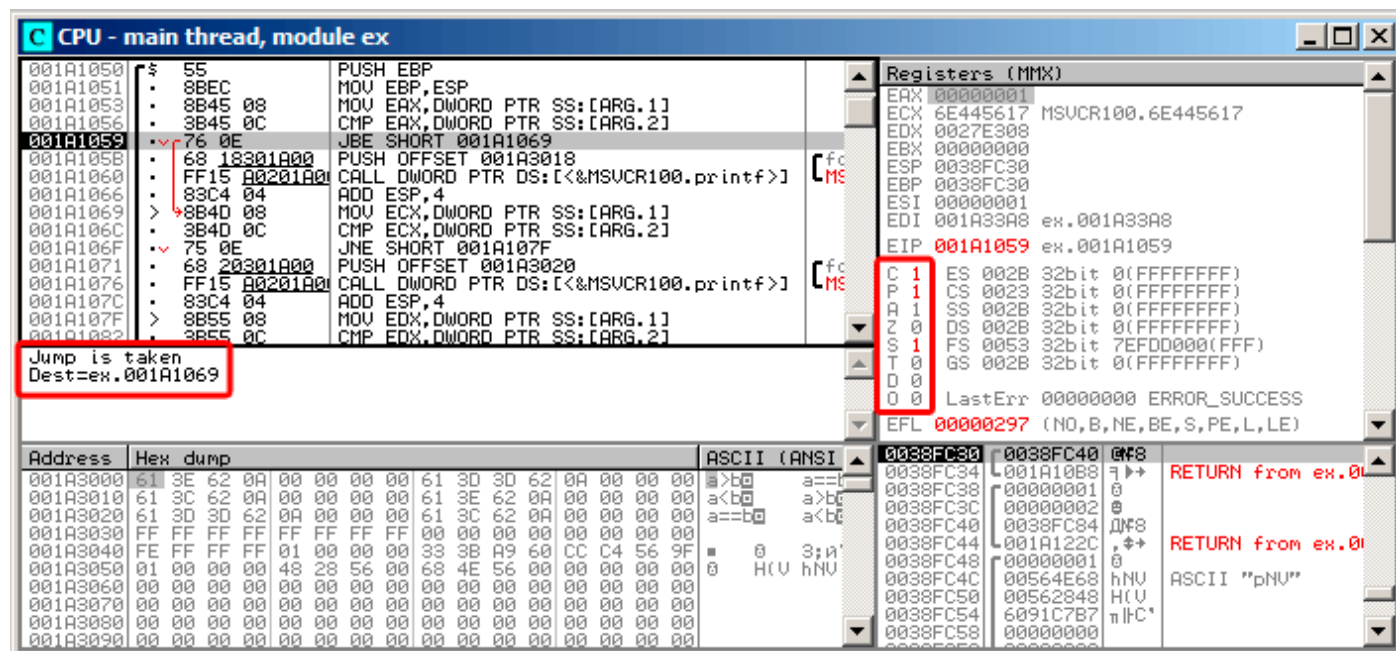


Рис. 1.26: OllyDbg: `f_unsigned()`: первый условный переход

Итак, флаги: C=1, P=1, A=1, Z=0, S=1, T=0, D=0, O=0. Для краткости, в OllyDbg флаги называются только одной буквой.

OllyDbg подсказывает, что первый переход (JBE) сейчас сработает. Действительно, если заглянуть в документацию от Intel, (11.1.4 (стр. 988)) прочитаем там, что JBE срабатывает в случаях если CF=1 или ZF=1. Условие здесь выполняется, так что переход срабатывает.

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Следующий переход:

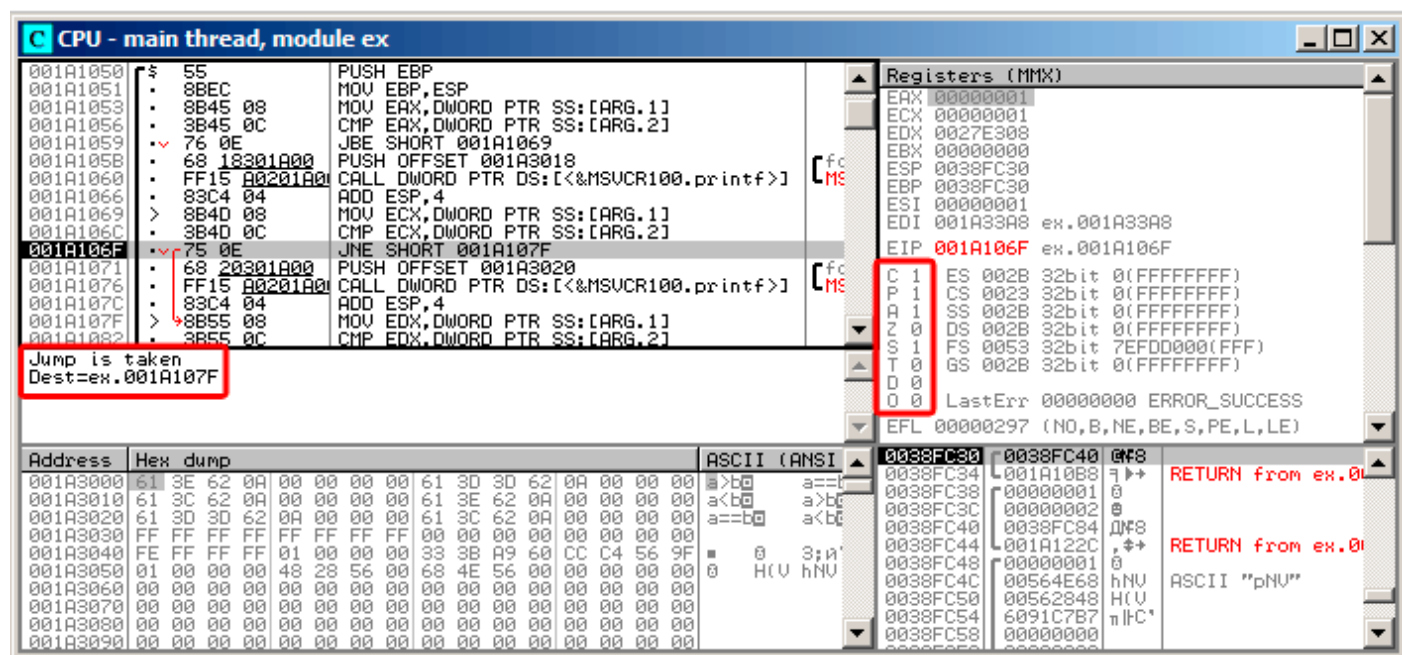


Рис. 1.27: OllyDbg: `f_unsigned()`: второй условный переход

OllyDbg подсказывает, что JNZ сработает. Действительно, JNZ срабатывает если ZF=0 (zero flag).

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Третий переход, JNB:

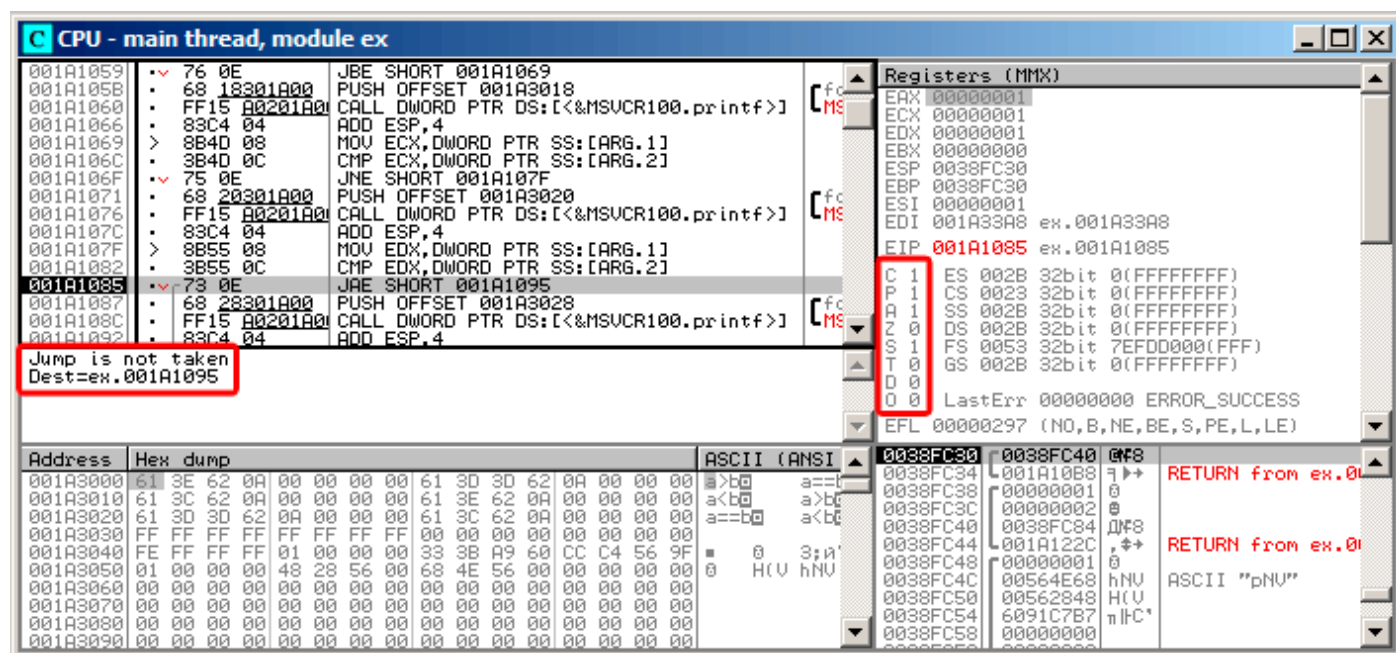


Рис. 1.28: OllyDbg: `f_unsigned()`: третий условный переход

В документации от Intel (11.1.4 (стр. 988)) мы можем найти, что JNB срабатывает если $CF=0$ (carry flag). В нашем случае это не так, переход не срабатывает, и выполняется третий по счету `printf()`.

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Теперь можно попробовать в OllyDbg функцию `f_signed()`, работающую со знаковыми величинами. Флаги выставляются точно так же: `C=1, P=1, A=1, Z=0, S=1, T=0, D=0, O=0`. Первый переход `JLE` сработает:

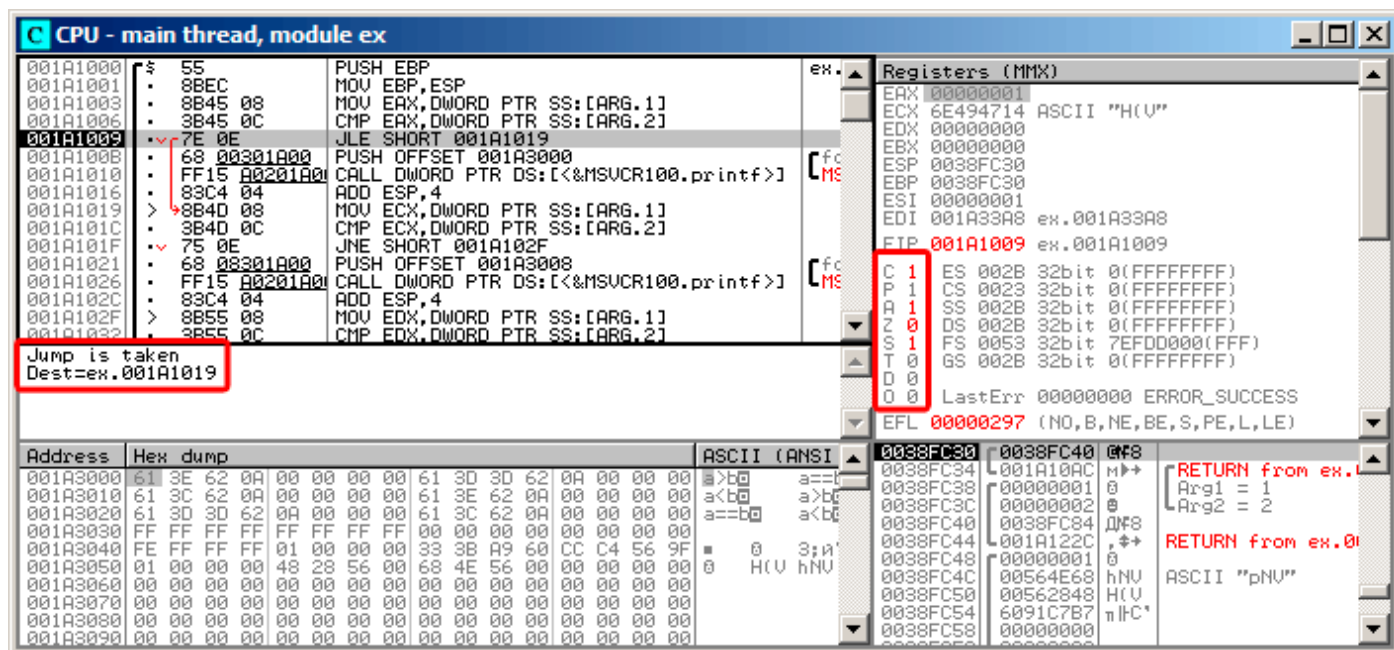


Рис. 1.29: OllyDbg: `f_signed()`: первый условный переход

В документации от Intel (11.1.4 (стр. 988)) мы можем прочитать, что эта инструкция срабатывает если `ZF=1` или `SF≠OF`. В нашем случае `SF≠OF`, так что переход срабатывает.

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Второй переход JNZ работает: он срабатывает если ZF=0 (zero flag):

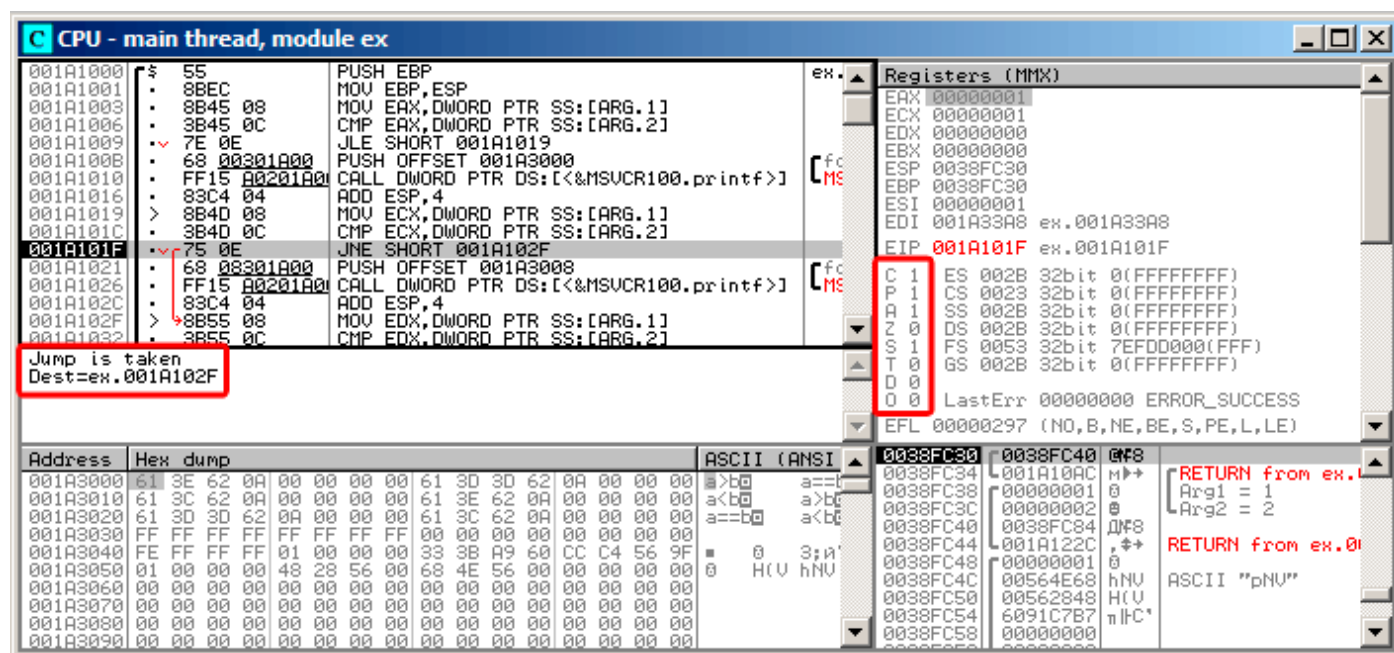


Рис. 1.30: OllyDbg: f_signed(): второй условный переход

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Третий переход JGE не работает, потому что он срабатывает, только если SF=OF, что в нашем случае не так:

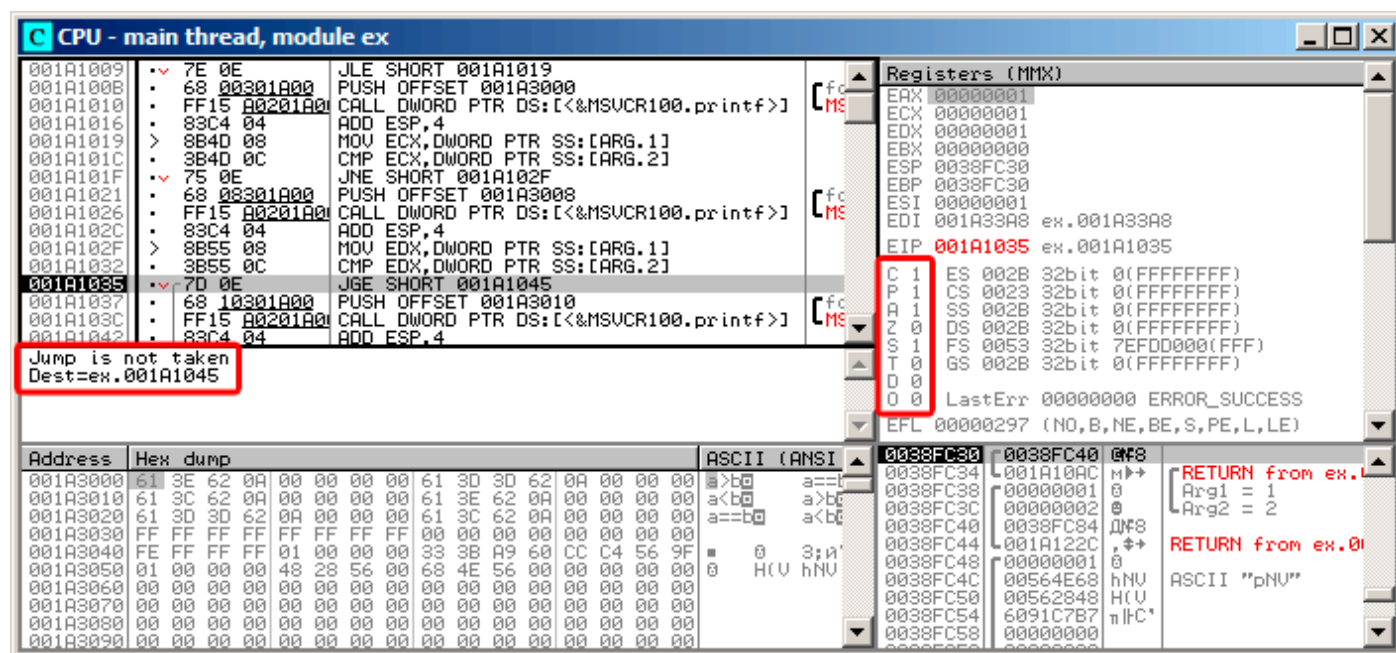


Рис. 1.31: OllyDbg: f_signed(): третий условный переход

Можем попробовать модифицировать исполняемый файл так, чтобы функция `f_unsigned()` всегда показывала «a==b», при любых входящих значениях. Вот как она выглядит в Hiew:

```

Hiew: 7_1.exe
C:\Polygon\ollydbg\7_1.exe  FRO ----- a32 PE .00401000 Hiew 8.02 (c)SEN
.00401000: 55          push     ebp
.00401001: 8BEC        mov      ebp,esp
.00401003: 8B4508      mov      eax,[ebp][8]
.00401006: 3B450C      cmp      eax,[ebp][00C]
.00401009: 7E0D        jle      .000401018 --E1
.0040100B: 680B0000    push     00040B000 --E2
.00401010: E8AA000000  call     .0004010BF --E3
.00401015: 83C404      add      esp,4
.00401018: 8B4D08      1mov     ecx,[ebp][8]
.0040101B: 3B4D0C      cmp      ecx,[ebp][00C]
.0040101E: 750D        jnz      .00040102D --E4
.00401020: 680B0000    push     00040B008 ; 'a==b' --E5
.00401025: E895000000  call     .0004010BF --E3
.0040102A: 83C404      add      esp,4
.0040102D: 8B5508      4mov     edx,[ebp][8]
.00401030: 3B550C      cmp      edx,[ebp][00C]
.00401033: 7D0D        jge      .000401042 --E6
.00401035: 6810B04000  push     00040B010 --E7
.0040103A: E880000000  call     .0004010BF --E3
.0040103F: 83C404      add      esp,4
.00401042: 5D          6pop     ebp
.00401043: C3          retn     ; ^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-^-
.00401044: CC          int      3
.00401045: CC          int      3
.00401046: CC          int      3
.00401047: CC          int      3
.00401048: CC          int      3
1Global 2FilBlk 3CryBlk 4ReLoad 5OrdLdr 6String 7Direct 8Table 91byte 10Leave 11Naked 12AddNam

```

Рис. 1.32: Hiew: функция `f_unsigned()`

Собственно, задач три:

- заставить первый переход срабатывать всегда;
- заставить второй переход не срабатывать никогда;
- заставить третий переход срабатывать всегда.

Так мы направим путь исполнения кода (code flow) во второй `printf()`, и он всегда будет срабатывать и выводить на консоль «a==b».

Для этого нужно изменить три инструкции (или байта):

- Первый переход теперь будет JMP, но смещение перехода (`jump offset`) останется прежним.
- Второй переход может быть и будет срабатывать иногда, но в любом случае он будет совершать переход только на следующую инструкцию, потому что мы выставяем смещение перехода (`jump offset`) в 0.

В этих инструкциях смещение перехода просто прибавляется к адресу следующей инструкции.

Когда смещение 0, переход будет на следующую инструкцию.

- Третий переход конвертируем в JMP точно так же, как и первый, он будет срабатывать всегда.



Если забыть про какой-то из переходов, то тогда будет срабатывать несколько вызовов `printf()`, а нам ведь нужно чтобы исполнялся только один.

Неоптимизирующий GCC

Неоптимизирующий GCC 4.4.1 производит почти такой же код, за исключением `puts()` (1.5.4 (стр. 21)) вместо `printf()`.

Оптимизирующий GCC

Наблюдательный читатель может спросить, зачем исполнять CMP так много раз, если флаги всегда одни и те же? По-видимому, оптимизирующий MSVC не может этого делать, но GCC 4.8.1 делает больше оптимизаций:

Листинг 1.105: GCC 4.8.1 f signed()

```
f_signed:
    mov     eax, DWORD PTR [esp+8]
    cmp     DWORD PTR [esp+4], eax
    jg      .L6
    je      .L7
    jge     .L1
    mov     DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC2 ; "a<b"
    jmp     puts
.L6:
    mov     DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC0 ; "a>b"
    jmp     puts
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
.L1:
    rep ret
.L7:
    mov     DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC1 ; "a==b"
    jmp     puts
```

Мы здесь также видим JMP puts вместо CALL puts / RETN. Этот прием описан немного позже: [1.15.1](#) (стр. 144).

Нужно сказать, что x86-код такого типа редок. MSVC 2012, как видно, не может генерировать подобное. С другой стороны, программисты на ассемблере прекрасно осведомлены о том, что инструкции Jcc можно располагать последовательно.

Так что если вы видите это где-то, имеется немалая вероятность, что этот фрагмент кода был написан вручную.

Функция f_unsigned() получилась не настолько эстетически короткой:

Листинг 1.106: GCC 4.8.1 f_unsigned()

```
f_unsigned:
    push    esi
    push    ebx
    sub     esp, 20
    mov     esi, DWORD PTR [esp+32]
    mov     ebx, DWORD PTR [esp+36]
    cmp     esi, ebx
    ja      .L13
    cmp     esi, ebx ; эту инструкцию можно было бы убрать
    je      .L14
.L10:
    jb      .L15
    add     esp, 20
    pop     ebx
    pop     esi
    ret
.L15:
    mov     DWORD PTR [esp+32], OFFSET FLAT:.LC2 ; "a<b"
    add     esp, 20
    pop     ebx
    pop     esi
    jmp     puts
.L13:
    mov     DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:.LC0 ; "a>b"
    call    puts
    cmp     esi, ebx
    jne     .L10
.L14:
    mov     DWORD PTR [esp+32], OFFSET FLAT:.LC1 ; "a==b"
    add     esp, 20
    pop     ebx
    pop     esi
    jmp     puts
```

Тем не менее, здесь 2 инструкции CMP вместо трех.

Так что, алгоритмы оптимизации GCC 4.8.1, наверное, ещё пока не идеальны.

ARM

32-битный ARM

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.107: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:000000B8          EXPORT f_signed
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
.text:000000B8          f_signed          ; CODE XREF: main+C
.text:000000B8 70 40 2D E9      STMFD      SP!, {R4-R6,LR}
.text:000000BC 01 40 A0 E1      MOV       R4, R1
.text:000000C0 04 00 50 E1      CMP       R0, R4
.text:000000C4 00 50 A0 E1      MOV       R5, R0
.text:000000C8 1A 0E 8F C2      ADRGT     R0, aAB          ; "a>b\n"
.text:000000CC A1 18 00 CB      BLGT      __2printf
.text:000000D0 04 00 55 E1      CMP       R5, R4
.text:000000D4 67 0F 8F 02      ADREQ     R0, aAB_0       ; "a==b\n"
.text:000000D8 9E 18 00 0B      BLEQ      __2printf
.text:000000DC 04 00 55 E1      CMP       R5, R4
.text:000000E0 70 80 BD A8      LDMGEFD   SP!, {R4-R6,PC}
.text:000000E4 70 40 BD E8      LDMFD     SP!, {R4-R6,LR}
.text:000000E8 19 0E 8F E2      ADR       R0, aAB_1       ; "a<b\n"
.text:000000EC 99 18 00 EA      B         __2printf
.text:000000EC          ; End of function f_signed
```

Многие инструкции в режиме ARM могут быть исполнены только при некоторых выставленных флагах.

Это нередко используется для сравнения чисел.

К примеру, инструкция ADD на самом деле называется ADDAL внутри, AL означает *Always*, то есть, исполнять всегда. Предикаты кодируются в 4-х старших битах инструкции 32-битных ARM-инструкций (*condition field*). Инструкция безусловного перехода B на самом деле условная и кодируется так же, как и прочие инструкции условных переходов, но имеет AL в *condition field*, то есть исполняется всегда (*execute Always*), игнорируя флаги.

Инструкция ADRGT работает так же, как и ADR, но исполняется только в случае, если предыдущая инструкция CMP, сравнивая два числа, обнаруживает, что одно из них больше второго (*Greater Than*).

Следующая инструкция BLGT ведет себя так же, как и BL и сработает, только если результат сравнения “больше чем” (*Greater Than*). ADRGT записывает в R0 указатель на строку a>b\n, а BLGT вызывает printf(). Следовательно, эти инструкции с суффиксом -GT исполняются только в том случае, если значение в R0 (там a) было больше, чем значение в R4 (там b).

Далее мы увидим инструкции ADREQ и BLEQ. Они работают так же, как и ADR и BL, но исполняются только если значения при последнем сравнении были равны. Перед ними расположен ещё один CMP, потому что вызов printf() мог испортить состояние флагов.

Далее мы увидим LDMGEFD. Эта инструкция работает так же, как и LDMFD⁸⁹, но сработает только если в результате сравнения одно из значений было больше или равно второму (*Greater or Equal*). Смысл инструкции LDMGEFD SP!, {R4-R6,PC} в том, что это как бы эпилог функции, но он сработает только если $a \geq b$, только тогда работа функции закончится.

Но если это не так, то есть $a < b$, то исполнение дойдет до следующей инструкции LDMFD SP!, {R4-R6,LR}. Это ещё один эпилог функции. Эта инструкция восстанавливает состояние регистров R4-R6, но и LR вместо PC, таким образом, пока что, не делая возврата из функции.

Последние две инструкции вызывают printf() со строкой «a<b\n» в качестве единственного аргумента. Безусловный переход на printf() вместо возврата из функции мы уже рассматривали в секции «printf() с несколькими аргументами» (1.8.2 (стр. 54)).

Функция f_unsigned точно такая же, но там используются инструкции ADRHI, BLHI, и LDMCSFD. Эти предикаты (*HI = Unsigned higher, CS = Carry Set (greater than or equal)*) аналогичны рассмотренным, но служат для работы с беззнаковыми значениями.

В функции main() ничего нового для нас нет:

Листинг 1.108: main()

```
.text:00000128          EXPORT main
.text:00000128          main
.text:00000128 10 40 2D E9      STMFD      SP!, {R4,LR}
.text:0000012C 02 10 A0 E3      MOV       R1, #2
.text:00000130 01 00 A0 E3      MOV       R0, #1
.text:00000134 DF FF FF EB      BL        f_signed
.text:00000138 02 10 A0 E3      MOV       R1, #2
.text:0000013C 01 00 A0 E3      MOV       R0, #1
```

⁸⁹LDMFD

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
.text:00000140 EA FF FF EB      BL      f_unsigned
.text:00000144 00 00 A0 E3      MOV     R0, #0
.text:00000148 10 80 BD E8      LDMFD   SP!, {R4,PC}
.text:00000148                      ; End of function main
```

Так, в режиме ARM можно обойтись без условных переходов.

Почему это хорошо? Читайте здесь: [2.10.1](#) (стр. 457).

В x86 нет аналогичной возможности, если не считать инструкцию CMOVcc, это то же что и MOV, но она срабатывает только при определенных выставленных флагах, обычно выставленных при помощи CMP во время сравнения.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.109: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
.text:00000072          f_signed ; CODE XREF: main+6
.text:00000072 70 B5      PUSH     {R4-R6,LR}
.text:00000074 0C 00      MOVVS   R4, R1
.text:00000076 05 00      MOVVS   R5, R0
.text:00000078 A0 42      CMP      R0, R4
.text:0000007A 02 DD      BLE      loc_82
.text:0000007C A4 A0      ADR      R0, aAB          ; "a>b\n"
.text:0000007E 06 F0 B7 F8    BL       __2printf
.text:00000082
.text:00000082          loc_82 ; CODE XREF: f_signed+8
.text:00000082 A5 42      CMP      R5, R4
.text:00000084 02 D1      BNE      loc_8C
.text:00000086 A4 A0      ADR      R0, aAB_0        ; "a==b\n"
.text:00000088 06 F0 B2 F8    BL       __2printf
.text:0000008C
.text:0000008C          loc_8C ; CODE XREF: f_signed+12
.text:0000008C A5 42      CMP      R5, R4
.text:0000008E 02 DA      BGE      locret_96
.text:00000090 A3 A0      ADR      R0, aAB_1        ; "a<b\n"
.text:00000092 06 F0 AD F8    BL       __2printf
.text:00000096
.text:00000096          locret_96 ; CODE XREF: f_signed+1C
.text:00000096 70 BD      POP      {R4-R6,PC}
.text:00000096                      ; End of function f_signed
```

В режиме Thumb только инструкции B могут быть дополнены условием исполнения (*condition code*), так что код для режима Thumb выглядит привычнее.

BLE это обычный переход с условием *Less than or Equal*, BNE — *Not Equal*, BGE — *Greater than or Equal*.

Функция f_unsigned точно такая же, но для работы с беззнаковыми величинами там используются инструкции BLS (*Unsigned lower or same*) и BCS (*Carry Set (Greater than or equal)*).

ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Листинг 1.110: f_signed()

```
f_signed:
; W0=a, W1=b
    cmp     w0, w1
    bgt     .L19      ; Branch if Greater Than (переход, если больше чем) (a>b)
    beq     .L20      ; Branch if Equal (переход, если равно) (a==b)
    bge     .L15      ; Branch if Greater than or Equal (переход, если больше или равно) (a>=b)
; b) (здесь это невозможно)
; a<b
    adrp    x0, .LC11      ; "a<b"
    add     x0, x0, :lo12:.LC11
    b       puts
.L19:
    adrp    x0, .LC9       ; "a>b"
```


1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
        add     x0, x0, :lo12:.LC9
        b       puts
.L15:    ; попасть сюда невозможно
        ret
.L20:    adrp    x0, .LC10          ; "a==b"
        add     x0, x0, :lo12:.LC10
        b       puts
```

Листинг 1.111: f_unsigned()

```
f_unsigned:
    stp        x29, x30, [sp, -48]!
; W0=a, W1=b
    cmp        w0, w1
    add        x29, sp, 0
    str        x19, [sp,16]
    mov        w19, w0
    bhi        .L25      ; Branch if HIgher (переход, если выше) (a>b)
    cmp        w19, w1
    beq        .L26      ; Branch if Equal (переход, если равно) (a==b)
.L23:    bcc     .L27      ; Branch if Carry Clear (если нет переноса)(если меньше, чем) (a<b)
; эпилог функции, сюда попасть невозможно
    ldr        x19, [sp,16]
    ldp        x29, x30, [sp], 48
    ret
.L27:    ldr        x19, [sp,16]
    adrp       x0, .LC11          ; "a<b"
    ldp        x29, x30, [sp], 48
    add        x0, x0, :lo12:.LC11
    b          puts
.L25:    adrp     x0, .LC9          ; "a>b"
    str        x1, [x29,40]
    add        x0, x0, :lo12:.LC9
    bl        puts
    ldr        x1, [x29,40]
    cmp        w19, w1
    bne        .L23      ; Branch if Not Equal (переход, если не равно)
.L26:    ldr        x19, [sp,16]
    adrp       x0, .LC10          ; "a==b"
    ldp        x29, x30, [sp], 48
    add        x0, x0, :lo12:.LC10
    b          puts
```

Комментарии добавлены автором этой книги. В глаза бросается то, что компилятор не в курсе, что некоторые ситуации невозможны, поэтому кое-где в функциях остается код, который никогда не исполнится.

Упражнение

Попробуйте вручную оптимизировать функции по размеру, убрав избыточные инструкции и не добавляя новых.

MIPS

Одна отличительная особенность MIPS это отсутствие регистра флагов. Очевидно, так было сделано для упрощения анализа зависимости данных (data dependency).

Так что здесь есть инструкция, похожая на SETcc в x86: SLT («Set on Less Than» — установить если меньше чем, знаковая версия) и SLTU (беззнаковая версия). Эта инструкция устанавливает регистр-получатель в 1 если условие верно или в 0 в противном случае.

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Затем регистр-получатель проверяется, используя инструкцию BEQ («Branch on Equal» — переход если равно) или BNE («Branch on Not Equal» — переход если не равно) и может произойти переход. Так что эта пара инструкций должна использоваться в MIPS для сравнения и перехода. Начнем со знаковой версии нашей функции:

Листинг 1.112: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:00000000 f_signed: # CODE XREF: main+18
.text:00000000
.text:00000000 var_10 = -0x10
.text:00000000 var_8 = -8
.text:00000000 var_4 = -4
.text:00000000 arg_0 = 0
.text:00000000 arg_4 = 4
.text:00000000
.text:00000000 addiu $sp, -0x20
.text:00000004 sw $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:00000008 sw $fp, 0x20+var_8($sp)
.text:0000000C move $fp, $sp
.text:00000010 la $gp, __gnu_local_gp
.text:00000018 sw $gp, 0x20+var_10($sp)
; сохранить входные значения в локальном стеке:
.text:0000001C sw $a0, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000020 sw $a1, 0x20+arg_4($fp)
; перезагрузить их:
.text:00000024 lw $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000028 lw $v0, 0x20+arg_4($fp)
; $v0=b
; $v1=a
.text:0000002C or $at, $zero ; NOP
; это псевдоинструкция. на самом деле, там "slt $v0,$v0,$v1" .
; так что $v0 будет установлен в 1, если $v0<$v1 (b<a) или в 0 в противном случае:
.text:00000030 slt $v0, $v1
; перейти на loc_5c, если условие не верно.
; это псевдоинструкция. на самом деле, там "beq $v0,$zero,loc_5c" :
.text:00000034 beqz $v0, loc_5C
; вывести "a>b" и выйти
.text:00000038 or $at, $zero ; branch delay slot, NOP
.text:0000003C lui $v0, (unk_230 >> 16) # "a>b"
.text:00000040 addiu $a0, $v0, (unk_230 & 0xFFFF) # "a>b"
.text:00000044 lw $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:00000048 or $at, $zero ; NOP
.text:0000004C move $t9, $v0
.text:00000050 jalr $t9
.text:00000054 or $at, $zero ; branch delay slot, NOP
.text:00000058 lw $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:0000005C
.text:0000005C loc_5C: # CODE XREF: f_signed+34
.text:0000005C lw $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000060 lw $v0, 0x20+arg_4($fp)
.text:00000064 or $at, $zero ; NOP
; проверить a==b, перейти на loc_90, если это не так:
.text:00000068 bne $v1, $v0, loc_90
.text:0000006C or $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; условие верно, вывести "a==b" и закончить:
.text:00000070 lui $v0, (aAB >> 16) # "a==b"
.text:00000074 addiu $a0, $v0, (aAB & 0xFFFF) # "a==b"
.text:00000078 lw $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:0000007C or $at, $zero ; NOP
.text:00000080 move $t9, $v0
.text:00000084 jalr $t9
.text:00000088 or $at, $zero ; branch delay slot, NOP
.text:0000008C lw $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:00000090
.text:00000090 loc_90: # CODE XREF: f_signed+68
.text:00000090 lw $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000094 lw $v0, 0x20+arg_4($fp)
.text:00000098 or $at, $zero ; NOP
; проверить условие $v1<$v0 (a<b), установить $v0 в 1, если условие верно:
.text:0000009C slt $v0, $v1, $v0
; если условие не верно (т.е. $v0==0), перейти на loc_c8:
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
.text:000000A0      beqz    $v0, loc_C8
.text:000000A4      or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; условие верно, вывести "a<b" и закончить
.text:000000A8      lui     $v0, (aAB_0 >> 16) # "a<b"
.text:000000AC      addiu   $a0, $v0, (aAB_0 & 0xFFFF) # "a<b"
.text:000000B0      lw      $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:000000B4      or      $at, $zero ; NOP
.text:000000B8      move    $t9, $v0
.text:000000BC      jalr    $t9
.text:000000C0      or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
.text:000000C4      lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:000000C8
; все 3 условия были неверны, так что просто заканчиваем:
.text:000000C8 loc_C8:                                # CODE XREF: f_signed+A0
.text:000000C8      move    $sp, $fp
.text:000000CC      lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:000000D0      lw      $fp, 0x20+var_8($sp)
.text:000000D4      addiu   $sp, 0x20
.text:000000D8      jr      $ra
.text:000000DC      or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
.text:000000DC      # End of function f_signed
```

SLT REG0, REG0, REG1 сокращается в IDA до более короткой формы SLT REG0, REG1. Мы также видим здесь псевдоинструкцию BEQZ («Branch if Equal to Zero» — переход если равно нулю), которая, на самом деле, BEQ REG, \$ZERO, LABEL.

Беззнаковая версия точно такая же, только здесь используется SLTU (беззнаковая версия, отсюда «U» в названии) вместо SLT:

Листинг 1.113: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.text:000000E0 f_unsigned:                                # CODE XREF: main+28
.text:000000E0
.text:000000E0 var_10      = -0x10
.text:000000E0 var_8       = -8
.text:000000E0 var_4       = -4
.text:000000E0 arg_0       = 0
.text:000000E0 arg_4       = 4
.text:000000E0
.text:000000E0      addiu   $sp, -0x20
.text:000000E4      sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:000000E8      sw      $fp, 0x20+var_8($sp)
.text:000000EC      move    $fp, $sp
.text:000000F0      la      $gp, __gnu_local_gp
.text:000000F8      sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
.text:000000FC      sw      $a0, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000100      sw      $a1, 0x20+arg_4($fp)
.text:00000104      lw      $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000108      lw      $v0, 0x20+arg_4($fp)
.text:0000010C      or      $at, $zero
.text:00000110      sltu    $v0, $v1
.text:00000114      beqz    $v0, loc_13C
.text:00000118      or      $at, $zero
.text:0000011C      lui     $v0, (unk_230 >> 16)
.text:00000120      addiu   $a0, $v0, (unk_230 & 0xFFFF)
.text:00000124      lw      $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:00000128      or      $at, $zero
.text:0000012C      move    $t9, $v0
.text:00000130      jalr    $t9
.text:00000134      or      $at, $zero
.text:00000138      lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:0000013C
.text:0000013C loc_13C:                                # CODE XREF: f_unsigned+34
.text:0000013C      lw      $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000140      lw      $v0, 0x20+arg_4($fp)
.text:00000144      or      $at, $zero
.text:00000148      bne     $v1, $v0, loc_170
.text:0000014C      or      $at, $zero
.text:00000150      lui     $v0, (aAB >> 16) # "a==b"
.text:00000154      addiu   $a0, $v0, (aAB & 0xFFFF) # "a==b"
.text:00000158      lw      $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
.text:0000015C      or      $at, $zero
.text:00000160      move     $t9, $v0
.text:00000164      jalr     $t9
.text:00000168      or      $at, $zero
.text:0000016C      lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:00000170      loc_170:
.text:00000170      # CODE XREF: f_unsigned+68
.text:00000170      lw      $v1, 0x20+arg_0($fp)
.text:00000174      lw      $v0, 0x20+arg_4($fp)
.text:00000178      or      $at, $zero
.text:0000017C      sltu    $v0, $v1, $v0
.text:00000180      beqz    $v0, loc_1A8
.text:00000184      or      $at, $zero
.text:00000188      lui     $v0, (aAB_0 >> 16) # "a<b"
.text:0000018C      addiu   $a0, $v0, (aAB_0 & 0xFFFF) # "a<b"
.text:00000190      lw      $v0, (puts & 0xFFFF)($gp)
.text:00000194      or      $at, $zero
.text:00000198      move     $t9, $v0
.text:0000019C      jalr     $t9
.text:000001A0      or      $at, $zero
.text:000001A4      lw      $gp, 0x20+var_10($fp)
.text:000001A8      loc_1A8:
.text:000001A8      # CODE XREF: f_unsigned+A0
.text:000001A8      move     $sp, $fp
.text:000001AC      lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
.text:000001B0      lw      $fp, 0x20+var_8($sp)
.text:000001B4      addiu   $sp, 0x20
.text:000001B8      jr      $ra
.text:000001BC      or      $at, $zero
.text:000001BC      # End of function f_unsigned
```

1.14.2. Вычисление абсолютной величины

Это простая функция:

```
int my_abs (int i)
{
    if (i<0)
        return -i;
    else
        return i;
};
```

Оптимизирующий MSVC

Обычный способ генерации кода:

Листинг 1.114: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
i$ = 8
my_abs PROC
; ECX = input
    test     ecx, ecx
; проверить знак входного значения
; пропустить инструкцию NEG, если знак положительный
    jns      SHORT $LN2@my_abs
; поменять знак
    neg      ecx
$LN2@my_abs:
; подготовить результат в EAX:
    mov      eax, ecx
    ret      0
my_abs ENDP
```

GCC 4.9 делает почти то же самое.

Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим Thumb

Листинг 1.115: Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим Thumb

```

my_abs PROC
    CMP        r0,#0
; входное значение равно нулю или больше нуля?
; в таком случае, пропустить инструкцию RSBS
    BGE        |L0.6|
; отнять входное значение от 0:
    RSBS       r0,r0,#0
|L0.6|
    BX         lr
ENDP

```

В ARM нет инструкции для изменения знака, так что компилятор Keil использует инструкцию «Reverse Subtract», которая просто вычитает, но с операндами, переставленными наоборот.

Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим ARM

В режиме ARM можно добавлять коды условий к некоторым инструкций, что компилятор Keil и сделал:

Листинг 1.116: Оптимизирующий Keil 6/2013: Режим ARM

```

my_abs PROC
    CMP        r0,#0
; исполнить инструкцию "Reverse Subtract" только в случае, если входное значение меньше 0:
    RSBLT      r0,r0,#0
    BX         lr
ENDP

```

Теперь здесь нет условных переходов и это хорошо:

[2.10.1](#) (стр. 457).

Неоптимизирующий GCC 4.9 (ARM64)

В ARM64 есть инструкция NEG для смены знака:

Листинг 1.117: Оптимизирующий GCC 4.9 (ARM64)

```

my_abs:
    sub        sp, sp, #16
    str        w0, [sp,12]
    ldr        w0, [sp,12]
; сравнить входное значение с содержимым регистра WZR
; (который всегда содержит ноль)
    cmp        w0, wzr
    bge        .L2
    ldr        w0, [sp,12]
    neg        w0, w0
    b          .L3
.L2:
    ldr        w0, [sp,12]
.L3:
    add        sp, sp, 16
    ret

```

MIPS

Листинг 1.118: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

my_abs:
; перейти если $a0<0:

```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
        bltz    $a0, locret_10
; просто вернуть входное значение ($a0) в $v0:
        move    $v0, $a0
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
locret_10:
; поменять у значения знак и сохранить его в $v0:
        jr      $ra
; это псевдоинструкция. на самом деле, это "subu $v0,$zero,$a0" ($v0=0-$a0)
        negu    $v0, $a0
```

Видим здесь новую инструкцию: BLTZ («Branch if Less Than Zero»). Тут есть также псевдоинструкция NEGU, которая на самом деле вычитает из нуля. Суффикс «U» в обеих инструкциях SUBU и NEGU означает, что при целочисленном переполнении исключение не сработает.

Версия без переходов?

Возможна также версия и без переходов, мы рассмотрим её позже: [3.13](#) (стр. [509](#)).

1.14.3. Тернарный условный оператор

Тернарный условный оператор (ternary conditional operator) в Си/Си++ это:

```
expression ? expression : expression
```

И вот пример:

```
const char* f (int a)
{
    return a==10 ? "it is ten" : "it is not ten";
};
```

x86

Старые и неоптимизирующие компиляторы генерируют код так, как если бы выражение if/else было использовано вместо него:

Листинг 1.119: Неоптимизирующий MSVC 2008

```
$SG746 DB      'it is ten', 00H
$SG747 DB      'it is not ten', 00H

tv65 = -4 ; будет использовано как временная переменная
_a$ = 8
_f      PROC
        push    ebp
        mov     ebp, esp
        push    ecx
; сравнить входное значение с 10
        cmp     DWORD PTR _a$[ebp], 10
; переход на $LN3@f если не равно
        jne     SHORT $LN3@f
; сохранить указатель на строку во временной переменной:
        mov     DWORD PTR tv65[ebp], OFFSET $SG746 ; 'it is ten'
; перейти на выход
        jmp     SHORT $LN4@f
$LN3@f:
; сохранить указатель на строку во временной переменной:
        mov     DWORD PTR tv65[ebp], OFFSET $SG747 ; 'it is not ten'
$LN4@f:
; это выход. скопировать указатель на строку из временной переменной в EAX.
        mov     eax, DWORD PTR tv65[ebp]
        mov     esp, ebp
        pop     ebp
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
_f      ret      0
      ENDP
```

Листинг 1.120: Оптимизирующий MSVC 2008

```
$SG792 DB      'it is ten', 00H
$SG793 DB      'it is not ten', 00H

_a$ = 8 ; size = 4
_f      PROC
; сравнить входное значение с 10
      cmp      DWORD PTR _a$[esp-4], 10
      mov      eax, OFFSET $SG792 ; 'it is ten'
; переход на $LN4@f если равно
      je       SHORT $LN4@f
      mov      eax, OFFSET $SG793 ; 'it is not ten'
$LN4@f:
      ret      0
_f      ENDP
```

Новые компиляторы могут быть более краткими:

Листинг 1.121: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
$SG1355 DB      'it is ten', 00H
$SG1356 DB      'it is not ten', 00H

a$ = 8
f      PROC
; загрузить указатели на обе строки
      lea      rdx, OFFSET FLAT:$SG1355 ; 'it is ten'
      lea      rax, OFFSET FLAT:$SG1356 ; 'it is not ten'
; сравнить входное значение с 10
      cmp      ecx, 10
; если равно, скопировать значение из RDX ("it is ten")
; если нет, ничего не делаем. указатель на строку "it is not ten" всё еще в RAX.
      cmov     rax, rdx
      ret      0
f      ENDP
```

Оптимизирующий GCC 4.8 для x86 также использует инструкцию CMOVcc, тогда как неоптимизирующий GCC 4.8 использует условные переходы.

ARM

Оптимизирующий Keil для режима ARM также использует инструкцию ADRcc, срабатывающую при некотором условии:

Листинг 1.122: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
f PROC
; сравнить входное значение с 10
      CMP      r0,#0xa
; если результат сравнения Equal (равно), скопировать указатель на строку "it is ten" в R0
      ADREQ    r0,|L0.16| ; "it is ten"
; если результат сравнения Not Equal (не равно), скопировать указатель на строку "it is not ten"
      ↪ " в R0
      ADRNE    r0,|L0.28| ; "it is not ten"
      BX      lr
      ENDP

|L0.16|
      DCB      "it is ten",0
|L0.28|
      DCB      "it is not ten",0
```

Без внешнего вмешательства инструкции ADREQ и ADRNE никогда не исполнятся одновременно. Оптимизирующий Keil для режима Thumb вынужден использовать инструкции условного перехода, потому что тут нет инструкции загрузки значения, поддерживающей флаги условия:

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

Листинг 1.123: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
f PROC
; сравнить входное значение с 10
    CMP    r0,#0xa
; переход на |L0.8| если EQual (равно)
    BEQ    |L0.8|
    ADR    r0,|L0.12| ; "it is not ten"
    BX     lr
|L0.8|
    ADR    r0,|L0.28| ; "it is ten"
    BX     lr
ENDP

|L0.12|
    DCB    "it is not ten",0
|L0.28|
    DCB    "it is ten",0
```

ARM64

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9 для ARM64 также использует условные переходы:

Листинг 1.124: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    cmp    x0, 10
    beq    .L3          ; branch if equal (переход, если равно)
    adrp   x0, .LC1      ; "it is ten"
    add    x0, x0, :lo12:LC1
    ret

.L3:
    adrp   x0, .LC0      ; "it is not ten"
    add    x0, x0, :lo12:LC0
    ret

.LC0:
    .string "it is ten"
.LC1:
    .string "it is not ten"
```

Это потому что в ARM64 нет простой инструкции загрузки с флагами условия, как ADRcc в 32-битном режиме ARM или CMOVcc в x86.

Но с другой стороны, там есть инструкция CSEL («Conditional SElect») [ARM Architecture Reference Manual, ARMv8, for ARMv8-A architecture profile, (2013)p390, C5.5], но GCC 4.9 наверное, пока не так хорош, чтобы генерировать её в таком фрагменте кода

MIPS

GCC 4.4.5 для MIPS тоже не так хорош, к сожалению:

Листинг 1.125: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (вывод на ассемблере)

```
$LC0:
    .ascii "it is not ten\000"
$LC1:
    .ascii "it is ten\000"
f:
    li     $2,10          # 0xa
; сравнить $a0 и 10, переход, если равно:
    beq    $4,$2,$L2
    nop ; branch delay slot

; оставить адрес строки "it is not ten" в $v0 и выйти:
    lui    $2,%hi($LC0)
    j      $31
    addiu   $2,$2,%lo($LC0)
```


1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
$L2:
; оставить адрес строки "it is ten" в $v0 и выйти:
    lui    $2,%hi($LC1)
    j      $31
    addiu   $2,$2,%lo($LC1)
```

Перепишем, используя обычный if/else

```
const char* f (int a)
{
    if (a==10)
        return "it is ten";
    else
        return "it is not ten";
};
```

Интересно, оптимизирующий GCC 4.8 для x86 также может генерировать CMOVcc в этом случае:

Листинг 1.126: Оптимизирующий GCC 4.8

```
.LC0:
    .string "it is ten"
.LC1:
    .string "it is not ten"
f:
.LFB0:
; сравнить входное значение с 10
    cmp     DWORD PTR [esp+4], 10
    mov     edx, OFFSET FLAT:.LC1 ; "it is not ten"
    mov     eax, OFFSET FLAT:.LC0 ; "it is ten"
; если результат сравнение Not Equal (не равно), скопировать значение из EDX в EAX
; а если нет, то ничего не делать
    cmovne  eax, edx
    ret
```

Оптимизирующий Keil в режиме ARM генерирует код идентичный этому: листинг [1.122](#).

Но оптимизирующий MSVC 2012 пока не так хорош.

Вывод

Почему оптимизирующие компиляторы стараются избавиться от условных переходов? Читайте больше об этом здесь: [2.10.1](#) (стр. [457](#)).

1.14.4. Поиск минимального и максимального значения

32-bit

```
int my_max(int a, int b)
{
    if (a>b)
        return a;
    else
        return b;
};

int my_min(int a, int b)
{
    if (a<b)
        return a;
    else
        return b;
};
```

```

_a$ = 8
_b$ = 12
_my_min PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
; сравнить A и B:
    cmp     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
; переход, если A больше или равно B:
    jge     SHORT $LN2@my_min
; перезагрузить A в EAX в противном случае и перейти на выход
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    jmp     SHORT $LN3@my_min
    jmp     SHORT $LN3@my_min ; это избыточная JMP
$LN2@my_min:
; возврат B
    mov     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
$LN3@my_min:
    pop     ebp
    ret     0
_my_min ENDP

_a$ = 8
_b$ = 12
_my_max PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
; сравнить A и B:
    cmp     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
; переход, если A меньше или равно B:
    jle     SHORT $LN2@my_max
; перезагрузить A в EAX в противном случае и перейти на выход
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    jmp     SHORT $LN3@my_max
    jmp     SHORT $LN3@my_max ; это избыточная JMP
$LN2@my_max:
; возврат B
    mov     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
$LN3@my_max:
    pop     ebp
    ret     0
_my_max ENDP

```

Эти две функции отличаются друг от друга только инструкцией условного перехода: JGE («Jump if Greater or Equal» — переход если больше или равно) используется в первой и JLE («Jump if Less or Equal» — переход если меньше или равно) во второй.

Здесь есть ненужная инструкция JMP в каждой функции, которую MSVC, наверное, оставил по ошибке.

Без переходов

ARM в режиме Thumb напоминает нам x86-код:

Листинг 1.128: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```

my_max PROC
; R0=A
; R1=B
; сравнить A и B:
    CMP     r0,r1
; переход, если A больше B:
    BGT     |L0.6|
; в противном случае (A<=B) возврат R1 (B):
    MOVS    r0,r1
|L0.6|

```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
; возврат
    BX      lr
    ENDP

my_min PROC
; R0=A
; R1=B
; сравнить A и B:
    CMP     r0,r1
; переход, если A меньше B:
    BLT     |L0.14|
; в противном случае (A>=B) возврат R1 (B):
    MOVS     r0,r1
|L0.14|
; возврат
    BX      lr
    ENDP
```

Функции отличаются только инструкцией перехода: BGT и BLT. А в режиме ARM можно использовать условные суффиксы, так что код более плотный. MOVcc будет исполнена только если условие верно:

Листинг 1.129: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
my_max PROC
; R0=A
; R1=B
; сравнить A и B:
    CMP     r0,r1
; вернуть B вместо A копируя B в R0
; эта инструкция сработает только если A<=B (т.е. LE – Less or Equal, меньше или равно)
; если инструкция не сработает (в случае A>B), A всё еще в регистре R0
    MOVLE   r0,r1
    BX      lr
    ENDP

my_min PROC
; R0=A
; R1=B
; сравнить A и B:
    CMP     r0,r1
; вернуть B вместо A копируя B в R0
; эта инструкция сработает только если A>=B (т.е. GE – Greater or Equal, больше или равно)
; если инструкция не сработает (в случае A<B), A всё еще в регистре R0
    MOVGE   r0,r1
    BX      lr
    ENDP
```

Оптимизирующий GCC 4.8.1 и оптимизирующий MSVC 2013 могут использовать инструкцию CMOVcc, которая аналогична MOVcc в ARM:

Листинг 1.130: Оптимизирующий MSVC 2013

```
my_max:
    mov     edx, DWORD PTR [esp+4]
    mov     eax, DWORD PTR [esp+8]
; EDX=A
; EAX=B
; сравнить A и B:
    cmp     edx, eax
; если A>=B, загрузить значение A в EAX
; в противном случае, эта инструкция ничего не делает (если A<B)
    cmovge  eax, edx
    ret

my_min:
    mov     edx, DWORD PTR [esp+4]
    mov     eax, DWORD PTR [esp+8]
; EDX=A
; EAX=B
```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
; сравнить A и B:
    cmp     edx, eax
; если A<=B, загрузить значение A в EAX
; в противном случае, эта инструкция ничего не делает (если A>B)
    cmovle  eax, edx
    ret
```

64-bit

```
#include <stdint.h>

int64_t my_max(int64_t a, int64_t b)
{
    if (a>b)
        return a;
    else
        return b;
};

int64_t my_min(int64_t a, int64_t b)
{
    if (a<b)
        return a;
    else
        return b;
};
```

Тут есть ненужные перетасовки значений, но код в целом понятен:

Листинг 1.131: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
my_max:
    sub     sp, sp, #16
    str     x0, [sp,8]
    str     x1, [sp]
    ldr     x1, [sp,8]
    ldr     x0, [sp]
    cmp     x1, x0
    ble     .L2
    ldr     x0, [sp,8]
    b       .L3
.L2:
    ldr     x0, [sp]
.L3:
    add     sp, sp, 16
    ret

my_min:
    sub     sp, sp, #16
    str     x0, [sp,8]
    str     x1, [sp]
    ldr     x1, [sp,8]
    ldr     x0, [sp]
    cmp     x1, x0
    bge     .L5
    ldr     x0, [sp,8]
    b       .L6
.L5:
    ldr     x0, [sp]
.L6:
    add     sp, sp, 16
    ret
```

Без переходов

Нет нужды загружать аргументы функции из стека, они уже в регистрах:

```

my_max:
; RDI=A
; RSI=B
; сравнить A и B:
    cmp    rdi, rsi
; подготовить B в RAX для возврата:
    mov    rax, rsi
; если A>=B, оставить A (RDI) в RAX для возврата.
; в противном случае, инструкция ничего не делает (если A<B)
    cmovge rax, rdi
    ret

my_min:
; RDI=A
; RSI=B
; сравнить A и B:
    cmp    rdi, rsi
; подготовить B в RAX для возврата:
    mov    rax, rsi
; если A<=B, оставить A (RDI) в RAX для возврата.
; в противном случае, инструкция ничего не делает (если A>B)
    cmovle rax, rdi
    ret

```

MSVC 2013 делает то же самое.

В ARM64 есть инструкция CSEL, которая работает точно также, как и MOVcc в ARM и CMOVcc в x86, но название другое: «Conditional SElect».

Листинг 1.133: Оптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```

my_max:
; X0=A
; X1=B
; сравнить A и B:
    cmp    x0, x1
; выбрать X0 (A) в X0 если X0>=X1 или A>=B (Greater or Equal: больше или равно)
; выбрать X1 (B) в X0 если A<B
    csel    x0, x0, x1, ge
    ret

my_min:
; X0=A
; X1=B
; сравнить A и B:
    cmp    x0, x1
; выбрать X0 (A) в X0 если X0<=X1 (Less or Equal: меньше или равно)
; выбрать X1 (B) в X0 если A>B
    csel    x0, x0, x1, le
    ret

```

MIPS

А GCC 4.4.5 для MIPS не так хорош, к сожалению:

Листинг 1.134: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

my_max:
; установить $v1 в 1, если $a1<$a0, в противном случае очистить если( $a1>$a0):
    slt    $v1, $a1, $a0
; переход, если в $v1 ноль или( $a1>$a0):
    beqz   $v1, locret_10
; это branch delay slot
; подготовить $a1 в $v0 на случай, если переход сработает:
    move   $v0, $a1
; переход не сработал, подготовить $a0 в $v0:
    move   $v0, $a0

```

1.14. УСЛОВНЫЕ ПЕРЕХОДЫ

```
locret_10:
    jr      $ra
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP

; функция min() точно такая же, но входные операнды в инструкции SLT поменяны местами:
my_min:
    slt     $v1, $a0, $a1
    beqz    $v1, locret_28
    move    $v0, $a1
    move    $v0, $a0

locret_28:
    jr      $ra
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

Не забывайте о *branch delay slots*: первая MOVE выполняется *перед* BEQZ, вторая MOVE выполняется только если переход не произошел.

1.14.5. Вывод

x86

Примерный скелет условных переходов:

Листинг 1.135: x86

```
CMP register, register/value
Jcc true ; cc=код условия
false:
... код, исполняющийся, если сравнение ложно ...
JMP exit
true:
... код, исполняющийся, если сравнение истинно ...
exit:
```

ARM

Листинг 1.136: ARM

```
CMP register, register/value
Bcc true ; cc=код условия
false:
... код, исполняющийся, если сравнение ложно ...
JMP exit
true:
... код, исполняющийся, если сравнение истинно ...
exit:
```

MIPS

Листинг 1.137: Проверка на ноль

```
BEQZ REG, label
...
```

Листинг 1.138: Меньше ли нуля? (используя псевдоинструкцию)

```
BLTZ REG, label
...
```

Листинг 1.139: Проверка на равенство

```
BEQ REG1, REG2, label
...
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Листинг 1.140: Проверка на неравенство

```
BNE REG1, REG2, label
...
```

Листинг 1.141: Проверка на меньше (знаковое)

```
SLT REG1, REG2, REG3
BEQ REG1, label
...
```

Листинг 1.142: Проверка на меньше (беззнаковое)

```
SLTU REG1, REG2, REG3
BEQ REG1, label
...
```

Без инструкций перехода

Если тело условного выражения очень короткое, может быть использована инструкция условного копирования: MOVcc в ARM (в режиме ARM), CSEL в ARM64, CMOVcc в x86.

ARM

В режиме ARM можно использовать условные суффиксы для некоторых инструкций:

Листинг 1.143: ARM (Режим ARM)

```
CMP register, register/value
instr1_cc ; инструкция, которая будет исполнена, если условие истинно
instr2_cc ; еще инструкция, которая будет исполнена, если условие истинно
... и тд.....
```

Нет никаких ограничений на количество инструкций с условными суффиксами до тех пор, пока флаги CPU не были модифицированы одной из таких инструкций.

В режиме Thumb есть инструкция IT, позволяющая дополнить следующие 4 инструкции суффиксами, задающими условие.

Читайте больше об этом: [1.19.7](#) (стр. [253](#)).

Листинг 1.144: ARM (Режим Thumb)

```
CMP register, register/value
ITEEE EQ ; выставить такие суффиксы: if-then-else-else-else
instr1 ; инструкция будет исполнена, если истинно
instr2 ; инструкция будет исполнена, если ложно
instr3 ; инструкция будет исполнена, если ложно
instr4 ; инструкция будет исполнена, если ложно
```

1.14.6. Упражнение

(ARM64) Попробуйте переписать код в листинг [1.124](#) убрав все инструкции условного перехода, и используйте инструкцию CSEL.

1.15. switch()/case/default

1.15.1. Если вариантов мало

```
#include <stdio.h>

void f (int a)
{
    switch (a)
    {
        case 0: printf ("zero\n"); break;
        case 1: printf ("one\n"); break;
        case 2: printf ("two\n"); break;
        default: printf ("something unknown\n"); break;
    };
};

int main()
{
    f (2); // test
};
```

x86**Неоптимизирующий MSVC**

Это дает в итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.145: MSVC 2010

```
tv64 = -4 ; size = 4
_a$ = 8 ; size = 4
_f PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    mov     DWORD PTR tv64[ebp], eax
    cmp     DWORD PTR tv64[ebp], 0
    je      SHORT $LN4@f
    cmp     DWORD PTR tv64[ebp], 1
    je      SHORT $LN3@f
    cmp     DWORD PTR tv64[ebp], 2
    je      SHORT $LN2@f
    jmp     SHORT $LN1@f
$LN4@f:
    push    OFFSET $SG739 ; 'zero', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN7@f
$LN3@f:
    push    OFFSET $SG741 ; 'one', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN7@f
$LN2@f:
    push    OFFSET $SG743 ; 'two', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN7@f
$LN1@f:
    push    OFFSET $SG745 ; 'something unknown', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN7@f:
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_f ENDP
```


1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Наша функция с оператором switch(), с небольшим количеством вариантов, это практически аналог подобной конструкции:

```
void f (int a)
{
    if (a==0)
        printf ("zero\n");
    else if (a==1)
        printf ("one\n");
    else if (a==2)
        printf ("two\n");
    else
        printf ("something unknown\n");
};
```

Когда вариантов немного и мы видим подобный код, невозможно сказать с уверенностью, был ли в оригинальном исходном коде switch(), либо просто набор операторов if().

То есть, switch() это синтаксический сахар для большого количества вложенных проверок при помощи if().

В самом выходном коде ничего особо нового, за исключением того, что компилятор зачем-то перекладывает входящую переменную (*a*) во временную в локальном стеке v64⁹⁰.

Если скомпилировать это при помощи GCC 4.4.1, то будет почти то же самое, даже с максимальной оптимизацией (ключ -O3).

Оптимизирующий MSVC

Попробуем включить оптимизацию кодегенератора MSVC (/Ox): cl 1.c /Fa1.asm /Ox

Листинг 1.146: MSVC

```
_a$ = 8 ; size = 4
_f PROC
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    sub     eax, 0
    je      SHORT $LN4@f
    sub     eax, 1
    je      SHORT $LN3@f
    sub     eax, 1
    je      SHORT $LN2@f
    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG791 ; 'something unknown', 0aH, 00H
    jmp     _printf
$LN2@f:
    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG789 ; 'two', 0aH, 00H
    jmp     _printf
$LN3@f:
    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG787 ; 'one', 0aH, 00H
    jmp     _printf
$LN4@f:
    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG785 ; 'zero', 0aH, 00H
    jmp     _printf
_f ENDP
```

Вот здесь уже всё немного по-другому, причем не без грязных трюков.

Первое: *a* помещается в EAX и от него отнимается 0. Звучит абсурдно, но нужно это для того, чтобы проверить, 0 ли в EAX был до этого? Если да, то выставится флаг ZF (что означает, что результат вычитания 0 от числа стал 0) и первый условный переход JE (*Jump if Equal* или его синоним JZ — *Jump if Zero*) сработает на метку \$LN4@f, где выводится сообщение 'zero'. Если первый переход не сработал, от значения отнимается по единице, и если на какой-то стадии в результате образуется 0, то сработает соответствующий переход.

И в конце концов, если ни один из условных переходов не сработал, управление передается printf() со строковым аргументом 'something unknown'.

⁹⁰Локальные переменные в стеке с префиксом tv — так MSVC называет внутренние переменные для своих нужд

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Второе: мы видим две, мягко говоря, необычные вещи: указатель на сообщение помещается в переменную *a*, и затем `printf()` вызывается не через `CALL`, а через `JMP`. Объяснение этому простое. Вызывающая функция заталкивает в стек некоторое значение и через `CALL` вызывает нашу функцию. `CALL` в свою очередь заталкивает в стек адрес возврата (*RA*) и делает безусловный переход на адрес нашей функции. Наша функция в самом начале (да и в любом её месте, потому что в теле функции нет ни одной инструкции, которая меняет что-то в стеке или в `ESP`) имеет следующую разметку стека:

- `ESP` — хранится *RA*
- `ESP+4` — хранится значение *a*

С другой стороны, чтобы вызвать `printf()`, нам нужна почти такая же разметка стека, только в первом аргументе нужен указатель на строку. Что, собственно, этот код и делает.

Он заменяет свой первый аргумент на адрес строки, и затем передает управление `printf()`, как если бы вызвали не нашу функцию `f()`, а сразу `printf()`. `printf()` выводит некую строку на `stdout`, затем исполняет инструкцию `RET`, которая из стека достает *RA* и управление передается в ту функцию, которая вызвала `f()`, минуя при этом конец функции `f()`.

Всё это возможно, потому что `printf()` вызывается в `f()` в самом конце. Всё это чем-то даже похоже на `longjmp()`⁹¹. И всё это, разумеется, сделано для экономии времени исполнения.

Похожая ситуация с компилятором для ARM описана в секции «`printf()` с несколькими аргументами» (1.8.2 (стр. 54)).

⁹¹[wikipedia](#)

OllyDbg

Так как этот пример немного запутанный, попробуем оттрассировать его в OllyDbg.

OllyDbg может распознавать подобные switch()-конструкции, так что он добавляет полезные комментарии. EAX в начале равен 2, это входное значение функции:

The screenshot shows the OllyDbg interface with the CPU window displaying assembly code. A red box highlights the EAX register in the registers window, which contains the value 00000002. The assembly code includes a switch statement with cases for 'two', 'one', and 'zero'. The memory dump shows ASCII strings like 'zero', 'one', 'two', and 'something unknown'.

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
00FF3000	7A 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
00FF3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	two something unknown
00FF3020	67 20 75 6E 68 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	
00FF3030	FF FF FF FF 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3040	FE FF FF FF 01 00 00 00 34 54 75 46 CB AB 8A B9	
00FF3050	01 00 00 00 48 28 2A 00 68 4E 2A 00 00 00 00 00	
00FF3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Рис. 1.34: OllyDbg: EAX содержит первый (и единственный) аргумент функции

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

0 отнимается от 2 в EAX. Конечно же, EAX всё ещё содержит 2. Но флаг ZF теперь 0, что означает, что последнее вычисленное значение не было нулевым:

CPU - main thread, module few

Address	Hex dump	Assembly	Comment
00FF1000	8B4424 04	MOV EAX, DWORD PTR SS:[ARG.1]	
00FF1004	33E8 00	SUB EAX, 0	
00FF1007	74 30	JZ SHORT 00FF1039	Switch (cases 0..2, 4 ex
00FF1009	48	DEC EAX	
00FF100A	74 1F	JZ SHORT 00FF102B	
00FF100C	48	DEC EAX	
00FF100E	74 0E	JZ SHORT 00FF101D	
00FF100F	C74424 04 18	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3018	ASCII "something unknown
00FF1017	FF25 A020FE0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF101B	C74424 04 10	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3010	ASCII "two", case 2 of
00FF1025	FF25 A020FE0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF102B	C74424 04 08	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3008	ASCII "one", case 1 of
00FF1033	FF25 A020FE0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1039	C74424 04 00	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3000	ASCII "zero", case 0 of
00FF1041	FF25 A020FE0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1047	CC	INT3	
00FF1048	CC	INT3	
00FF1049	CC	INT3	
00FF104A	CC	INT3	
00FF104B	CC	INT3	
00FF104C	CC	INT3	

Jump is not taken
Dest=few.00FF1039

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy
00FF3000	7A 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
00FF3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	two something
00FF3020	67 20 75 6E 68 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	g unknown
00FF3030	FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3040	FE FF FF FF 01 00 00 00 34 54 75 46 CB AB 8A B9	0 4TuFipKj
00FF3050	01 00 00 00 48 28 2A 00 68 4E 2A 00 00 00 00 00	0 H(* hN*
00FF3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Register	Value
EAX	00000002
ECX	6E494714 ASCII "H(*"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	001EF84C
EBP	001EF894
ESI	00000001
EDI	00FF33A8 few.00FF33A8
EIP	00FF1007 few.00FF1007
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 0	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
T 0	FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
D 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
0 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000202 (NO,NB,NE,A,NS,PO,GE,G)
MM0	0000 0000 0000 0000
MM1	0000 0000 0000 0000
MM2	0000 0000 0000 0000
MM3	0000 0000 0000 0000
MM4	0000 0000 0000 0000

Address	Hex dump	Comment
001EF84C	00FF1057	RETURN from
001EF850	00000002	
001EF854	00FF11CA	RETURN from
001EF858	00000001	
001EF85C	002A4E68	hN* ASCII "pN"
001EF860	002A2848	H(*
001EF864	466BAC00	ankF
001EF868	00000000	
001EF86C	00000000	
001EF870	7EFD0000	p*
001EF874	00000000	
001EF878	00000000	
001EF87C	001EF864	d*
001EF880	D3389310	Y8u
001EF884	001EF800	Printer to p

Рис. 1.35: OllyDbg: SUB исполнилась

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

DEC исполнилась и EAX теперь содержит 1. Но 1 не ноль, так что флаг ZF всё ещё 0:

CPU - main thread, module few

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)	Registers (MMX)
00FF1000	8B 44 24 04	MOV EAX,DWORD PTR SS:[ARG.1]	EAX 00000000
00FF1004	83 E8 00	SUB EAX,0	ECX 6E494714 ASCII "H(*"
00FF1007	74 30	JZ SHORT 00FF1039	EDX 00000000
00FF1009	48	DEC EAX	EBX 00000000
00FF100A	74 1F	JZ SHORT 00FF102B	ESP 001EF84C
00FF100C	48	DEC EAX	EBP 001EF894
00FF100D	74 0E	JZ SHORT 00FF101D	ESI 00000001
00FF100F	C7 44 24 04 18	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1],OFFSET 00FF3018	EDI 00FF33A8 few.00FF33A8
00FF1017	FF 25 0020FF0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	EIP 00FF100A few.00FF100A
00FF101D	C7 44 24 04 10	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1],OFFSET 00FF3010	C 0 ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
00FF1025	FF 25 0020FF0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	P 0 CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
00FF102B	C7 44 24 04 08	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1],OFFSET 00FF3008	S 0 SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
00FF1033	FF 25 0020FF0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	T 0 DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
00FF1039	C7 44 24 04 00	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1],OFFSET 00FF3000	S 0 FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
00FF1041	FF 25 0020FF0	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	T 0 GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
00FF1047	CC	INT3	D 0
00FF1048	CC	INT3	O 0 LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
00FF1049	CC	INT3	EFL 00000202 (NO,NB,NE,A,NS,PO,GE,G
00FF104A	CC	INT3	MM0 0000 0000 0000 0000
00FF104B	CC	INT3	MM1 0000 0000 0000 0000
00FF104C	CC	INT3	MM2 0000 0000 0000 0000
			MM3 0000 0000 0000 0000
			MM4 0000 0000 0000 0000

Jump is not taken
Dest=few.00FF102B

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)	Registers (MMX)
00FF3000	7A 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one	001EF850 00000002
00FF3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	two something	001EF854 00FF11CA
00FF3020	67 20 75 6E 68 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	g unknown	001EF858 00000001
00FF3030	FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF85C 002A4E68 hN*
00FF3040	FE FF FF FF 01 00 00 00 34 54 75 46 CB AB 8A B9		001EF860 002A2848 H*
00FF3050	01 00 00 00 48 28 2A 00 68 4E 2A 00 00 00 00 00		001EF864 466BAC08 amkF
00FF3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF868 00000000
00FF3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF86C 00000000
00FF3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF870 7EFD0000 p*
00FF3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF874 00000000
00FF30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF878 00000000
00FF30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF87C 001EF864 d*
00FF30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF880 03389310 Y8
00FF30D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00		001EF884 001EF800 Pointer to

Рис. 1.36: OllyDbg: первая DEC исполнилась

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Следующая DEC исполнилась. EAX наконец 0 и флаг ZF выставлен, потому что результат — ноль:

CPU - main thread, module few

Address	Hex dump	Assembly	Comment
00FF1000	8B 44 24 04	MOV EAX, DWORD PTR SS:[ARG.1]	
00FF1004	83 E8 00	SUB EAX, 0	
00FF1007	74 30	JZ SHORT 00FF1039	Switch (cases 0..2, 4 ex
00FF1009	48	DEC EAX	
00FF100A	74 1F	JZ SHORT 00FF102B	
00FF100C	48	DEC EAX	
00FF100D	74 0E	JZ SHORT 00FF101D	
00FF100F	C7 44 24 04 18	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3018	ASCII "something unknown"
00FF1017	FF 25 A0 20 FF 00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF101D	C7 44 24 04 10	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3010	ASCII "two", case 2 of
00FF1025	FF 25 A0 20 FF 00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF102B	C7 44 24 04 08	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3008	ASCII "one", case 1 of
00FF1033	FF 25 A0 20 FF 00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1039	C7 44 24 04 00	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3000	ASCII "zero", case 0 of
00FF1041	FF 25 A0 20 FF 00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1047	CC	INT3	
00FF1048	CC	INT3	
00FF1049	CC	INT3	
00FF104A	CC	INT3	
00FF104B	CC	INT3	
00FF104C	CC	INT3	

Registers (MMX)

Register	Value	Comment
EAX	00000000	
ECX	6E494714	ASCII "H(*"
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF100D	few.00FF100D
CS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
DS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
SS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
ES	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
FS	0053	32bit 7EFDD000(FFF)
GS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
LastErr	00000000	ERROR_SUCCESS
EFL	00000246	(NO, NB, E, BE, NS, PE, GE, LE)

Hex dump

Address	Hex	ASCII (ANSI - Cy)
00FF3000	74 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
00FF3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 73 6F 6D 65 74 63 69 6E	two something unknown
00FF3020	67 20 75 6E 6B 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	
00FF3030	FE FF FF FF 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3040	01 00 00 00 43 23 2A 00 34 54 75 46 CB AB 8A B3	
00FF3050	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Registers (MMX)

Register	Value	Comment
EAX	00000000	
ECX	00000002	
EDX	00FF11CA	RETURN from f
EBX	00000001	
ESP	002A4E68	hN# ASCII "pN"
EBP	002A4E68	hN# ASCII "pN"
ESI	466BACA0	amkF
EDI	00000000	
EIP	001EF86C	
CS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
DS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
SS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
ES	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
FS	0053	32bit 7EFDD000(FFF)
GS	002B	32bit 0(FFFFFFFF)
LastErr	00000000	ERROR_SUCCESS
EFL	00000246	(NO, NB, E, BE, NS, PE, GE, LE)

Hex dump

Address	Hex	ASCII (ANSI - Cy)
001EF84C	00FF1057	RETURN from f
001EF850	00000002	
001EF854	00FF11CA	RETURN from f
001EF858	00000001	
001EF85C	002A4E68	hN# ASCII "pN"
001EF860	002A4E68	hN# ASCII "pN"
001EF864	466BACA0	amkF
001EF868	00000000	
001EF86C	00000000	
001EF870	7EFDE000	p#"
001EF874	00000000	
001EF878	00000000	
001EF87C	001EF864	d°▲
001EF880	D3389310	y8u
001EF884	001EF800	Printer to ne

Рис. 1.37: OllyDbg: вторая DEC исполнилась

OllyDbg показывает, что условный переход сейчас работает.

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Указатель на строку «two» сейчас будет записан в стек:

CPU - main thread, module few

Address	Hex dump	Assembly	Comment
00FF1000	8B4424 04	MOV EAX, DWORD PTR SS:[ARG.1]	
00FF1004	83E8 00	SUB EAX, 0	
00FF1007	74 30	JZ SHORT 00FF1039	Switch (cases 0..2, 4 ex
00FF1009	48	DEC EAX	
00FF100A	74 1F	JZ SHORT 00FF102B	
00FF100C	48	DEC EAX	
00FF100D	74 0E	JZ SHORT 00FF101D	
00FF100F	C74424 04 18	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3011	ASCII "something unknown
00FF1011	FF25 0020FE00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1013	C74424 04 10	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3011	ASCII "two", case 2 of
00FF1015	FF25 0020FE00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF1017	C74424 04 08	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3000	ASCII "one", case 1 of
00FF1019	FF25 0020FE00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF101B	C74424 04 00	MOV DWORD PTR SS:[ARG.1], OFFSET 00FF3000	ASCII "zero", case 0 of
00FF101D	FF25 0020FE00	JMP DWORD PTR DS:[<&MSUCR100.printf>]	
00FF101F	CC	INT3	
00FF1021	CC	INT3	
00FF1023	CC	INT3	
00FF1025	CC	INT3	
00FF1027	CC	INT3	
00FF1029	CC	INT3	
00FF102B	CC	INT3	
00FF102D	CC	INT3	
00FF102F	CC	INT3	
00FF1031	CC	INT3	
00FF1033	CC	INT3	
00FF1035	CC	INT3	
00FF1037	CC	INT3	
00FF1039	CC	INT3	
00FF103B	CC	INT3	
00FF103D	CC	INT3	
00FF103F	CC	INT3	
00FF1041	CC	INT3	
00FF1043	CC	INT3	
00FF1045	CC	INT3	
00FF1047	CC	INT3	
00FF1049	CC	INT3	
00FF104B	CC	INT3	
00FF104D	CC	INT3	
00FF104F	CC	INT3	
00FF1051	CC	INT3	
00FF1053	CC	INT3	
00FF1055	CC	INT3	
00FF1057	CC	INT3	
00FF1059	CC	INT3	
00FF105B	CC	INT3	
00FF105D	CC	INT3	
00FF105F	CC	INT3	
00FF1061	CC	INT3	
00FF1063	CC	INT3	
00FF1065	CC	INT3	
00FF1067	CC	INT3	
00FF1069	CC	INT3	
00FF106B	CC	INT3	
00FF106D	CC	INT3	
00FF106F	CC	INT3	
00FF1071	CC	INT3	
00FF1073	CC	INT3	
00FF1075	CC	INT3	
00FF1077	CC	INT3	
00FF1079	CC	INT3	
00FF107B	CC	INT3	
00FF107D	CC	INT3	
00FF107F	CC	INT3	
00FF1081	CC	INT3	
00FF1083	CC	INT3	
00FF1085	CC	INT3	
00FF1087	CC	INT3	
00FF1089	CC	INT3	
00FF108B	CC	INT3	
00FF108D	CC	INT3	
00FF108F	CC	INT3	
00FF1091	CC	INT3	
00FF1093	CC	INT3	
00FF1095	CC	INT3	
00FF1097	CC	INT3	
00FF1099	CC	INT3	
00FF109B	CC	INT3	
00FF109D	CC	INT3	
00FF109F	CC	INT3	
00FF10A1	CC	INT3	
00FF10A3	CC	INT3	
00FF10A5	CC	INT3	
00FF10A7	CC	INT3	
00FF10A9	CC	INT3	
00FF10AB	CC	INT3	
00FF10AD	CC	INT3	
00FF10AF	CC	INT3	
00FF10B1	CC	INT3	
00FF10B3	CC	INT3	
00FF10B5	CC	INT3	
00FF10B7	CC	INT3	
00FF10B9	CC	INT3	
00FF10BB	CC	INT3	
00FF10BD	CC	INT3	
00FF10BF	CC	INT3	
00FF10C1	CC	INT3	
00FF10C3	CC	INT3	
00FF10C5	CC	INT3	
00FF10C7	CC	INT3	
00FF10C9	CC	INT3	
00FF10CB	CC	INT3	
00FF10CD	CC	INT3	
00FF10CF	CC	INT3	
00FF10D1	CC	INT3	
00FF10D3	CC	INT3	
00FF10D5	CC	INT3	
00FF10D7	CC	INT3	
00FF10D9	CC	INT3	
00FF10DB	CC	INT3	
00FF10DD	CC	INT3	
00FF10DF	CC	INT3	
00FF10E1	CC	INT3	
00FF10E3	CC	INT3	
00FF10E5	CC	INT3	
00FF10E7	CC	INT3	
00FF10E9	CC	INT3	
00FF10EB	CC	INT3	
00FF10ED	CC	INT3	
00FF10EF	CC	INT3	
00FF10F1	CC	INT3	
00FF10F3	CC	INT3	
00FF10F5	CC	INT3	
00FF10F7	CC	INT3	
00FF10F9	CC	INT3	
00FF10FB	CC	INT3	
00FF10FD	CC	INT3	
00FF10FF	CC	INT3	

Registers (MMX)

Register	Value	Comment
EAX	00000000	
ECX	6E494714	ASCII "H(*"
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8
EIP	00FF101D	few.00FF101D
EAX	00000000	
ECX	00000000	
EDX	00000000	
EBX	00000000	
ESP	001EF84C	
EBP	001EF894	
ESI	00000001	
EDI	00FF33A8	few.00FF33A8

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

MOV записывает указатель на строку по адресу 0x001EF850 (см. окно стека). Переход сработал. Это самая первая инструкция функции printf() в MSVCR100.DLL (этот пример был скомпилирован с опцией /MD):

CPU - main thread, module MSVCR100

Address	Hex	dump	ASCII (ANSI - Cy)
00FF3000	74 65 72 6F	0A 00 00 00 6F 6E 65 0A	zero one
00FF3010	74 77 6F 0A	00 00 00 00 73 6F 6D 65	two something unknown
00FF3020	67 20 75 6E	6B 6E 6F 77 6E 0A 00 00	
00FF3030	FF FF FF FF	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3040	FE FF FF FF	01 00 00 00 34 54 75 46	
00FF3050	01 00 00 00	4B 2B 2A 00 6B 4E 2A 00	
00FF3060	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3070	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3080	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3090	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30A0	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30B0	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30C0	00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	

Stack [001EF848]=few.00FF3064
Imm=0000000C (decimal 12.)

MSVCR100.printf

Registers (MMX)

Register	Value
EAX	00000000
ECX	6E494714 ASCII "H(*)"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	001EF84C
EBP	001EF894
ESI	00000001
EDI	00FF33A8 few.00FF33A8
EIP	6E445584 MSVCR100.printf

RETURN from few

Register	Value
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 1	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000246 (NO,NB,E,BE,NS,PE,GE,LE)

Рис. 1.39: OllyDbg: первая инструкция в printf() в MSVCR100.DLL

Теперь printf() считает строку на 0x00FF3010 как свой единственный аргумент и выводит строку.

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Это самая последняя инструкция функции printf():

CPU - main thread, module MSVCRT100

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
00FF3000	7A 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
00FF3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	two somethin
00FF3020	67 20 75 6E 6B 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	g unknown
00FF3030	FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3040	FE FF FF FF 01 00 00 00 34 54 75 46 CB AB 8A B9	0 4TuF7nKl
00FF3050	01 00 00 00 48 28 2A 00 63 4E 2A 00 00 00 00 00	0 H(* hN*
00FF3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FF30D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Registers (MMX)

Register	Value
EAX	00000004
ECX	6E445617 MSVCRT100.6E445617
EDX	0009DC88
EBX	00000000
ESP	001EF84C
EBP	001EF894
ESI	00000001
EDI	00FF33A8 few.00FF33A8
EIP	6E445617 MSVCRT100.6E445617

Top of stack [001EF84C]=few.00FF1057

MSVCRT100.printf+93

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
001EF84C	00FF1057	RETURN from f
001EF850	00FF3010	ASCII "two"
001EF854	00FF11CA	RETURN from f
001EF858	00000001	0
001EF85C	002A4E68	hN*
001EF860	002A2848	H(*
001EF864	466BACA0	amkF
001EF868	00000000	
001EF86C	00000000	
001EF870	7EFDE000	p#"
001EF874	00000000	
001EF878	00000000	
001EF87C	001EF864	d°▲
001EF880	D3389310	y8u
001EF884	001EF800	Printer to ne

Рис. 1.40: OllyDbg: последняя инструкция в printf() в MSVCRT100.DLL

Строка «two» была только что выведена в консоли.

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Нажмем F7 или F8 (сделать шаг, не входя в функцию) и вернемся...нет, не в функцию `f()` но в `main()`:

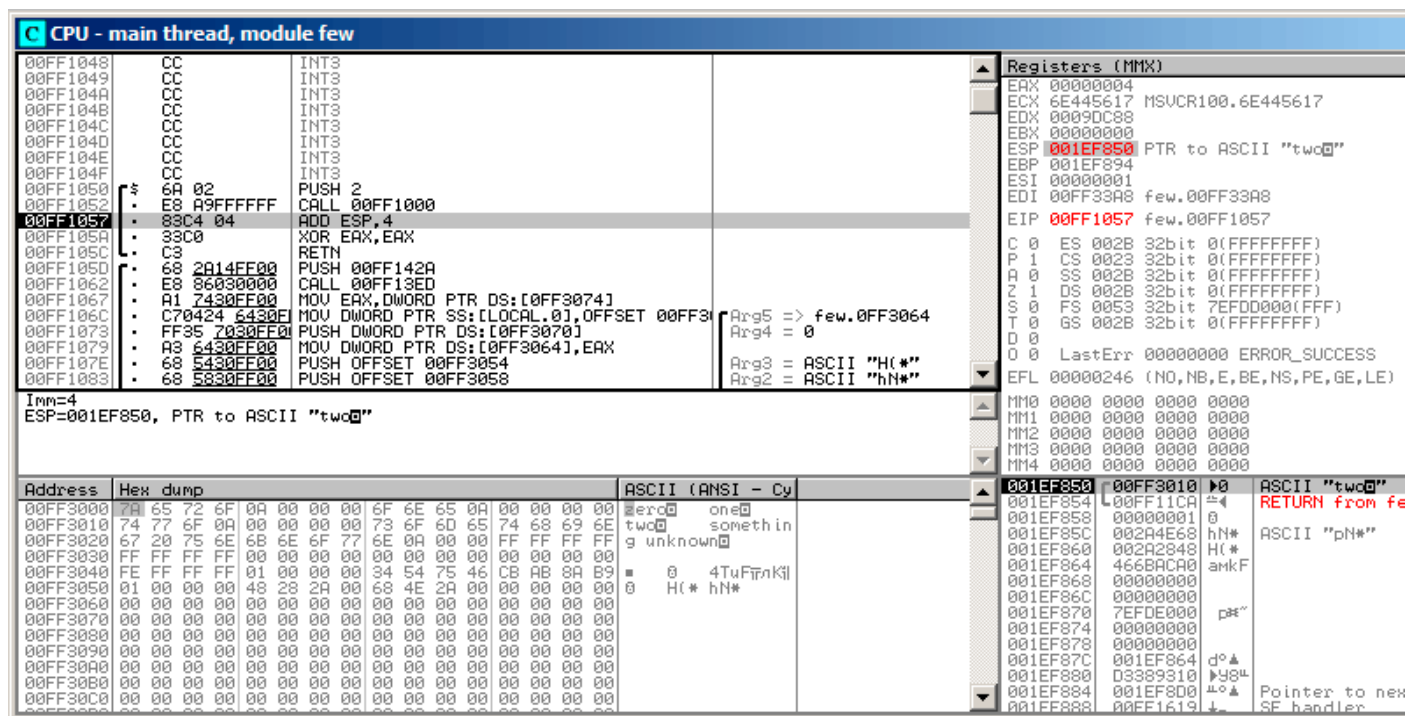


Рис. 1.41: OllyDbg: возврат в `main()`

Да, это прямой переход из внутренностей `printf()` в `main()`. Потому как **RA** в стеке указывает не на какое-то место в функции `f()` а в `main()`. И `CALL 0x00FF1000` это инструкция вызывающая функцию `f()`.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
.text:0000014C          f1:
.text:0000014C 00 00 50 E3    CMP     R0, #0
.text:00000150 13 0E 8F 02    ADREQ  R0, aZero ; "zero\n"
.text:00000154 05 00 00 0A    BEQ    loc_170
.text:00000158 01 00 50 E3    CMP     R0, #1
.text:0000015C 4B 0F 8F 02    ADREQ  R0, aOne ; "one\n"
.text:00000160 02 00 00 0A    BEQ    loc_170
.text:00000164 02 00 50 E3    CMP     R0, #2
.text:00000168 4A 0F 8F 12    ADRNE  R0, aSomethingUnkno ; "something unknown\n"
.text:0000016C 4E 0F 8F 02    ADREQ  R0, aTwo ; "two\n"
.text:00000170
.text:00000170          loc_170: ; CODE XREF: f1+8
.text:00000170          ; f1+14
.text:00000170 78 18 00 EA    B       _2printf
```

Мы снова не сможем сказать, глядя на этот код, был ли в оригинальном исходном коде `switch()` либо же несколько операторов `if()`.

Так или иначе, мы снова видим здесь инструкции с предикатами, например, `ADREQ ((Equal))`, которая будет исполняться только если `R0 = 0`, и тогда в `R0` будет загружен адрес строки «zero\n».

Следующая инструкция `BEQ` перенаправит исполнение на `loc_170`, если `R0 = 0`.

Кстати, наблюдательный читатель может спросить, сработает ли `BEQ` нормально, ведь `ADREQ` перед ним уже заполнила регистр `R0` чем-то другим?

Сработает, потому что `BEQ` проверяет флаги, установленные инструкцией `CMP`, а `ADREQ` флаги никак не модифицирует.

Далее всё просто и знакомо. Вызов `printf()` один, и в самом конце, мы уже рассматривали подобный трюк (1.8.2 (стр. 54)). К вызову функции `printf()` в конце ведут три пути.

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Последняя инструкция CMP R0, #2 здесь нужна, чтобы узнать $a = 2$ или нет.

Если это не так, то при помощи ADRNE (*Not Equal*) в R0 будет загружен указатель на строку «*something unknown \n*», ведь a уже было проверено на 0 и 1 до этого, и здесь a точно не попадает под эти константы.

Ну а если $R0 = 2$, в R0 будет загружен указатель на строку «*two\n*» при помощи инструкции ADREQ.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
.text:000000D4          f1:
.text:000000D4 10 B5      PUSH    {R4,LR}
.text:000000D6 00 28      CMP     R0, #0
.text:000000D8 05 D0      BEQ     zero_case
.text:000000DA 01 28      CMP     R0, #1
.text:000000DC 05 D0      BEQ     one_case
.text:000000DE 02 28      CMP     R0, #2
.text:000000E0 05 D0      BEQ     two_case
.text:000000E2 91 A0      ADR     R0, aSomethingUnkno ; "something unknown\n"
.text:000000E4 04 E0      B       default_case

.text:000000E6          zero_case: ; CODE XREF: f1+4
.text:000000E6 95 A0      ADR     R0, aZero ; "zero\n"
.text:000000E8 02 E0      B       default_case

.text:000000EA          one_case: ; CODE XREF: f1+8
.text:000000EA 96 A0      ADR     R0, aOne ; "one\n"
.text:000000EC 00 E0      B       default_case

.text:000000EE          two_case: ; CODE XREF: f1+C
.text:000000EE 97 A0      ADR     R0, aTwo ; "two\n"
.text:000000F0          default_case ; CODE XREF: f1+10
.text:000000F0          ; f1+14
.text:000000F0 06 F0 7E F8 BL      __2printf
.text:000000F4 10 BD      POP     {R4,PC}
```

Как уже было отмечено, в Thumb-режиме нет возможности добавлять условные предикаты к большинству инструкций, так что Thumb-код вышел похожим на код x86 в стиле [CISC](#), вполне понятный.

ARM64: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
.LC12:
.string "zero"
.LC13:
.string "one"
.LC14:
.string "two"
.LC15:
.string "something unknown"
f12:
    stp     x29, x30, [sp, -32]!
    add     x29, sp, 0
    str     w0, [x29,28]
    ldr     w0, [x29,28]
    cmp     w0, 1
    beq     .L34
    cmp     w0, 2
    beq     .L35
    cmp     w0, wzr
    bne     .L38          ; переход на метку по умолчанию
    adrp    x0, .LC12      ; "zero"
    add     x0, x0, :lo12:.LC12
    bl      puts
    b       .L32
.L34:
    adrp    x0, .LC13      ; "one"
    add     x0, x0, :lo12:.LC13
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
bl puts
b .L32
.L35:
    adrp x0, .LC14 ; "two"
    add x0, x0, :lo12:.LC14
    bl puts
    b .L32
.L38:
    adrp x0, .LC15 ; "something unknown"
    add x0, x0, :lo12:.LC15
    bl puts
    nop
.L32:
    ldp x29, x30, [sp], 32
    ret
```

Входное значение имеет тип *int*, поэтому для него используется регистр W0, а не целая часть регистра X0.

Указатели на строки передаются в puts() при помощи пары инструкций ADRP/ADD, как было показано в примере «Hello, world!»: [1.5.4](#) (стр. [24](#)).

ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f12:
    cmp w0, 1
    beq .L31
    cmp w0, 2
    beq .L32
    cbz w0, .L35
; метка по умолчанию
    adrp x0, .LC15 ; "something unknown"
    add x0, x0, :lo12:.LC15
    b puts
.L35:
    adrp x0, .LC12 ; "zero"
    add x0, x0, :lo12:.LC12
    b puts
.L32:
    adrp x0, .LC14 ; "two"
    add x0, x0, :lo12:.LC14
    b puts
.L31:
    adrp x0, .LC13 ; "one"
    add x0, x0, :lo12:.LC13
    b puts
```

Фрагмент кода более оптимизированный. Инструкция CBZ (*Compare and Branch on Zero* — сравнить и перейти если ноль) совершает переход если W0 ноль. Здесь также прямой переход на puts() вместо вызова, как уже было описано: [1.15.1](#) (стр. [144](#)).

MIPS

Листинг 1.147: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
    lui $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
; это 1?
    li $v0, 1
    beq $a0, $v0, loc_60
    la $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF) ; branch delay slot
; это 2?
    li $v0, 2
    beq $a0, $v0, loc_4C
    or $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; перейти, если не равно 0:
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
        bnez    $a0, loc_38
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; случай нуля:
        lui     $a0, ($LC0 >> 16) # "zero"
        lw      $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jr      $t9 ; branch delay slot, NOP
        la      $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "zero" ; branch delay slot

loc_38:
        # CODE XREF: f+1C
        lui     $a0, ($LC3 >> 16) # "something unknown"
        lw      $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jr      $t9
        la      $a0, ($LC3 & 0xFFFF) # "something unknown" ; branch delay slot

loc_4C:
        # CODE XREF: f+14
        lui     $a0, ($LC2 >> 16) # "two"
        lw      $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jr      $t9
        la      $a0, ($LC2 & 0xFFFF) # "two" ; branch delay slot

loc_60:
        # CODE XREF: f+8
        lui     $a0, ($LC1 >> 16) # "one"
        lw      $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jr      $t9
        la      $a0, ($LC1 & 0xFFFF) # "one" ; branch delay slot
```

Функция всегда заканчивается вызовом `puts()`, так что здесь мы видим переход на `puts()` (JR: «Jump Register») вместо перехода с сохранением [RA](#) («jump and link»).

Мы говорили об этом ранее: [1.15.1](#) (стр. [144](#)).

Мы также часто видим NOP-инструкции после LW. Это «load delay slot»: ещё один *delay slot* в MIPS. Инструкция после LW может исполняться в тот момент, когда LW загружает значение из памяти.

Впрочем, следующая инструкция не должна использовать результат LW.

Современные MIPS-процессоры ждут, если следующая инструкция использует результат LW, так что всё это уже устарело, но GCC всё еще добавляет NOP-ы для более старых процессоров.

Вообще, это можно игнорировать.

Вывод

Оператор `switch()` с малым количеством вариантов трудно отличим от применения конструкции `if/else`: листинг [1.15.1](#).

1.15.2. И если много

Если ветвлений слишком много, то генерировать слишком длинный код с многочисленными JE/JNE уже не так удобно.

```
#include <stdio.h>

void f (int a)
{
    switch (a)
    {
        case 0: printf ("zero\n"); break;
        case 1: printf ("one\n"); break;
        case 2: printf ("two\n"); break;
        case 3: printf ("three\n"); break;
        case 4: printf ("four\n"); break;
        default: printf ("something unknown\n"); break;
    };
}
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
};

int main()
{
    f (2); // test
};
```

x86

Неоптимизирующий MSVC

Рассмотрим пример, скомпилированный в (MSVC 2010):

Листинг 1.148: MSVC 2010

```
tv64 = -4 ; size = 4
_a$ = 8 ; size = 4
_f PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    mov     DWORD PTR tv64[ebp], eax
    cmp     DWORD PTR tv64[ebp], 4
    ja      SHORT $LN1@f
    mov     ecx, DWORD PTR tv64[ebp]
    jmp     DWORD PTR $LN11@f[ecx*4]
$LN6@f:
    push    OFFSET $SG739 ; 'zero', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN9@f
$LN5@f:
    push    OFFSET $SG741 ; 'one', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN9@f
$LN4@f:
    push    OFFSET $SG743 ; 'two', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN9@f
$LN3@f:
    push    OFFSET $SG745 ; 'three', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN9@f
$LN2@f:
    push    OFFSET $SG747 ; 'four', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
    jmp     SHORT $LN9@f
$LN1@f:
    push    OFFSET $SG749 ; 'something unknown', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 4
$LN9@f:
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
    prap    2 ; выровнять следующую метку
$LN11@f:
    DD      $LN6@f ; 0
    DD      $LN5@f ; 1
    DD      $LN4@f ; 2
    DD      $LN3@f ; 3
    DD      $LN2@f ; 4
_f ENDP
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Здесь происходит следующее: в теле функции есть набор вызовов `printf()` с разными аргументами. Все они имеют, конечно же, адреса, а также внутренние символические метки, которые присвоил им компилятор. Также все эти метки указываются во внутренней таблице `$LN11@f`.

В начале функции, если a больше 4, то сразу происходит переход на метку `$LN1@f`, где вызывается `printf()` с аргументом `'something unknown'`.

А если a меньше или равно 4, то это значение умножается на 4 и прибавляется адрес таблицы с переходами (`$LN11@f`). Таким образом, получается адрес внутри таблицы, где лежит нужный адрес внутри тела функции. Например, возьмем a равным 2. $2 * 4 = 8$ (ведь все элементы таблицы — это адреса внутри 32-битного процесса, таким образом, каждый элемент занимает 4 байта). 8 прибавить к `$LN11@f` — это будет элемент таблицы, где лежит `$LN4@f`. `JMP` вытаскивает из таблицы адрес `$LN4@f` и делает безусловный переход туда.

Эта таблица иногда называется *jump table* или *branch table*⁹².

А там вызывается `printf()` с аргументом `'two'`. Дословно, инструкция `jmp DWORD PTR $LN11@f[ecx*4]` означает *перейти по DWORD, который лежит по адресу \$LN11@f + ecx * 4*.

`prad (.1.7` (стр. 1013)) это макрос ассемблера, выравнивающий начало таблицы, чтобы она располагалась по адресу кратному 4 (или 16). Это нужно для того, чтобы процессор мог эффективнее загружать 32-битные значения из памяти через шину с памятью, кэш-память, итд.

⁹²Сам метод раньше назывался *computed GOTO* В ранних версиях Фортрана: [wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Computed_goto). Не очень-то и полезно в наше время, но каков термин!

Попробуем этот пример в OllyDbg. Входное значение функции (2) загружается в EAX:

CPU - main thread, module lot

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
010B1000	55	PUSH EBP
010B1001	8BEC	MOV EBP,ESP
010B1003	51	PUSH ECX
010B1004	8B45 08	MOV EAX,DWORD PTR SS:[EBP+8]
010B1007	8945 FC	MOV DWORD PTR SS:[EBP-4],EAX
010B100A	837D FC 04	CMP DWORD PTR SS:[EBP-4],4
010B100E	77 5A	JA SHORT 010B106A
010B1010	8B4D FC	MOV ECX,DWORD PTR SS:[EBP-4]
010B1013	FF248D 7C100	JMP DWORD PTR DS:[ECX*4+10B107C]
010B101A	68 00300001	PUSH OFFSET 010B3000
010B101F	FF15 00200000	CALL DWORD PTR DS:[<&MSVCRT10.printf>]
010B1025	83C4 04	ADD ESP,4
010B1028	EB 4E	JMP SHORT 010B1078
010B102A	68 00300001	PUSH OFFSET 010B3000
010B102F	FF15 00200000	CALL DWORD PTR DS:[<&MSVCRT10.printf>]
010B1035	83C4 04	ADD ESP,4
010B1038	EB 3E	JMP SHORT 010B1078
010B103A	68 10300001	PUSH OFFSET 010B3010
010B103F	FF15 00200000	CALL DWORD PTR DS:[<&MSVCRT10.printf>]
010B1045	83C4 04	ADD ESP,4
010B1048	EB 2E	JMP SHORT 010B1078

Registers (MMX)

Register	Value
EAX	00000002
ECX	6E494714 MSVCRT10.__initenv
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	003CFDA8
EBP	003CFDA8
ESI	00000001
EDI	010B33B8 lot.010B33B8
EIP	010B1007 lot.010B1007

Stack [003CFDA8]=6E494714 (MSVCRT10.__initenv)

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
010B3000	7A 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
010B3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 74 68 72 65 65 0A 00 00	two three
010B3020	66 6F 75 72 0A 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	four somethin
010B3030	67 20 75 6E 6B 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	g unknown
010B3040	FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3050	FE FF FF FF 01 00 00 00 9A E2 68 1D 65 1D 97 E2	
010B3060	01 00 00 00 48 28 03 00 68 4E 03 00 00 00 00 00	
010B3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

MMX

Register	Value
MM0	0000 0000 0000 0000
MM1	0000 0000 0000 0000
MM2	0000 0000 0000 0000
MM3	0000 0000 0000 0000
MM4	0000 0000 0000 0000

003CFDA8 6E494714 16In OFFSET MSVCRT10

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
003CFDA8	003CFDA8	16In
003CFDB0	010B109A	16In
003CFDB4	00000002	0
003CFDB8	003CFDFC	16In
003CFDBC	010B120E	16In
003CFDC0	00000001	0
003CFDC4	00034E68	hN
003CFDC8	00032848	H
003CFDCC	1D541F66	fT
003CFDD0	00000000	
003CFDD4	00000000	
003CFDD8	7EFDE000	p
003CFDDC	00000000	
003CFDE0	00000000	

Рис. 1.42: OllyDbg: входное значение функции загружено в EAX

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Входное значение проверяется, не больше ли оно чем 4? Нет, переход по умолчанию («default») не будет выполнен:

CPU - main thread, module lot

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
010B1000	55	PUSH EBP
010B1001	8BEC	MOV EBP,ESP
010B1003	51	PUSH ECX
010B1004	8B45 08	MOV EAX,DWORD PTR SS:[EBP+8]
010B1007	8945 FC	MOV DWORD PTR SS:[EBP-4],EAX
010B1009	837D FC 04	CMP DWORD PTR SS:[EBP-4],4
010B100E	77 5A	J< SHORT 010B106A
010B1010	8B4D FC	MOV ECX,DWORD PTR SS:[EBP-4]
010B1013	FF248D 7C100	JMP DWORD PTR DS:[ECX*4+10B107C]
010B101A	68 00300B01	PUSH OFFSET 010B3000
010B101F	FF15 00200B00	CALL DWORD PTR DS:[&MSUCR100.printf]
010B1025	83C4 04	ADD ESP,4
010B1028	EB 4E	JMP SHORT 010B1078
010B102A	68 00300B01	PUSH OFFSET 010B3000
010B102F	FF15 00200B00	CALL DWORD PTR DS:[&MSUCR100.printf]
010B1035	83C4 04	ADD ESP,4
010B1038	EB 3E	JMP SHORT 010B1078
010B103A	68 10300B01	PUSH OFFSET 010B3010
010B103F	FF15 00200B00	CALL DWORD PTR DS:[&MSUCR100.printf]
010B1045	83C4 04	ADD ESP,4
010B1048	EB 2E	JMP SHORT 010B1078

Registers (MMX)

Register	Value
EAX	00000002
ECX	6E494714 MSUCR100.__initenv
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	003CFD88
EBP	003CFD8C
ESI	00000001
EDI	010B33B8 lot.010B33B8
EIP	010B100E lot.010B100E

Jump is not taken
Dest=lot.010B106A

Memory Dump

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
010B3000	74 65 72 6F 0A 00 00 00 6F 6E 65 0A 00 00 00 00	zero one
010B3010	74 77 6F 0A 00 00 00 00 74 68 72 65 65 0A 00 00	two three
010B3020	66 6F 75 72 0A 00 00 00 73 6F 6D 65 74 68 69 6E	four somethin
010B3030	67 20 75 6E 68 6E 6F 77 6E 0A 00 00 FF FF FF FF	g unknown
010B3040	FF FF FF FF 01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3050	FE FF FF FF 01 00 00 00 9A E2 68 1D 65 1D 97 E2	
010B3060	01 00 00 00 48 28 03 00 68 4E 03 00 00 00 00 00	
010B3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
010B30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Registers (MMX)

Register	Value
MM0	0000 0000 0000 0000
MM1	0000 0000 0000 0000
MM2	0000 0000 0000 0000
MM3	0000 0000 0000 0000
MM4	0000 0000 0000 0000

Memory Dump

Address	Hex dump	ASCII (ANSI - Cy)
003CFD88	00000002	
003CFD8C	003CFD88	
003CFD90	010B109A	
003CFD94	00000002	
003CFD98	003CFD8C	
003CFD9C	010B120E	
003CFDA0	00000001	
003CFDA4	00034E68	
003CFDA8	00032848	
003CFDAC	1D541F66	
003CFDD0	00000000	
003CFDD4	00000000	
003CFDD8	7EFDE000	
003CFDDC	00000000	
003CFDE0	00000000	

Рис. 1.43: OllyDbg: 2 не больше чем 4: переход не работает

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Здесь мы видим jump table:

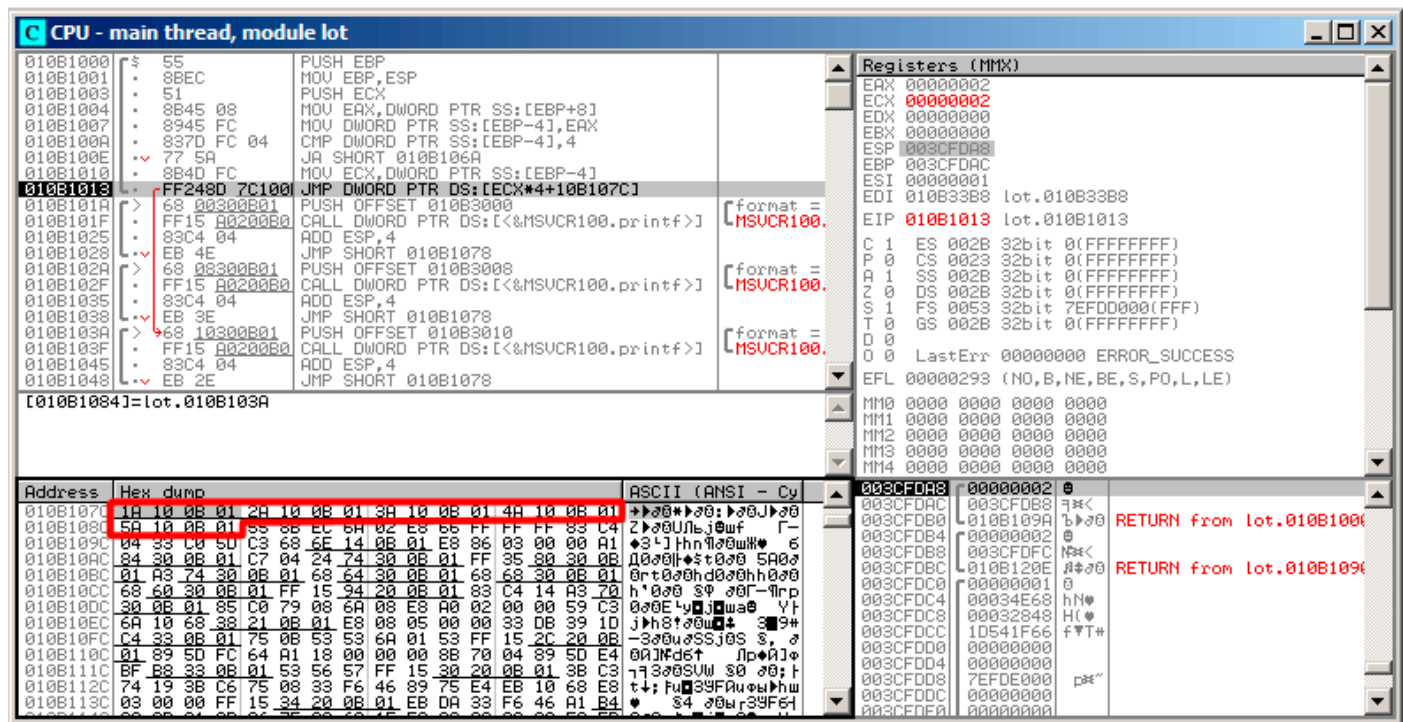


Рис. 1.44: OllyDbg: вычисляем адрес для перехода используя jump table

Кстати, щелкнем по «Follow in Dump» → «Address constant», так что теперь *jump table* видна в окне данных.

Это 5 32-битных значений⁹³. ECX сейчас содержит 2, так что третий элемент (может индексироваться как 2⁹⁴) таблицы будет использован. Кстати, можно также щелкнуть «Follow in Dump» → «Memory address» и OllyDbg покажет элемент, который сейчас адресуется в инструкции JMP. Это 0x010B103A.

⁹³Они подчеркнуты в OllyDbg, потому что это также и FIXUP-ы: 6.5.2 (стр. 739), мы вернемся к ним позже

⁹⁴Об индексации, см. также: 3.19.3

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Переход сработал и мы теперь на 0x010B103A: сейчас будет исполнен код, выводящий строку «two»:

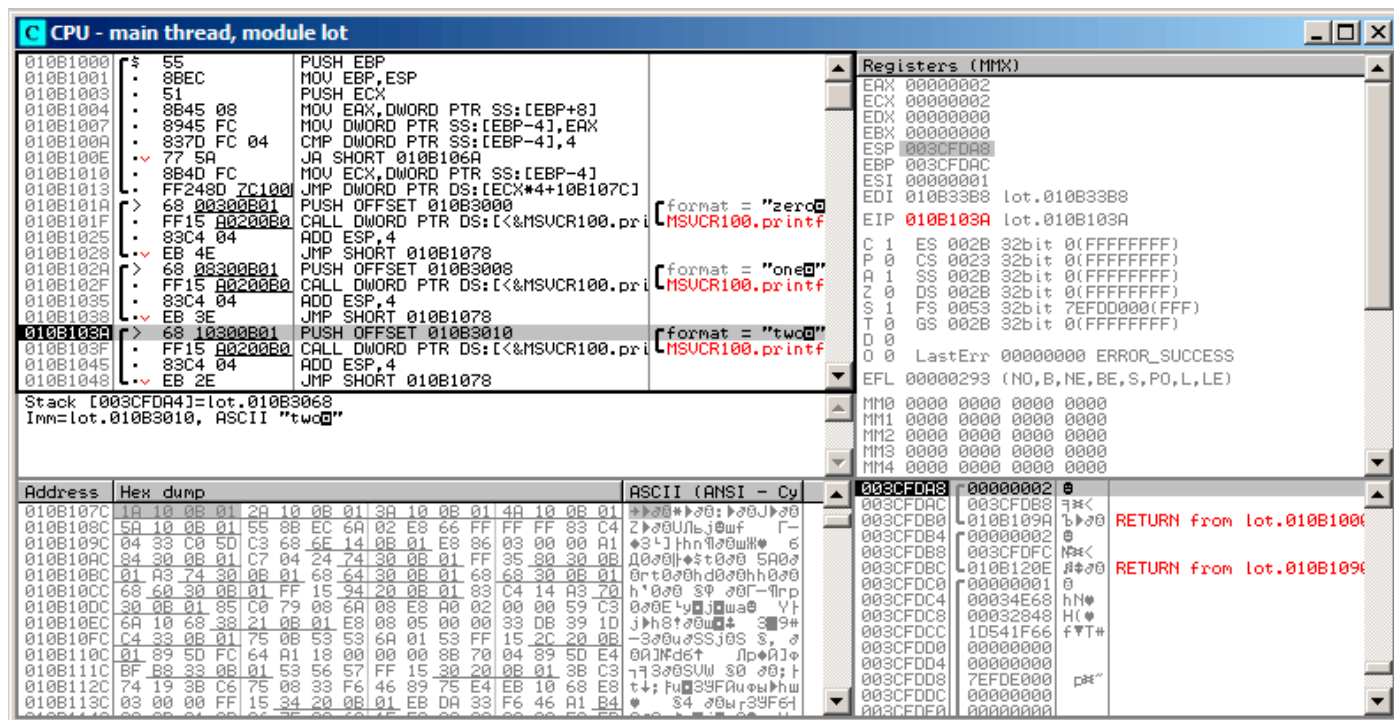


Рис. 1.45: OllyDbg: теперь мы на соответствующей метке case:

Неоптимизирующий GCC

Посмотрим, что сгенерирует GCC 4.4.1:

Листинг 1.149: GCC 4.4.1

```
public f
f:
proc near ; CODE XREF: main+10

var_18 = dword ptr -18h
arg_0 = dword ptr 8

push    ebp
mov     ebp, esp
sub     esp, 18h
cmp     [ebp+arg_0], 4
ja      short loc_8048444
mov     eax, [ebp+arg_0]
shl     eax, 2
mov     eax, ds:off_804855C[eax]
jmp     eax

loc_80483FE: ; DATA XREF: .rodata:off_804855C
mov     [esp+18h+var_18], offset aZero ; "zero"
call    _puts
jmp     short locret_8048450

loc_804840C: ; DATA XREF: .rodata:08048560
mov     [esp+18h+var_18], offset aOne ; "one"
call    _puts
jmp     short locret_8048450

loc_804841A: ; DATA XREF: .rodata:08048564
mov     [esp+18h+var_18], offset aTwo ; "two"
call    _puts
jmp     short locret_8048450
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
loc_8048428: ; DATA XREF: .rodata:08048568
mov     [esp+18h+var_18], offset aThree ; "three"
call    _puts
jmp     short locret_8048450

loc_8048436: ; DATA XREF: .rodata:0804856C
mov     [esp+18h+var_18], offset aFour ; "four"
call    _puts
jmp     short locret_8048450

loc_8048444: ; CODE XREF: f+A
mov     [esp+18h+var_18], offset aSomethingUnkno ; "something unknown"
call    _puts

locret_8048450: ; CODE XREF: f+26
; f+34...
leave
retn
f       endp

off_804855C dd offset loc_80483FE ; DATA XREF: f+12
           dd offset loc_804840C
           dd offset loc_804841A
           dd offset loc_8048428
           dd offset loc_8048436
```

Практически то же самое, за исключением мелкого нюанса: аргумент из `arg_0` умножается на 4 при помощи сдвига влево на 2 бита (это почти то же самое что и умножение на 4) (1.18.2 (стр. 207)). Затем адрес метки внутри функции берется из массива `off_804855C` и адресуется при помощи вычисленного индекса.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.150: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
00000174          f2
00000174 05 00 50 E3      CMP     R0, #5          ; switch 5 cases
00000178 00 F1 8F 30      ADDCC   PC, PC, R0,LSL#2 ; switch jump
0000017C 0E 00 00 EA      B       default_case ; jumtable 00000178 default case

00000180
00000180          loc_180 ; CODE XREF: f2+4
00000180 03 00 00 EA      B       zero_case ; jumtable 00000178 case 0

00000184
00000184          loc_184 ; CODE XREF: f2+4
00000184 04 00 00 EA      B       one_case ; jumtable 00000178 case 1

00000188
00000188          loc_188 ; CODE XREF: f2+4
00000188 05 00 00 EA      B       two_case ; jumtable 00000178 case 2

0000018C
0000018C          loc_18C ; CODE XREF: f2+4
0000018C 06 00 00 EA      B       three_case ; jumtable 00000178 case 3

00000190
00000190          loc_190 ; CODE XREF: f2+4
00000190 07 00 00 EA      B       four_case ; jumtable 00000178 case 4

00000194
00000194          zero_case ; CODE XREF: f2+4
00000194          ; f2:loc_180
00000194 EC 00 8F E2      ADR     R0, aZero ; jumtable 00000178 case 0
00000198 06 00 00 EA      B       loc_1B8

0000019C
0000019C          one_case ; CODE XREF: f2+4
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```

0000019C          ; f2:loc_184
0000019C EC 00 8F E2    ADR    R0, aOne      ; jumptable 00000178 case 1
000001A0 04 00 00 EA    B      loc_1B8

000001A4
000001A4          two_case ; CODE XREF: f2+4
000001A4          ; f2:loc_188
000001A4 01 0C 8F E2    ADR    R0, aTwo      ; jumptable 00000178 case 2
000001A8 02 00 00 EA    B      loc_1B8

000001AC
000001AC          three_case ; CODE XREF: f2+4
000001AC          ; f2:loc_18C
000001AC 01 0C 8F E2    ADR    R0, aThree    ; jumptable 00000178 case 3
000001B0 00 00 00 EA    B      loc_1B8

000001B4
000001B4          four_case ; CODE XREF: f2+4
000001B4          ; f2:loc_190
000001B4 01 0C 8F E2    ADR    R0, aFour      ; jumptable 00000178 case 4
000001B8
000001B8          loc_1B8    ; CODE XREF: f2+24
000001B8          ; f2+2C
000001B8 66 18 00 EA    B      __2printf

000001BC
000001BC          default_case ; CODE XREF: f2+4
000001BC          ; f2+8
000001BC D4 00 8F E2    ADR    R0, aSomethingUnkno ; jumptable 00000178 default case
000001C0 FC FF FF EA    B      loc_1B8

```

В этом коде используется та особенность режима ARM, что все инструкции в этом режиме имеют фиксированную длину 4 байта.

Итак, не будем забывать, что максимальное значение для *a* это 4: всё что выше, должно вызвать вывод строки «*something unknown*».

Самая первая инструкция `CMP R0, #5` сравнивает входное значение в *a* с 5.

⁹⁵ Следующая инструкция `ADDCC PC, PC, R0, LSL#2` сработает только в случае если $R0 < 5$ (*CC=Carry clear / Less than*). Следовательно, если `ADDCC` не сработает (это случай с $R0 \geq 5$), выполнится переход на метку `default_case`.

Но если $R0 < 5$ и `ADDCC` сработает, то произойдет следующее.

Значение в *R0* умножается на 4. Фактически, `LSL#2` в суффиксе инструкции означает «сдвиг влево на 2 бита».

Но как будет видно позже (1.18.2 (стр. 207)) в секции «Сдвиги», сдвиг влево на 2 бита, это эквивалентно его умножению на 4.

Затем полученное $R0 * 4$ прибавляется к текущему значению *PC*, совершая, таким образом, переход на одну из расположенных ниже инструкций *B* (*Branch*).

На момент исполнения `ADDCC`, содержимое *PC* на 8 байт больше (0x180), чем адрес по которому расположена сама инструкция `ADDCC` (0x178), либо, говоря иным языком, на 2 инструкции больше.

Это связано с работой конвейера процессора ARM: пока исполняется инструкция `ADDCC`, процессор уже начинает обрабатывать инструкцию после следующей, поэтому *PC* указывает туда. Этот факт нужно запомнить.

Если $a = 0$, тогда к *PC* ничего не будет прибавлено и в *PC* запишется актуальный на тот момент *PC* (который больше на 8) и произойдет переход на метку `loc_180`. Это на 8 байт дальше места, где находится инструкция `ADDCC`.

Если $a = 1$, тогда в *PC* запишется $PC + 8 + a * 4 = PC + 8 + 1 * 4 = PC + 12 = 0x184$. Это адрес метки `loc_184`.

При каждой добавленной к *a* единице итоговый *PC* увеличивается на 4.

4 это длина инструкции в режиме ARM и одновременно с этим, длина каждой инструкции *B*, их здесь следует 5 в ряд.

⁹⁵ADD—складывание чисел

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

Каждая из этих пяти инструкций `B` передает управление дальше, где собственно и происходит то, что запрограммировано в операторе `switch()`. Там происходит загрузка указателя на свою строку, итд.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.151: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
000000F6          EXPORT f2
000000F6          f2
000000F6 10 B5      PUSH    {R4,LR}
000000F8 03 00      MOVS    R3, R0
000000FA 06 F0 69 F8  BL      __ARM_common_switch8_thumb ; switch 6 cases

000000FE 05        DCB 5
000000FF 04 06 08 0A 0C 10  DCB 4, 6, 8, 0xA, 0xC, 0x10 ; jump table for switch statement
00000105 00        ALIGN 2
00000106
00000106          zero_case ; CODE XREF: f2+4
00000106 8D A0      ADR      R0, aZero ; jumtable 000000FA case 0
00000108 06 E0      B       loc_118

0000010A
0000010A          one_case ; CODE XREF: f2+4
0000010A 8E A0      ADR      R0, aOne ; jumtable 000000FA case 1
0000010C 04 E0      B       loc_118

0000010E
0000010E          two_case ; CODE XREF: f2+4
0000010E 8F A0      ADR      R0, aTwo ; jumtable 000000FA case 2
00000110 02 E0      B       loc_118

00000112
00000112          three_case ; CODE XREF: f2+4
00000112 90 A0      ADR      R0, aThree ; jumtable 000000FA case 3
00000114 00 E0      B       loc_118

00000116
00000116          four_case ; CODE XREF: f2+4
00000116 91 A0      ADR      R0, aFour ; jumtable 000000FA case 4
00000118
00000118          loc_118 ; CODE XREF: f2+12
00000118          ; f2+16
00000118 06 F0 6A F8      BL      __2printf
0000011C 10 BD      POP     {R4,PC}

0000011E
0000011E          default_case ; CODE XREF: f2+4
0000011E 82 A0      ADR      R0, aSomethingUnkno ; jumtable 000000FA default case
00000120 FA E7      B       loc_118

000061D0          EXPORT __ARM_common_switch8_thumb
000061D0          __ARM_common_switch8_thumb ; CODE XREF: example6_f2+4
000061D0 78 47      BX      PC

000061D2 00 00      ALIGN 4
000061D2          ; End of function __ARM_common_switch8_thumb
000061D2
000061D4          __32__ARM_common_switch8_thumb ; CODE XREF: ↵
000061D4          ↵ __ARM_common_switch8_thumb
000061D4 01 C0 5E E5      LDRB    R12, [LR,#-1]
000061D8 0C 00 53 E1      CMP     R3, R12
000061DC 0C 30 DE 27      LDRCSB  R3, [LR,R12]
000061E0 03 30 DE 37      LDRCCB  R3, [LR,R3]
000061E4 83 C0 8E E0      ADD     R12, LR, R3,LSL#1
000061E8 1C FF 2F E1      BX      R12
000061E8          ; End of function __32__ARM_common_switch8_thumb
```


1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

В режимах Thumb и Thumb-2 уже нельзя надеяться на то, что все инструкции имеют одну длину. Можно даже сказать, что в этих режимах инструкции переменной длины, как в x86.

Так что здесь добавляется специальная таблица, содержащая информацию о том, как много вариантов здесь, не включая варианта по умолчанию, и смещения, для каждого варианта. Каждое смещение кодирует метку, куда нужно передать управление в соответствующем случае.

Для того чтобы работать с таблицей и совершить переход, вызывается служебная функция `__ARM_common_switch8_thumb`. Она начинается с инструкции BX PC, чья функция — переключить процессор в ARM-режим.

Далее функция, работающая с таблицей. Она слишком сложная для рассмотрения в данном месте, так что пропустим это.

Но можно отметить, что эта функция использует регистр LR как указатель на таблицу.

Действительно, после вызова этой функции, в LR был записан адрес после инструкции

BL `__ARM_common_switch8_thumb`, а там как раз и начинается таблица.

Ещё можно отметить, что код для этого выделен в отдельную функцию для того, чтобы не нужно было каждый раз генерировать точно такой же фрагмент кода для каждого выражения switch().

IDA распознала эту служебную функцию и таблицу автоматически дописала комментарии к меткам вроде
`jumpable 000000FA case 0.`

MIPS

Листинг 1.152: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
    lui    $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
; перейти на loc_24, если входное значение меньше 5:
    sltiu  $v0, $a0, 5
    bnez   $v0, loc_24
    la     $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF) ; branch delay slot
; входное значение больше или равно 5
; вывести "something unknown" и закончить:
    lui    $a0, ($LC5 >> 16) # "something unknown"
    lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
    or     $at, $zero ; NOP
    jr     $t9
    la     $a0, ($LC5 & 0xFFFF) # "something unknown" ; branch delay slot

loc_24:
                                # CODE XREF: f+8
; загрузить адрес таблицы переходов
; LA это псевдоинструкция, на самом деле здесь пара LUI и ADDIU:
    la     $v0, off_120
; умножить входное значение на 4:
    sll    $a0, 2
; прибавить умноженное значение к адресу таблицы:
    addu   $a0, $v0, $a0
; загрузить элемент из таблицы переходов:
    lw     $v0, 0($a0)
    or     $at, $zero ; NOP
; перейти по адресу, полученному из таблицы:
    jr     $v0
    or     $at, $zero ; branch delay slot, NOP

sub_44:
                                # DATA XREF: .rodata:0000012C
; вывести "three" и закончить
    lui    $a0, ($LC3 >> 16) # "three"
    lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
    or     $at, $zero ; NOP
    jr     $t9
    la     $a0, ($LC3 & 0xFFFF) # "three" ; branch delay slot

sub_58:
                                # DATA XREF: .rodata:00000130
; вывести "four" и закончить
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
        lui    $a0, ($LC4 >> 16) # "four"
        lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or     $at, $zero ; NOP
        jr     $t9
        la     $a0, ($LC4 & 0xFFFF) # "four" ; branch delay slot

sub_6C:                                # DATA XREF: .rodata:off_120
; вывести "zero" и закончить
        lui    $a0, ($LC0 >> 16) # "zero"
        lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or     $at, $zero ; NOP
        jr     $t9
        la     $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "zero" ; branch delay slot

sub_80:                                # DATA XREF: .rodata:00000124
; вывести "one" и закончить
        lui    $a0, ($LC1 >> 16) # "one"
        lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or     $at, $zero ; NOP
        jr     $t9
        la     $a0, ($LC1 & 0xFFFF) # "one" ; branch delay slot

sub_94:                                # DATA XREF: .rodata:00000128
; вывести "two" и закончить
        lui    $a0, ($LC2 >> 16) # "two"
        lw     $t9, (puts & 0xFFFF)($gp)
        or     $at, $zero ; NOP
        jr     $t9
        la     $a0, ($LC2 & 0xFFFF) # "two" ; branch delay slot

; может быть размещено в секции .rodata:
off_120:    .word sub_6C
            .word sub_80
            .word sub_94
            .word sub_44
            .word sub_58
```

Новая для нас инструкция здесь это SLTIU («Set on Less Than Immediate Unsigned» — установить, если меньше чем значение, беззнаковое сравнение).

На самом деле, это то же что и SLTU («Set on Less Than Unsigned»), но «I» означает «immediate», т.е. число может быть задано в самой инструкции.

BNEZ это «Branch if Not Equal to Zero» (переход если не равно нулю).

Код очень похож на код для других ISA. SLL («Shift Word Left Logical» — логический сдвиг влево) совершает умножение на 4. MIPS всё-таки это 32-битный процессор, так что все адреса в таблице переходов (*jump table*) 32-битные.

Вывод

Примерный скелет оператора *switch()*:

Листинг 1.153: x86

```
MOV REG, input
CMP REG, 4 ; максимальное количество меток
JA default
SHL REG, 2 ; найти элемент в таблице. сдвинуть на 3 бита в x64
MOV REG, jump_table[REG]
JMP REG

case1:
    ; делать что-то
    JMP exit
case2:
    ; делать что-то
    JMP exit
case3:
```


1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
; делать что-то
JMP exit
case4:
    ; делать что-то
    JMP exit
case5:
    ; делать что-то
    JMP exit

default:

    ...

exit:

    ....

jump_table dd case1
            dd case2
            dd case3
            dd case4
            dd case5
```

Переход по адресу из таблицы переходов может быть также реализован такой инструкцией: `JMP jump_table[REG*4]`. Или `JMP jump_table[REG*8]` в x64.

Таблица переходов (*jump table*) это просто массив указателей, как это будет вскоре описано: [1.20.5](#) (стр. 277).

1.15.3. Когда много case в одном блоке

Вот очень часто используемая конструкция: несколько case может быть использовано в одном блоке:

```
#include <stdio.h>

void f(int a)
{
    switch (a)
    {
        case 1:
        case 2:
        case 7:
        case 10:
            printf ("1, 2, 7, 10\n");
            break;

        case 3:
        case 4:
        case 5:
        case 6:
            printf ("3, 4, 5\n");
            break;

        case 8:
        case 9:
        case 20:
        case 21:
            printf ("8, 9, 21\n");
            break;

        case 22:
            printf ("22\n");
            break;

        default:
            printf ("default\n");
            break;
    };
};

int main()
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
{  
    f(4);  
};
```

Слишком расточительно генерировать каждый блок для каждого случая, поэтому обычно генерируется каждый блок плюс некий диспетчер.

MSVC

Листинг 1.154: Оптимизирующий MSVC 2010

```
1 $SG2798 DB      '1, 2, 7, 10', 0aH, 00H  
2 $SG2800 DB      '3, 4, 5', 0aH, 00H  
3 $SG2802 DB      '8, 9, 21', 0aH, 00H  
4 $SG2804 DB      '22', 0aH, 00H  
5 $SG2806 DB      'default', 0aH, 00H  
6  
7 _a$ = 8  
8 _f PROC  
9     mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]  
10    dec     eax  
11    cmp     eax, 21  
12    ja      SHORT $LN1@f  
13    movzx   eax, BYTE PTR $LN10@f[eax]  
14    jmp     DWORD PTR $LN11@f[eax*4]  
15 $LN5@f:  
16    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG2798 ; '1, 2, 7, 10'  
17    jmp     DWORD PTR __imp__printf  
18 $LN4@f:  
19    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG2800 ; '3, 4, 5'  
20    jmp     DWORD PTR __imp__printf  
21 $LN3@f:  
22    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG2802 ; '8, 9, 21'  
23    jmp     DWORD PTR __imp__printf  
24 $LN2@f:  
25    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG2804 ; '22'  
26    jmp     DWORD PTR __imp__printf  
27 $LN1@f:  
28    mov     DWORD PTR _a$[esp-4], OFFSET $SG2806 ; 'default'  
29    jmp     DWORD PTR __imp__printf  
30    npad    2 ; выровнять таблицу $LN11@f по 16-байтной границе  
31 $LN11@f:  
32    DD      $LN5@f ; вывести '1, 2, 7, 10'  
33    DD      $LN4@f ; вывести '3, 4, 5'  
34    DD      $LN3@f ; вывести '8, 9, 21'  
35    DD      $LN2@f ; вывести '22'  
36    DD      $LN1@f ; вывести 'default'  
37 $LN10@f:  
38    DB      0 ; a=1  
39    DB      0 ; a=2  
40    DB      1 ; a=3  
41    DB      1 ; a=4  
42    DB      1 ; a=5  
43    DB      1 ; a=6  
44    DB      0 ; a=7  
45    DB      2 ; a=8  
46    DB      2 ; a=9  
47    DB      0 ; a=10  
48    DB      4 ; a=11  
49    DB      4 ; a=12  
50    DB      4 ; a=13  
51    DB      4 ; a=14  
52    DB      4 ; a=15  
53    DB      4 ; a=16  
54    DB      4 ; a=17  
55    DB      4 ; a=18  
56    DB      4 ; a=19  
57    DB      2 ; a=20
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
58      DB      2 ; a=21
59      DB      3 ; a=22
60  _f      ENDP
```

Здесь видим две таблицы: первая таблица (\$LN10@f) это таблица индексов, а вторая таблица (\$LN11@f) это массив указателей на блоки.

В начале, входное значение используется как индекс в таблице индексов (строка 13).

Вот краткое описание значений в таблице: 0 это первый блок case (для значений 1, 2, 7, 10), 1 это второй (для значений 3, 4, 5), 2 это третий (для значений 8, 9, 21), 3 это четвертый (для значений 22), 4 это для блока по умолчанию.

Мы получаем индекс для второй таблицы указателей на блоки и переходим туда (строка 14).

Ещё нужно отметить то, что здесь нет случая для нулевого входного значения.

Поэтому мы видим инструкцию DEC на строке 10 и таблица начинается с $a = 1$. Потому что незачем выделять в таблице элемент для $a = 0$.

Это очень часто используемый шаблон.

В чем же экономия? Почему нельзя сделать так, как уже обсуждалось (1.15.2 (стр. 162)), используя только одну таблицу, содержащую указатели на блоки? Причина в том, что элементы в таблице индексов занимают только по 8-битному байту, поэтому всё это более компактно.

GCC

GCC делает так, как уже обсуждалось (1.15.2 (стр. 162)), используя просто таблицу указателей.

ARM64: Оптимизирующий GCC 4.9.1

Во-первых, здесь нет кода, срабатывающего в случае если входное значение — 0, так что GCC пытается сделать таблицу переходов более компактной и начинает со случая, когда входное значение — 1.

GCC 4.9.1 для ARM64 использует даже более интересный трюк. Он может закодировать все смещения как 8-битные байты. Вспомним, что все инструкции в ARM64 имеют размер в 4 байта.

GCC также использует тот факт, что все смещения в моем крохотном примере находятся достаточно близко друг от друга.

Так что таблица переходов состоит из байт.

Листинг 1.155: Оптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
f14:
; входное значение в W0
    sub    w0, w0, #1
    cmp    w0, 21
; переход если меньше или равно (беззнаковое):
    bls    .L9
.L2:
; вывести "default":
    adrp   x0, .LC4
    add    x0, x0, :lo12:.LC4
    b      puts
.L9:
; загрузить адрес таблицы переходов в X1:
    adrp   x1, .L4
    add    x1, x1, :lo12:.L4
; W0=input_value-1
; загрузить байт из таблицы:
    ldrb   w0, [x1,w0,uxtw]
; загрузить адрес метки Lrtx:
    adr    x1, .Lrtx4
; умножить элемент из таблицы на 4 (сдвинув на 2 бита влево) и прибавить (или вычесть) к ↗
    ↙ адресу Lrtx:
    add    x0, x1, w0, sxtb #2
; перейти на вычисленный адрес:
```

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
br      x0
; эта метка указывает на сегмент кода (text):
.Lrtx4:
        .section      .rodata
; всё после выражения ".section" выделяется в сегменте только для чтения (rodata):
.L4:
        .byte  (.L3 - .Lrtx4) / 4      ; case 1
        .byte  (.L3 - .Lrtx4) / 4      ; case 2
        .byte  (.L5 - .Lrtx4) / 4      ; case 3
        .byte  (.L5 - .Lrtx4) / 4      ; case 4
        .byte  (.L5 - .Lrtx4) / 4      ; case 5
        .byte  (.L5 - .Lrtx4) / 4      ; case 6
        .byte  (.L3 - .Lrtx4) / 4      ; case 7
        .byte  (.L6 - .Lrtx4) / 4      ; case 8
        .byte  (.L6 - .Lrtx4) / 4      ; case 9
        .byte  (.L3 - .Lrtx4) / 4      ; case 10
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 11
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 12
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 13
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 14
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 15
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 16
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 17
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 18
        .byte  (.L2 - .Lrtx4) / 4      ; case 19
        .byte  (.L6 - .Lrtx4) / 4      ; case 20
        .byte  (.L6 - .Lrtx4) / 4      ; case 21
        .byte  (.L7 - .Lrtx4) / 4      ; case 22
        .text
; всё после выражения ".text" выделяется в сегменте кода (text):
.L7:
; вывести "22"
        adrp    x0, .LC3
        add     x0, x0, :lo12:LC3
        b       puts
.L6:
; вывести "8, 9, 21"
        adrp    x0, .LC2
        add     x0, x0, :lo12:LC2
        b       puts
.L5:
; вывести "3, 4, 5"
        adrp    x0, .LC1
        add     x0, x0, :lo12:LC1
        b       puts
.L3:
; вывести "1, 2, 7, 10"
        adrp    x0, .LC0
        add     x0, x0, :lo12:LC0
        b       puts
.LC0:
        .string "1, 2, 7, 10"
.LC1:
        .string "3, 4, 5"
.LC2:
        .string "8, 9, 21"
.LC3:
        .string "22"
.LC4:
        .string "default"
```

Скомпилируем этот пример как объектный файл и откроем его в [IDA](#). Вот таблица переходов:

Листинг 1.156: jumtable in IDA

.rodata:0000000000000064	AREA .rodata, DATA, READONLY
.rodata:0000000000000064	; ORG 0x64
.rodata:0000000000000064 \$d	DCB 9 ; case 1
.rodata:0000000000000065	DCB 9 ; case 2
.rodata:0000000000000066	DCB 6 ; case 3
.rodata:0000000000000067	DCB 6 ; case 4

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
.rodata:0000000000000068      DCB    6      ; case 5
.rodata:0000000000000069      DCB    6      ; case 6
.rodata:000000000000006A      DCB    9      ; case 7
.rodata:000000000000006B      DCB    3      ; case 8
.rodata:000000000000006C      DCB    3      ; case 9
.rodata:000000000000006D      DCB    9      ; case 10
.rodata:000000000000006E      DCB 0xF7    ; case 11
.rodata:000000000000006F      DCB 0xF7    ; case 12
.rodata:0000000000000070      DCB 0xF7    ; case 13
.rodata:0000000000000071      DCB 0xF7    ; case 14
.rodata:0000000000000072      DCB 0xF7    ; case 15
.rodata:0000000000000073      DCB 0xF7    ; case 16
.rodata:0000000000000074      DCB 0xF7    ; case 17
.rodata:0000000000000075      DCB 0xF7    ; case 18
.rodata:0000000000000076      DCB 0xF7    ; case 19
.rodata:0000000000000077      DCB    3      ; case 20
.rodata:0000000000000078      DCB    3      ; case 21
.rodata:0000000000000079      DCB    0      ; case 22
.rodata:000000000000007B ; .rodata ends
```

В случае 1, 9 будет умножено на 9 и прибавлено к адресу метки Lrtx4.

В случае 22, 0 будет умножено на 4, в результате это 0.

Место сразу за меткой Lrtx4 это метка L7, где находится код, выводющий «22».

В сегменте кода нет таблицы переходов, место для нее выделено в отдельной секции .rodata (нет особой нужды располагать её в сегменте кода).

Там есть также отрицательные байты (0xF7). Они используются для перехода назад, на код, выводющий строку «default» (на .L2).

1.15.4. Fall-through

Ещё одно популярное использование оператора switch() это т.н. «fallthrough» («провал»). Вот простой пример⁹⁶:

```
1 bool is_whitespace(char c) {
2     switch (c) {
3         case ' ': // fallthrough
4         case '\t': // fallthrough
5         case '\r': // fallthrough
6         case '\n':
7             return true;
8         default: // not whitespace
9             return false;
10    }
11 }
```

Немного сложнее, из ядра Linux⁹⁷:

```
1 char nco1, nco2;
2
3 void f(int if_freq_khz)
4 {
5
6     switch (if_freq_khz) {
7         default:
8             printf("IF=%d KHz is not supported, 3250 assumed\n", if_freq_khz);
9             /* fallthrough */
10        case 3250: /* 3.25Mhz */
11            nco1 = 0x34;
12            nco2 = 0x00;
13            break;
14        case 3500: /* 3.50Mhz */
15            nco1 = 0x38;
```

⁹⁶Взято отсюда: https://github.com/azonalon/prgraas/blob/master/proglib/lecture_examples/is_whitespace.c

⁹⁷<https://github.com/torvalds/linux/blob/master/drivers/media/dvb-frontends/lgt3306a.c>

1.15. SWITCH()/CASE/DEFAULT

```
16         nco2 = 0x00;
17         break;
18     case 4000: /* 4.00Mhz */
19         nco1 = 0x40;
20         nco2 = 0x00;
21         break;
22     case 5000: /* 5.00Mhz */
23         nco1 = 0x50;
24         nco2 = 0x00;
25         break;
26     case 5380: /* 5.38Mhz */
27         nco1 = 0x56;
28         nco2 = 0x14;
29         break;
30     }
31 };
```

Листинг 1.157: Оптимизирующий GCC 5.4.0 x86

```
1  .LC0:
2      .string "IF=%d KHz is not supportted, 3250 assumed\n"
3  f:
4      sub    esp, 12
5      mov    eax, DWORD PTR [esp+16]
6      cmp    eax, 4000
7      je     .L3
8      jg     .L4
9      cmp    eax, 3250
10     je     .L5
11     cmp    eax, 3500
12     jne    .L2
13     mov    BYTE PTR nco1, 56
14     mov    BYTE PTR nco2, 0
15     add    esp, 12
16     ret
17  .L4:
18     cmp    eax, 5000
19     je     .L7
20     cmp    eax, 5380
21     jne    .L2
22     mov    BYTE PTR nco1, 86
23     mov    BYTE PTR nco2, 20
24     add    esp, 12
25     ret
26  .L2:
27     sub    esp, 8
28     push   eax
29     push   OFFSET FLAT:.LC0
30     call   printf
31     add    esp, 16
32  .L5:
33     mov    BYTE PTR nco1, 52
34     mov    BYTE PTR nco2, 0
35     add    esp, 12
36     ret
37  .L3:
38     mov    BYTE PTR nco1, 64
39     mov    BYTE PTR nco2, 0
40     add    esp, 12
41     ret
42  .L7:
43     mov    BYTE PTR nco1, 80
44     mov    BYTE PTR nco2, 0
45     add    esp, 12
46     ret
```

На метку .L5 управление может перейти если на входе ф-ции число 3250. Но на эту метку можно попасть и с другой стороны: мы видим что между вызовом printf() и меткой .L5 нет никаких переходов.

1.16. ЦИКЛЫ

Теперь мы можем понять, почему иногда *switch()* является источником ошибок: если забыть дописать *break*, это прекратит выражение *switch()* в *fallthrough*, и вместо одного блока для каждого условия, будет исполняться сразу несколько.

1.15.5. Упражнения

Упражнение #1

Вполне возможно переделать пример на Си в листинге 1.15.2 (стр. 156) так, чтобы при компиляции получалось даже ещё меньше кода, но работать всё будет точно так же. Попробуйте этого добиться.

1.16. Циклы

1.16.1. Простой пример

x86

Для организации циклов в архитектуре x86 есть старая инструкция *L00P*. Она проверяет значение регистра *ECX* и если оно не 0, делает **декремент** *ECX* и переход по метке, указанной в операнде. Возможно, эта инструкция не слишком удобная, потому что уже почти не бывает современных компиляторов, которые использовали бы её. Так что если вы видите где-то *L00P*, то с большой вероятностью это вручную написанный код на ассемблере.

Обычно, циклы на Си/Си++ создаются при помощи *for()*, *while()*, *do/while()*. Начнем с *for()*. Это выражение описывает инициализацию, условие, операцию после каждой итерации (**инкремент/декремент**) и тело цикла.

```
for (инициализация; условие; после каждой итерации)
{
    тело_цикла;
}
```

Примерно так же, генерируемый код и будет состоять из этих четырех частей. Возьмем пример:

```
#include <stdio.h>

void printing_function(int i)
{
    printf ("f(%d)\n", i);
};

int main()
{
    int i;

    for (i=2; i<10; i++)
        printing_function(i);

    return 0;
};
```

Имеем в итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.158: MSVC 2010

```
_i$ = -4
_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], 2    ; инициализация цикла
    jmp     SHORT $LN3@main
$LN2@main:
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp] ; то что мы делаем после каждой итерации:
add     eax, 1                  ; добавляем 1 к i
mov     DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN3@main:
cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 10  ; это условие проверяется перед каждой итерацией
jge     SHORT $LN1@main         ; если i больше или равно 10, заканчиваем цикл
mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp] ; тело цикла: вызов функции printing_function(i)
push    ecx
call    _printing_function
add     esp, 4
jmp     SHORT $LN2@main         ; переход на начало цикла
$LN1@main:                      ; конец цикла
xor     eax, eax
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
_main   ENDP
```

В принципе, ничего необычного.

GCC 4.4.1 выдает примерно такой же код, с небольшой разницей:

Листинг 1.159: GCC 4.4.1

```
main      proc near
var_20    = dword ptr -20h
var_4     = dword ptr -4

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        and     esp, 0FFFFFFF0h
        sub     esp, 20h
        mov     [esp+20h+var_4], 2 ; инициализация i
        jmp     short loc_8048476

loc_8048465:
        mov     eax, [esp+20h+var_4]
        mov     [esp+20h+var_20], eax
        call    printing_function
        add     [esp+20h+var_4], 1 ; инкремент i

loc_8048476:
        cmp     [esp+20h+var_4], 9
        jle     short loc_8048465 ; если i<=9, продолжаем цикл
        mov     eax, 0
        leave
        retn

main      endp
```

Интересно становится, если скомпилируем этот же код при помощи MSVC 2010 с включенной оптимизацией (/Ox):

Листинг 1.160: Оптимизирующий MSVC

```
_main     PROC
        push    esi
        mov     esi, 2
$LL3@main:
        push    esi
        call    _printing_function
        inc     esi
        add     esp, 4
        cmp     esi, 10 ; 0000000aH
        jl      SHORT $LL3@main
        xor     eax, eax
        pop     esi
        ret     0
_main     ENDP
```


1.16. ЦИКЛЫ

Здесь происходит следующее: переменную *i* компилятор не выделяет в локальном стеке, а выделяет целый регистр под нее: ESI. Это возможно для маленьких функций, где мало локальных переменных.

В принципе, всё то же самое, только теперь одна важная особенность: *f()* не должна менять значение ESI. Наш компилятор уверен в этом, а если бы и была необходимость использовать регистр ESI в функции *f()*, то её значение сохранялось бы в стеке. Примерно так же как и в нашем листинге: обратите внимание на `PUSH ESI/POP ESI` в начале и конце функции.

Попробуем GCC 4.4.1 с максимальной оптимизацией (-O3):

Листинг 1.161: Оптимизирующий GCC 4.4.1

```
main      proc near
var_10    = dword ptr -10h

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        and     esp, 0FFFFFFF0h
        sub     esp, 10h
        mov     [esp+10h+var_10], 2
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 3
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 4
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 5
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 6
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 7
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 8
        call    printing_function
        mov     [esp+10h+var_10], 9
        call    printing_function
        xor     eax, eax
        leave
        retn
main      endp
```

Однако GCC просто *развернул цикл*⁹⁸.

Делается это в тех случаях, когда итераций не слишком много (как в нашем примере) и можно немного сэкономить время, убрав все инструкции, обеспечивающие цикл. В качестве обратной стороны медали, размер кода увеличился.

Использовать большие развернутые циклы в наше время не рекомендуется, потому что большие функции требуют больше кэш-памяти⁹⁹.

Увеличим максимальное значение *i* в цикле до 100 и попробуем снова. GCC выдает:

Листинг 1.162: GCC

```
main      public main
          proc near
var_20    = dword ptr -20h

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        and     esp, 0FFFFFFF0h
        push    ebx
        mov     ebx, 2      ; i=2
        sub     esp, 1Ch

; выравнивание метки loc_80484D0 (начало тела цикла)
```

⁹⁸[loop unwinding](#) в англоязычной литературе

⁹⁹Очень хорошая статья об этом: [Ulrich Drepper, *What Every Programmer Should Know About Memory*, (2007)]¹⁰⁰. А также о рекомендациях о развернутых циклах от Intel можно прочитать здесь: [[Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual, (2014)]3.4.1.7].

1.16. ЦИКЛЫ

```
; по 16-байтной границе:
    por

loc_80484D0:
; передать i как первый аргумент для printing_function():
    mov     [esp+20h+var_20], ebx
    add     ebx, 1      ; i++
    call    printing_function
    cmp     ebx, 64h    ; i==100?
    jnz     short loc_80484D0 ; если нет, продолжать
    add     esp, 1Ch
    xor     eax, eax    ; возврат 0
    pop     ebx
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    retn
main      endp
```

Это уже похоже на то, что сделал MSVC 2010 в режиме оптимизации (/Ox). За исключением того, что под переменную *i* будет выделен регистр EBX.

GCC уверен, что этот регистр не будет модифицироваться внутри *f()*, а если вдруг это и придётся там сделать, то его значение будет сохранено в начале функции, прямо как в *main()*.

x86: OllyDbg

Скомпилируем наш пример в MSVC 2010 с /Ox и /Ob0 и загрузим в OllyDbg.

Оказывается, OllyDbg может обнаруживать простые циклы и показывать их в квадратных скобках, для удобства:

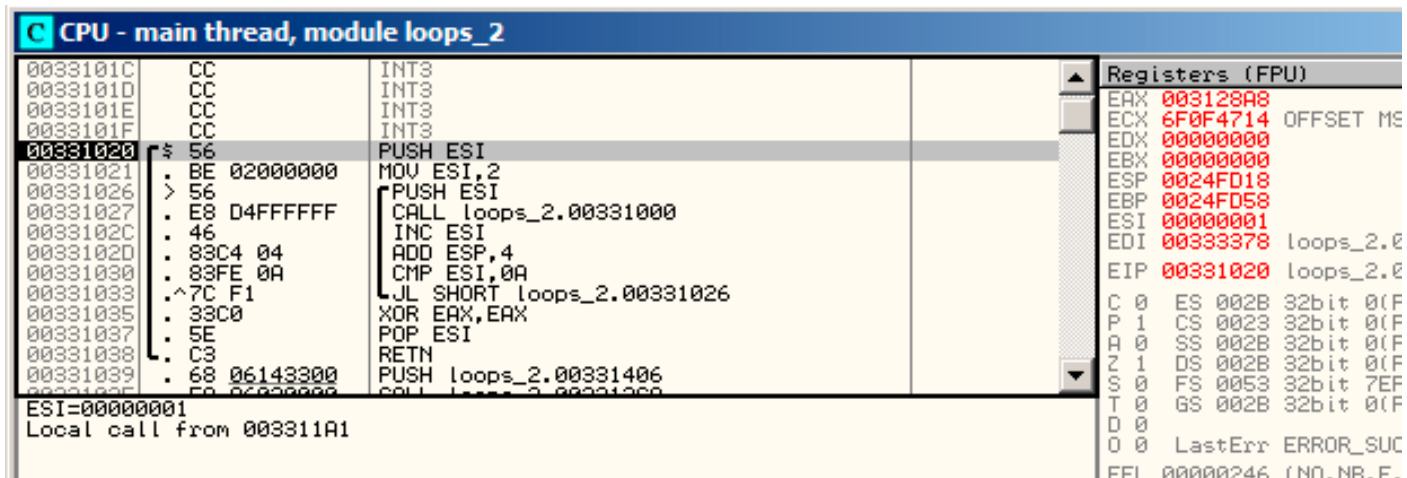


Рис. 1.46: OllyDbg: начало main()

Трассируя (F8 — сделать шаг, не входя в функцию) мы видим, как ESI увеличивается на 1.

Например, здесь $ESI = i = 6$:

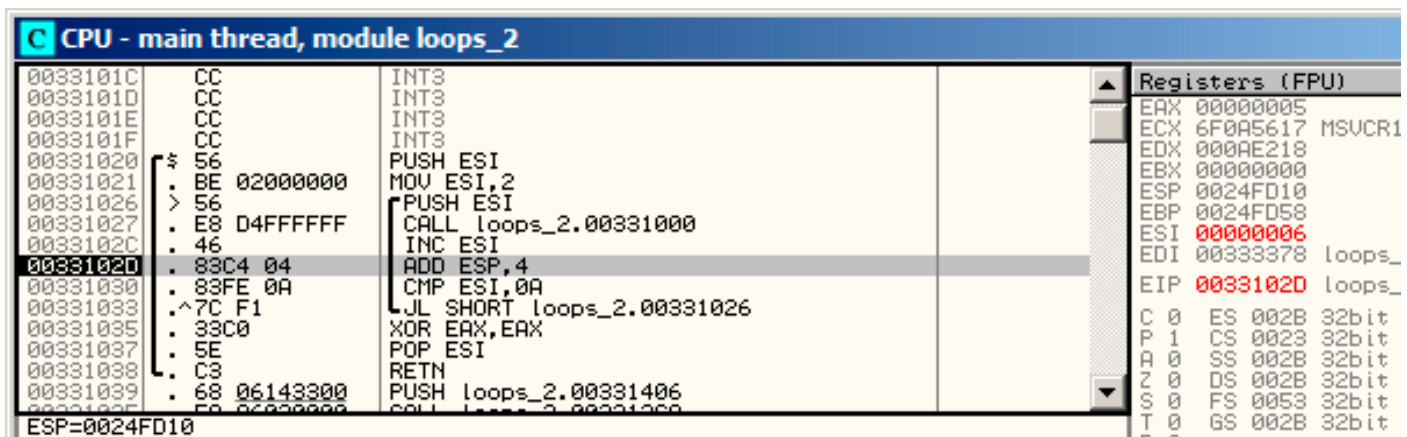


Рис. 1.47: OllyDbg: тело цикла только что отработало с $i = 6$

9 это последнее значение цикла. Поэтому JL после [инкремента](#) не срабатывает и функция заканчивается:

1.16. ЦИКЛЫ

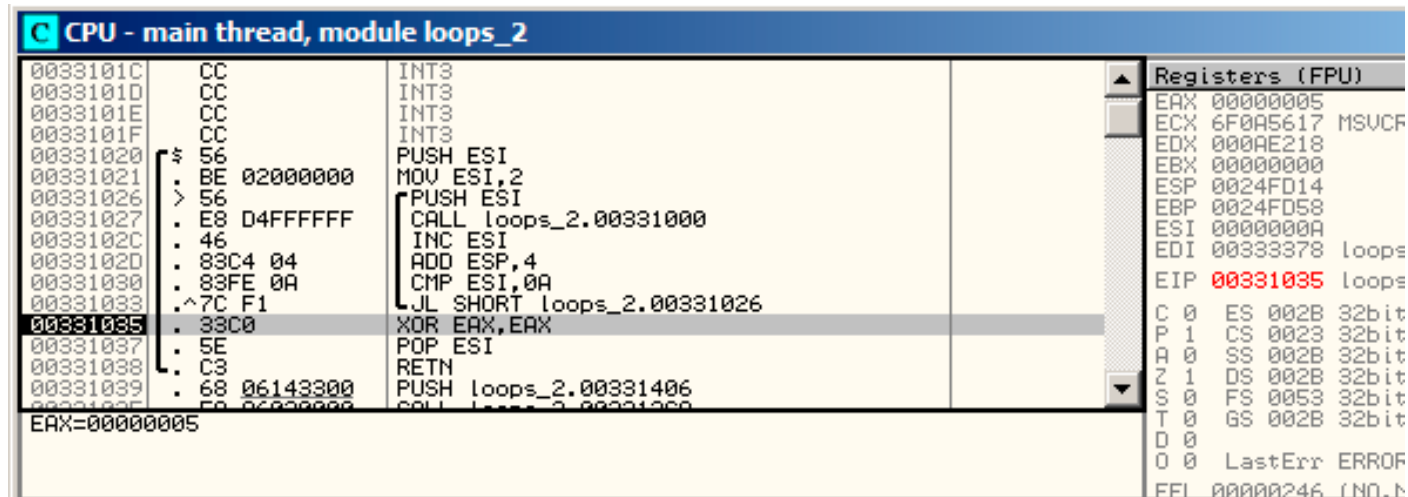


Рис. 1.48: OllyDbg: $ESI = 10$, конец цикла

x86: tracer

Как видно, трассировать вручную цикл в отладчике — это не очень удобно. Поэтому попробуем **tracer**. Открываем скомпилированный пример в **IDA**, находим там адрес инструкции **PUSH ESI** (передающей единственный аргумент в **f()**), а это **0x401026** в нашем случае и запускаем **tracer**:

```
tracer.exe -l:loops_2.exe bpx=loops_2.exe!0x00401026
```

Опция **BPX** просто ставит точку останова по адресу и затем **tracer** будет выдавать состояние регистров. В **tracer.log** после запуска я вижу следующее:

```
PID=12884|New process loops_2.exe
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00a328c8 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0f4714 EDX=0x00000000
ESI=0x00000002 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=PF ZF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000003 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000004 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000005 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000006 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000007 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000008 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
(0) loops_2.exe!0x401026
EAX=0x00000005 EBX=0x00000000 ECX=0x6f0a5617 EDX=0x000ee188
ESI=0x00000009 EDI=0x00333378 EBP=0x0024fbfc ESP=0x0024fbb8
EIP=0x00331026
FLAGS=CF PF AF SF IF
PID=12884|Process loops_2.exe exited. ExitCode=0 (0x0)
```

Видно, как значение ESI последовательно изменяется от 2 до 9. И даже более того, в [tracer](#) можно собирать значения регистров по всем адресам внутри функции.

Там это называется *trace*. Каждая инструкция трассируется, значения самых интересных регистров запоминаются. Затем генерируется .idc-скрипт для [IDA](#), который добавляет комментарии. Итак, в [IDA](#) я узнал что адрес `main()` это `0x00401020` и запускаю:

```
tracer.exe -l:loops_2.exe bpf=loops_2.exe!0x00401020,trace:cc
```

BPF означает установить точку останова на функции.

Получаю в итоге скрипты `loops_2.exe.idc` и `loops_2.exe_clear.idc`.

1.16. ЦИКЛЫ

Загружаю loops_2.exe.idc в IDA и увижу следующее:

```
.text:00401020
.text:00401020 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00401020
.text:00401020
.text:00401020 ; int __cdecl main(int argc, const char **argv, const char **envp)
.text:00401020 _main proc near ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+110↓p
.text:00401020
.text:00401020 argv = dword ptr 4
.text:00401020 argv = dword ptr 8
.text:00401020 envp = dword ptr 0Ch
.text:00401020
.text:00401020 push esi ; ESI=1
.text:00401021 mov esi, 2
.text:00401026
.text:00401026 loc_401026: ; CODE XREF: _main+13↓j
.text:00401026 push esi ; ESI=2..9
.text:00401027 call sub_401000 ; tracing nested maximum level (1) reached,
.text:0040102C inc esi ; ESI=2..9
.text:0040102D add esp, 4 ; ESP=0x38fcbc
.text:00401030 cmp esi, 0Ah ; ESI=3..0xa
.text:00401033 jl short loc_401026 ; SF=false,true OF=false
.text:00401035 xor eax, eax
.text:00401037 pop esi
.text:00401038 retn ; EAX=0
.text:00401038 _main endp
```

Рис. 1.49: IDA с загруженным .idc-скриптом

Видно, что ESI меняется от 2 до 9 в начале тела цикла, но после **инкремента** он в пределах [3..0xA]. Видно также, что функция main() заканчивается с 0 в EAX.

tracer также генерирует loops_2.exe.txt, содержащий адреса инструкций, сколько раз была исполнена каждая и значения регистров:

Листинг 1.163: loops_2.exe.txt

```
0x401020 (.text+0x20), e= 1 [PUSH ESI] ESI=1
0x401021 (.text+0x21), e= 1 [MOV ESI, 2]
0x401026 (.text+0x26), e= 8 [PUSH ESI] ESI=2..9
0x401027 (.text+0x27), e= 8 [CALL 8D1000h] tracing nested maximum level (1) reached, ↗
↳ skipping this CALL 8D1000h=0x8d1000
0x40102c (.text+0x2c), e= 8 [INC ESI] ESI=2..9
0x40102d (.text+0x2d), e= 8 [ADD ESP, 4] ESP=0x38fcbc
0x401030 (.text+0x30), e= 8 [CMP ESI, 0Ah] ESI=3..0xa
0x401033 (.text+0x33), e= 8 [JL 8D1026h] SF=false,true OF=false
0x401035 (.text+0x35), e= 1 [XOR EAX, EAX]
0x401037 (.text+0x37), e= 1 [POP ESI]
0x401038 (.text+0x38), e= 1 [RETN] EAX=0
```

Так можно использовать **grep**.

ARM

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
main
    STMFD    SP!, {R4,LR}
    MOV     R4, #2
    B       loc_368
loc_35C    ; CODE XREF: main+1C
    MOV     R0, R4
    BL      printing_function
    ADD     R4, R4, #1
loc_368    ; CODE XREF: main+8
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
CMP    R4, #0xA
BLT    loc_35C
MOV    R0, #0
LDMFD  SP!, {R4,PC}
```

Счетчик итераций i будет храниться в регистре R4. Инструкция MOV R4, #2 просто инициализирует i . Инструкции MOV R0, R4 и BL printing_function составляют тело цикла. Первая инструкция готовит аргумент для функции, f() а вторая вызывает её. Инструкция ADD R4, R4, #1 прибавляет единицу к i при каждой итерации. CMP R4, #0xA сравнивает i с 0xA (10). Следующая за ней инструкция BLT (*Branch Less Than*) совершит переход, если i меньше чем 10. В противном случае в R0 запишется 0 (потому что наша функция возвращает 0) и произойдет выход из функции.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
_main
    PUSH    {R4,LR}
    MOVS    R4, #2

loc_132
    ; CODE XREF: _main+E
    MOVS    R0, R4
    BL      printing_function
    ADDS    R4, R4, #1
    CMP     R4, #0xA
    BLT     loc_132
    MOVS    R0, #0
    POP     {R4,PC}
```

Практически всё то же самое.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```
_main
    PUSH    {R4,R7,LR}
    MOVW    R4, #0x1124 ; "%d\n"
    MOVS    R1, #2
    MOVT.W  R4, #0
    ADD     R7, SP, #4
    ADD     R4, PC
    MOV     R0, R4
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #3
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #4
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #5
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #6
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #7
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #8
    BLX     _printf
    MOV     R0, R4
    MOVS    R1, #9
    BLX     _printf
    MOVS    R0, #0
    POP     {R4,R7,PC}
```

На самом деле, в моей функции f() было такое:

1.16. ЦИКЛЫ

```
void printing_function(int i)
{
    printf ("%d\n", i);
};
```

Так что LLVM не только *развернул* цикл, но также и представил мою очень простую функцию `f()` как *inline-функцию*, и вставил её тело вместо цикла 8 раз. Это возможно, когда функция очень простая (как та что у меня) и когда она вызывается не очень много раз, как здесь.

ARM64: Оптимизирующий GCC 4.9.1

Листинг 1.164: Оптимизирующий GCC 4.9.1

```
printing_function:
; подготовить второй аргумент printf():
    mov     w1, w0
; загрузить адрес строки "f(%d)\n"
    adrp    x0, .LC0
    add     x0, x0, :lo12:LC0
; здесь просто переход вместо перехода с сохранением адреса и инструкции возврата:
    b       printf
main:
; сохранить FP и LR в локальном стеке:
    stp     x29, x30, [sp, -32]!
; установить стековый фрейм:
    add     x29, sp, 0
; сохранить содержимое регистра X19 в локальном стеке:
    str     x19, [sp, 16]
; будем использовать регистр W19 как счетчик.
; установить начальное значение в 2:
    mov     w19, 2
.L3:
; подготовить первый аргумент printing_function():
    mov     w0, w19
; инкремент регистра счетчика.
    add     w19, w19, 1
; W0 все еще содержит значение счетчика перед инкрементом.
    bl     printing_function
; конец?
    cmp     w19, 10
; нет, перейти на начало тела цикла:
    bne     .L3
; возврат 0
    mov     w0, 0
; восстановить содержимое регистра X19:
    ldr     x19, [sp, 16]
; восстановить значения FP и LR:
    ldp     x29, x30, [sp], 32
    ret
.LC0:
    .string "f(%d)\n"
```

ARM64: Неоптимизирующий GCC 4.9.1

Листинг 1.165: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 -fno-inline

```
printing_function:
; подготовить второй аргумент printf():
    mov     w1, w0
; загрузить адрес строки "f(%d)\n"
    adrp    x0, .LC0
    add     x0, x0, :lo12:LC0
; здесь просто переход вместо перехода с сохранением адреса и инструкции возврата:
    b       printf
main:
```


1.16. ЦИКЛЫ

```
; сохранить FP и LR в локальном стеке:
    str    x29, x30, [sp, -32]!
; установить стековый фрейм:
    add    x29, sp, 0
; сохранить содержимое регистра X19 в локальном стеке:
    str    x19, [sp,16]
; будем использовать регистр W19 как счетчик.
; установить начальное значение в 2:
    mov    w19, 2
.L3:
; подготовить первый аргумент printing_function():
    mov    w0, w19
; инкремент регистра счетчика.
    add    w19, w19, 1
; W0 все еще содержит значение счетчика перед инкрементом.
    bl     printing_function
; конец?
    cmp    w19, 10
; нет, перейти на начало тела цикла:
    bne    .L3
; возврат 0
    mov    w0, 0
; восстановить содержимое регистра X19:
    ldr    x19, [sp,16]
; восстановить значения FP и LR:
    ldp    x29, x30, [sp], 32
    ret
.LC0:
    .string "f(%d)\n"
```

MIPS

Листинг 1.166: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
main:

; IDA не знает названия переменных в локальном стеке
; Это мы назвали их вручную:
i      = -0x10
saved_FP = -8
saved_RA = -4

; пролог функции:
    addiu   $sp, -0x28
    sw      $ra, 0x28+saved_RA($sp)
    sw      $fp, 0x28+saved_FP($sp)
    move    $fp, $sp
; инициализировать счетчик значением 2 и сохранить это значение в локальном стеке
    li      $v0, 2
    sw      $v0, 0x28+i($fp)
; псевдоинструкция. здесь на самом деле "BEQ $ZERO, $ZERO, loc_9C":
    b       loc_9C
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP

loc_80:                                # CODE XREF: main+48
; загрузить значение счетчика из локального стека и вызвать printing_function():
    lw      $a0, 0x28+i($fp)
    jal     printing_function
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; загрузить счетчик, инкрементировать его и записать назад:
    lw      $v0, 0x28+i($fp)
    or      $at, $zero ; NOP
    addiu   $v0, 1
    sw      $v0, 0x28+i($fp)

loc_9C:                                # CODE XREF: main+18
; проверить счетчик, он больше 10?
    lw      $v0, 0x28+i($fp)
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
        or      $at, $zero ; NOP
        slti    $v0, 0xA
; если он меньше 10, перейти на loc_80 (начало тела цикла):
        bnez    $v0, loc_80
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; заканчиваем, возвращаем 0:
        move    $v0, $zero
; эпилог функции:
        move    $sp, $fp
        lw      $ra, 0x28+saved_RA($sp)
        lw      $fp, 0x28+saved_FP($sp)
        addiu   $sp, 0x28
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

Новая для нас инструкция это B. Вернее, это псевдоинструкция (BEQ).

Ещё кое-что

По генерируемому коду мы видим следующее: после инициализации *i*, тело цикла не исполняется. В начале проверяется условие *i*, а лишь затем исполняется тело цикла. И это правильно, потому что если условие в самом начале не истинно, тело цикла исполнять нельзя.

Так может быть, например, в таком случае:

```
for (i=0; i<количество_элементов_для_обработки; i++)
    тело_цикла;
```

Если *количество_элементов_для_обработки* равно 0, тело цикла не должно исполниться ни разу. Поэтому проверка условия происходит перед тем как исполнить само тело.

Впрочем, оптимизирующий компилятор может переставить проверку условия и тело цикла местами, если он уверен, что описанная здесь ситуация невозможна, как в случае с нашим простейшим примером и с применением компиляторов Keil, Xcode (LLVM), MSVC и GCC в режиме оптимизации.

1.16.2. Функция копирования блоков памяти

Настоящие функции копирования памяти могут копировать по 4 или 8 байт на каждой итерации, использовать SIMD¹⁰¹, векторизацию, итд.

Но ради простоты, этот пример настолько прост, насколько это возможно.

```
#include <stdio.h>

void my_memcpy (unsigned char* dst, unsigned char* src, size_t cnt)
{
    size_t i;
    for (i=0; i<cnt; i++)
        dst[i]=src[i];
};
```

Простейшая реализация

Листинг 1.167: GCC 4.9 x64 оптимизация по размеру (-Os)

```
my_memcpy:
; RDI = целевой адрес
; RSI = исходный адрес
; RDX = размер блока

; инициализировать счетчик (i) в 0
xor     eax, eax
.L2:
```

¹⁰¹Single Instruction, Multiple Data

1.16. ЦИКЛЫ

```
; все байты скопированы? тогда заканчиваем:
    cmp     rax, rdx
    je      .L5
; загружаем байт по адресу RSI+i:
    mov     cl, BYTE PTR [rsi+rax]
; записываем байт по адресу RDI+i:
    mov     BYTE PTR [rdi+rax], cl
    inc     rax ; i++
    jmp     .L2
.L5:
    ret
```

Листинг 1.168: GCC 4.9 ARM64 оптимизация по размеру (-Os)

```
my_метсру:
; X0 = целевой адрес
; X1 = исходный адрес
; X2 = размер блока

; инициализировать счетчик (i) в 0
    mov     x3, 0
.L2:
; все байты скопированы? тогда заканчиваем:
    cmp     x3, x2
    beq     .L5
; загружаем байт по адресу X1+i:
    ldrb     w4, [x1,x3]
; записываем байт по адресу X0+i:
    strb     w4, [x0,x3]
    add     x3, x3, 1 ; i++
    b       .L2
.L5:
    ret
```

Листинг 1.169: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
my_метсру PROC
; R0 = целевой адрес
; R1 = исходный адрес
; R2 = размер блока

    PUSH    {r4,lr}
; инициализировать счетчик (i) в 0
    MOVS    r3,#0
; условие проверяется в конце ф-ции, так что переходим туда:
    B       |L0.12|
|L0.6|
; загружаем байт по адресу R1+i:
    LDRB     r4,[r1,r3]
; записываем байт по адресу R0+i:
    STRB     r4,[r0,r3]
; i++
    ADDS     r3,r3,#1
|L0.12|
; i<size?
    CMP      r3,r2
; перейти на начало цикла, если это так:
    BCC      |L0.6|
    POP      {r4,pc}
    ENDP
```

ARM в режиме ARM

Keil в режиме ARM пользуется условными суффиксами:

Листинг 1.170: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
my_метсру PROC
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
; R0 = целевой адрес
; R1 = исходный адрес
; R2 = размер блока

; инициализировать счетчик (i) в 0
    MOV     r3,#0
|L0.4|
; все байты скопированы?
    CMP     r3,r2
; следующий блок исполнится только в случае условия меньше чем,
; т.е., если R2<R3 или i<size.
; загружаем байт по адресу R1+i:
    LDRBCC  r12,[r1,r3]
; записываем байт по адресу R0+i:
    STRBCC  r12,[r0,r3]
; i++
    ADDCC   r3,r3,#1
; последняя инструкция условного блока.
; перейти на начало цикла, если i<size
; в противном случае, ничего не делать (т.е. если i>=size)
    BCC     |L0.4|
; возврат
    BX      lr
    ENDP
```

Вот почему здесь только одна инструкция перехода вместо двух.

MIPS

Листинг 1.171: GCC 4.4.5 оптимизация по размеру (-Os) (IDA)

```
my_мемсру:
; перейти на ту часть цикла, где проверяется условие:
    b       loc_14
; инициализировать счетчик (i) в 0
; он будет всегда находится в регистре $v0:
    move    $v0,$zero ; branch delay slot

loc_8:                                # CODE XREF: my_мемсру+1C
; загрузить байт как беззнаковый по адресу $t0 в $v1:
    lbu     $v1, 0($t0)
; инкремент счетчика (i):
    addiu   $v0, 1
; записываем байт по адресу $a3
    sb      $v1, 0($a3)

loc_14:                                # CODE XREF: my_мемсру
; проверить, до сих пор ли счетчик (i) в $v0 меньше чем третий аргумент ("cnt" в $a2)
    sltu    $v1, $v0, $a2
; сформировать адрес байта исходного блока:
    addu    $t0, $a1, $v0
; $t0 = $a1+$v0 = src+i
; перейти на тело цикла, если счетчик всё еще меньше чем "cnt":
    bnez    $v1, loc_8
; сформировать адрес байта в целевом блоке ($a3 = $a0+$v0 = dst+i):
    addu    $a3, $a0, $v0 ; branch delay slot
; закончить, если BNEZ не сработала
    jr      $ra
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

Здесь две новых для нас инструкций: LBU («Load Byte Unsigned») и SB («Store Byte»). Так же как и в ARM, все регистры в MIPS имеют длину в 32 бита. Здесь нет частей регистров равных байту, как в x86.

Так что когда нужно работать с байтами, приходится выделять целый 32-битный регистр для этого.

LBU загружает байт и сбрасывает все остальные биты («Unsigned»).

1.16. ЦИКЛЫ

И напротив, инструкция LB («Load Byte») расширяет байт до 32-битного значения учитывая знак. SB просто записывает байт из младших 8 бит регистра в память.

Векторизация

Оптимизирующий GCC может из этого примера сделать намного больше: [1.28.1](#) (стр. 403).

1.16.3. Проверка условия

Важно помнить, что в конструкции *for()*, проверка условия происходит не в конце, а в начале, перед исполнением тела цикла. Но нередко компилятору удобнее проверять условие в конце, после тела. Иногда может добавляться еще одна проверка в начале.

Например:

```
#include <stdio.h>

void f(int start, int finish)
{
    for (; start<finish; start++)
        printf ("%d\n", start);
};
```

Оптимизирующий GCC 5.4.0 x64:

```
f:
; check condition (1):
    cmp     edi, esi
    jge     .L9
    push    rbp
    push    rbx
    mov     ebp, esi
    mov     ebx, edi
    sub     rsp, 8
.L5:
    mov     edx, ebx
    xor     eax, eax
    mov     esi, OFFSET FLAT:.LC0 ; '%d\n'
    mov     edi, 1
    add     ebx, 1
    call    __printf_chk
; check condition (2):
    cmp     ebp, ebx
    jne     .L5
    add     rsp, 8
    pop     rbx
    pop     rbp
.L9:
    rep ret
```

Видим две проверки.

Hex-Rays (по крайней мере версии 2.2.0) декомпилирует это так:

```
void __cdecl f(unsigned int start, unsigned int finish)
{
    unsigned int v2; // ebx@2
    __int64 v3; // rdx@3

    if ( (signed int)start < (signed int)finish )
    {
        v2 = start;
        do
        {
            v3 = v2++;
            _printf_chk(1LL, "%d\n", v3);
        }
    }
```

1.16. ЦИКЛЫ

```
while ( finish != v2 );  
}  
}
```

В данном случае, *do/while()* можно смело заменять на *for()*, а первую проверку убрать.

1.16.4. Вывод

Примерный скелет цикла от 2 до 9 включительно:

Листинг 1.172: x86

```
mov [counter], 2 ; инициализация  
jmp check  
body:  
; тело цикла  
; делаем тут что-нибудь  
; используем переменную счетчика в локальном стеке  
add [counter], 1 ; инкремент  
check:  
cmp [counter], 9  
jle body
```

Операция инкремента может быть представлена как 3 инструкции в неоптимизированном коде:

Листинг 1.173: x86

```
MOV [counter], 2 ; инициализация  
JMP check  
body:  
; тело цикла  
; делаем тут что-нибудь  
; используем переменную счетчика в локальном стеке  
MOV REG, [counter] ; инкремент  
INC REG  
MOV [counter], REG  
check:  
CMP [counter], 9  
JLE body
```

Если тело цикла короткое, под переменную счетчика можно выделить целый регистр:

Листинг 1.174: x86

```
MOV EBX, 2 ; инициализация  
JMP check  
body:  
; тело цикла  
; делаем тут что-нибудь  
; используем переменную счетчика в EBX, но не изменяем её!  
INC EBX ; инкремент  
check:  
CMP EBX, 9  
JLE body
```

Некоторые части цикла могут быть сгенерированы компилятором в другом порядке:

Листинг 1.175: x86

```
MOV [counter], 2 ; инициализация  
JMP label_check  
label_increment:  
ADD [counter], 1 ; инкремент  
label_check:  
CMP [counter], 10  
JGE exit  
; тело цикла  
; делаем тут что-нибудь  
; используем переменную счетчика в локальном стеке
```

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

```
JMP label_increment
exit:
```

Обычно условие проверяется *перед* телом цикла, но компилятор может перестроить цикл так, что условие проверяется *после* тела цикла.

Это происходит тогда, когда компилятор уверен, что условие всегда будет *истинно* на первой итерации, так что тело цикла исполнится как минимум один раз:

Листинг 1.176: x86

```
MOV REG, 2 ; инициализация
body:
; тело цикла
; делаем тут что-нибудь
; используем переменную счетчика в REG, но не изменяем её!
INC REG ; инкремент
CMP REG, 10
JL body
```

Используя инструкцию L00P. Это редкость, компиляторы не используют её. Так что если вы её видите, это верный знак, что этот фрагмент кода написан вручную:

Листинг 1.177: x86

```
; считать от 10 до 1
MOV ECX, 10
body:
; тело цикла
; делаем тут что-нибудь
; используем переменную счетчика в ECX, но не изменяем её!
L00P body
```

ARM. В этом примере регистр R4 выделен для переменной счетчика:

Листинг 1.178: ARM

```
MOV R4, 2 ; инициализация
B check
body:
; тело цикла
; делаем тут что-нибудь
; используем переменную счетчика в R4, но не изменяем её!
ADD R4,R4, #1 ; инкремент
check:
CMP R4, #10
BLT body
```

1.16.5. Упражнения

- <http://challenges.re/54>
- <http://challenges.re/55>
- <http://challenges.re/56>
- <http://challenges.re/57>

1.17. Еще кое-что о строках

1.17.1. strlen()

Ещё немного о циклах. Часто функция `strlen()` ¹⁰² реализуется при помощи `while()`. Например, вот как это сделано в стандартных библиотеках MSVC:

¹⁰²подсчет длины строки в Си

```

int my_strlen (const char * str)
{
    const char *eos = str;

    while( *eos++ ) ;

    return( eos - str - 1 );
}

int main()
{
    // test
    return my_strlen("hello!");
};

```

x86**Неоптимизирующий MSVC**

Итак, компилируем:

```

_eos$ = -4 ; size = 4
_str$ = 8 ; size = 4
_strlen PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    mov     eax, DWORD PTR _str$[ebp] ; взять указатель на символ из "str"
    mov     DWORD PTR _eos$[ebp], eax ; и переложить его в нашу локальную переменную "eos"
$LN2@strlen_:
    mov     ecx, DWORD PTR _eos$[ebp] ; ECX=eos

    ; взять байт, на который указывает ECX и положить его в EDX расширяя до 32-х бит, учитывая ↗
    ; ↘ знак

    movsx   edx, BYTE PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR _eos$[ebp] ; EAX=eos
    add     eax, 1 ; инкремент EAX
    mov     DWORD PTR _eos$[ebp], eax ; положить eax назад в "eos"
    test    edx, edx ; EDX ноль?
    je      SHORT $LN1@strlen_ ; да, то что лежит в EDX это ноль, выйти из цикла
    jmp     SHORT $LN2@strlen_ ; продолжаем цикл
$LN1@strlen_:

    ; здесь мы вычисляем разницу двух указателей

    mov     eax, DWORD PTR _eos$[ebp]
    sub     eax, DWORD PTR _str$[ebp]
    sub     eax, 1 ; отнимаем от разницы еще единицу и возвращаем результат
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_strlen_ ENDP

```

Здесь две новых инструкции: MOVSBX и TEST.

О первой. MOVSBX предназначена для того, чтобы взять байт из какого-либо места в памяти и положить его, в нашем случае, в регистр EDX. Но регистр EDX — 32-битный. MOVSBX означает *MOV with Sign-Extend*. Оставшиеся биты с 8-го по 31-й MOVSBX сделает единицей, если исходный байт в памяти имеет знак *минус*, или заполнит нулями, если знак *плюс*.

И вот зачем всё это.

По умолчанию в MSVC и GCC тип *char* — знаковый. Если у нас есть две переменные, одна *char*, а другая *int* (*int* тоже знаковый), и если в первой переменной лежит -2 (что кодируется как 0xFE) и мы просто переложим это в *int*, то там будет 0x000000FE, а это, с точки зрения *int*, даже знакового, будет 254, но никак не -2. -2 в переменной *int* кодируется как 0xFFFFFFFF. Для того чтобы значение

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

0xFE из переменной типа *char* переложить в знаковый *int* с сохранением всего, нужно узнать его знак и затем заполнить остальные биты. Это делает MOVXSX.

См. также об этом раздел «Представление знака в числах» (2.2 (стр. 444)).

Хотя конкретно здесь компилятору вряд ли была особая надобность хранить значение *char* в регистре EDX, а не его восьмибитной части, скажем DL. Но получилось, как получилось. Должно быть [register allocator](#) компилятора сработал именно так.

Позже выполняется TEST EDX, EDX. Об инструкции TEST читайте в разделе о битовых полях (1.22 (стр. 295)). Конкретно здесь эта инструкция просто проверяет состояние регистра EDX на 0.

Неоптимизирующий GCC

Попробуем GCC 4.4.1:

```
strlen      public strlen
            proc near

eos         = dword ptr -4
arg_0       = dword ptr  8

            push    ebp
            mov     ebp, esp
            sub     esp, 10h
            mov     eax, [ebp+arg_0]
            mov     [ebp+eos], eax

loc_80483F0:
            mov     eax, [ebp+eos]
            movzx   eax, byte ptr [eax]
            test    al, al
            setnz   al
            add     [ebp+eos], 1
            test    al, al
            jnz     short loc_80483F0
            mov     edx, [ebp+eos]
            mov     eax, [ebp+arg_0]
            mov     ecx, edx
            sub     ecx, eax
            mov     eax, ecx
            sub     eax, 1
            leave
            retn

strlen      endp
```

Результат очень похож на MSVC, только здесь используется MOVZX, а не MOVXSX. MOVZX означает *MOV with Zero-Extend*. Эта инструкция перекладывает какое-либо значение в регистр и остальные биты выставляет в 0. Фактически, преимущество этой инструкции только в том, что она позволяет заменить две инструкции сразу:
xor eax, eax / mov al, [...].

С другой стороны, нам очевидно, что здесь можно было бы написать вот так:
mov al, byte ptr [eax] / test al, al — это тоже самое, хотя старшие биты EAX будут «замусорены». Но будем считать, что это погрешность компилятора — он не смог сделать код более экономным или более понятным. Строго говоря, компилятор вообще не нацелен на то, чтобы генерировать понятный (для человека) код.

Следующая новая инструкция для нас — SETNZ. В данном случае, если в AL был не ноль, то test al, al выставит флаг ZF в 0, а SETNZ, если ZF==0 (NZ значит *not zero*) выставит 1 в AL. Смысл этой процедуры в том, что *если AL не ноль, выполнить переход на loc_80483F0*. Компилятор выдал немного избыточный код, но не будем забывать, что оптимизация выключена.

Оптимизирующий MSVC

Теперь скомпилируем всё то же самое в MSVC 2012, но с включенной оптимизацией (/Ox):

```
_str$ = 8 ; size = 4
_strlen PROC
    mov     edx, DWORD PTR _str$[esp-4] ; EDX -> указатель на строку
    mov     eax, edx ; переложить в EAX
$LL2@strlen:
    mov     cl, BYTE PTR [eax] ; CL = *EAX
    inc     eax ; EAX++
    test    cl, cl ; CL==0?
    jne     SHORT $LL2@strlen ; нет, продолжаем цикл
    sub     eax, edx ; вычисляем разницу указателей
    dec     eax ; декремент EAX
    ret     0
_strlen ENDP
```

Здесь всё попроще стало. Но следует отметить, что компилятор обычно может так хорошо использовать регистры только на небольших функциях с небольшим количеством локальных переменных.

INC/DEC— это инструкции [инкремента-декремента](#). Попросту говоря — увеличить на единицу или уменьшить.

Можем попробовать этот (соптимизированный) пример в OllyDbg. Вот самая первая итерация:

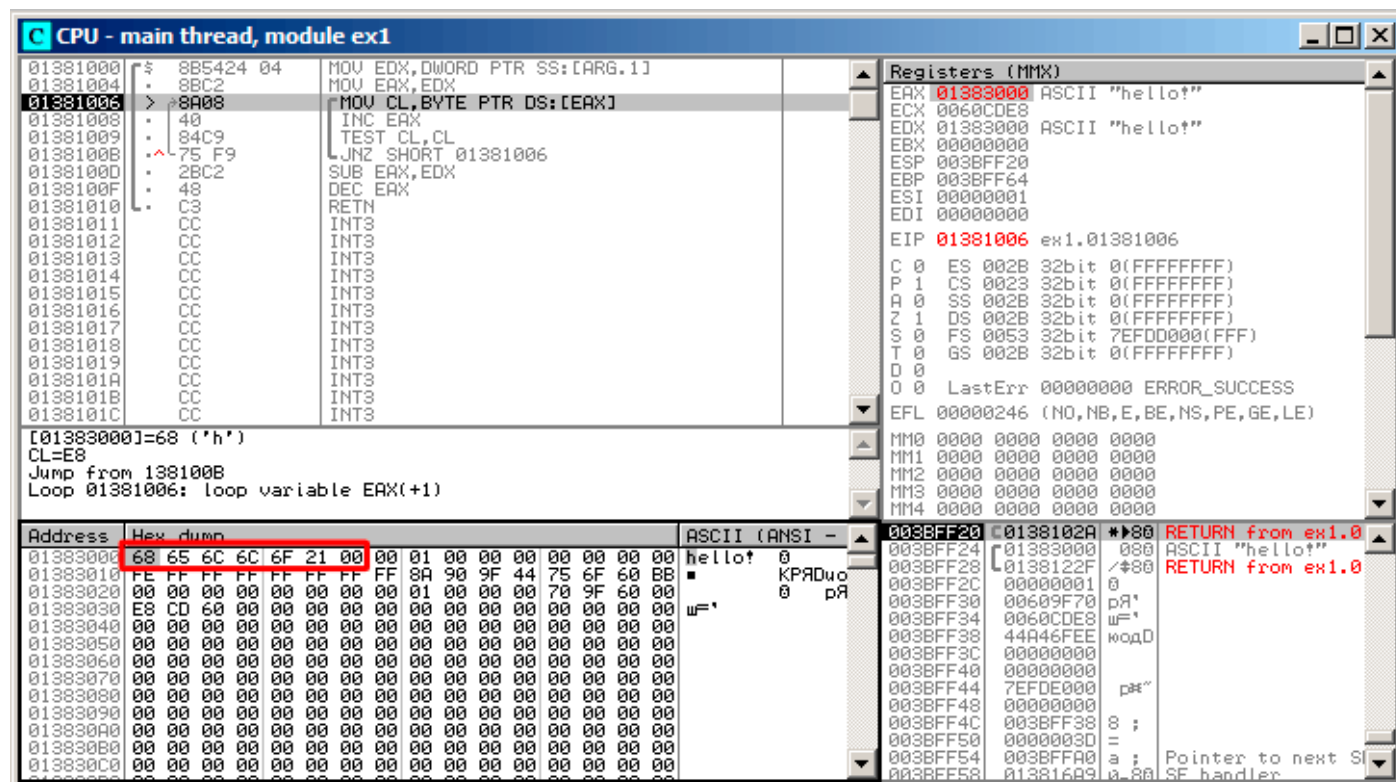


Рис. 1.50: OllyDbg: начало первой итерации

Видно, что OllyDbg обнаружил цикл и, для удобства, свернул инструкции тела цикла в скобке.

Нажав правой кнопкой на EAX, можно выбрать «Follow in Dump» и позиция в окне памяти будет как раз там, где надо.

Здесь мы видим в памяти строку «hello!». После неё имеется как минимум 1 нулевой байт, затем случайный мусор. Если OllyDbg видит, что в регистре содержится адрес какой-то строки, он показывает эту строку.

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

Нажмем F8 (сделать шаг, не входя в функцию) столько раз, чтобы текущий адрес снова был в начале тела цикла:

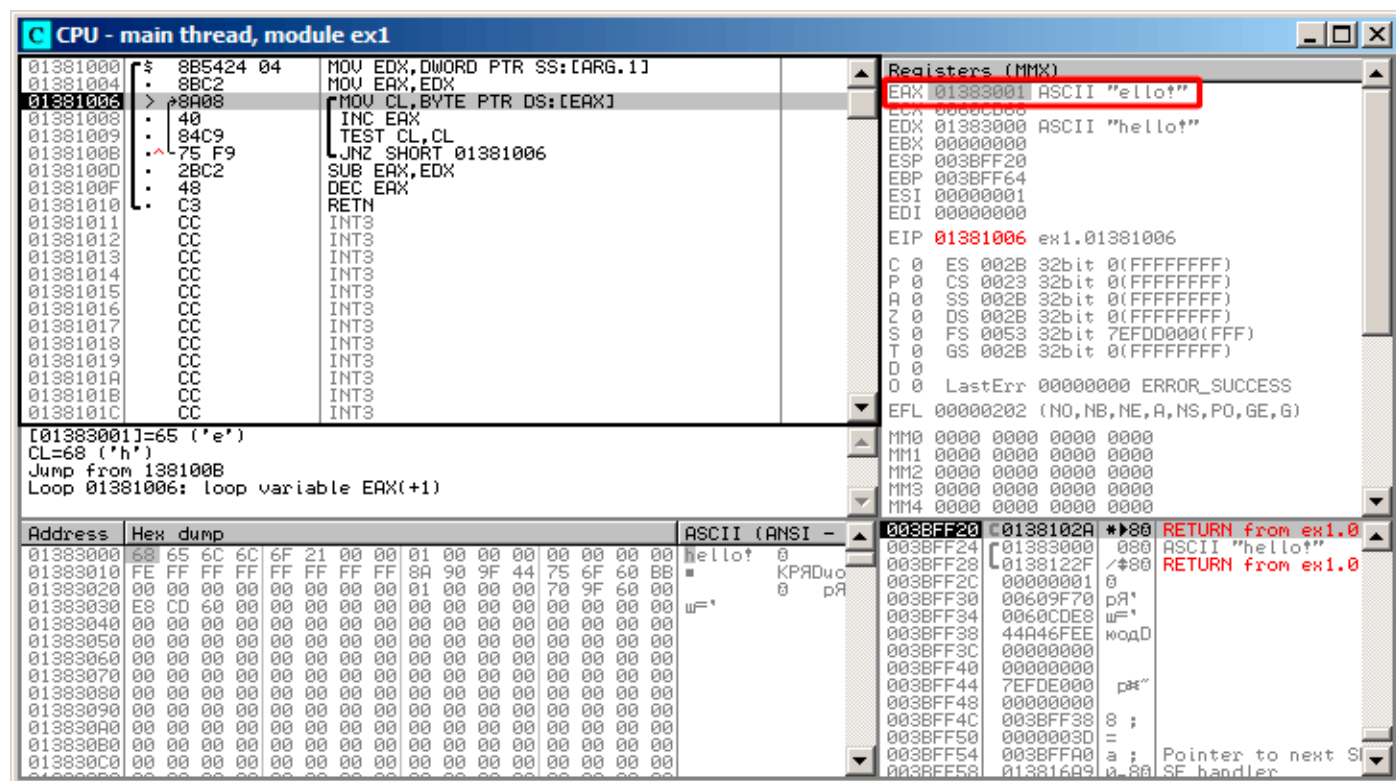


Рис. 1.51: OllyDbg: начало второй итерации

Видно, что EAX уже содержит адрес второго символа в строке.

Будем нажимать F8 достаточное количество раз, чтобы выйти из цикла:



A EDX так и не менялся — он всё ещё указывает на начало строки. Здесь сейчас будет вычисляться разница между этими двумя адресами.

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

Инструкция SUB исполнилась:

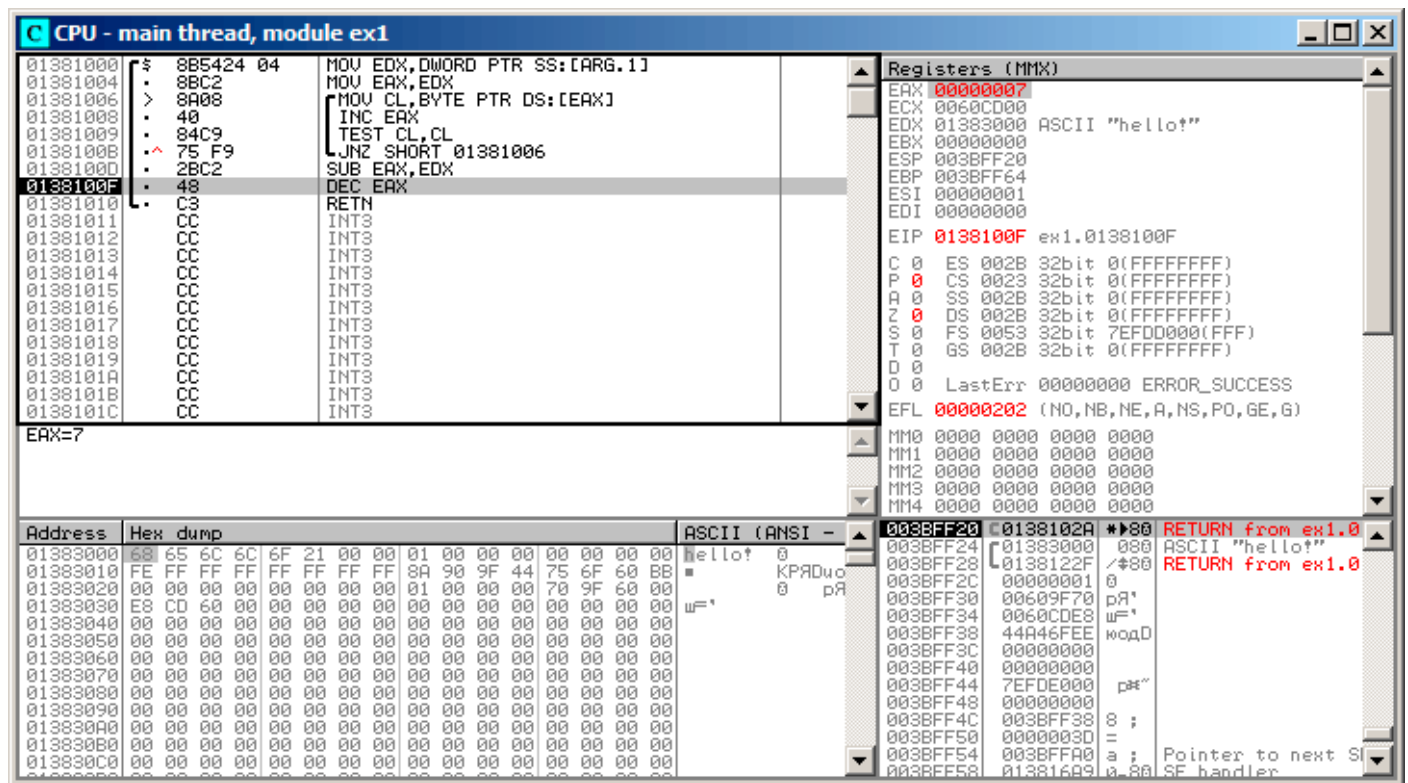


Рис. 1.53: OllyDbg: сейчас будет декремент EAX

Разница указателей сейчас в регистре EAX — 7.

Действительно, длина строки «hello!» — 6, но вместе с нулевым байтом — 7. Но `strlen()` должна возвращать количество ненулевых символов в строке. Так что сейчас будет исполняться декремент и выход из функции.

Оптимизирующий GCC

Попробуем GCC 4.4.1 с включенной оптимизацией (ключ -O3):

```
public strlen
proc near
    arg_0 = dword ptr 8

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     ecx, [ebp+arg_0]
    mov     eax, ecx

loc_8048418:
    movzx   edx, byte ptr [eax]
    add     eax, 1
    test    dl, dl
    jnz     short loc_8048418
    not     ecx
    add     eax, ecx
    pop     ebp
    retn

strlen
endp
```

Здесь GCC не очень отстает от MSVC за исключением наличия MOVZX.

Впрочем, MOVZX здесь явно можно заменить на `mov dl, byte ptr [eax]`.

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

Но возможно, компилятору GCC просто проще помнить, что у него под переменную типа *char* отведен целый 32-битный регистр EDX и быть уверенным в том, что старшие биты регистра не будут замусорены.

Далее мы видим новую для нас инструкцию NOT. Эта инструкция инвертирует все биты в операнде. Можно сказать, что здесь это синонимично инструкции XOR ECX, 0xffffffffh. NOT и следующая за ней инструкция ADD вычисляют разницу указателей и отнимают от результата единицу. Только происходит это слегка по-другому. Сначала ECX, где хранится указатель на *str*, инвертируется и от него отнимается единица. См. также раздел: «Представление знака в числах» (2.2 (стр. 444)).

Иными словами, в конце функции, после цикла, происходит примерно следующее:

```
ecx=str;
eax=eos;
ecx=(-ecx)-1;
eax=eax+ecx
return eax
```

... что эквивалентно:

```
ecx=str;
eax=eos;
eax=eax-ecx;
eax=eax-1;
return eax
```

Но почему GCC решил, что так будет лучше? Трудно угадать. Но наверное, оба эти варианта работают примерно одинаково в плане эффективности и скорости.

ARM

32-битный ARM

Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Листинг 1.180: Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```
_strlen
eos  = -8
str  = -4

    SUB    SP, SP, #8 ; выделить 8 байт для локальных переменных
    STR    R0, [SP,#8+str]
    LDR    R0, [SP,#8+str]
    STR    R0, [SP,#8+eos]

loc_2CB8 ; CODE XREF: _strlen+28
    LDR    R0, [SP,#8+eos]
    ADD    R1, R0, #1
    STR    R1, [SP,#8+eos]
    LDRSB  R0, [R0]
    CMP    R0, #0
    BEQ    loc_2CD4
    B      loc_2CB8
loc_2CD4 ; CODE XREF: _strlen+24
    LDR    R0, [SP,#8+eos]
    LDR    R1, [SP,#8+str]
    SUB    R0, R0, R1 ; R0=eos-str
    SUB    R0, R0, #1 ; R0=R0-1
    ADD    SP, SP, #8 ; освободить выделенные 8 байт
    BX     LR
```

Неоптимизирующий LLVM генерирует слишком много кода. Зато на этом примере можно посмотреть, как функции работают с локальными переменными в стеке.

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

В нашей функции только локальных переменных две — это два указателя: *eos* и *str*. В этом листинге сгенерированном при помощи [IDA](#) мы переименовали *var_8* и *var_4* в *eos* и *str* вручную.

Итак, первые несколько инструкций просто сохраняют входное значение в обоих переменных *str* и *eos*.

С метки *loc_2CB8* начинается тело цикла.

Первые три инструкции в теле цикла (LDR, ADD, STR) загружают значение *eos* в R0. Затем происходит инкремент значения и оно сохраняется в локальной переменной *eos* расположенной в стеке.

Следующая инструкция LDRSB R0, [R0] («Load Register Signed Byte») загружает байт из памяти по адресу R0, расширяет его до 32-бит считая его знаковым (signed) и сохраняет в R0 ¹⁰³. Это немного похоже на инструкцию MOVSW в x86. Компилятор считает этот байт знаковым (signed), потому что тип *char* по стандарту Си — знаковый.

Об этом уже было немного написано ([1.17.1](#) (стр. [191](#))) в этой же секции, но посвященной x86.

Следует также заметить, что в ARM нет возможности использовать 8-битную или 16-битную часть регистра, как это возможно в x86.

Вероятно, это связано с тем, что за x86 тянется длинный шлейф совместимости со своими предками, вплоть до 16-битного 8086 и даже 8-битного 8080, а ARM разрабатывался с чистого листа как 32-битный RISC-процессор.

Следовательно, чтобы работать с отдельными байтами на ARM, так или иначе придется использовать 32-битные регистры.

Итак, LDRSB загружает символы из строки в R0, по одному.

Следующие инструкции CMP и BEQ проверяют, является ли этот символ 0.

Если не 0, то происходит переход на начало тела цикла. А если 0, выходим из цикла.

В конце функции вычисляется разница между *eos* и *str*, вычитается единица, и вычисленное значение возвращается через R0.

N.B. В этой функции не сохранялись регистры. По стандарту регистры R0-R3 называются также «scratch registers». Они предназначены для передачи аргументов и их значения не нужно восстанавливать при выходе из функции, потому что они больше не нужны в вызывающей функции. Таким образом, их можно использовать как захочется.

А так как никакие больше регистры не используются, то и сохранять нечего.

Поэтому управление можно вернуть вызывающей функции простым переходом (BX) по адресу в регистре LR.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

Листинг 1.181: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

_strlen	MOV	R1, R0
loc_2DF6	LDRB.W	R2, [R1], #1
	CMP	R2, #0
	BNE	loc_2DF6
	MVNS	R0, R0
	ADD	R0, R1
	BX	LR

Оптимизирующий LLVM решил, что под переменные *eos* и *str* выделять место в стеке не обязательно, и эти переменные можно хранить прямо в регистрах.

Перед началом тела цикла *str* будет находиться в R0, а *eos* — в R1.

Инструкция LDRB.W R2, [R1], #1 загружает в R2 байт из памяти по адресу R1, расширяя его как знаковый (signed), до 32-битного значения, но не только это.

¹⁰³Компилятор Keil считает тип *char* знаковым, как и MSVC и GCC.

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

#1 в конце инструкции означает «Post-indexed addressing», т.е. после загрузки байта к R1 добавится единица.

Читайте больше об этом: [1.31.2](#) (стр. 430).

Далее в теле цикла можно увидеть CMP и BNE¹⁰⁴. Они продолжают работу цикла до тех пор, пока не будет встречен 0.

После конца цикла MVNS¹⁰⁵ (инвертирование всех бит, NOT в x86) и ADD вычисляют $eos-str-1$. На самом деле, эти две инструкции вычисляют $R0 = str + eos$, что эквивалентно тому, что было в исходном коде. Почему это так, уже было описано чуть раньше, здесь ([1.17.1](#) (стр. 198)).

Вероятно, LLVM, как и GCC, посчитал, что такой код может быть короче (или быстрее).

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.182: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
_strlen
    MOV     R1, R0

loc_2C8
    LDRB    R2, [R1], #1
    CMP     R2, #0
    SUBEQ   R0, R1, R0
    SUBEQ   R0, R0, #1
    BNE     loc_2C8
    BX      LR
```

Практически то же самое, что мы уже видели, за тем исключением, что выражение $str-eos-1$ может быть вычислено не в самом конце функции, а прямо в теле цикла.

Суффикс -EQ означает, что инструкция будет выполнена только если операнды в исполненной перед этим инструкции CMP были равны.

Таким образом, если в R0 будет 0, обе инструкции SUBEQ исполнятся и результат останется в R0.

ARM64

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
my_strlen:
    mov     x1, x0
    ; X1 теперь временный регистр (eos), работающий, как курсор
.L58:
    ; загрузить байт из X1 в W2, инкремент X1 (пост-индекс)
    ldrb    w2, [x1], 1
    ; Compare and Branch if NonZero: сравнить W0 с нулем, перейти на .L58 если не ноль
    cbnz    w2, .L58
    ; вычислить разницу между изначальным указателем в X0 и текущим адресом в X1
    sub     x0, x1, x0
    ; декремент младших 32-х бит результата
    sub     w0, w0, #1
    ret
```

Алгоритм такой же как и в [1.17.1](#) (стр. 192): найти нулевой байт, затем вычислить разницу между указателями, затем отнять 1 от результата. Комментарии добавлены автором книги.

Стоит добавить, что наш пример имеет ошибку: `my_strlen()` возвращает 32-битный *int*, тогда как должна возвращать *size_t* или иной 64-битный тип.

¹⁰⁴(PowerPC, ARM) Branch if Not Equal

¹⁰⁵MoVe Not

1.17. ЕЩЕ КОЕ-ЧТО О СТРОКАХ

Причина в том, что теоретически, `strlen()` можно вызывать для огромных блоков в памяти, превышающих 4GB, так что она должна иметь возможность вернуть 64-битное значение на 64-битной платформе.

Так что из-за моей ошибки, последняя инструкция SUB работает над 32-битной частью регистра, тогда как предпоследняя SUB работает с полными 64-битными частями (она вычисляет разницу между указателями).

Это моя ошибка, но лучше оставить это как есть, как пример кода, который возможен в таком случае.

Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
my_strlen:
; пролог функции
    sub    sp, sp, #32
; первый аргумент (str) будет записан в [sp,8]
    str    x0, [sp,8]
    ldr    x0, [sp,8]
; скопировать переменную "str" в "eos"
    str    x0, [sp,24]
    nop
.L62:
; eos++
    ldr    x0, [sp,24] ; загрузить "eos" в X0
    add    x1, x0, 1   ; инкремент X0
    str    x1, [sp,24] ; сохранить X0 в "eos"
; загрузить байт из памяти по адресу в X0 в W0
    ldrb   w0, [x0]
; это ноль? (WZR это 32-битный регистр всегда содержащий ноль)
    cmp    w0, wzr
; переход если не ноль (Branch Not Equal)
    bne    .L62
; найден нулевой байт. вычисляем разницу.
; загрузить "eos" в X1
    ldr    x1, [sp,24]
; загрузить "str" в X0
    ldr    x0, [sp,8]
; вычислить разницу
    sub    x0, x1, x0
; декремент результата
    sub    w0, w0, #1
; эпилог функции
    add    sp, sp, 32
    ret
```

Более многословно. Переменные часто сохраняются в память и загружаются назад (локальный стек). Здесь та же ошибка: операция декремента происходит над 32-битной частью регистра.

MIPS

Листинг 1.183: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
my_strlen:
; переменная "eos" всегда будет находиться в $v1:
    move   $v1, $a0

loc_4:
; загрузить байт по адресу в "eos" в $a1:
    lb     $a1, 0($v1)
    or     $at, $zero ; load delay slot, NOP
; если загруженный байт не ноль, перейти на loc_4:
    bnez   $a1, loc_4
; в любом случае, инкрементируем "eos":
    addiu  $v1, 1 ; branch delay slot
; цикл закончен. инвертируем переменную "str":
    nor    $v0, $zero, $a0
```

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

```
; $v0=-str-1
                jr      $ra
; возвращаемое значение = $v1 + $v0 = eos + ( -str-1 ) = eos - str - 1
                addu    $v0, $v1, $v0 ; branch delay slot
```

В MIPS нет инструкции NOT, но есть NOR — операция OR + NOT.

Эта операция широко применяется в цифровой электронике¹⁰⁶. Например, космический компьютер Apollo Guidance Computer использовавшийся в программе «Аполлон» был построен исключительно на 5600 элементах NOR: [Jens Eickhoff, *Onboard Computers, Onboard Software and Satellite Operations: An Introduction*, (2011)]. Но элемент NOR не очень популярен в программировании.

Так что операция NOT реализована здесь как NOR DST, \$ZERO, SRC.

Из фундаментальных знаний 2.2 (стр. 444), мы можем знать, что побитовое инвертирование знакового числа это то же что и смена его знака с вычитанием 1 из результата.

Так что NOT берет значение *str* и трансформирует его в $-str - 1$.

Следующая операция сложения готовит результат.

1.18. Замена одних арифметических инструкций на другие

В целях оптимизации одна инструкция может быть заменена другой, или даже группой инструкций. Например, ADD и SUB могут заменять друг друга: строка 18 в листинг.3.119.

Более того, не всегда замена тривиальна. Инструкция LEA, несмотря на оригинальное назначение, нередко применяется для простых арифметических действий: .1.6 (стр. 1003).

1.18.1. Умножение

Умножение при помощи сложения

Вот простой пример:

```
unsigned int f(unsigned int a)
{
    return a*8;
};
```

Умножение на 8 заменяется на три инструкции сложения, делающих то же самое. Должно быть, оптимизатор в MSVC решил, что этот код может быть быстрее.

Листинг 1.184: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_TEXT    SEGMENT
_a$ = 8      ; size = 4
_f       PROC
; File c:\polygon\c\2.c
        mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
        add     eax, eax
        add     eax, eax
        add     eax, eax
        ret     0
_f       ENDP
_TEXT    ENDS
END
```

Умножение при помощи сдвигов

Ещё очень часто умножения и деления на числа вида 2^n заменяются на инструкции сдвигов.

¹⁰⁶NOR называют «универсальным элементом»

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

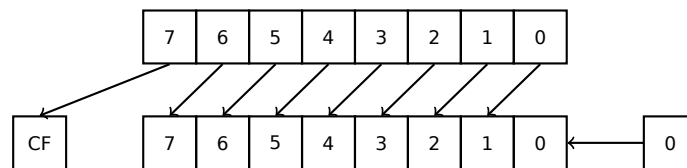
```
unsigned int f(unsigned int a)
{
    return a*4;
};
```

Листинг 1.185: Неоптимизирующий MSVC 2010

```
_a$ = 8      ; size = 4
_f PROC
    push     ebp
    mov      ebp, esp
    mov      eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    shl      eax, 2
    pop      ebp
    ret      0
_f ENDP
```

Умножить на 4 это просто сдвинуть число на 2 бита влево, вставив 2 нулевых бита справа (как два самых младших бита). Это как умножить 3 на 100 — нужно просто дописать два нуля справа.

Вот как работает инструкция сдвига влево:



Добавленные биты справа — всегда нули.

Умножение на 4 в ARM:

Листинг 1.186: Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
f PROC
    LSL      r0, r0, #2
    BX      lr
    ENDP
```

Умножение на 4 в MIPS:

Листинг 1.187: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
jr      $ra
sll      $v0, $a0, 2 ; branch delay slot
```

SLL это «Shift Left Logical».

Умножение при помощи сдвигов, сложений и вычитаний

Можно избавиться от операции умножения, если вы умножаете на числа вроде 7 или 17, и использовать сдвиги.

Здесь используется относительно простая математика.

32-бита

```
#include <stdint.h>

int f1(int a)
{
    return a*7;
};

int f2(int a)
{
    return a*28;
```

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

```
};  
  
int f3(int a)  
{  
    return a*17;  
};
```

x86

Листинг 1.188: Оптимизирующий MSVC 2012

```
; a*7  
_a$ = 8  
_f1 PROC  
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]  
; ECX=a  
    lea     eax, DWORD PTR [ecx*8]  
; EAX=ECX*8  
    sub     eax, ecx  
; EAX=EAX-ECX=ECX*8-ECX=ECX*7=a*7  
    ret     0  
_f1 ENDP  
  
; a*28  
_a$ = 8  
_f2 PROC  
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]  
; ECX=a  
    lea     eax, DWORD PTR [ecx*8]  
; EAX=ECX*8  
    sub     eax, ecx  
; EAX=EAX-ECX=ECX*8-ECX=ECX*7=a*7  
    shl     eax, 2  
; EAX=EAX<<2=(a*7)*4=a*28  
    ret     0  
_f2 ENDP  
  
; a*17  
_a$ = 8  
_f3 PROC  
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]  
; EAX=a  
    shl     eax, 4  
; EAX=EAX<<4=EAX*16=a*16  
    add     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]  
; EAX=EAX+a=a*16+a=a*17  
    ret     0  
_f3 ENDP
```

ARM

Keil, генерируя код для режима ARM, использует модификаторы инструкции, в которых можно задавать сдвиг для второго операнда:

Листинг 1.189: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
; a*7  
||f1|| PROC  
    RSB     r0, r0, r0, LSL #3  
; R0=R0<<3-R0=R0*8-R0=a*8-a=a*7  
    BX      lr  
    ENDP  
  
; a*28  
||f2|| PROC  
    RSB     r0, r0, r0, LSL #3
```

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

```
; R0=R0<<3-R0=R0*8-R0=a*8-a=a*7
    LSL    r0,r0,#2
; R0=R0<<2=R0*4=a*7*4=a*28
    BX     lr
    ENDP

; a*17
||f3|| PROC
    ADD     r0,r0,r0,LSL #4
; R0=R0+R0<<4=R0+R0*16=R0*17=a*17
    BX     lr
    ENDP
```

Но таких модификаторов в режиме Thumb нет.

И он также не смог оптимизировать функцию f2():

Листинг 1.190: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
; a*7
||f1|| PROC
    LSLS    r1,r0,#3
; R1=R0<<3=a<<3=a*8
    SUBS    r0,r1,r0
; R0=R1-R0=a*8-a=a*7
    BX     lr
    ENDP

; a*28
||f2|| PROC
    MOVS    r1,#0x1c ; 28
; R1=28
    MULS    r0,r1,r0
; R0=R1*R0=28*a
    BX     lr
    ENDP

; a*17
||f3|| PROC
    LSLS    r1,r0,#4
; R1=R0<<4=R0*16=a*16
    ADDS    r0,r0,r1
; R0=R0+R1=a+a*16=a*17
    BX     lr
    ENDP
```

MIPS

Листинг 1.191: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
_f1:
    sll     $v0, $a0, 3
; $v0 = $a0<<3 = $a0*8
    jr      $ra
    subu    $v0, $a0 ; branch delay slot
; $v0 = $v0-$a0 = $a0*8-$a0 = $a0*7

_f2:
    sll     $v0, $a0, 5
; $v0 = $a0<<5 = $a0*32
    sll     $a0, 2
; $a0 = $a0<<2 = $a0*4
    jr      $ra
    subu    $v0, $a0 ; branch delay slot
; $v0 = $a0*32-$a0*4 = $a0*28

_f3:
    sll     $v0, $a0, 4
```

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

```
; $v0 = $a0<<4 = $a0*16
        jr      $ra
        addu    $v0, $a0 ; branch delay slot
; $v0 = $a0*16+$a0 = $a0*17
```

64-бита

```
#include <stdint.h>

int64_t f1(int64_t a)
{
    return a*7;
};

int64_t f2(int64_t a)
{
    return a*28;
};

int64_t f3(int64_t a)
{
    return a*17;
};
```

x64

Листинг 1.192: Оптимизирующий MSVC 2012

```
; a*7
f1:
    lea     rax, [0+rdi*8]
; RAX=RDI*8=a*8
    sub     rax, rdi
; RAX=RAX-RDI=a*8-a=a*7
    ret

; a*28
f2:
    lea     rax, [0+rdi*4]
; RAX=RDI*4=a*4
    sal     rdi, 5
; RDI=RDI<<5=RDI*32=a*32
    sub     rdi, rax
; RDI=RDI-RAX=a*32-a*4=a*28
    mov     rax, rdi
    ret

; a*17
f3:
    mov     rax, rdi
    sal     rax, 4
; RAX=RAX<<4=a*16
    add     rax, rdi
; RAX=a*16+a=a*17
    ret
```

ARM64

GCC 4.9 для ARM64 также очень лаконичен благодаря модификаторам сдвига:

Листинг 1.193: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9 ARM64

```
; a*7
```

1.18. ЗАМЕНА ОДНИХ АРИФМЕТИЧЕСКИХ ИНСТРУКЦИЙ НА ДРУГИЕ

```
f1:
    lsl      x1, x0, 3
; X1=X0<<3=X0*8=a*8
    sub      x0, x1, x0
; X0=X1-X0=a*8-a=a*7
    ret

; a*28
f2:
    lsl      x1, x0, 5
; X1=X0<<5=a*32
    sub      x0, x1, x0, lsl 2
; X0=X1-X0<<2=a*32-a<<2=a*32-a*4=a*28
    ret

; a*17
f3:
    add      x0, x0, x0, lsl 4
; X0=X0+X0<<4=a+a*16=a*17
    ret
```

Алгоритм умножения Бута

Когда-то компьютеры были большими и дорогими настолько, что некоторые не имели поддержки операции умножения в **CPU**, например Data General Nova. И когда операция умножения была нужна, она обеспечивалась программно, например, при помощи алгоритма Бута (*Booth's multiplication algorithm*). Это алгоритм перемножения чисел используя только операции сложения и сдвига.

То что ныне делают компиляторы для оптимизации — это не совсем то, но цель (умножение) и средства (замена более быстрыми операциями) те же.

1.18.2. Деление

Деление используя сдвиги

Например, возьмем деление на 4:

```
unsigned int f(unsigned int a)
{
    return a/4;
};
```

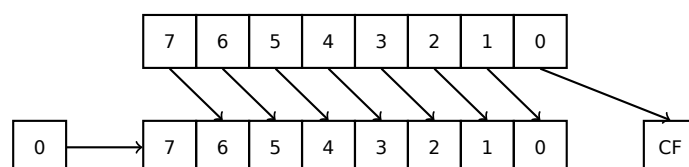
Имеем в итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.194: MSVC 2010

```
_a$ = 8      ; size = 4
_f          PROC
    mov      eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    shr      eax, 2
    ret      0
_f          ENDP
```

Инструкция **SHR** (*Shift Right*) в данном примере сдвигает число на 2 бита вправо. При этом освободившиеся два бита слева (т.е. самые старшие разряды) выставляются в нули. А самые младшие 2 бита выкидываются. Фактически, эти два выкинутых бита — остаток от деления.

Инструкция **SHR** работает так же как и **SHL**, только в другую сторону.



1.19. РАБОТА С FPU

Для того, чтобы это проще понять, представьте себе десятичную систему счисления и число 23. 23 можно разделить на 10 просто откинув последний разряд (3 — это остаток от деления). После этой операции останется 2 как **частное**.

Так что остаток выбрасывается, но это нормально, мы все-таки работаем с целочисленными значениями, а не с **вещественными**!

Деление на 4 в ARM:

Листинг 1.195: Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
f PROC
    LSR    r0,r0,#2
    BX     lr
ENDP
```

Деление на 4 в MIPS:

Листинг 1.196: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
jr      $ra
srl     $v0, $a0, 2 ; branch delay slot
```

Инструкция SRL это «Shift Right Logical».

1.18.3. Упражнение

- <http://challenges.re/59>

1.19. Работа с FPU

FPU — блок в процессоре работающий с числами с плавающей запятой.

Раньше он назывался «сопроцессором» и он стоит немного в стороне от **CPU**.

1.19.1. IEEE 754

Число с плавающей точкой в формате IEEE 754 состоит из *знака*, *мантиссы*¹⁰⁷ и *экспоненты*.

1.19.2. x86

Перед изучением **FPU** в x86 полезно ознакомиться с тем как работают стековые машины¹⁰⁸ или ознакомиться с основами языка Forth¹⁰⁹.

Интересен факт, что в свое время (до 80486) сопроцессор был отдельным чипом на материнской плате, и вследствие его высокой цены, он не всегда присутствовал. Его можно было докупить и установить отдельно¹¹⁰. Начиная с 80486 DX в состав процессора всегда входит FPU.

Этот факт может напоминать такой рудимент как наличие инструкции FWAIT, которая заставляет **CPU** ожидать, пока **FPU** закончит работу. Другой рудимент это тот факт, что опкоды **FPU**-инструкций начинаются с т.н. «escape»-опкодов (D8..DF) как опкоды, передающиеся в отдельный сопроцессор.

FPU имеет стек из восьми 80-битных регистров: ST(0)..ST(7). Для краткости, **IDA** и OllyDbg отображают ST(0) как ST, что в некоторых учебниках и документациях означает «Stack Top» («вершина стека»). Каждый регистр может содержать число в формате IEEE 754¹¹¹.

¹⁰⁷ *significand* или *fraction* в англоязычной литературе

¹⁰⁸ wikipedia.org/wiki/Stack_machine

¹⁰⁹ [wikipedia.org/wiki/Forth_\(programming_language\)](http://wikipedia.org/wiki/Forth_(programming_language))

¹¹⁰ Например, Джон Кармак использовал в своей игре Doom числа с фиксированной запятой (ru.wikipedia.org/wiki/Число_с_фиксированной_запятой), хранящиеся в обычных 32-битных **GPR** (16 бит на целую часть и 16 на дробную), чтобы Doom работал на 32-битных компьютерах без FPU, т.е. 80386 и 80486 SX.

¹¹¹ wikipedia.org/wiki/IEEE_floating_point

1.19.3. ARM, MIPS, x86/x64 SIMD

В ARM и MIPS FPU это не стек, а просто набор регистров, к которым можно обращаться произвольно, как к [GPR](#).

Такая же идеология применяется в расширениях SIMD в процессорах x86/x64.

1.19.4. Си/Си++

В стандартных Си/Си++ имеются два типа для работы с числами с плавающей запятой: *float* (число одинарной точности¹¹², 32 бита)¹¹³ и *double* (число двойной точности¹¹⁴, 64 бита).

В [Donald E. Knuth, *The Art of Computer Programming*, Volume 2, 3rd ed., (1997)246] мы можем найти что *single-precision* означает, что значение с плавающей точкой может быть помещено в одно [32-битное] машинное слово, а *doulbe-precision* означает, что оно размещено в двух словах (64 бита).

GCC также поддерживает тип *long double (extended precision*¹¹⁵, 80 бит), но MSVC — нет.

Несмотря на то, что *float* занимает столько же места, сколько и *int* на 32-битной архитектуре, представление чисел, разумеется, совершенно другое.

1.19.5. Простой пример

Рассмотрим простой пример:

```
#include <stdio.h>

double f (double a, double b)
{
    return a/3.14 + b*4.1;
};

int main()
{
    printf ("%f\n", f(1.2, 3.4));
};
```

x86

MSVC

Компилируем в MSVC 2010:

Листинг 1.197: MSVC 2010: f()

```
CONST    SEGMENT
__real@4010666666666666 DQ 0401066666666666r    ; 4.1
CONST    ENDS
CONST    SEGMENT
__real@40091eb851eb851f DQ 040091eb851eb851fr    ; 3.14
CONST    ENDS
_TEXT    SEGMENT
_a$ = 8          ; size = 8
_b$ = 16         ; size = 8
_f PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    fld     QWORD PTR _a$[ebp]
```

¹¹²wikipedia.org/wiki/Single-precision_floating-point_format

¹¹³Формат представления чисел с плавающей точкой одинарной точности затрагивается в разделе *Работа с типом float как со структурой* (1.24.6 (стр. 364)).

¹¹⁴wikipedia.org/wiki/Double-precision_floating-point_format

¹¹⁵wikipedia.org/wiki/Extended_precision

1.19. РАБОТА С FPU

```
; текущее состояние стека: ST(0) = _a
    fdiv    QWORD PTR __real@40091eb851eb851f
; текущее состояние стека: ST(0) = результат деления _a на 3.14
    fld     QWORD PTR _b$[ebp]
; текущее состояние стека: ST(0) = _b;
; ST(1) = результат деления _a на 3.14
    fmul    QWORD PTR __real@4010666666666666
; текущее состояние стека:
; ST(0) = результат умножения _b на 4.1;
; ST(1) = результат деления _a на 3.14
    faddp   ST(1), ST(0)
; текущее состояние стека: ST(0) = результат сложения
    pop     ebp
    ret     0
_f  ENDP
```

FLD берет 8 байт из стека и загружает их в регистр ST(0), автоматически конвертируя во внутренний 80-битный формат (*extended precision*).

FDIV делит содержимое регистра ST(0) на число, лежащее по адресу `__real@40091eb851eb851f` — там закодировано значение 3,14. Синтаксис ассемблера не поддерживает подобные числа, поэтому мы там видим шестнадцатеричное представление числа 3,14 в формате IEEE 754.

После выполнения FDIV в ST(0) остается **частное**.

Кстати, есть ещё инструкция FDIVP, которая делит ST(1) на ST(0), выталкивает эти числа из стека и заталкивает результат. Если вы знаете язык Forth¹¹⁶, то это как раз оно и есть — стековая машина¹¹⁷.

Следующая FLD заталкивает в стек значение *b*.

После этого в ST(1) перемещается результат деления, а в ST(0) теперь *b*.

Следующий FMUL умножает *b* из ST(0) на значение `__real@4010666666666666` — там лежит число 4,1 — и оставляет результат в ST(0).

Самая последняя инструкция FADDP складывает два значения из вершины стека в ST(1) и затем выталкивает значение, лежащее в ST(0). Таким образом результат сложения остается на вершине стека в ST(0).

Функция должна вернуть результат в ST(0), так что больше ничего здесь не производится, кроме эпилога функции.

¹¹⁶ [wikipedia.org/wiki/Forth_\(programming_language\)](https://wikipedia.org/wiki/Forth_(programming_language))

¹¹⁷ wikipedia.org/wiki/Stack_machine

2 пары 32-битных слов обведены в стеке красным. Каждая пара — это числа двойной точности в формате IEEE 754, переданные из `main()`.

Видно, как первая FLD загружает значение 1,2 из стека и помещает в регистр `ST(0)`:

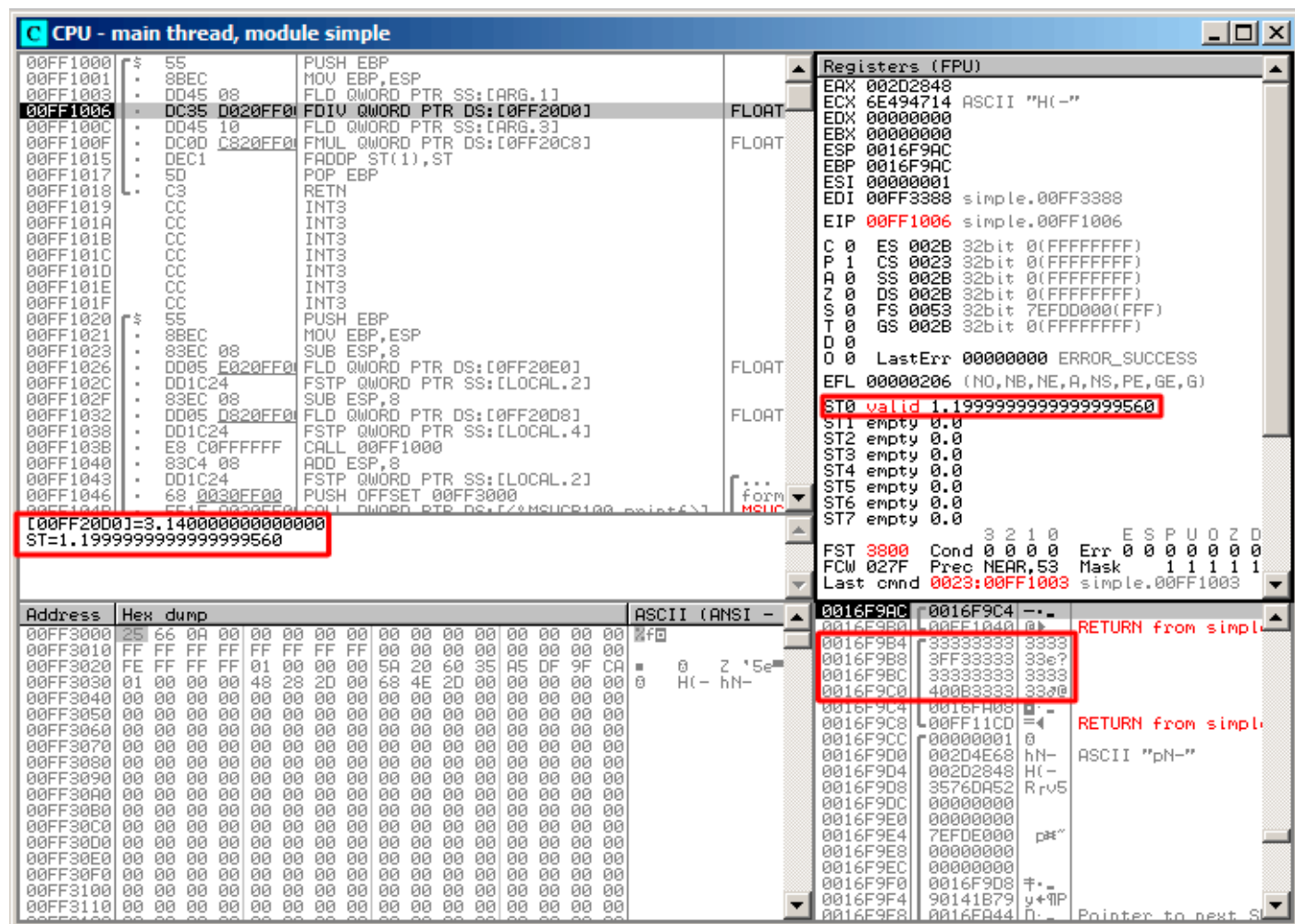


Рис. 1.54: OllyDbg: первая FLD исполнилась

Из-за неизбежных ошибок конвертирования числа из 64-битного IEEE 754 в 80-битное (внутреннее в FPU), мы видим здесь 1,199..., что очень близко к 1,2.

Прямо сейчас EIP указывает на следующую инструкцию (FDIV), загружающую константу двойной точности из памяти.

Для удобства, OllyDbg показывает её значение: 3,14.

1.19. РАБОТА С FPU

Трассируем дальше. FDIV исполнилась, теперь ST(0) содержит 0,382...(quotient):

The screenshot shows the OllyDbg interface with the CPU window displaying assembly code and the Registers (FPU) window showing the state of the floating-point registers.

CPU - main thread, module simple

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
00FF1000	55	PUSH EBP
00FF1001	8BEC	MOV EBP,ESP
00FF1003	DD45 08	FLD QWORD PTR SS:[ARG.1]
00FF1006	DC35 0020FF00	FDIV QWORD PTR DS:[0FF20D0]
00FF100C	DD45 10	FLD QWORD PTR SS:[ARG.3]
00FF100F	DC0D C820FF00	FMUL QWORD PTR DS:[0FF20C8]
00FF1015	DEC1	FADDP ST(1),ST
00FF1017	5D	POP EBP
00FF1018	C3	RET
00FF1019	CC	INT3
00FF101A	CC	INT3
00FF101B	CC	INT3
00FF101C	CC	INT3
00FF101D	CC	INT3
00FF101E	CC	INT3
00FF101F	CC	INT3
00FF1020	55	PUSH EBP
00FF1021	8BEC	MOV EBP,ESP
00FF1023	83EC 08	SUB ESP,8
00FF1026	DD05 E020FF00	FLD QWORD PTR DS:[0FF20E0]
00FF102C	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00FF102F	83EC 08	SUB ESP,8
00FF1032	DD05 D820FF00	FLD QWORD PTR DS:[0FF20D8]
00FF1038	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.4]
00FF103B	E8 C0FFFFFF	CALL 00FF1000
00FF1040	83C4 08	ADD ESP,8
00FF1043	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00FF1046	68 0030FF00	PUSH OFFSET 00FF3000
00FF104B	5515 0030FF00	CALL QWORD PTR DS:[MSUCR100.exe+515]

Stack [0016F9BC]=3.4000000000000000

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	002D2848
ECX	6E494714 ASCII "H(-"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0016F9AC
EBP	0016F9AC
ESI	00000001
EDI	00FF3388 simple.00FF3388
EIP	00FF100C simple.00FF100C
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
0 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000206 (NO,NB,NE,A,NS,PE,GE,G)
ST0	valid 0.3821656050955413719
ST1	empty 0.0
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0

Registers (x86)

Register	Value
FST	3820 Cond 0 0 0 Err 0 0 1 0 0 0 0
FCW	027F Prec NEAR,53 Mask 1 1 1 1 1
Last cmd	0023:00FF1006 simple.00FF1006

Registers (x87)

Register	Value
0016F9AC	0016F9C4 --
0016F9B0	00FF1040 @
0016F9B4	33333333 3333
0016F9B8	3FF33333 33e?
0016F9BC	33333333 3333
0016F9C0	400B3333 3330
0016F9C4	0016FA08
0016F9C8	00FF11CD
0016F9CC	00000001 0
0016F9D0	002D4E68 hN-
0016F9D4	002D2848 H(-
0016F9D8	3576DA52 Rv5
0016F9DC	00000000
0016F9E0	00000000
0016F9E4	7EFDE000 p#"
0016F9E8	00000000
0016F9EC	00000000
0016F9F0	0016F9D8
0016F9F4	90141B79 y+7P
0016F9F8	0016FA44 D- Pointer to next S

Рис. 1.55: OllyDbg: FDIV исполнилась

1.19. РАБОТА С FPU

Третий шаг: вторая FLD исполнилась, загрузив в ST(0) 3,4 (мы видим приближенное число 3,39999...):

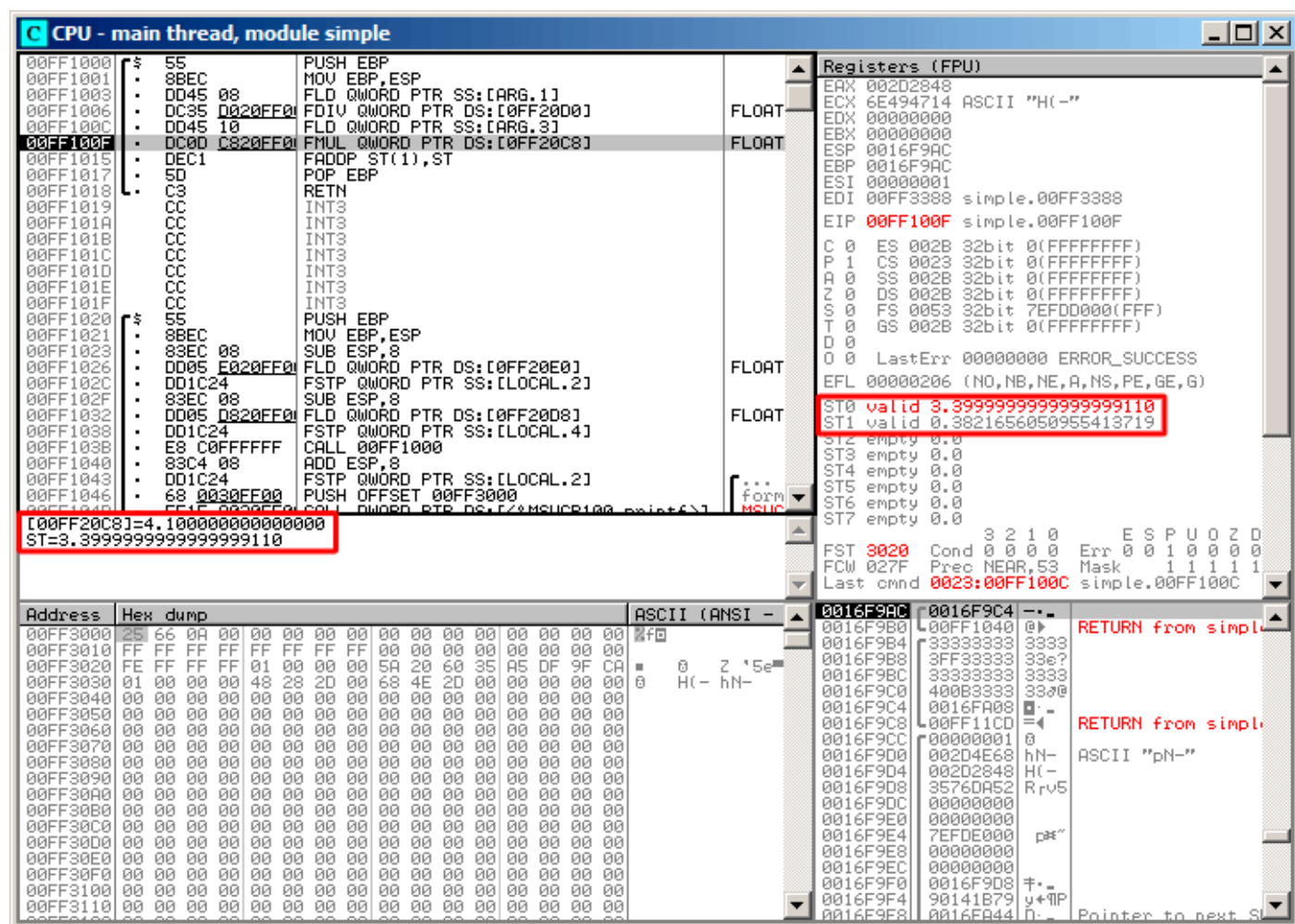


Рис. 1.56: OllyDbg: вторая FLD исполнилась

В это время `quotient` провалилось в ST(1). EIP указывает на следующую инструкцию: FMUL. Она загружает константу 4,1 из памяти, так что OllyDbg тоже показывает её здесь.

1.19. РАБОТА С FPU

Затем: FMUL исполнилась, теперь в ST(0) произведение:

CPU - main thread, module simple

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
00FF1000	55	PUSH EBP
00FF1001	8BEC	MOV EBP,ESP
00FF1003	DD45 08	FLD QWORD PTR SS:[ARG.1]
00FF1006	DC35 0020FF00	FSTP QWORD PTR DS:[0FF20D0]
00FF100C	DD45 10	FLD QWORD PTR SS:[ARG.3]
00FF100F	DC0D C820FF00	FSTP QWORD PTR DS:[0FF20C8]
00FF1015	DEC1	FADDP ST(1),ST
00FF1017	5D	POP EBP
00FF1018	C3	RETN
00FF1019	CC	INT3
00FF101A	CC	INT3
00FF101B	CC	INT3
00FF101C	CC	INT3
00FF101D	CC	INT3
00FF101E	CC	INT3
00FF101F	CC	INT3
00FF1020	55	PUSH EBP
00FF1021	8BEC	MOV EBP,ESP
00FF1023	83EC 08	SUB ESP,8
00FF1026	DD05 E020FF00	FLD QWORD PTR DS:[0FF20E0]
00FF102C	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00FF102F	83EC 08	SUB ESP,8
00FF1032	DD05 D820FF00	FLD QWORD PTR DS:[0FF20D8]
00FF1038	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.4]
00FF103B	E8 C0FFFFFF	CALL 00FF1000
00FF1040	83C4 08	ADD ESP,8
00FF1043	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00FF1046	68 0030FF00	PUSH OFFSET 00FF3000
00FF104B	FF15 0020FF00	PUSH QWORD PTR DS:[MSUBC100,offset4]

ST=13.93999999999997730
ST(1)=0.3821656050955413719

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	002D2848
ECX	6E494714 ASCII "H(-"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0016F9AC
EBP	0016F9AC
ESI	00000001
EDI	00FF3388 simple.00FF3388
EIP	00FF1015 simple.00FF1015
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000206 (NO,NB,NE,A,NS,PE,GE,G)
ST0	valid 13.93999999999997730
ST1	valid 0.3821656050955413719
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0

3 2 1 0 E S P U O Z D
FST 3020 Cond 0 0 0 Err 0 0 1 0 0 0
FCW 027F Prec NEAR,53 Mask 1 1 1 1
Last cmd 0023:00FF100F simple.00FF100F

0016F9AC 0016F9C4

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
0016F9B0	00FF1040	RETURN from simple
0016F9B4	33333333	3333
0016F9B8	3FF33333	33e?
0016F9BC	33333333	3333
0016F9C0	400B3333	333e
0016F9C4	0016FA08	
0016F9C8	00FF11CD	RETURN from simple
0016F9CC	00000001	0
0016F9D0	002D4E68	hN-
0016F9D4	002D2848	H(-
0016F9D8	3576DA52	Rrv5
0016F9DC	00000000	
0016F9E0	00000000	
0016F9E4	7EFDE000	pa"
0016F9E8	00000000	
0016F9EC	00000000	
0016F9F0	0016F9D8	
0016F9F4	90141B79	y+7P
0016F9F8	0016FA44	Printer to next S

Рис. 1.57: OllyDbg: FMUL исполнилась

1.19. РАБОТА С FPU

Затем: FADDP исполнилась, теперь в ST(0) сумма, а ST(1) очистился:

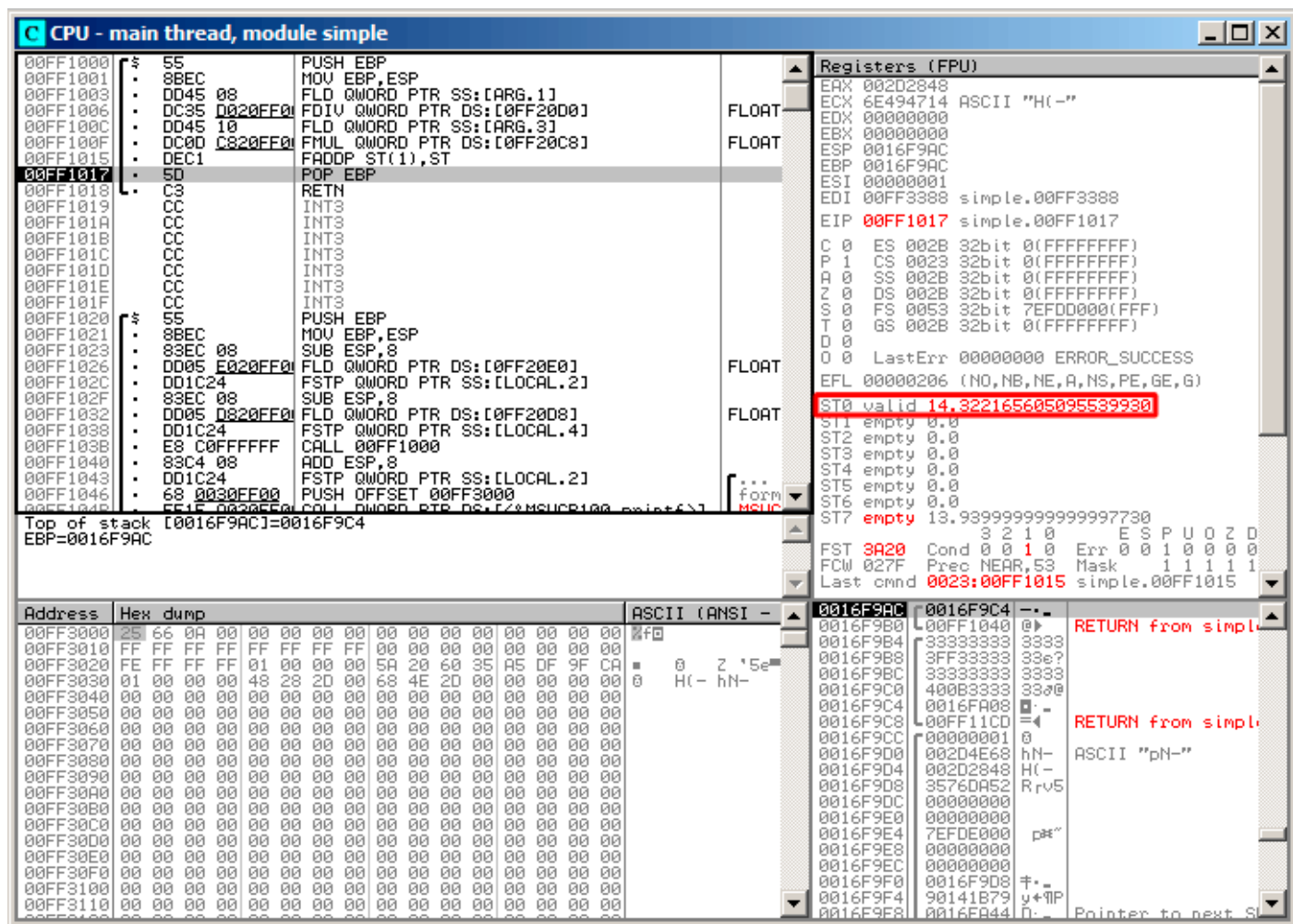


Рис. 1.58: OllyDbg: FADDP исполнилась

Сумма остается в ST(0) потому что функция возвращает результат своей работы через ST(0).

Позже main() возьмет это значение оттуда.

Мы также видим кое-что необычное: значение 13,93...теперь находится в ST(7).

Почему?

Мы читали в этой книге, что регистры в FPU представляют собой стек: 1.19.2 (стр. 208). Но это упрощение. Представьте, если бы в железе было бы так, как описано. Тогда при каждом заталкивании (или выталкивании) в стек, все остальные 7 значений нужно было бы передвигать (или копировать) в соседние регистры, а это слишком затратно.

Так что в реальности у FPU есть просто 8 регистров и указатель (называемый TOP), содержащий номер регистра, который в текущий момент является «вершиной стека».

При заталкивании значения в стек регистр TOP меняется, и указывает на свободный регистр. Затем значение записывается в этот регистр.

При выталкивании значения из стека процедура обратная. Однако освобожденный регистр не обнуляется (наверное, можно было бы сделать, чтобы обнулялся, но это лишняя работа и работало бы медленнее). Так что это мы здесь и видим. Можно сказать, что FADDP сохранила сумму, а затем вытолкнула один элемент.

Но в реальности, эта инструкция сохранила сумму и затем передвинула регистр TOP.

Было бы ещё точнее сказать, что регистры FPU представляют собой кольцевой буфер.

Листинг 1.198: Оптимизирующий GCC 4.4.1

```

f                public f
                proc near
arg_0            = qword ptr 8
arg_8            = qword ptr 10h

                push    ebp
                fld     ds:dbl_8048608 ; 3.14

; состояние стека сейчас: ST(0) = 3.14

                mov     ebp, esp
                fdivr   [ebp+arg_0]

; состояние стека сейчас: ST(0) = результат деления

                fld     ds:dbl_8048610 ; 4.1

; состояние стека сейчас: ST(0) = 4.1, ST(1) = результат деления

                fmul    [ebp+arg_8]

; состояние стека сейчас: ST(0) = результат умножения, ST(1) = результат деления

                pop     ebp
                faddp   st(1), st

; состояние стека сейчас: ST(0) = результат сложения

                retn
f                endp

```

Разница в том, что в стек сначала заталкивается 3,14 (в ST(0)), а затем значение из arg_0 делится на то, что лежит в регистре ST(0).

FDIVR означает *Reverse Divide* — делить, поменяв делитель и делимое местами. Точно такой же инструкции для умножения нет, потому что она была бы бессмысленна (ведь умножение операция коммутативная), так что остается только FMUL без соответствующей ей -R инструкции.

FADDP не только складывает два значения, но также и выталкивает из стека одно значение. После этого в ST(0) остается только результат сложения.

ARM: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Пока в ARM не было стандартного набора инструкций для работы с числами с плавающей точкой, разные производители процессоров могли добавлять свои расширения для работы с ними. Позже был принят стандарт VFP (*Vector Floating Point*).

Важное отличие от x86 в том, что там вы работаете с FPU-стеком, а здесь стека нет, вы работаете просто с регистрами.

Листинг 1.199: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```

f
    VLDR        D16, =3.14
    VMOV        D17, R0, R1 ; загрузить "a"
    VMOV        D18, R2, R3 ; загрузить "b"
    VDIV.F64    D16, D17, D16 ; a/3.14
    VLDR        D17, =4.1
    VMUL.F64    D17, D18, D17 ; b*4.1
    VADD.F64    D16, D17, D16 ; +
    VMOV        R0, R1, D16
    BX          LR

dbl_2C98        DCFD 3.14          ; DATA XREF: f
dbl_2CA0        DCFD 4.1          ; DATA XREF: f+10

```

1.19. РАБОТА С FPU

Итак, здесь мы видим использование новых регистров с префиксом D.

Это 64-битные регистры. Их 32 и их можно использовать для чисел с плавающей точкой двойной точности (double) и для SIMD (в ARM это называется NEON).

Имеются также 32 32-битных S-регистра. Они применяются для работы с числами с плавающей точкой одинарной точности (float).

Запомнить легко: D-регистры предназначены для чисел double-точности, а S-регистры — для чисел single-точности.

Больше об этом: [.2.3](#) (стр. [1016](#)).

Обе константы (3,14 и 4,1) хранятся в памяти в формате IEEE 754.

Инструкции VLDR и VMOV, как можно догадаться, это аналоги обычных LDR и MOV, но они работают с D-регистрами.

Важно отметить, что эти инструкции, как и D-регистры, предназначены не только для работы с числами с плавающей точкой, но пригодны также и для работы с SIMD (NEON), и позже это также будет видно.

Аргументы передаются в функцию обычным путем через R-регистры, однако каждое число, имеющее двойную точность, занимает 64 бита, так что для передачи каждого нужны два R-регистра.

VMOV D17, R0, R1 в самом начале составляет два 32-битных значения из R0 и R1 в одно 64-битное и сохраняет в D17.

VMOV R0, R1, D16 в конце это обратная процедура: то что было в D16 остается в двух регистрах R0 и R1, потому что число с двойной точностью, занимающее 64 бита, возвращается в паре регистров R0 и R1.

VDIV, VMUL и VADD, это инструкции для работы с числами с плавающей точкой, вычисляющие, соответственно, [частное](#), [произведение](#) и сумму.

Код для Thumb-2 такой же.

ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
f
    PUSH    {R3-R7,LR}
    MOVS    R7, R2
    MOVS    R4, R3
    MOVS    R5, R0
    MOVS    R6, R1
    LDR     R2, =0x66666666 ; 4.1
    LDR     R3, =0x40106666
    MOVS    R0, R7
    MOVS    R1, R4
    BL      __aeabi_dmul
    MOVS    R7, R0
    MOVS    R4, R1
    LDR     R2, =0x51EB851F ; 3.14
    LDR     R3, =0x40091EB8
    MOVS    R0, R5
    MOVS    R1, R6
    BL      __aeabi_ddiv
    MOVS    R2, R7
    MOVS    R3, R4
    BL      __aeabi_dadd
    POP     {R3-R7,PC}

; 4.1 в формате IEEE 754:
dword_364    DCD 0x66666666 ; DATA XREF: f+A
dword_368    DCD 0x40106666 ; DATA XREF: f+C
; 3.14 в формате IEEE 754:
dword_36C    DCD 0x51EB851F ; DATA XREF: f+1A
dword_370    DCD 0x40091EB8 ; DATA XREF: f+1C
```

Keil компилировал для процессора, в котором может и не быть поддержки FPU или NEON. Так что числа с двойной точностью передаются в парах обычных R-регистров, а вместо FPU-инструкций

1.19. РАБОТА С FPU

вызываются сервисные библиотечные функции

`__aeabi_dmul`, `__aeabi_ddiv`, `__aeabi_dadd`, эмулирующие умножение, деление и сложение чисел с плавающей точкой.

Конечно, это медленнее чем FPU-сопроцессор, но это лучше, чем ничего.

Кстати, похожие библиотеки для эмуляции сопроцессорных инструкций были очень распространены в x86 когда сопроцессор был редким и дорогим и присутствовал далеко не во всех компьютерах.

Эмуляция FPU-сопроцессора в ARM называется *soft float* или *armel (emulation)*, а использование FPU-инструкций сопроцессора — *hard float* или *armhf*.

ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Очень компактный код:

Листинг 1.200: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
; D0 = a, D1 = b
    ldr    d2, .LC25        ; 3.14
; D2 = 3.14
    fdiv   d0, d0, d2
; D0 = D0/D2 = a/3.14
    ldr    d2, .LC26        ; 4.1
; D2 = 4.1
    fmadd  d0, d1, d2, d0
; D0 = D1*D2+D0 = b*4.1+a/3.14
    ret

; константы в формате IEEE 754:
.LC25:
    .word  1374389535      ; 3.14
    .word  1074339512
.LC26:
    .word  1717986918      ; 4.1
    .word  1074816614
```

ARM64: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Листинг 1.201: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    sub    sp, sp, #16
    str    d0, [sp,8]      ; сохранить "a" в Register Save Area
    str    d1, [sp]        ; сохранить "b" в Register Save Area
    ldr    x1, [sp,8]
; X1 = a
    ldr    x0, .LC25
; X0 = 3.14
    fmov   d0, x1
    fmov   d1, x0
; D0 = a, D1 = 3.14
    fdiv   d0, d0, d1
; D0 = D0/D1 = a/3.14

    fmov   x1, d0
; X1 = a/3.14
    ldr    x2, [sp]
; X2 = b
    ldr    x0, .LC26
; X0 = 4.1
    fmov   d0, x2
; D0 = b
    fmov   d1, x0
; D1 = 4.1
    fmul   d0, d0, d1
; D0 = D0*D1 = b*4.1
```

1.19. РАБОТА С FPU

```
fmov    x0, d0
; X0 = D0 = b*4.1
fmov    d0, x1
; D0 = a/3.14
fmov    d1, x0
; D1 = X0 = b*4.1
fadd    d0, d0, d1
; D0 = D0+D1 = a/3.14 + b*4.1

fmov    x0, d0 ; \ избыточный код
fmov    d0, x0 ; /
add     sp, sp, 16
ret

.LC25:
.word   1374389535      ; 3.14
.word   1074339512

.LC26:
.word   1717986918      ; 4.1
.word   1074816614
```

Неоптимизирующий GCC более многословный. Здесь много ненужных перетасовок значений, включая явно избыточный код (последние две инструкции GMOV). Должно быть, GCC 4.9 пока ещё не очень хорош для генерации кода под ARM64. Интересно заметить что у ARM64 64-битные регистры и D-регистры так же 64-битные. Так что компилятор может сохранять значения типа *double* в [GPR](#) вместо локального стека. Это было невозможно на 32-битных CPU. И снова, как упражнение, вы можете попробовать оптимизировать эту функцию вручную, без добавления новых инструкций вроде FMADD.

MIPS

MIPS может поддерживать несколько сопроцессоров (вплоть до 4), нулевой из которых¹¹⁸ это специальный управляющий сопроцессор, а первый — это FPU.

Как и в ARM, сопроцессор в MIPS это не стековая машина. Он имеет 32 32-битных регистра (\$F0-\$F31):

[3.1](#) (стр. 1018). Когда нужно работать с 64-битными значениями типа *double*, используется пара 32-битных F-регистров.

Листинг 1.202: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
; $f12-$f13=A
; $f14-$f15=B
        lui     $v0, (dword_C4 >> 16) ; ?
; загрузить младшую 32-битную часть константы 3.14 в $f0:
        lwc1    $f0, dword_BC
        or      $at, $zero              ; load delay slot, NOP
; загрузить старшую 32-битную часть константы 3.14 в $f1:
        lwc1    $f1, $LC0
        lui     $v0, ($LC1 >> 16)      ; ?
; A в $f12-$f13, константа 3.14 в $f0-$f1, произвести деление:
        div.d   $f0, $f12, $f0
; $f0-$f1=A/3.14
; загрузить младшую 32-битную часть константы 4.1 в $f2:
        lwc1    $f2, dword_C4
        or      $at, $zero              ; load delay slot, NOP
; загрузить старшую 32-битную часть константы 4.1 в $f3:
        lwc1    $f3, $LC1
        or      $at, $zero              ; load delay slot, NOP
; B в $f14-$f15, константа 4.1 в $f2-$f3, произвести умножение:
        mul.d   $f2, $f14, $f2
; $f2-$f3=B*4.1
        jr      $ra
; суммировать 64-битные части и оставить результат в $f0-$f1:
        add.d   $f0, $f2              ; branch delay slot, NOP
```

¹¹⁸Если считать с нуля.

```
.rodata.cst8:000000B8 $LC0:          .word 0x40091EB8      # DATA XREF: f+C
.rodata.cst8:000000BC dword_BC:    .word 0x51EB851F      # DATA XREF: f+4
.rodata.cst8:000000C0 $LC1:          .word 0x40106666      # DATA XREF: f+10
.rodata.cst8:000000C4 dword_C4:    .word 0x66666666      # DATA XREF: f
```

Новые инструкции:

- LWC1 загружает 32-битное слово в регистр первого сопроцессора (отсюда «1» в названии инструкции).

Пара инструкций LWC1 может быть объединена в одну псевдоинструкцию L.D.

- DIV.D, MUL.D, ADD.D производят деление, умножение и сложение соответственно («.D» в суффиксе означает двойную точность, «.S» — одинарную точность)

Здесь также имеется странная аномалия компилятора: инструкция LUI помеченная нами вопросительным знаком.

Мне трудно понять, зачем загружать часть 64-битной константы типа *double* в регистр \$V0.

От этих инструкций нет толка. Если кто-то об этом что-то знает, пожалуйста, напишите автору емейл [119](#).

1.19.6. Передача чисел с плавающей запятой в аргументах

```
#include <math.h>
#include <stdio.h>

int main ()
{
    printf ("32.01 ^ 1.54 = %lf\n", pow (32.01,1.54));

    return 0;
}
```

x86

Посмотрим, что у нас вышло (MSVC 2010):

Листинг 1.203: MSVC 2010

```
CONST    SEGMENT
__real@40400147ae147ae1 DQ 040400147ae147ae1r    ; 32.01
__real@3ff8a3d70a3d70a4 DQ 03ff8a3d70a3d70a4r    ; 1.54
CONST    ENDS

_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 8 ; выделить место для первой переменной
    fld     QWORD PTR __real@3ff8a3d70a3d70a4
    fstp    QWORD PTR [esp]
    sub     esp, 8 ; выделить место для второй переменной
    fld     QWORD PTR __real@40400147ae147ae1
    fstp    QWORD PTR [esp]
    call    _pow
    add     esp, 8 ; вернуть место от одной переменной.

; в локальном стеке сейчас все еще зарезервировано 8 байт для нас.
; результат сейчас в ST(0)

    fstp    QWORD PTR [esp] ; перегрузить результат из ST(0) в локальный стек для printf()
    push    OFFSET $SG2651
    call    _printf
```

¹¹⁹dennis@yurichev.com

1.19. РАБОТА С FPU

```
add    esp, 12
xor     eax, eax
pop     ebp
ret     0
_main  ENDP
```

FLD и FSTP перемещают переменные из сегмента данных в FPU-стек или обратно. `pow()`¹²⁰ достает оба значения из стека и возвращает результат в `ST(0)`. `printf()` берет 8 байт из стека и трактует их как переменную типа *double*.

Кстати, с тем же успехом можно было бы перекладывать эти два числа из памяти в стек при помощи пары MOV:

ведь в памяти числа в формате IEEE 754, `pow()` также принимает их в том же формате, и никакая конверсия не требуется.

Собственно, так и происходит в следующем примере с ARM: 1.19.6 (стр. 221).

ARM + Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```
_main
var_C      = -0xC

        PUSH    {R7,LR}
        MOV     R7, SP
        SUB     SP, SP, #4
        VLDR    D16, =32.01
        VMOV    R0, R1, D16
        VLDR    D16, =1.54
        VMOV    R2, R3, D16
        BLX     _pow
        VMOV    D16, R0, R1
        MOV     R0, 0xFC1 ; "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"
        ADD     R0, PC
        VMOV    R1, R2, D16
        BLX     _printf
        MOVS    R1, 0
        STR     R0, [SP,#0xC+var_C]
        MOV     R0, R1
        ADD     SP, SP, #4
        POP     {R7,PC}

dbl_2F90   DCFD 32.01      ; DATA XREF: _main+6
dbl_2F98   DCFD 1.54      ; DATA XREF: _main+E
```

Как уже было указано, 64-битные числа с плавающей точкой передаются в парах R-регистров.

Этот код слегка избыточен (наверное, потому что не включена оптимизация), ведь можно было бы загружать значения напрямую в R-регистры минуя загрузку в D-регистры.

Итак, видно, что функция `_pow` получает первый аргумент в R0 и R1, а второй в R2 и R3. Функция оставляет результат в R0 и R1. Результат работы `_pow` перекладывается в D16, затем в пару R1 и R2, откуда `printf()` берет это число-результат.

ARM + Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
_main
        STMFD   SP!, {R4-R6,LR}
        LDR     R2, =0xA3D70A4 ; y
        LDR     R3, =0x3FF8A3D7
        LDR     R0, =0xAE147AE1 ; x
        LDR     R1, =0x40400147
        BL      pow
        MOV     R4, R0
```

¹²⁰стандартная функция Си, возводящая число в степень

1.19. РАБОТА С FPU

```
MOV    R2, R4
MOV    R3, R1
ADR    R0, a32_011_54Lf ; "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"
BL     __2printf
MOV    R0, #0
LDMFD  SP!, {R4-R6,PC}

y      DCD 0xA3D70A4      ; DATA XREF: _main+4
dword_520 DCD 0x3FF8A3D7  ; DATA XREF: _main+8
x      DCD 0xAE147AE1     ; DATA XREF: _main+C
dword_528 DCD 0x40400147  ; DATA XREF: _main+10
a32_011_54Lf DCB "32.01 ^ 1.54 = %lf",0xA,0
                                ; DATA XREF: _main+24
```

Здесь не используются D-регистры, используются только пары R-регистров.

ARM64 + Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Листинг 1.204: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    stp    x29, x30, [sp, -16]!
    add    x29, sp, 0
    ldr    d1, .LC1 ; загрузить 1.54 в D1
    ldr    d0, .LC0 ; загрузить 32.01 в D0
    bl     pow
; результат pow() в D0
    adrp   x0, .LC2
    add    x0, x0, :lo12:.LC2
    bl     printf
    mov    w0, 0
    ldp    x29, x30, [sp], 16
    ret

.LC0:
; 32.01 в формате IEEE 754
    .word  -1374389535
    .word  1077936455

.LC1:
; 1.54 в формате IEEE 754
    .word  171798692
    .word  1073259479

.LC2:
    .string "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"
```

Константы загружаются в D0 и D1: функция `pow()` берет их оттуда. Результат в D0 после исполнения `pow()`. Он пропускается в `printf()` без всякой модификации и перемещений, потому что `printf()` берет аргументы **интегральных типов** и указатели из X-регистров, а аргументы типа плавающей точки из D-регистров.

MIPS

Листинг 1.205: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
main:
var_10      = -0x10
var_4       = -4

; пролог функции:
    lui    $gp, (dword_9C >> 16)
    addiu  $sp, -0x20
    la     $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
    sw     $ra, 0x20+var_4($sp)
    sw     $gp, 0x20+var_10($sp)
    lui    $v0, (dword_A4 >> 16) ; ?
; загрузить младшую 32-битную часть числа 32.01:
```

1.19. РАБОТА С FPU

```
        lwc1    $f12, dword_9C
; загрузить адрес функции pow():
        lw      $t9, (pow & 0xFFFF)($gp)
; загрузить страшную 32-битную часть числа 32.01:
        lwc1    $f13, $LC0
        lui     $v0, ($LC1 >> 16) ; ?
; загрузить младшую 32-битную часть числа 1.54:
        lwc1    $f14, dword_A4
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
; загрузить страшную 32-битную часть числа 1.54:
        lwc1    $f15, $LC1
; вызвать pow():
        jalr    $t9
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
        lw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; скопировать результат из $f0 и $f1 в $a3 и $a2:
        mfc1    $a3, $f0
        lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
        mfc1    $a2, $f1
; вызвать printf():
        lui     $a0, ($LC2 >> 16) # "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"
        jalr    $t9
        la      $a0, ($LC2 & 0xFFFF) # "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"
; эпилог функции:
        lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
; возврат 0:
        move    $v0, $zero
        jr      $ra
        addiu   $sp, 0x20

.rodata.str1.4:00000084 $LC2:          .ascii "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"<0>

; 32.01:
.rodata.cst8:00000098 $LC0:          .word 0x40400147          # DATA XREF: main+20
.rodata.cst8:0000009C dword_9C:      .word 0xAE147AE1          # DATA XREF: main
.rodata.cst8:0000009C                                     # main+18
; 1.54:
.rodata.cst8:000000A0 $LC1:          .word 0x3FF8A3D7          # DATA XREF: main+24
.rodata.cst8:000000A0                                     # main+30
.rodata.cst8:000000A4 dword_A4:      .word 0xA3D70A4           # DATA XREF: main+14
```

И снова мы здесь видим, как LUI загружает 32-битную часть числа типа *double* в \$V0. И снова трудно понять почему.

Новая для нас инструкция это MFC1 («Move From Coprocessor 1») (копировать из первого сопроцессора). FPU это сопроцессор под номером 1, вот откуда «1» в имени инструкции. Эта инструкция переносит значения из регистров сопроцессора в регистры основного CPU (GPR). Так что результат исполнения pow() в итоге копируется в регистры \$A3 и \$A2 и из этой пары регистров printf() берет его как 64-битное значение типа *double*.

1.19.7. Пример со сравнением

Попробуем теперь вот это:

```
#include <stdio.h>

double d_max (double a, double b)
{
    if (a>b)
        return a;

    return b;
};

int main()
{
    printf ("%f\n", d_max (1.2, 3.4));
    printf ("%f\n", d_max (5.6, -4));
}
```


};

Несмотря на кажущуюся простоту этой функции, понять, как она работает, будет чуть сложнее.

x86

Неоптимизирующий MSVC

Вот что выдал MSVC 2010:

Листинг 1.206: Неоптимизирующий MSVC 2010

```

PUBLIC      _d_max
_TEXT      SEGMENT
_a$ = 8          ; size = 8
_b$ = 16         ; size = 8
_d_max     PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    fld     QWORD PTR _b$[ebp]

; состояние стека сейчас: ST(0) = _b
; сравниваем _b (в ST(0)) и _a, затем выталкиваем значение из стека

    fcomp   QWORD PTR _a$[ebp]

; стек теперь пустой

    fnstsw  ax
    test    ah, 5
    jp      SHORT $LN1@d_max

; мы здесь только если a>b

    fld     QWORD PTR _a$[ebp]
    jmp     SHORT $LN2@d_max
$LN1@d_max:
    fld     QWORD PTR _b$[ebp]
$LN2@d_max:
    pop     ebp
    ret     0
_d_max     ENDP

```

Итак, FLD загружает `_b` в регистр `ST(0)`.

FCOMP сравнивает содержимое `ST(0)` с тем, что лежит в `_a` и выставляет биты `C3/C2/C0` в регистре статуса FPU. Это 16-битный регистр отражающий текущее состояние FPU.

После этого инструкция FCOMP также выдергивает одно значение из стека. Это отличает её от FCOM, которая просто сравнивает значения, оставляя стек в таком же состоянии.

К сожалению, у процессоров до Intel P6 ¹²¹ нет инструкций условного перехода, проверяющих биты `C3/C2/C0`. Возможно, так сложилось исторически (вспомните о том, что FPU когда-то был вообще отдельным чипом).

А у Intel P6 появились инструкции FCOMI/FCOMIP/FUCOMI/FUCOMIP, делающие то же самое, только напрямую модифицирующие флаги ZF/PF/CF.

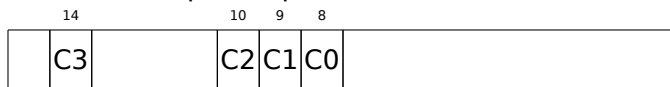
Так что FNSTSW копирует содержимое регистра статуса в AX. Биты `C3/C2/C0` занимают позиции, соответственно, 14, 10, 8. В этих позициях они и остаются в регистре AX, и все они расположены в старшей части регистра — AH.

- Если $b > a$ в нашем случае, то биты `C3/C2/C0` должны быть выставлены так: 0, 0, 0.
- Если $a > b$, то биты будут выставлены: 0, 0, 1.
- Если $a = b$, то биты будут выставлены так: 1, 0, 0.
- Если результат не определен (в случае ошибки), то биты будут выставлены так: 1, 1, 1.

¹²¹Intel P6 это Pentium Pro, Pentium II, и последующие модели

1.19. РАБОТА С FPU

Вот как биты C3/C2/C0 расположены в регистре AX:



Вот как биты C3/C2/C0 расположены в регистре AN:



После исполнения `test ah`, 5¹²² будут учтены только биты C0 и C2 (на позициях 0 и 2), остальные просто проигнорированы.

Теперь немного о *parity flag*¹²³. Ещё один замечательный рудимент эпохи.

Этот флаг выставляется в 1 если количество единиц в последнем результате чётно. И в 0 если нечётно.

Заглянем в Wikipedia¹²⁴:

One common reason to test the parity flag actually has nothing to do with parity. The FPU has four condition flags (C0 to C3), but they cannot be tested directly, and must instead be first copied to the flags register. When this happens, C0 is placed in the carry flag, C2 in the parity flag and C3 in the zero flag. The C2 flag is set when e.g. incomparable floating point values (NaN or unsupported format) are compared with the FUCOM instructions.

Как упоминается в Wikipedia, флаг четности иногда используется в FPU-коде и сейчас мы увидим как.

Флаг PF будет выставлен в 1, если C0 и C2 оба 1 или оба 0. И тогда сработает последующий JP (*jump if PF==1*). Если мы вернемся чуть назад и посмотрим значения C3/C2/C0 для разных вариантов, то увидим, что условный переход JP сработает в двух случаях: если $b > a$ или если $a = b$ (ведь бит C3 перестал учитываться после исполнения `test ah, 5`).

Дальше всё просто. Если условный переход сработал, то FLD загрузит значение `_b` в `ST(0)`, а если не сработал, то загрузится `a` и произойдет выход из функции.

А как же проверка флага C2?

Флаг C2 включается в случае ошибки (NaN, итд.), но наш код его не проверяет.

Если программисту нужно знать, не произошла ли FPU-ошибка, он должен позаботиться об этом дополнительно, добавив соответствующие проверки.

 $^{122}_{5} = 101b$

123 флаг четности

¹²⁴[wikipedia.org/wiki/Parity flag](https://wikipedia.org/wiki/Parity_flag)

Первый пример с OllyDbg: $a=1,2$ и $b=3,4$

Загружаем пример в OllyDbg:

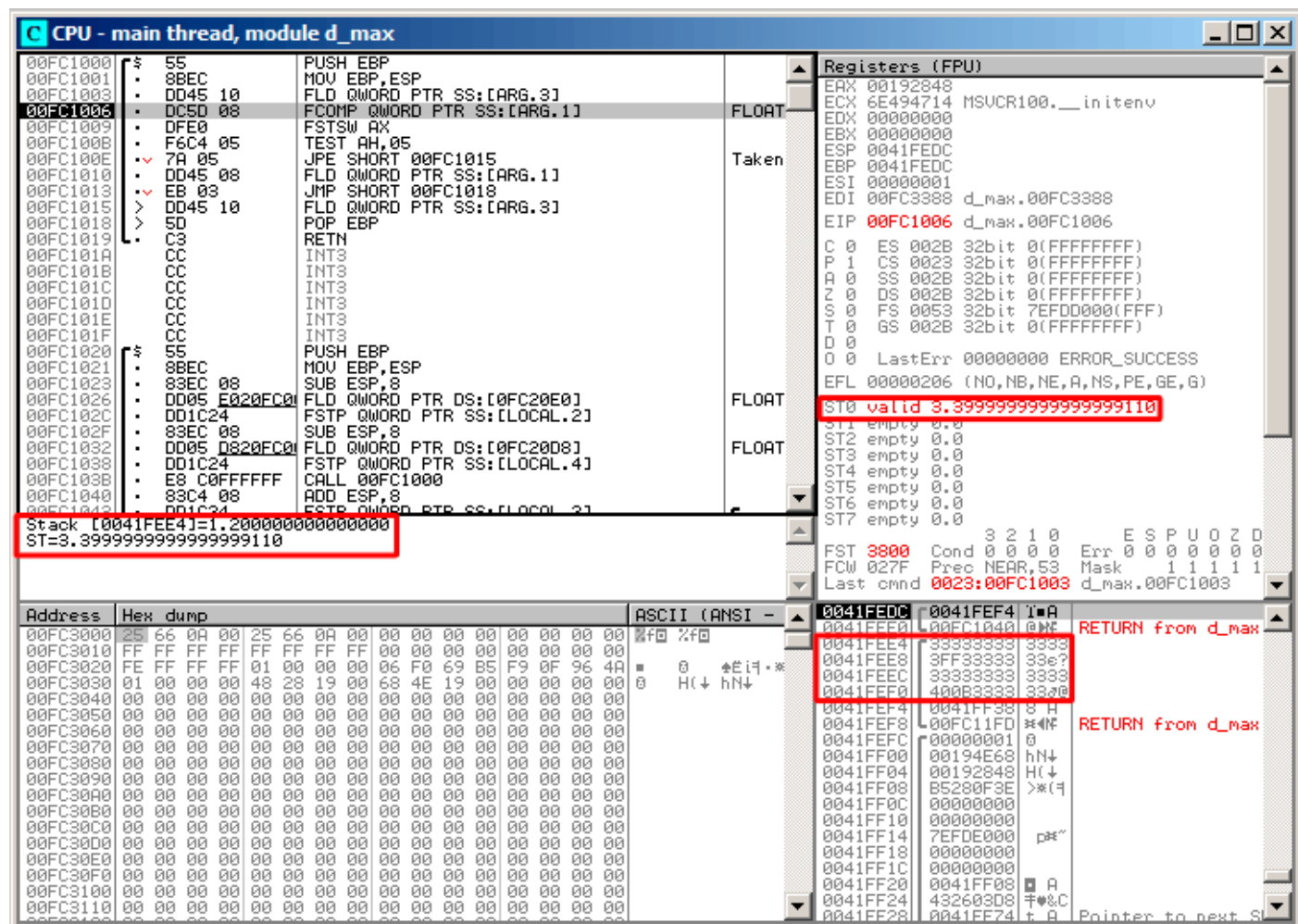


Рис. 1.59: OllyDbg: первая FLD исполнилась

Текущие параметры функции: $a = 1,2$ и $b = 3,4$ (их видно в стеке: 2 пары 32-битных значений). b (3,4) уже загружено в ST(0). Сейчас будет исполняться FCOMP. OllyDbg показывает второй аргумент для FCOMP, который сейчас находится в стеке.

FCOMP отработал:

The screenshot shows the OlyDbg interface with the following components:

- Assembly Window:** Displays instructions at addresses 00FC1000 to 00FC1040. The instruction at 00FC1009 is `FSTSW AX`, which is highlighted in red. The instruction at 00FC100A is `FSTP QWORD PTR DS:[0FC20E0]`, which is also highlighted in red.
- Registers (FPU) Window:** Shows the state of the FPU registers. The condition code (FST 0000) is highlighted in red, indicating a successful comparison. The registers ST0 through ST7 are empty.
- Memory Dump Window:** Shows the memory dump starting at address 00FC3000. The dump is organized into columns for hex, ASCII, and ANSI.

Рис. 1.60: OlyDbg: FCOMP исполнилась

Мы видим состояния condition-флагов **FPU**: все нули. Вытолкнутое значение отображается как ST(7). Почему это так, объяснялось ранее: 1.19.5 (стр. 215).

FNSTSW сработал:

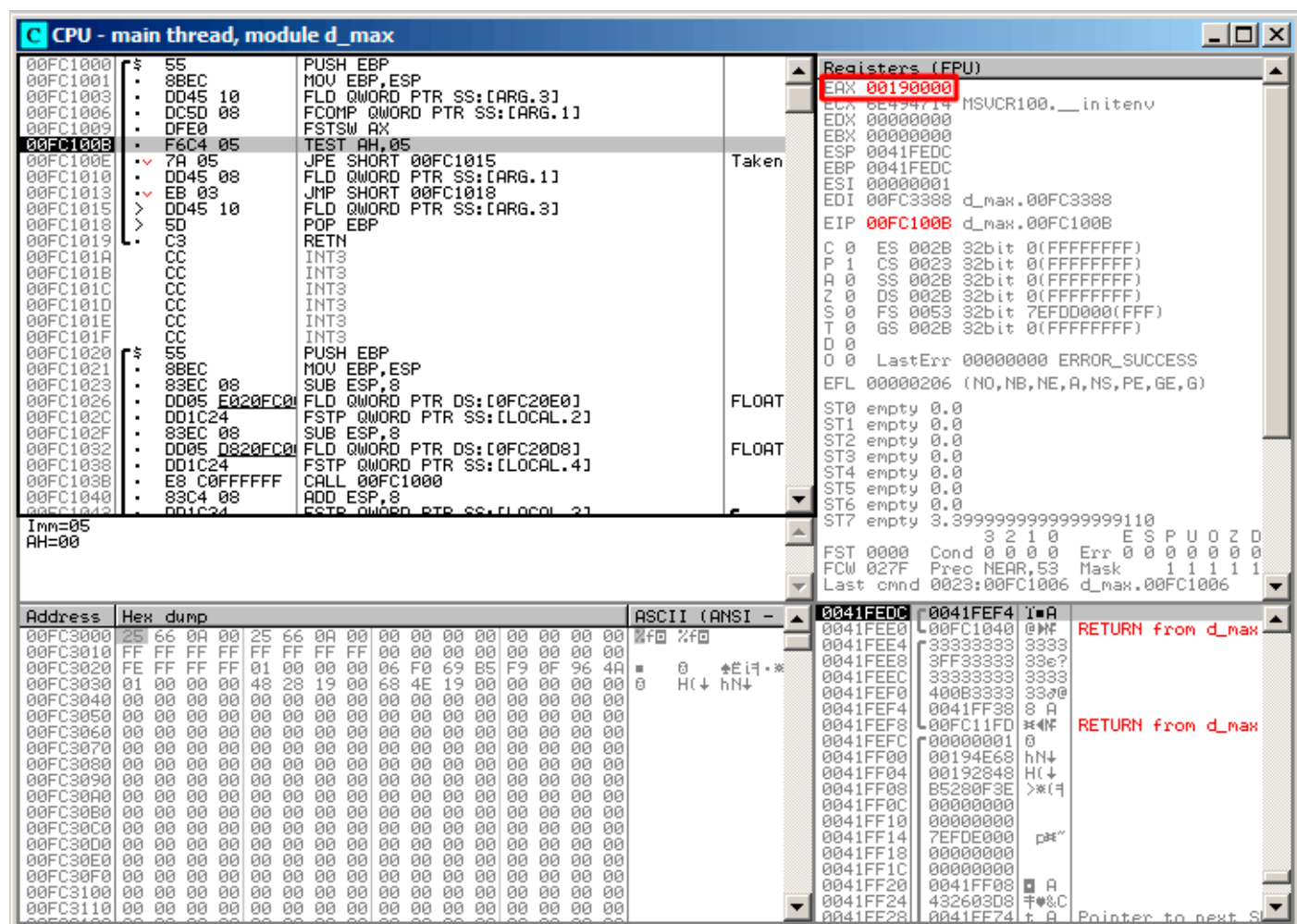


Рис. 1.61: OllyDbg: FNSTSW исполнилась

Видно, что регистр AX содержит нули. Действительно, ведь все condition-флаги тоже содержали нули.

(OllyDbg дизассемблирует команду FNSTSW как FSTSW —это синоним).

TEST сработал:

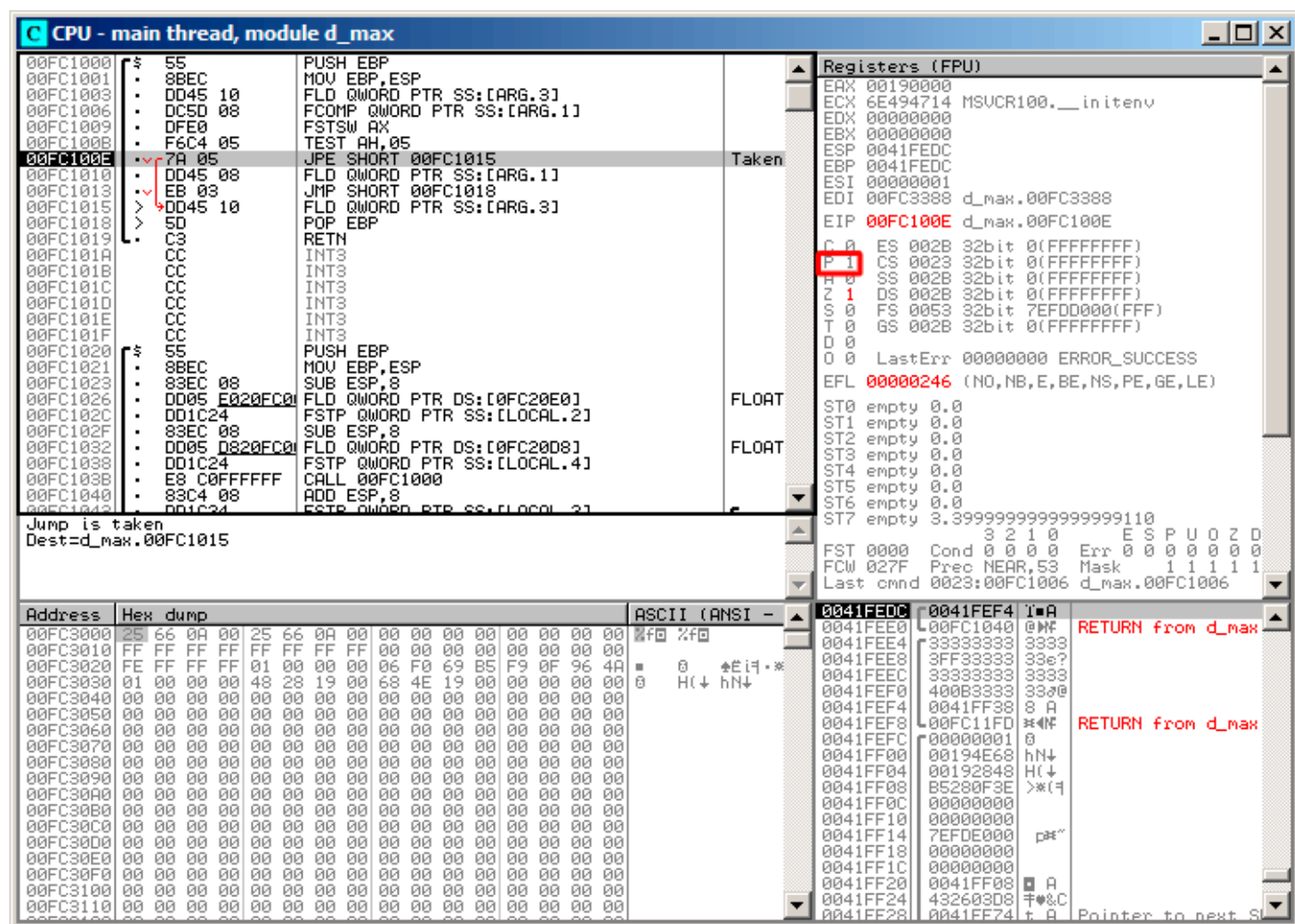


Рис. 1.62: OllyDbg: TEST исполнилась

Флаг PF равен единице. Всё верно: количество выставленных бит в 0 — это 0, а 0 — это четное число.

OllyDbg дизассемблирует JP как [JPE](#)¹²⁵ — это синонимы. И она сейчас работает.

¹²⁵Jump Parity Even (инструкция x86)

JPE сработала, FLD загрузила в ST(0) значение $b(3,4)$:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -)
00FC1000	55	PUSH EBP
00FC1001	8BEC	MOV EBP,ESP
00FC1003	DD45 10	FLD QWORD PTR SS:[ARG.3]
00FC1006	DC5D 08	FCOMP QWORD PTR SS:[ARG.1]
00FC1009	DFF0	FSTSW AX
00FC100B	F6C4 05	TEST AH,05
00FC100E	7A 05	JPE SHORT 00FC1015
00FC1010	DD45 08	FLD QWORD PTR SS:[ARG.1]
00FC1013	EB 03	JMP SHORT 00FC1018
00FC1015	DD45 10	FLD QWORD PTR SS:[ARG.3]
00FC1018	5D	POP EBP
00FC1019	C3	RETN
00FC101A	CC	INT3
00FC101B	CC	INT3
00FC101C	CC	INT3
00FC101D	CC	INT3
00FC101E	CC	INT3
00FC101F	CC	INT3
00FC1020	55	PUSH EBP
00FC1021	8BEC	MOV EBP,ESP
00FC1023	83EC 08	SUB ESP,8
00FC1026	DD05 E020FC0	FLD QWORD PTR DS:[0FC20E0]
00FC102C	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00FC102F	83EC 08	SUB ESP,8
00FC1032	DD05 D820FC0	FLD QWORD PTR DS:[0FC20D8]
00FC1038	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.4]
00FC103B	E8 C0FFFFFF	CALL 00FC1000
00FC1040	83C4 08	ADD ESP,8
00FC1043	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]

Top of stack [0041FEE0]=d_max.00FC1040

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00190000
ECX	6E494714 MSUCR100.__initenv
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0041FEE0
EBP	0041FEF4
ESI	00000001
EDI	00FC3388 d_max.00FC3388
EIP	00FC1019 d_max.00FC1019
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 1	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000246 (NO,NB,E,BE,NS,PE,GE,LE)
ST0	valid 3.3999999999999999110
ST1	empty 0.0
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0

Stack

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -)
0041FEE0	33333333 3333	
0041FEE4	33333333 3333	
0041FEE8	33333333 3333	
0041FEEC	33333333 3333	
0041FEF0	400B3333 3333	
0041FEF4	0041FF38 8 A	
0041FEF8	00FC11FD 8 A	
0041FEFC	00000001 0	
0041FFF0	00194E68 hN↓	
0041FFF4	00192848 H(↓	
0041FFF8	B5280F3E >*(↓	
0041FFF0C	00000000	
0041FFF10	00000000	
0041FFF14	7EFDE000 p&"	
0041FFF18	00000000	
0041FFF1C	00000000	
0041FFF20	0041FF08 A	
0041FFF24	43260308 40%C	
0041FFF28	0041FF74 t A	
0041FFF2C	00FC1649 I.N	

RETURN from d_max

Рис. 1.63: OllyDbg: вторая FLD исполнилась

Функция заканчивает свою работу.

Второй пример с OllyDbg: $a=5,6$ и $b=-1$

Загружаем пример в OllyDbg:

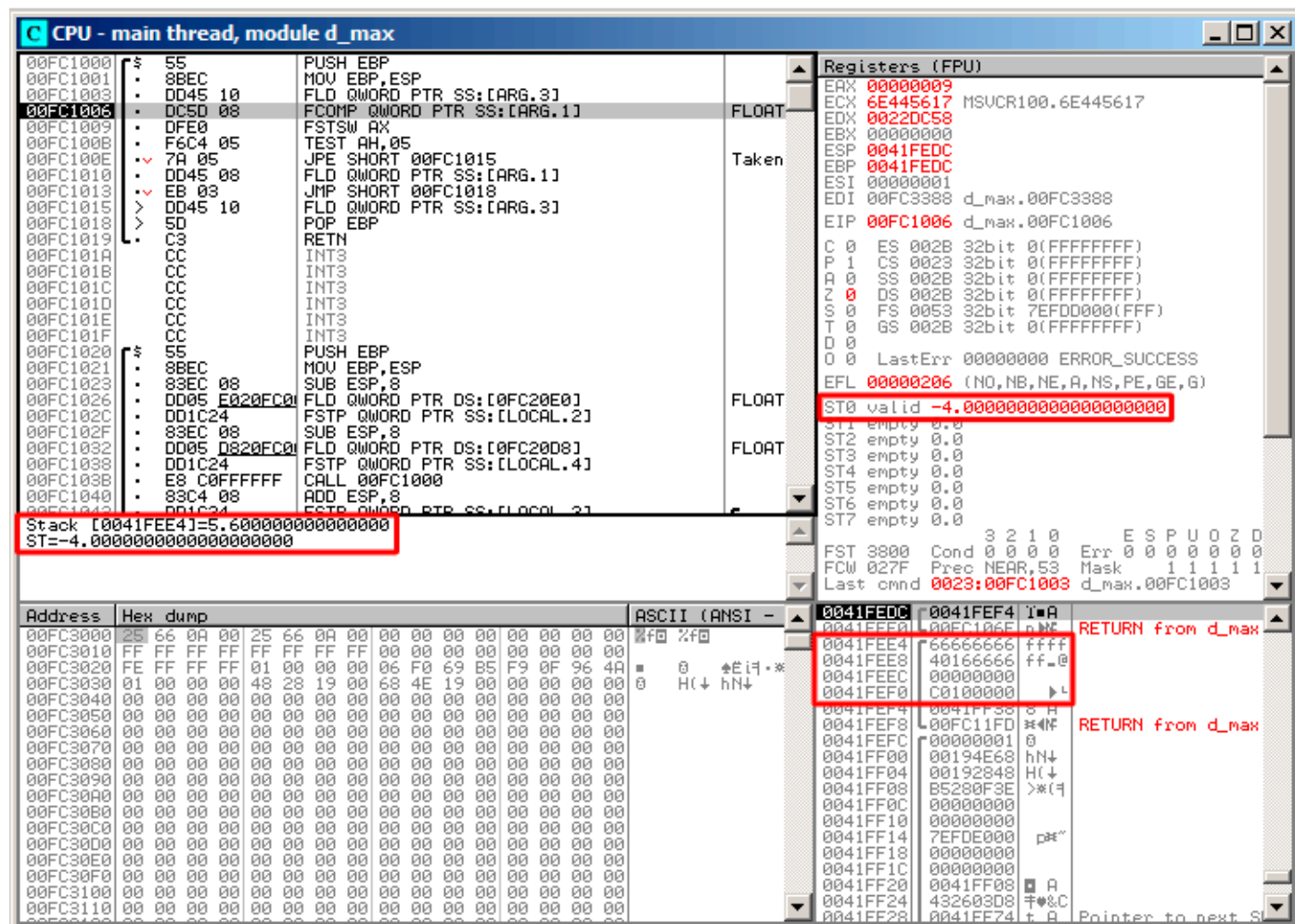


Рис. 1.64: OllyDbg: первая FLD исполнилась

Текущие параметры функции: $a = 5,6$ и $b = -4$. b (-4) уже загружено в **ST(0)**. Сейчас будет исполняться **FCOMP**. OllyDbg показывает второй аргумент **FCOMP**, который сейчас находится в стеке.

FCOMP отработал:

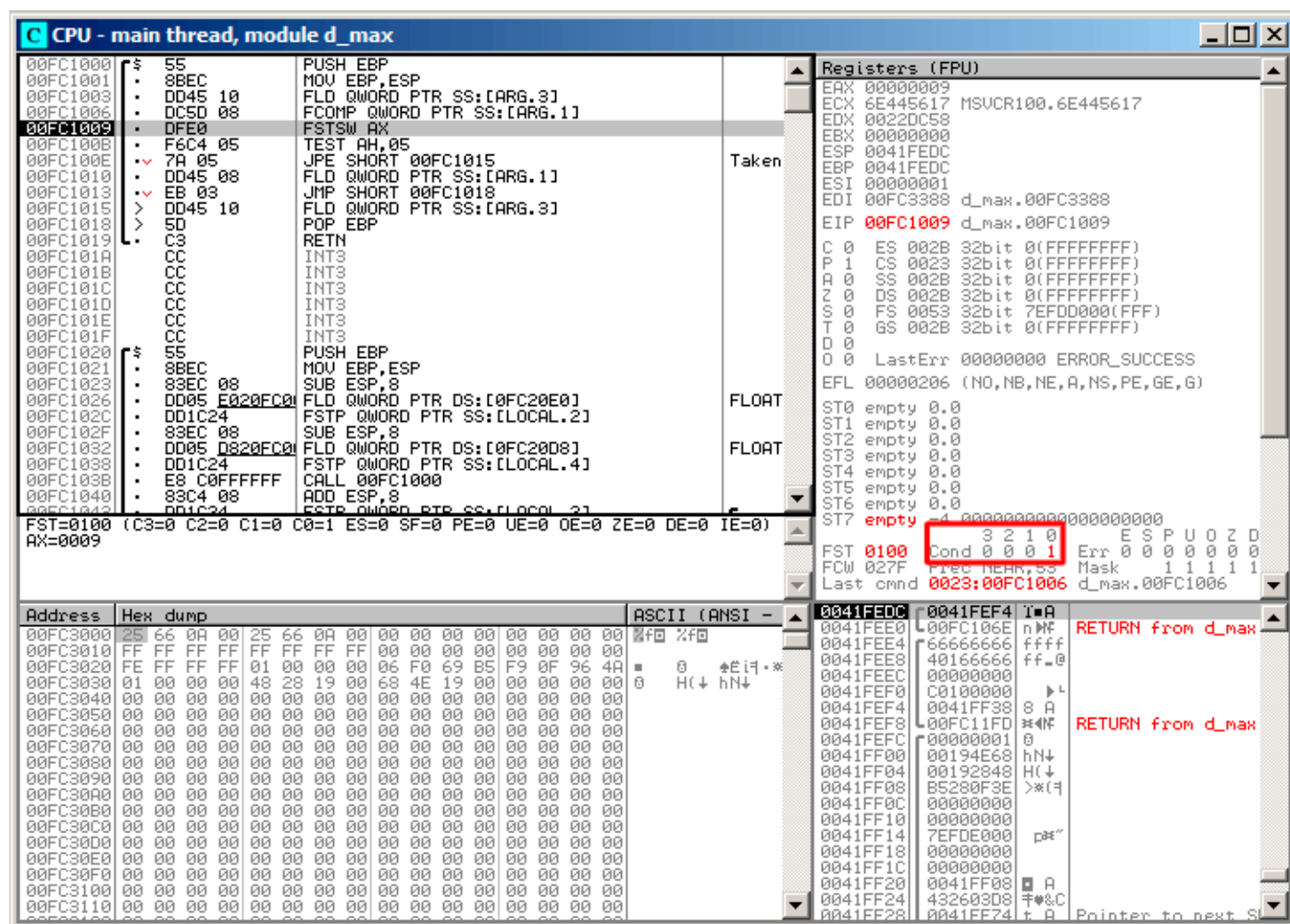


Рис. 1.65: OlyDbg: FCOMP исполнилась

Мы видим значения condition-флагов FPU: все нули, кроме C0.

FNSTSW сработал:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00FC3000	25 66 0A 00 25 66 0A 00 00 00 00 00 00 00 00 00	%f0 %f0
00FC3010	FF FF FF FF FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00	0 0 0 0 0 0 0 0
00FC3020	FE FF FF FF 01 00 00 00 06 F0 69 B5 F9 0F 96 4A	0 H(↓ hN↓
00FC3030	01 00 00 00 48 28 19 00 68 4E 19 00 00 00 00 00	
00FC3040	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3050	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30E0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC30F0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3100	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00FC3110	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00000100
ECX	0E443517 MSUCR100.6E445617
EDX	0022DC58
EBX	00000000
ESP	0041FEDC
EBP	0041FEDC
ESI	00000001
EDI	00FC3388 d_max.00FC3388
EIP	00FC100B d_max.00FC100B
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	0000206 (NO,NB,NE,A,NS,PE,GE,G)
ST0	empty 0.0
ST1	empty 0.0
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty -4.00000000000000000000000000000000
FST 0100	Cond 0 0 0 1 Err 0 0 0 0 0 0
FCW 027F	Prec NEAR,53 Mask 1 1 1 1
Last cmd	0023:00FC1006 d_max.00FC1006

Stack

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
0041FEE0	00FC106E nMF	
0041FEE4	66666666 ffff	
0041FEE8	40166666 ff_0	
0041FEEC	00000000	
0041FEF0	C0100000	
0041FEF4	0041FF38 8 A	
0041FEF8	00FC11FD 8 A	
0041FEFC	00000001 0	
0041FF00	00194E68 hN↓	
0041FF04	00192848 H(↓	
0041FF08	B5280F3E >*(↓	
0041FF0C	00000000	
0041FF10	00000000	
0041FF14	7EFDE000 p#"	
0041FF18	00000000	
0041FF1C	00000000	
0041FF20	0041FF08 0 A	
0041FF24	432603D8 70&C	
0041FF28	0041FE74 t A	Pointer to next S

Рис. 1.66: OllyDbg: FNSTSW исполнилась

Видно, что регистр AX содержит 0x100: флаг C0 стал на место 8-го бита.

TEST сработал:

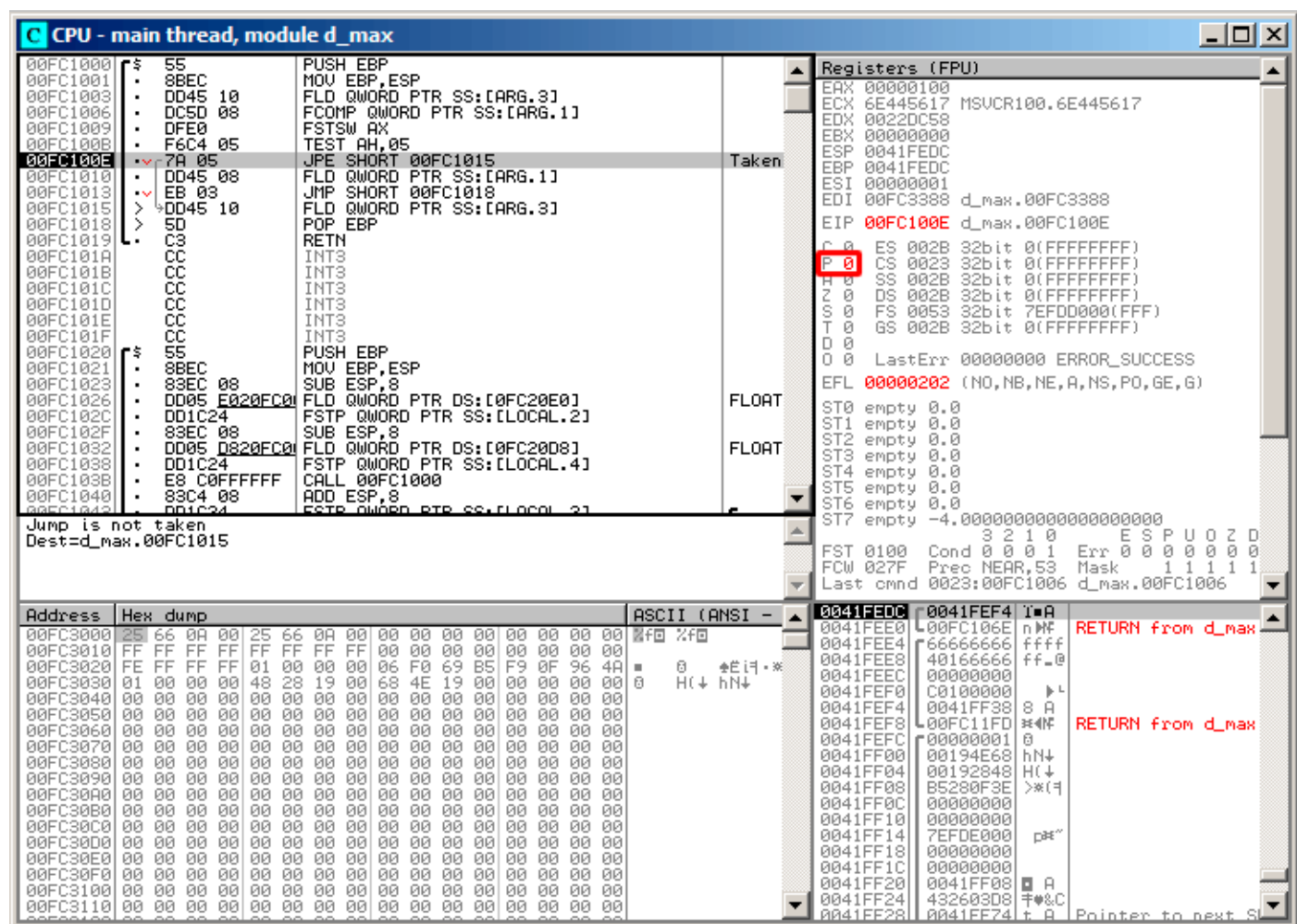


Рис. 1.67: OllyDbg: TEST исполнилась

Флаг PF равен нулю. Всё верно: количество единичных бит в 0x100 — 1, а 1 — нечетное число.

`JPE` сейчас не работает.

JPE не сработала, FLD загрузила в ST(0) значение *a* (5,6):

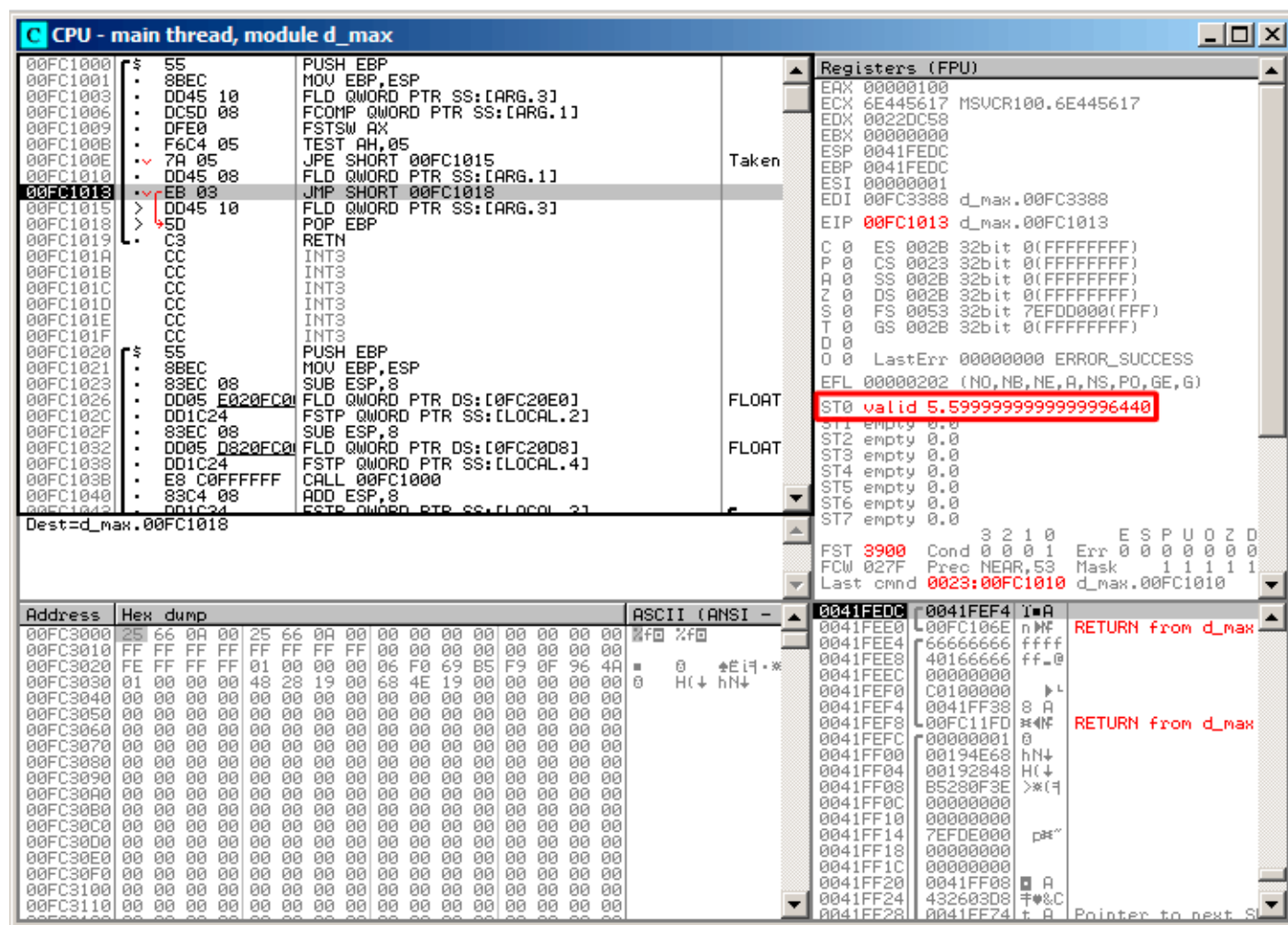


Рис. 1.68: OllyDbg: вторая FLD исполнилась

Функция заканчивает свою работу.

Оптимизирующий MSVC 2010

Листинг 1.207: Оптимизирующий MSVC 2010

```

_a$ = 8 ; size = 8
_b$ = 16 ; size = 8
_d_max PROC
    fld     QWORD PTR _b$[esp-4]
    fld     QWORD PTR _a$[esp-4]

; состояние стека сейчас: ST(0) = _a, ST(1) = _b

    fcom    ST(1) ; сравнить _a и ST(1) = (_b)
    fnstsw  ax
    test    ah, 65 ; 00000041H
    jne     SHORT $LN5@d_max
; копировать содержимое ST(0) в ST(1) и вытолкнуть значение из стека,
; оставив _a на вершине
    fstp    ST(1)

; состояние стека сейчас: ST(0) = _a

    ret     0
$LN5@d_max:
; копировать содержимое ST(0) в ST(0) и вытолкнуть значение из стека,

```

1.19. РАБОТА С FPU

```
; оставив _b на вершине
fstp    ST(0)

; состояние стека сейчас: ST(0) = _b

ret     0
_d_max ENDP
```

FCOM отличается от FCOMP тем, что просто сравнивает значения и оставляет стек в том же состоянии. В отличие от предыдущего примера, операнды здесь в обратном порядке. Поэтому и результат сравнения в C3/C2/C0 будет отличаться:

- Если $a > b$, то биты C3/C2/C0 должны быть выставлены так: 0, 0, 0.
- Если $b > a$, то биты будут выставлены так: 0, 0, 1.
- Если $a = b$, то биты будут выставлены так: 1, 0, 0.

Инструкция `test ah, 65` как бы оставляет только два бита — C3 и C0. Они оба будут нулями, если $a > b$: в таком случае переход JNE не сработает. Далее имеется инструкция `FSTP ST(1)` — эта инструкция копирует значение ST(0) в указанный операнд и выдергивает одно значение из стека. В данном случае, она копирует ST(0) (где сейчас лежит `_a`) в ST(1). После этого на вершине стека два раза лежит `_a`. Затем одно значение выдергивается. После этого в ST(0) остается `_a` и функция завершается.

Условный переход JNE сработает в двух других случаях: если $b > a$ или $a = b$. ST(0) скопируется в ST(0) (как бы холостая операция). Затем одно значение из стека вылетит и на вершине стека останется то, что до этого лежало в ST(1) (то есть `_b`). И функция завершится. Эта инструкция используется здесь видимо потому что в FPU нет другой инструкции, которая просто выдергивает значение из стека и выбрасывает его.

[illegible]

Рис. 1.69: OllyDbg: обе FLD исполнились

Сейчас будет исполняться FC0M: OllyDbg показывает содержимое ST(0) и ST(1) для удобства.

FCOM работала:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -)
00A91000	DD 44 24 0C	
00A91004	DD 44 24 04	
00A91008	D8 D1	
00A9100A	DF E0	
00A9100C	F6 C4 41	
00A9100F	75 03	
00A91011	DD D9	
00A91013	C3	
00A91014	DD D8	
00A91016	C3	
00A91017	CC	
00A91018	CC	
00A91019	CC	
00A9101A	CC	
00A9101B	CC	
00A9101C	CC	
00A9101D	CC	
00A9101E	CC	
00A9101F	CC	
00A91020	DD 05 E0 20 A9 00	
00A91026	56	
00A91027	83 EC 10	
00A9102A	DD 5C 24 08	
00A9102E	DD 05 D8 20 A9 00	
00A91034	DD 1C 24	
00A91037	E8 C4 FFFF FF	
00A9103C	8B 35 00 20 A9 00	
00A91042	DD 5C 24 08	
00A91046	83 C4 08	

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00582848
ECX	6E494714 ASCII "H(X"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0021FC60
EBP	0021FCB8
ESI	00000001
EDI	00A93388 d_max.00A93388
EIP	00A9100A d_max.00A9100A
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 0	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
O 0	
LastErr	00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000202 (NO,NB,NE,A,NS,PO,GE,G)
ST0 valid	1.1999999999999999560
ST1 valid	3.3999999999999999110
ST2 empty	0.0
ST3 empty	0.0
ST4 empty	0.0
ST5 empty	0.0
ST6 empty	0.0
ST7 empty	0.0

FST 3100 (C3=0 C2=0 C1=0 C0=1 ES=0 SF=0 PE=0 UE=0 OE=0 ZE=0 DE=0 IE=0)

AX=2848

Cond 0 0 0 1

Mask 1 1 1 1

Last cmd 0023:00A91008 d_max.00A91008

0021FC60 00A9103C < > RETURN from d_max

0021FC64 33333333 3333

0021FC68 3FF33333 33e?

0021FC6C 33333333 3333

0021FC70 400B3333 333e

0021FC74 00000001 0

0021FC78 00A911ED 3333

0021FC7C 00000001 0

0021FC80 00584E68 hNX

0021FC84 00582848 H(X

0021FC88 B816C583 7+7

0021FC8C 00000000

0021FC90 00000000

0021FC94 7EFDE000 p8"

0021FC98 00000000

0021FC9C 00000000

0021FCA0 0021FC88 1111

0021FCA4 6F0794F8 0000

0021FCA8 0021FCF4 1111

0021FCAC 00A91639 9..a

Pointer to next SF handler

Рис. 1.70: OllyDbg: FCOM исполнилась

C0 установлен, остальные флаги сброшены.

FNSTSW сработала, AX=0x3100:



TEST сработала:

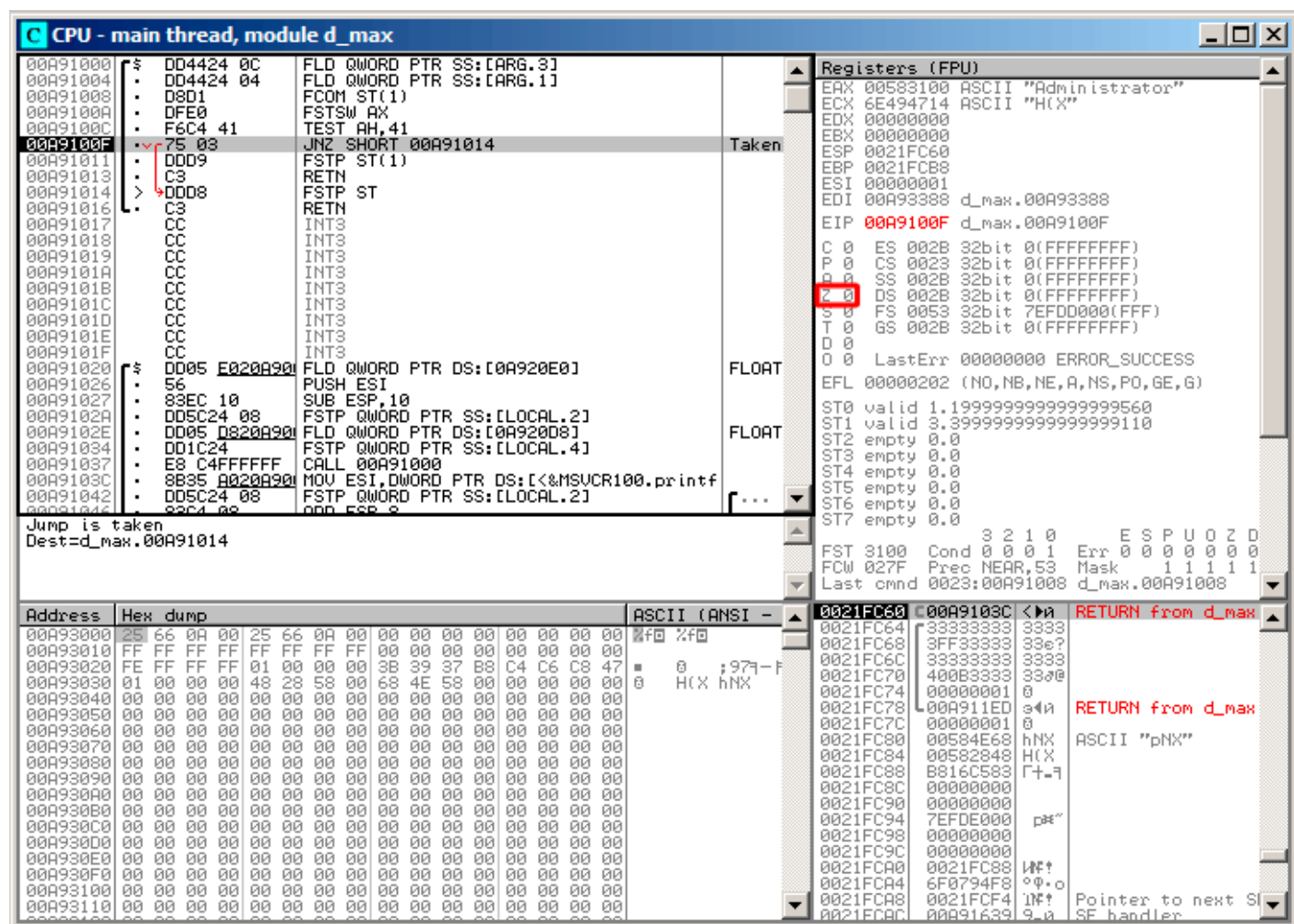


Рис. 1.72: OllyDbg: TEST исполнилась

ZF=0, переход сейчас произойдет.

FSTP ST (или FSTP ST(0)) сработала — 1,2 было вытолкнуто из стека, и на вершине осталось 3,4:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
00A91000	DD 44 24 0C	FLO QWORD PTR SS:[ARG.3]
00A91004	DD 44 24 04	FLO QWORD PTR SS:[ARG.1]
00A91008	D8 D1	FCOM ST(1)
00A9100A	DF E0	FSTSW AX
00A9100C	F6 C4 41	TEST AH, 41
00A9100F	75 03	JNZ SHORT 00A91014
00A91011	DD D9	FSTP ST(1)
00A91013	C3	RETN
00A91014	DD D8	FSTP ST
00A91016	C3	RETN
00A91017	CC	INT3
00A91018	CC	INT3
00A91019	CC	INT3
00A9101A	CC	INT3
00A9101B	CC	INT3
00A9101C	CC	INT3
00A9101D	CC	INT3
00A9101E	CC	INT3
00A9101F	CC	INT3
00A91020	DD 05 E0 20 A9 00	FLO QWORD PTR DS:[0A920E0]
00A91026	56	PUSH ESI
00A91027	83 EC 10	SUB ESP, 10
00A9102A	DD 5C 24 08	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00A9102E	DD 05 D8 20 A9 00	FLO QWORD PTR DS:[0A920D8]
00A91034	DD 1C 24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.4]
00A91037	E8 C4 FFFF FF	CALL 00A91000
00A9103C	8B 35 00 20 A9 00	MOV ESI, DWORD PTR DS:[<&MSVCRT00.printf
00A91042	DD 5C 24 08	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00A91046	83 C4 08	ADD ESP, 8

Top of stack [0021FC60]=d_max.00A9103C

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00583100 ASCII "Administrator"
ECX	6E494714 ASCII "H(X"
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0021FC60
EBP	0021FCB8
ESI	00000001
EDI	00A93388 d_max.00A93388
EIP	00A91016 d_max.00A91016
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 0	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000202 (NO, NB, NE, A, NS, PO, GE, G)
ST0	valid 3.3999999999999999110
ST1	empty 0.0
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 1.1999999999999999560
FST	3900 Cond 0 0 0 1 Err 0 0 0 0 0
FCW	027F Prec NEAR, 53 Mask 1 1 1 1 1
Last cmd	0023:00A91014 d_max.00A91014

Stack

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
00A93000	66 0A 00 25 66 0A 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	%f0 %f0
00A93010	FF FF FF FF FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93020	FE FF FF FF 01 00 00 00 3B 39 37 B8 C4 C6 C8 47	0 ;979-F
00A93030	01 00 00 00 48 28 58 00 68 4E 58 00 00 00 00 00	0 H(X hNX
00A93040	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93050	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930E0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A930F0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93100	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
00A93110	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

Stack (continued)

Address	Hex dump	ASCII (ANSI -
0021FC60	00A9103C	RETURN from d_max
0021FC64	33 33 33 33 33 33 33 33	
0021FC68	3F F3 33 33 33 33 33 33	
0021FC6C	33 33 33 33 33 33 33 33	
0021FC70	40 0B 33 33 33 33 33 33	
0021FC74	00 00 00 00 00 00 00 00	
0021FC78	00A911ED	RETURN from d_max
0021FC7C	00 00 00 00 00 00 00 00	
0021FC80	00 58 4E 68 hNX	ASCII "pNX"
0021FC84	00 58 28 48 H(X	
0021FC88	B8 16 C5 83 [+9	
0021FC8C	00 00 00 00	
0021FC90	00 00 00 00	
0021FC94	7E FDE 00 00	
0021FC98	00 00 00 00	
0021FC9C	00 00 00 00	
0021FCA0	00 21 FC 88	Wf?
0021FCA4	6F 07 94 F8	oP.o
0021FCA8	00 21 FC F4	Wf?
0021FCAC	00A91639	Pointer to next SE handler

Рис. 1.73: OllyDbg: FSTP исполнилась

Видно, что инструкция FSTP ST работает просто как выталкивание одного значения из FPU-стека.

Второй пример с OllyDbg: a=5,6 и b=-4

Обе FLD отработали:

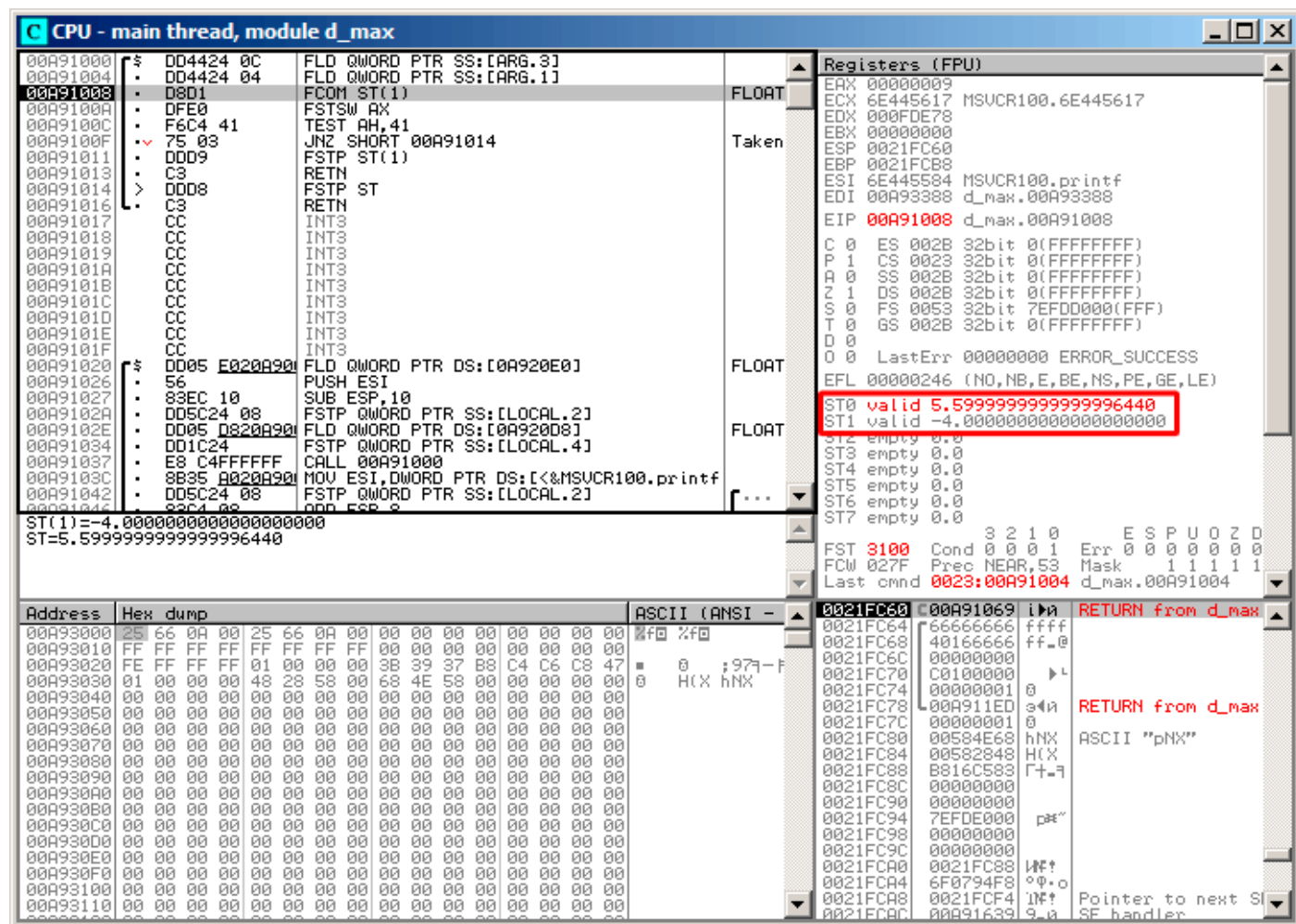


Рис. 1.74: OllyDbg: обе FLD исполнились

Сейчас будет выполняться FCOM.

FCOM сработала:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00A91000	DD 44 24 0C	F
00A91004	DD 44 24 04	F
00A91008	D8 D1	F
00A9100A	DF E0	F
00A9100C	F6 C4 41	T
00A9100F	75 03	J
00A91011	DD D9	F
00A91013	C3	R
00A91014	DD D8	F
00A91016	C3	R
00A91017	CC	I
00A91018	CC	I
00A91019	CC	I
00A9101A	CC	I
00A9101B	CC	I
00A9101C	CC	I
00A9101D	CC	I
00A9101E	CC	I
00A9101F	CC	I
00A91020	DD 05 E0 20 A9 00	F
00A91026	56	P
00A91027	83 EC 10	S
00A9102A	DD 5C 24 08	F
00A9102E	DD 05 D8 20 A9 00	F
00A91034	DD 1C 24	F
00A91037	E8 C4 FFFF F	C
00A9103C	8B 35 00 20 A9 00	M
00A91042	DD 5C 24 08	F
00A91046	83 C4 08	S

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00000009
ECX	6E445617 MSUCR100.6E445617
EDX	000FDE78
EBX	00000000
ESP	0021FC60
EBP	0021FCB8
ESI	6E445584 MSUCR100.printf
EDI	00A93388 d_max.00A93388
EIP	00A9100A d_max.00A9100A
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 1	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFDD000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
O 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000246 (NO,NB,E,BE,NS,PE,GE,LE)
ST0	valid 5.5999999999999996440
ST1	valid -4.00000000000000000000
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0

FST 3000 (C3=0 C2=0 C1=0 C0=0 ES=0 SF=0 PE=0 UE=0 OE=0 ZE=0 DE=0 IE=0)

AX=0009

0021FC60 00A91069 i>> RETURN from d_max

0021FC64 66666666 ffff

0021FC68 40166666 ff..

0021FC6C 00000000

0021FC70 C0100000

0021FC74 00000001

0021FC78 00A911ED

0021FC7C 00000001

0021FC80 00584E68 hNX

0021FC84 00582848 H(X

0021FC88 B816C583 T+..

0021FC8C 00000000

0021FC90 00000000

0021FC94 7EFDE000

0021FC98 00000000

0021FC9C 00000000

0021FCA0 0021FC88

0021FCA4 6F0794F8

0021FCA8 0021FCF4

0021FCAC 00A91639

Рис. 1.75: OllyDbg: FCOM исполнилась

Все condition-флаги сброшены.

FNSTSW сработала, AX=0x3000:



1.19. РАБОТА С FPU

TEST сработала:

CPU - main thread, module d_max

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00A91000	DD4424 0C	FLD QWORD PTR SS:[ARG.3]
00A91004	DD4424 04	FLD QWORD PTR SS:[ARG.1]
00A91008	D8D1	FCOM ST(1)
00A9100A	DFF0	FSTSW AX
00A9100C	F6C4 41	TEST AH,41
00A9100F	75 03	JNZ SHORT 00A91014
00A91011	DD09	FSTP ST(1)
00A91013	C3	RETN
00A91014	DD08	FSTP ST
00A91016	C3	RETN
00A91017	CC	INT3
00A91018	CC	INT3
00A91019	CC	INT3
00A9101A	CC	INT3
00A9101B	CC	INT3
00A9101C	CC	INT3
00A9101D	CC	INT3
00A9101E	CC	INT3
00A9101F	CC	INT3
00A91020	DD05 E020A900	FLD QWORD PTR DS:[0A920E0]
00A91022	56	PUSH ESI
00A91023	83EC 10	SUB ESP,10
00A91024	DD5C24 08	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00A91026	DD05 D820A900	FLD QWORD PTR DS:[0A920D8]
00A91028	DD1C24	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.4]
00A91029	E8 C4FFFFFF	CALL 00A91000
00A9102A	8B35 0020A900	MOV ESI,DWORD PTR DS:[&MSUCR100.printf
00A9102B	DD5C24 08	FSTP QWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00A9102C	83C4 08	SUB ESP,8

Jump is not taken
Dest=0A91014

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00003000
ECX	6E445617 MSUCR100.6E445617
EDX	000FDE78
EBX	00000000
ESP	0021FC60
EBP	0021FCB8
ESI	6E445617 MSUCR100.printf
EDI	00A93388 d_max.00A93388
EIP	00A9100F d_max.00A9100F
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 1	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
Q 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 1	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
D 0	
0 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000246 (NO,NB,E,BE,NS,PE,GE,LE)
ST0	valid 5.5999999999999996440
ST1	valid -4.00000000000000000000
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0

Registers (CPU)

Register	Value
FST	3000 Cond 0 0 0 0 Err 0 0 0 0 0 0
FCW	027F Prec NEAR,53 Mask 1 1 1 1
Last cmd	0023:00A91008 d_max.00A91008

Registers (FPU) - 0021FC60

Register	Value
0021FC64	66666666 ffff
0021FC68	40166666 ff_0
0021FC6C	00000000
0021FC70	C0100000
0021FC74	00000001 0
0021FC78	00A911ED 0
0021FC7C	00000001 0
0021FC80	00584E68 hNX
0021FC84	00582848 H(X
0021FC88	B816C583 T_7
0021FC8C	00000000
0021FC90	00000000
0021FC94	7EFD0000 p#"
0021FC98	00000000
0021FC9C	00000000
0021FCA0	0021FC88 INF?
0021FCA4	6F0794F8 00.0
0021FCA8	0021FCF4 INF? Pointer to next SI
0021FCAC	00A91639 9_0 SE handler

Рис. 1.77: OllyDbg: TEST исполнилась

ZF=1, переход сейчас не произойдет.

FSTP ST(1) сработала: на вершине FPU-стека осталось значение 5,6.

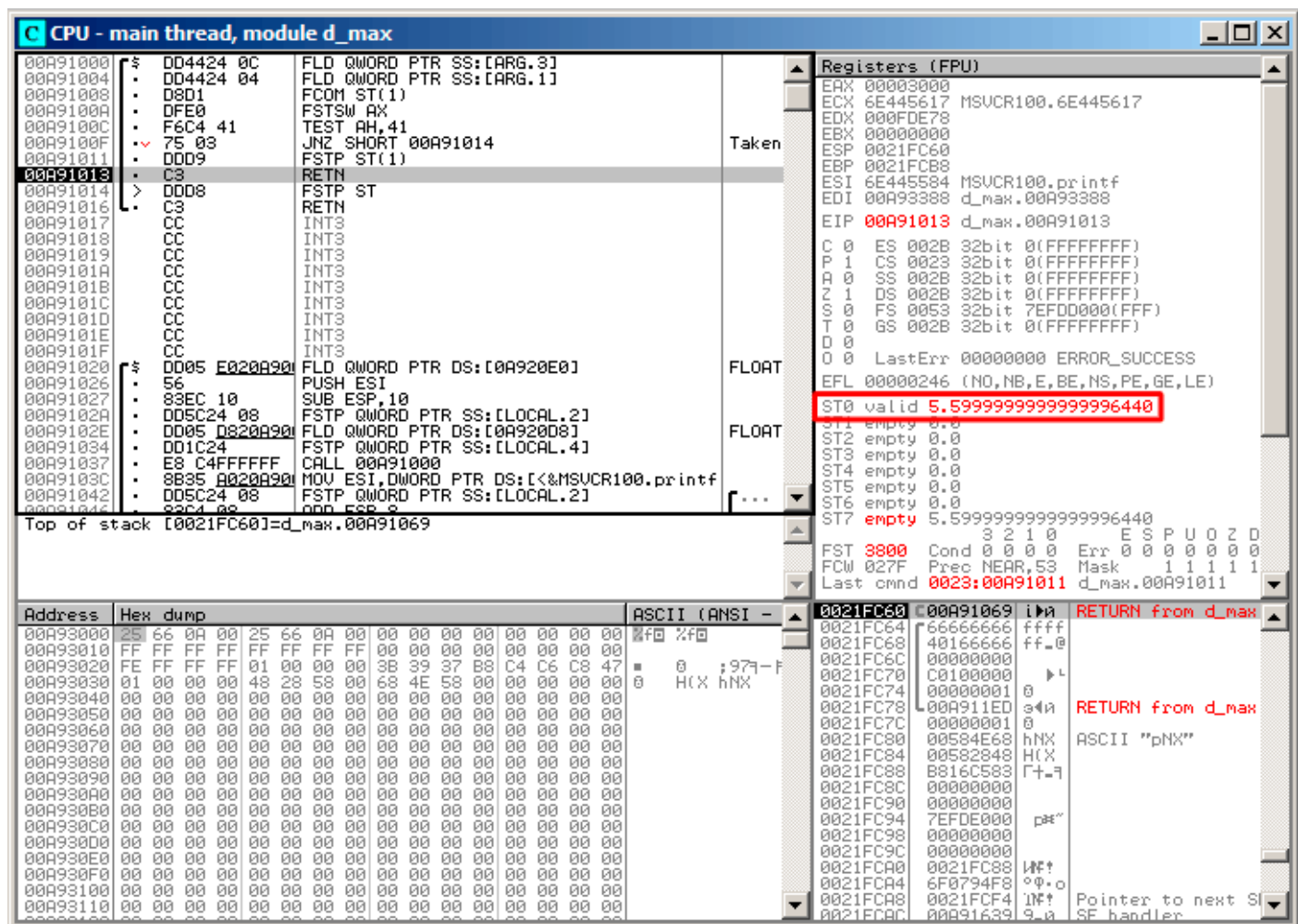


Рис. 1.78: OllyDbg: FSTP исполнилась

Видно, что инструкция FSTP ST(1) работает так: оставляет значение на вершине стека, но обнуляет регистр ST(1).

GCC 4.4.1

Листинг 1.208: GCC 4.4.1

```
d_max proc near
b          = qword ptr -10h
a          = qword ptr -8
a_first_half = dword ptr 8
a_second_half = dword ptr 0Ch
b_first_half = dword ptr 10h
b_second_half = dword ptr 14h

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 10h

; переложим a и b в локальный стек:

    mov     eax, [ebp+a_first_half]
    mov     dword ptr [ebp+a], eax
    mov     eax, [ebp+a_second_half]
    mov     dword ptr [ebp+a+4], eax
    mov     eax, [ebp+b_first_half]
```

1.19. РАБОТА С FPU

```

mov     dword ptr [ebp+b], eax
mov     eax, [ebp+b_second_half]
mov     dword ptr [ebp+b+4], eax

; загружаем а и b в стек FPU:

fld     [ebp+a]
fld     [ebp+b]

; текущее состояние стека: ST(0) – b; ST(1) – а

fxch    st(1) ; эта инструкция меняет ST(1) и ST(0) местами

; текущее состояние стека: ST(0) – а; ST(1) – b

fucmprr ; сравнить а и b и выдернуть из стека два значения, т.е. а и b
fnstsw  ax ; записать статус FPU в AX
sahf    ; загрузить состояние флагов SF, ZF, AF, PF, и CF из AH
setnbe  al ; записать 1 в AL, если CF=0 и ZF=0
test    al, al ; AL==0 ?
jz      short loc_8048453 ; да
fld     [ebp+a]
jmp     short locret_8048456

loc_8048453:
fld     [ebp+b]

locret_8048456:
leave
retn
d_max endp

```

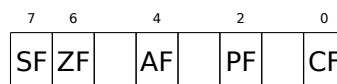
FUCOMPP — это почти то же что и FCOM, только выкидывает из стека оба значения после сравнения, а также несколько иначе реагирует на «не-числа».

Немного о не-числах.

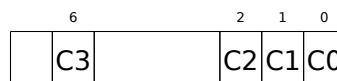
FPU умеет работать со специальными переменными, которые числами не являются и называются «не числа» или NaN¹²⁶. Это бесконечность, результат деления на ноль, и так далее. Нечисла бывают «тихие» и «сигнализирующие». С первыми можно продолжать работать и далее, а вот если вы попытаетесь совершить какую-то операцию с сигнализирующим нечислом, то сработает исключение.

Так вот, FCOM вызовет исключение если любой из операндов какое-либо нечисло. FUCOM же вызовет исключение только если один из операндов именно «сигнализирующее нечисло».

Далее мы видим SAHF (*Store AH into Flags*) — это довольно редкая инструкция в коде, не использующим FPU. 8 бит из AH перекладываются в младшие 8 бит регистра статуса процессора в таком порядке:



Вспомним, что FNSTSW перегружает интересующие нас биты C3/C2/C0 в AH, и соответственно они будут в позициях 6, 2, 0 в регистре AH:



Иными словами, пара инструкций fnstsw ax / sahf перекладывает биты C3/C2/C0 в флаги ZF, PF, CF.

Теперь снова вспомним, какие значения бит C3/C2/C0 будут при каких результатах сравнения:

- Если a больше b в нашем случае, то биты C3/C2/C0 должны быть выставлены так: 0, 0, 0.
- Если a меньше b , то биты будут выставлены так: 0, 0, 1.
- Если $a = b$, то так: 1, 0, 0.

Иными словами, после трех инструкций FUCOMPP/FNSTSW/SAHF возможны такие состояния флагов:

¹²⁶ru.wikipedia.org/wiki/NaN

1.19. РАБОТА С FPU

- Если $a > b$ в нашем случае, то флаги будут выставлены так: ZF=0, PF=0, CF=0.
- Если $a < b$, то флаги будут выставлены так: ZF=0, PF=0, CF=1.
- Если $a = b$, то так: ZF=1, PF=0, CF=0.

Инструкция SETNBE выставит в AL единицу или ноль в зависимости от флагов и условий. Это почти аналог JNBE, за тем лишь исключением, что SETcc¹²⁷ выставляет 1 или 0 в AL, а Jcc делает переход или нет. SETNBE запишет 1 только если CF=0 и ZF=0. Если это не так, то запишет 0 в AL.

CF будет 0 и ZF будет 0 одновременно только в одном случае: если $a > b$.

Тогда в AL будет записана 1, последующий условный переход JZ выполнен не будет и функция вернет `_a`. В остальных случаях, функция вернет `_b`.

Оптимизирующий GCC 4.4.1

Листинг 1.209: Оптимизирующий GCC 4.4.1

```
public d_max
proc near
d_max
arg_0      = qword ptr 8
arg_8      = qword ptr 10h

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        fld     [ebp+arg_0] ; _a
        fld     [ebp+arg_8] ; _b

; состояние стека сейчас: ST(0) = _b, ST(1) = _a
        fxch    st(1)

; состояние стека сейчас: ST(0) = _a, ST(1) = _b
        fucom   st(1) ; сравнить _a и _b
        fnstsw  ax
        sahf
        ja      short loc_8048448

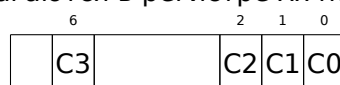
; записать ST(0) в ST(0) (холостая операция),
; выкинуть значение лежащее на вершине стека,
; оставить _b на вершине стека
        fstp    st
        jmp     short loc_804844A

loc_8048448:
; записать _a в ST(1), выкинуть значение лежащее на вершине стека, оставить _a на вершине стека
        fstp    st(1)

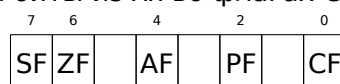
loc_804844A:
        pop     ebp
        retn
d_max
endp
```

Почти всё что здесь есть, уже описано мною, кроме одного: использование JA после SAHF. Действительно, инструкции условных переходов «больше», «меньше» и «равно» для сравнения беззнаковых чисел (а это JA, JAE, JB, JBE, JE/JZ, JNA, JNAE, JNB, JNBE, JNE/JNZ) проверяют только флаги CF и ZF.

Вспомним, как биты C3/C2/C0 располагаются в регистре AH после исполнения FSTSW/FNSTSW:



Вспомним также, как располагаются биты из AH во флагах CPU после исполнения SAHF:



¹²⁷cc это *condition code*

1.19. РАБОТА С FPU

Биты C3 и C0 после сравнения переключаются в флаги ZF и CF так, что перечисленные инструкции переходов могут работать. JA работает, если CF и ZF обнулены.

Таким образом, перечисленные инструкции условного перехода можно использовать после инструкций FNSTSW/SAHF.

Может быть, биты статуса FPU C3/C2/C0 преднамеренно были размещены таким образом, чтобы переноситься на базовые флаги процессора без перестановок?

GCC 4.8.1 с оптимизацией -O3

В линейке процессоров P6 от Intel появились новые FPU-инструкции¹²⁸. Это FUCOMI (сравнить операнды и выставить флаги основного CPU) и FCMOVss (работает как CMOVss, но на регистрах FPU). Очевидно, разработчики GCC решили отказаться от поддержки процессоров до линейки P6 (ранние Pentium, 80486, итд.).

И кстати, FPU уже давно не отдельная часть процессора в линейке P6, так что флаги основного CPU можно модифицировать из FPU.

Вот что имеем:

Листинг 1.210: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
fld    QWORD PTR [esp+4]    ; загрузить "a"
fld    QWORD PTR [esp+12]   ; загрузить "b"
; ST0=b, ST1=a
fxch   st(1)
; ST0=a, ST1=b
; сравнить "a" и "b"
fucomi st, st(1)
; скопировать ST1 (там "b") в ST0 если a<=b
; в противном случае, оставить "a" в ST0
fcmovbe st, st(1)
; выбросить значение из ST1
fstp   st(1)
ret
```

Не совсем понимаю, зачем здесь FXCH (поменять местами операнды).

От нее легко избавиться поменяв местами инструкции FLD либо заменив FCMOVBE (*below or equal* — меньше или равно) на FCMOVA (*above* — больше).

Должно быть, неаккуратность компилятора.

Так что FUCOMI сравнивает ST(0) (*a*) и ST(1) (*b*) и затем устанавливает флаги основного CPU. FCMOVBE проверяет флаги и копирует ST(1) (в тот момент там находится *b*) в ST(0) (там *a*) если $ST0(a) \leq ST1(b)$. В противном случае ($a > b$), она оставляет *a* в ST(0).

Последняя FSTP оставляет содержимое ST(0) на вершине стека, выбрасывая содержимое ST(1).

Попробуем оттрассировать функцию в GDB:

Листинг 1.211: Оптимизирующий GCC 4.8.1 and GDB

```
1 dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gcc -O3 d_max.c -o d_max -fno-inline
2 dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gdb d_max
3 GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
4 ...
5 Reading symbols from /home/dennis/polygon/d_max...(no debugging symbols found)...done.
6 (gdb) b d_max
7 Breakpoint 1 at 0x80484a0
8 (gdb) run
9 Starting program: /home/dennis/polygon/d_max
10
11 Breakpoint 1, 0x80484a0 in d_max ()
12 (gdb) ni
13 0x80484a4 in d_max ()
14 (gdb) disas $eip
15 Dump of assembler code for function d_max:
16 0x080484a0 <+0>:    fldl    0x4(%esp)
```

¹²⁸Начиная с Pentium Pro, Pentium-II, итд.

1.19. PA50TA C FPU

```

17 => 0x080484a4 <+4>:      fldl    0xc(%esp)
18    0x080484a8 <+8>:      fxch    %st(1)
19    0x080484aa <+10>:     fucomi  %st(1),%st
20    0x080484ac <+12>:     fcmovbe %st(1),%st
21    0x080484ae <+14>:     fstp    %st(1)
22    0x080484b0 <+16>:     ret
23 End of assembler dump.
24 (gdb) ni
25 0x080484a8 in d_max ()
26 (gdb) info float
27   R7: Valid    0x3fff99999999999800 +1.19999999999999956
28 =>R6: Valid    0x4000d999999999999800 +3.39999999999999911
29   R5: Empty    0x00000000000000000000
30   R4: Empty    0x00000000000000000000
31   R3: Empty    0x00000000000000000000
32   R2: Empty    0x00000000000000000000
33   R1: Empty    0x00000000000000000000
34   R0: Empty    0x00000000000000000000
35
36 Status Word:    0x3000
37                TOP: 6
38 Control Word:   0x037f  IM DM ZM OM UM PM
39                PC: Extended Precision (64-bits)
40                RC: Round to nearest
41 Tag Word:       0x0fff
42 Instruction Pointer: 0x73:0x080484a4
43 Operand Pointer:  0x7b:0xbffff118
44 Opcode:         0x0000
45 (gdb) ni
46 0x080484aa in d_max ()
47 (gdb) info float
48   R7: Valid    0x4000d999999999999800 +3.39999999999999911
49 =>R6: Valid    0x3fff9999999999999800 +1.19999999999999956
50   R5: Empty    0x00000000000000000000
51   R4: Empty    0x00000000000000000000
52   R3: Empty    0x00000000000000000000
53   R2: Empty    0x00000000000000000000
54   R1: Empty    0x00000000000000000000
55   R0: Empty    0x00000000000000000000
56
57 Status Word:    0x3000
58                TOP: 6
59 Control Word:   0x037f  IM DM ZM OM UM PM
60                PC: Extended Precision (64-bits)
61                RC: Round to nearest
62 Tag Word:       0x0fff
63 Instruction Pointer: 0x73:0x080484a8
64 Operand Pointer:  0x7b:0xbffff118
65 Opcode:         0x0000
66 (gdb) disas $eip
67 Dump of assembler code for function d_max:
68   0x080484a0 <+0>:      fldl    0x4(%esp)
69   0x080484a4 <+4>:      fldl    0xc(%esp)
70   0x080484a8 <+8>:      fxch    %st(1)
71 => 0x080484aa <+10>:     fucomi  %st(1),%st
72   0x080484ac <+12>:     fcmovbe %st(1),%st
73   0x080484ae <+14>:     fstp    %st(1)
74   0x080484b0 <+16>:     ret
75 End of assembler dump.
76 (gdb) ni
77 0x080484ac in d_max ()
78 (gdb) info registers
79  eax                0x1                1
80  ecx                0xbffff1c4         -1073745468
81  edx                0x8048340          134513472
82  ebx                0xb7fbf000         -1208225792
83  esp                0xbffff10c         0xbffff10c
84  ebp                0xbffff128         0xbffff128
85  esi                0x0                0
86  edi                0x0                0

```

1.19. РАБОТА С FPU

```
87 eip                0x80484ac      0x80484ac <d_max+12>
88 eflags            0x203      [ CF IF ]
89 cs                 0x73      115
90 ss                 0x7b      123
91 ds                 0x7b      123
92 es                 0x7b      123
93 fs                 0x0       0
94 gs                 0x33      51
95 (gdb) ni
96 0x080484ae in d_max ()
97 (gdb) info float
98   R7: Valid      0x4000d99999999999800 +3.39999999999999911
99 =>R6: Valid      0x4000d999999999999800 +3.39999999999999911
100   R5: Empty      0x00000000000000000000
101   R4: Empty      0x00000000000000000000
102   R3: Empty      0x00000000000000000000
103   R2: Empty      0x00000000000000000000
104   R1: Empty      0x00000000000000000000
105   R0: Empty      0x00000000000000000000
106
107 Status Word:      0x3000
108                  TOP: 6
109 Control Word:     0x037f   IM DM ZM OM UM PM
110                  PC: Extended Precision (64-bits)
111                  RC: Round to nearest
112 Tag Word:         0x0fff
113 Instruction Pointer: 0x73:0x080484ac
114 Operand Pointer:   0x7b:0xbffff118
115 Opcode:           0x0000
116 (gdb) disas $eip
117 Dump of assembler code for function d_max:
118   0x080484a0 <+0>:   fldl    0x4(%esp)
119   0x080484a4 <+4>:   fldl    0xc(%esp)
120   0x080484a8 <+8>:   fxch    %st(1)
121   0x080484aa <+10>:  fucomi  %st(1),%st
122   0x080484ac <+12>:  fcmovbe %st(1),%st
123 => 0x080484ae <+14>:  fstp    %st(1)
124   0x080484b0 <+16>:  ret
125 End of assembler dump.
126 (gdb) ni
127 0x080484b0 in d_max ()
128 (gdb) info float
129 =>R7: Valid      0x4000d999999999999800 +3.39999999999999911
130   R6: Empty      0x4000d999999999999800
131   R5: Empty      0x00000000000000000000
132   R4: Empty      0x00000000000000000000
133   R3: Empty      0x00000000000000000000
134   R2: Empty      0x00000000000000000000
135   R1: Empty      0x00000000000000000000
136   R0: Empty      0x00000000000000000000
137
138 Status Word:      0x3800
139                  TOP: 7
140 Control Word:     0x037f   IM DM ZM OM UM PM
141                  PC: Extended Precision (64-bits)
142                  RC: Round to nearest
143 Tag Word:         0x3fff
144 Instruction Pointer: 0x73:0x080484ae
145 Operand Pointer:   0x7b:0xbffff118
146 Opcode:           0x0000
147 (gdb) quit
148 A debugging session is active.
149
150      Inferior 1 [process 30194] will be killed.
151
152 Quit anyway? (y or n) y
153 dennis@ubuntuvms:~/polygon$
```

Используя «ni», дадим первым двум инструкциям FLD исполниться.

1.19. РАБОТА С FPU

Посмотрим регистры FPU (строка 33).

Как уже было указано ранее, регистры FPU это скорее кольцевой буфер, нежели стек (1.19.5 (стр. 215)). И GDB показывает не регистры STx, а внутренние регистры FPU (Rx). Стрелка (на строке 35) указывает на текущую вершину стека.

Вы можете также увидеть содержимое регистра T0P в «Status Word» (строка 44). Там сейчас 6, так что вершина стека сейчас указывает на внутренний регистр 6.

Значения *a* и *b* меняются местами после исполнения FXCH (строка 54).

FUCOMI исполнилась (строка 83). Посмотрим флаги: CF выставлен (строка 95).

FCMOVBE действительно скопировал значение *b* (см. строку 104).

FSTP оставляет одно значение на вершине стека (строка 136). Значение T0P теперь 7, так что вершина FPU-стека указывает на внутренний регистр 7.

ARM

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Листинг 1.212: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

VMOV	D16, R2, R3 ; b
VMOV	D17, R0, R1 ; a
VCMPE.F64	D17, D16
VMRS	APSR_nzcv, FPSCR
VMOVT.F64	D16, D17 ; скопировать "a" в D16
VMOV	R0, R1, D16
BX	LR

Очень простой случай. Входные величины помещаются в D17 и D16 и сравниваются при помощи инструкции VCMPE. Как и в сопроцессорах x86, сопроцессор в ARM имеет свой собственный регистр статуса и флагов (FPSCR¹²⁹), потому что есть необходимость хранить специфичные для его работы флаги.

И так же, как и в x86, в ARM нет инструкций условного перехода, проверяющих биты в регистре статуса сопроцессора. Поэтому имеется инструкция VMRS, копирующая 4 бита (N, Z, C, V) из статуса сопроцессора в биты *общего* статуса (регистр APSR¹³⁰).

VMOVT это аналог MOVGT, инструкция для D-регистров, срабатывающая, если при сравнении один операнд был больше чем второй (GT — *Greater Than*).

Если она сработает, в D16 запишется значение *a*, лежащее в тот момент в D17. В обратном случае в D16 остается значение *b*.

Предпоследняя инструкция VMOV готовит то, что было в D16, для возврата через пару регистров R0 и R1.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

Листинг 1.213: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

VMOV	D16, R2, R3 ; b
VMOV	D17, R0, R1 ; a
VCMPE.F64	D17, D16
VMRS	APSR_nzcv, FPSCR
IT GT	
VMOVT.F64	D16, D17
VMOV	R0, R1, D16
BX	LR

¹²⁹(ARM) Floating-Point Status and Control Register

¹³⁰(ARM) Application Program Status Register

1.19. РАБОТА С FPU

Почти то же самое, что и в предыдущем примере, за парой отличий. Как мы уже знаем, многие инструкции в режиме ARM можно дополнять условием. Но в режиме Thumb такого нет. В 16-битных инструкций просто нет места для лишних 4 битов, при помощи которых можно было бы закодировать условие выполнения.

Поэтому в Thumb-2 добавили возможность дополнять Thumb-инструкции условиями. В листинге, сгенерированном при помощи [IDA](#), мы видим инструкцию VM0VGT, такую же как и в предыдущем примере.

В реальности там закодирована обычная инструкция VM0V, просто [IDA](#) добавила суффикс -GT к ней, потому что перед этой инструкцией стоит IT GT.

Инструкция IT определяет так называемый *if-then block*. После этой инструкции можно указывать до четырех инструкций, к каждой из которых будет добавлен суффикс условия.

В нашем примере IT GT означает, что следующая за ней инструкция будет исполнена, если условие GT (*Greater Than*) справедливо.

Теперь более сложный пример. Кстати, из Angry Birds (для iOS):

Листинг 1.214: Angry Birds Classic

```
...
ITE NE
VM0VNE      R2, R3, D16
VM0VEQ      R2, R3, D17
BLX         _objc_msgSend ; без суффикса
...
```

ITE означает *if-then-else* и кодирует суффиксы для двух следующих за ней инструкций.

Первая из них исполнится, если условие, закодированное в ITE (*NE, not equal*) будет в тот момент справедливо, а вторая — если это условие не сработает. (Обратное условие от NE это EQ (*equal*)).

Инструкция следующая за второй VM0V (или VM0VEQ) нормальная, без суффикса (BLX).

Ещё чуть сложнее, и снова этот фрагмент из Angry Birds:

Листинг 1.215: Angry Birds Classic

```
...
ITTTT EQ
MOVEQ       R0, R4
ADDEQ       SP, SP, #0x20
POPEQ.W     {R8,R10}
POPEQ       {R4-R7,PC}
BLX         __stack_chk_fail ; без суффикса
...
```

Четыре символа «Т» в инструкции означают, что четыре последующие инструкции будут исполнены если условие соблюдается. Поэтому [IDA](#) добавила ко всем четырем инструкциям суффикс -EQ. А если бы здесь было, например, ITEEE EQ (*if-then-else-else-else*), тогда суффиксы для следующих четырех инструкций были бы расставлены так:

```
-EQ
-NE
-NE
-NE
```

Ещё фрагмент из Angry Birds:

Листинг 1.216: Angry Birds Classic

```
...
CMP.W       R0, #0xFFFFFFFF
ITTE LE
SUBLE.W     R10, R0, #1
NEGLE      R0, R0
MOVGT      R10, R0
MOVS       R6, #0 ; без суффикса
CBZ        R0, loc_1E7E32 ; без суффикса
...
```

1.19. РАБОТА С FPU

ITTE (*if-then-then-else*) означает, что первая и вторая инструкции выполняются, если условие LE (*Less or Equal*) справедливо, а третья — если справедливо обратное условие (GT — *Greater Than*).

Компиляторы способны генерировать далеко не все варианты.

Например, в вышеупомянутой игре Angry Birds (версия *classic* для iOS)

встречаются только такие варианты инструкции IT: IT, ITE, ITT, ITTE, ITTT, ITTTT. Как это узнать? В [IDA](#) можно сгенерировать листинг (что и было сделано), только в опциях был установлен показ 4 байтов для каждого опкода.

Затем, зная что старшая часть 16-битного опкода (IT это 0xBF), сделаем при помощи грег это:

```
cat AngryBirdsClassic.lst | grep " BF" | grep "IT" > results.lst
```

Кстати, если писать на ассемблере для режима Thumb-2 вручную, и дополнять инструкции суффиксами условия, то ассемблер автоматически будет добавлять инструкцию IT с соответствующими флагами там, где надо.

Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Листинг 1.217: Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```
b          = -0x20
a          = -0x18
val_to_return = -0x10
saved_R7   = -4

        STR        R7, [SP,#saved_R7]!
        MOV        R7, SP
        SUB        SP, SP, #0x1C
        BIC        SP, SP, #7
        VMOV       D16, R2, R3
        VMOV       D17, R0, R1
        VSTR       D17, [SP,#0x20+a]
        VSTR       D16, [SP,#0x20+b]
        VLDR       D16, [SP,#0x20+a]
        VLDR       D17, [SP,#0x20+b]
        VCMPE.F64  D16, D17
        VMRS       APSR_nzcv, FPSCR
        BLE        loc_2E08
        VLDR       D16, [SP,#0x20+a]
        VSTR       D16, [SP,#0x20+val_to_return]
        B          loc_2E10

loc_2E08
        VLDR       D16, [SP,#0x20+b]
        VSTR       D16, [SP,#0x20+val_to_return]

loc_2E10
        VLDR       D16, [SP,#0x20+val_to_return]
        VMOV       R0, R1, D16
        MOV        SP, R7
        LDR        R7, [SP+0x20+b], #4
        BX        LR
```

Почти то же самое, что мы уже видели, но много избыточного кода из-за хранения *a* и *b*, а также выходного значения, в локальном стеке.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.218: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
PUSH    {R3-R7,LR}
MOVS    R4, R2
MOVS    R5, R3
MOVS    R6, R0
```

1.19. РАБОТА С FPU

```
        MOVS    R7, R1
        BL      __aeabi_cdrcmple
        BCS     loc_1C0
        MOVS    R0, R6
        MOVS    R1, R7
        POP     {R3-R7,PC}

loc_1C0:
        MOVS    R0, R4
        MOVS    R1, R5
        POP     {R3-R7,PC}
```

Keil не генерирует FPU-инструкции, потому что не рассчитывает на то, что они будут поддерживаться, а простым сравнением побитово здесь не обойтись.

Для сравнения вызывается библиотечная функция `__aeabi_cdrcmple`.

N.B. Результат сравнения эта функция оставляет в флагах, чтобы следующая за вызовом инструкция BCS (*Carry set — Greater than or equal*) могла работать без дополнительного кода.

ARM64

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
d_max:
; D0 - a, D1 - b
    fcmpe    d0, d1
    fcsel    d0, d0, d1, gt
; теперь результат в D0
    ret
```

В ARM64 ISA теперь есть FPU-инструкции, устанавливающие флаги CPU APSR вместо FPSCR для удобства. FPU больше не отдельное устройство (по крайней мере логически). Это FCMPE. Она сравнивает два значения, переданных в D0 и D1 (а это первый и второй аргументы функции) и выставляет флаги в APSR (N, Z, C, V).

FCSEL (*Floating Conditional Select*) копирует значение D0 или D1 в D0 в зависимости от условия (GT — Greater Than — больше чем), и снова, она использует флаги в регистре APSR вместо FPSCR. Это куда удобнее, если сравнивать с тем набором инструкций, что был в процессорах раньше.

Если условие верно (GT), тогда значение из D0 копируется в D0 (т.е. ничего не происходит). Если условие не верно, то значение D1 копируется в D0.

Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
d_max:
; сохранить входные аргументы в "Register Save Area"
    sub     sp, sp, #16
    str     d0, [sp,8]
    str     d1, [sp]
; перезагрузить значения
    ldr     x1, [sp,8]
    ldr     x0, [sp]
    fmov    d0, x1
    fmov    d1, x0
; D0 - a, D1 - b
    fcmpe    d0, d1
    ble     .L76
; a>b; загрузить D0 (a) в X0
    ldr     x0, [sp,8]
    b       .L74
.L76:
; a<=b; загрузить D1 (b) в X0
    ldr     x0, [sp]
.L74:
```


1.19. РАБОТА С FPU

```
; результат в X0
    fmov    d0, x0
; результат в D0
    add     sp, sp, 16
    ret
```

Неоптимизирующий GCC более многословен. В начале функция сохраняет значения входных аргументов в локальном стеке (*Register Save Area*). Затем код перезагружает значения в регистры X0/X1 и наконец копирует их в D0/D1 для сравнения инструкцией FCMPE. Много избыточного кода, но так работают неоптимизирующие компиляторы. FCMPE сравнивает значения и устанавливает флаги в APSR. В этот момент компилятор ещё не думает о более удобной инструкции FCSEL, так что он работает старым методом: использует инструкцию BLE (*Branch if Less than or Equal* (переход если меньше или равно)). В одном случае ($a > b$) значение a перезагружается в X0. В другом случае ($a \leq b$) значение b загружается в X0. Наконец, значение из X0 копируется в D0, потому что возвращаемое значение оставляется в этом регистре.

Упражнение

Для упражнения вы можете попробовать оптимизировать этот фрагмент кода вручную, удалив избыточные инструкции, но не добавляя новых (включая FCSEL).

Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9: float

Перепишем пример. Теперь здесь *float* вместо *double*.

```
float f_max (float a, float b)
{
    if (a>b)
        return a;

    return b;
};
```

```
f_max:
; S0 - a, S1 - b
    fcmpe    s0, s1
    fcsele   s0, s0, s1, gt
; теперь результат в S0
    ret
```

Всё то же самое, только используются S-регистры вместо D-. Так что числа типа *float* передаются в 32-битных S-регистрах (а это младшие части 64-битных D-регистров).

MIPS

В сопроцессоре MIPS есть бит результата, который устанавливается в FPU и проверяется в CPU.

Ранние MIPS имели только один бит (с названием FCC0), а у поздних их 8 (с названием FCC7-FCC0). Этот бит (или биты) находятся в регистре с названием FCCR.

Листинг 1.219: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
d_max:
; установить бит условия FPU в 1, если $f14<$f12 (b<a):
    c.lt.d   $f14, $f12
    or       $at, $zero ; NOP
; перейти на locret_14 если бит условия выставлен
    bclt     locret_14
; эта инструкция всегда выполняется (установить значение для возврата в "a"):
    mov.d    $f0, $f12 ; branch delay slot
; эта инструкция выполняется только если переход не произошел (т.е., если b>=a)
; установить значение для возврата в "b":
    mov.d    $f0, $f14
```

1.19. РАБОТА С FPU

```
locret_14:
    jr      $ra
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

C.LT.D сравнивает два значения. LT это условие «Less Than» (меньше чем). D означает переменные типа *double*.

В зависимости от результата сравнения, бит FCC0 устанавливается или очищается.

BC1T проверяет бит FCC0 и делает переход, если бит выставлен. T означает, что переход произойдет если бит выставлен («True»). Имеется также инструкция BC1F которая сработает, если бит сброшен («False»).

В зависимости от перехода один из аргументов функции помещается в регистр \$F0.

1.19.8. Некоторые константы

В Wikipedia легко найти представление некоторых констант в IEEE 754. Любопытно узнать, что 0.0 в IEEE 754 представляется как 32 нулевых бита (для одинарной точности) или 64 нулевых бита (для двойной). Так что, для записи числа 0.0 в переменную в памяти или регистр, можно пользоваться инструкцией MOV, или XOR reg, reg. Это тем может быть удобно, что если в структуре есть много переменных разных типов, то обычной ф-цией memset() можно установить все целочисленные переменные в 0, все булевы переменные в false, все указатели в NULL, и все переменные с плавающей точкой (любой точности) в 0.0.

1.19.9. Копирование

По инерции можно подумать, что для загрузки и сохранения (и, следовательно, копирования) чисел в формате IEEE 754 нужно использовать пару инструкций FLD/FST. Тем не менее, этого куда легче достичь используя обычную инструкцию MOV, которая, конечно же, просто копирует значения побитово.

1.19.10. Стек, калькуляторы и обратная польская запись

Теперь понятно, почему некоторые старые калькуляторы используют обратную польскую запись ¹³¹.

Например для сложения 12 и 34 нужно было набрать 12, потом 34, потом нажать знак «плюс».

Это потому что старые калькуляторы просто реализовали стековую машину и это было куда проще, чем обрабатывать сложные выражения со скобками.

1.19.11. 80 бит?

Внутреннее представление чисел с FPU — 80-битное. Странное число, потому как не является числом вида 2^n . Имеется гипотеза, что причина, возможно, историческая — стандартные IBM-овские перфокарты могли кодировать 12 строк по 80 бит. Раньше было также популярно текстовое разрешение $80 \cdot 25$.

В Wikipedia есть еще одно объяснение: https://en.wikipedia.org/wiki/Extended_precision.

Если вы знаете более точную причину, просьба сообщить автору: dennis@yurichev.com.

1.19.12. x64

О том, как происходит работа с числами с плавающей запятой в x86-64, читайте здесь: [1.30](#) (стр. 418).

¹³¹ru.wikipedia.org/wiki/Обратная_польская_запись

1.19.13. Упражнения

- <http://challenges.re/60>
- <http://challenges.re/61>

1.20. Массивы

Массив это просто набор переменных в памяти, обязательно лежащих рядом и обязательно одного типа¹³².

1.20.1. Простой пример

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int a[20];
    int i;

    for (i=0; i<20; i++)
        a[i]=i*2;

    for (i=0; i<20; i++)
        printf ("a[%d]=%d\n", i, a[i]);

    return 0;
};
```

x86**MSVC**

Компилируем:

Листинг 1.220: MSVC 2008

```
_TEXT    SEGMENT
_i$ = -84                                ; size = 4
_a$ = -80                                ; size = 80
_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 84                      ; 00000054H
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], 0
    jmp     SHORT $LN6@main
$LN5@main:
    mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp]
    add     eax, 1
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN6@main:
    cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 20      ; 00000014H
    jge     SHORT $LN4@main
    mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
    shl     ecx, 1
    mov     edx, DWORD PTR _i$[ebp]
    mov     DWORD PTR _a$[ebp+edx*4], ecx
    jmp     SHORT $LN5@main
$LN4@main:
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], 0
    jmp     SHORT $LN3@main
```

¹³² АКА «гомогенный контейнер»

1.20. МАССИВЫ

```
$LN2@main:
    mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp]
    add     eax, 1
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN3@main:
    cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 20      ; 00000014H
    jge     SHORT $LN1@main
    mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp+ecx*4]
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp]
    push    eax
    push    OFFSET $SG2463
    call    _printf
    add     esp, 12      ; 0000000cH
    jmp     SHORT $LN2@main
$LN1@main:
    xor     eax, eax
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
```

Ничего особенного, просто два цикла. Один изменяет массив, второй печатает его содержимое. Команда `shl ecx, 1` используется для умножения ECX на 2, об этом ниже ([1.18.2](#) (стр. 207)).

Под массив выделено в стеке 80 байт, это 20 элементов по 4 байта.

1.20. МАССИВЫ

Попробуем этот пример в OllyDbg.

Видно, как заполнился массив: каждый элемент это 32-битное слово типа *int*, с шагом 2:

The screenshot shows OllyDbg with the CPU window displaying assembly code. The code is a loop that fills a stack array. The registers window shows EAX=00000014. The memory dump window shows the stack array filled with 20 elements of 00000000.

Registers (FPU):

Register	Value
EAX	00000014
ECX	00000026
EDX	00000013
EBX	00000000
ESP	0018FEF0
EBP	0018FF44
ESI	00000001
EDI	0040338C
EIP	0040102C

Stack [0018FEF0]=00000014 (decimal 20.)
Jump from 40101C

Memory dump (Address, Hex dump, ASCII (ANSI)):

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
0018FEF4	00 00 00 00 02 00 00 00 04 00 00 00 06 00 00 00	
0018FF04	08 00 00 00 0A 00 00 00 0C 00 00 00 0E 00 00 00	
0018FF14	10 00 00 00 12 00 00 00 14 00 00 00 16 00 00 00	
0018FF24	18 00 00 00 1A 00 00 00 1C 00 00 00 1E 00 00 00	
0018FF34	20 00 00 00 22 00 00 00 24 00 00 00 26 00 00 00	
0018FF44	28 00 00 00 2A 00 00 00 2C 00 00 00 2E 00 00 00	
0018FF54	30 00 00 00 32 00 00 00 34 00 00 00 36 00 00 00	
0018FF64	38 00 00 00 3A 00 00 00 3C 00 00 00 3E 00 00 00	
0018FF74	40 00 00 00 42 00 00 00 44 00 00 00 46 00 00 00	
0018FF84	48 00 00 00 4A 00 00 00 4C 00 00 00 4E 00 00 00	
0018FF94	50 00 00 00 52 00 00 00 54 00 00 00 56 00 00 00	
0018FFA4	58 00 00 00 5A 00 00 00 5C 00 00 00 5E 00 00 00	
0018FFB4	60 00 00 00 62 00 00 00 64 00 00 00 66 00 00 00	
0018FFC4	68 00 00 00 6A 00 00 00 6C 00 00 00 6E 00 00 00	
0018FFD4	70 00 00 00 72 00 00 00 74 00 00 00 76 00 00 00	
0018FFE4	78 00 00 00 7A 00 00 00 7C 00 00 00 7E 00 00 00	
0018FFF4	80 00 00 00 82 00 00 00 84 00 00 00 86 00 00 00	

Рис. 1.79: OllyDbg: после заполнения массива

А так как этот массив находится в стеке, то мы видим все его 20 элементов внутри стека.

GCC

Рассмотрим результат работы GCC 4.4.1:

Листинг 1.221: GCC 4.4.1

```
main      public main
proc near ; DATA XREF: _start+17

var_70    = dword ptr -70h
var_6C    = dword ptr -6Ch
var_68    = dword ptr -68h
i_2       = dword ptr -54h
i         = dword ptr -4

push     ebp
mov      ebp, esp
and      esp, 0FFFFFFF0h
sub      esp, 70h
```

1.20. МАССИВЫ

```
mov     [esp+70h+i], 0          ; i=0
jmp     short loc_804840A

loc_80483F7:
mov     eax, [esp+70h+i]
mov     edx, [esp+70h+i]
add     edx, edx                ; edx=i*2
mov     [esp+eax*4+70h+i_2], edx
add     [esp+70h+i], 1          ; i++

loc_804840A:
cmp     [esp+70h+i], 13h
jle     short loc_80483F7
mov     [esp+70h+i], 0
jmp     short loc_8048441

loc_804841B:
mov     eax, [esp+70h+i]
mov     edx, [esp+eax*4+70h+i_2]
mov     eax, offset aADD ; "a[%d]=%d\n"
mov     [esp+70h+var_68], edx
mov     edx, [esp+70h+i]
mov     [esp+70h+var_6C], edx
mov     [esp+70h+var_70], eax
call    _printf
add     [esp+70h+i], 1

loc_8048441:
cmp     [esp+70h+i], 13h
jle     short loc_804841B
mov     eax, 0
leave
retn

main    endp
```

Переменная *a* в нашем примере имеет тип *int** (указатель на *int*). Вы можете попробовать передать в другую функцию указатель на массив, но точнее было бы сказать, что передается указатель на первый элемент массива (а адреса остальных элементов массива можно вычислить очевидным образом).

Если индексировать этот указатель как *a[idx]*, *idx* просто прибавляется к указателю и возвращается элемент, расположенный там, куда ссылается вычисленный указатель.

Вот любопытный пример. Строка символов вроде «*string*» это массив из символов. Она имеет тип *const char[]*. К этому указателю также можно применять индекс.

Поэтому можно написать даже так: «*string*»[*i*] — это совершенно легальное выражение в Си/Си++!

ARM

Неоптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
EXPORT _main
_main
    STMFD    SP!, {R4,LR}
; выделить место для 20-и переменных типа int:
    SUB     SP, SP, #0x50
; первый цикл:
    MOV     R4, #0                ; i
    B       loc_4A0
loc_494
    MOV     R0, R4,LSL#1          ; R0=R4*2
; сохранить R0 в SP+R4<<2 (то же что и SP+R4*4):
    STR     R0, [SP,R4,LSL#2]
    ADD     R4, R4, #1            ; i=i+1
loc_4A0
```

1.20. МАССИВЫ

```
        CMP     R4, #20          ; i<20?
        BLT     loc_494          ; да, запустить тело цикла снова
; второй цикл:
        MOV     R4, #0           ; i
        B       loc_4C4
loc_4B0      LDR     R2, [SP,R4,LSL#2] ; (второй аргумент printf) R2=*(SP+R4<<4) (то же что и ↗
        ↗ *(SP+R4*4))
        MOV     R1, R4           ; (первый аргумент printf) R1=i
        ADR     R0, aADD         ; "a[%d]=%d\n"
        BL      __2printf
        ADD     R4, R4, #1       ; i=i+1
loc_4C4      CMP     R4, #20          ; i<20?
        BLT     loc_4B0          ; да, запустить тело цикла снова
        MOV     R0, #0           ; значение для возврата
; освободить блок в стеке, выделенное для 20 переменных:
        ADD     SP, SP, #0x50
        LDMFD   SP!, {R4,PC}
```

Тип *int* требует 32 бита для хранения (или 4 байта),

так что для хранения 20 переменных типа *int*, нужно 80 (0x50) байт.

Поэтому инструкция `SUB SP, SP, #0x50` в прологе функции выделяет в локальном стеке под массив именно столько места.

И в первом и во втором цикле итератор цикла *i* будет постоянно находится в регистре R4.

Число, которое нужно записать в массив, вычисляется так: $i * 2$, и это эквивалентно сдвигу на 1 бит влево, так что инструкция `MOV R0, R4, LSL#1` делает это.

`STR R0, [SP, R4, LSL#2]` записывает содержимое R0 в массив. Указатель на элемент массива вычисляется так: [SP](#) указывает на начало массива, R4 это *i*.

Так что сдвигаем *i* на 2 бита влево, что эквивалентно умножению на 4 (ведь каждый элемент массива занимает 4 байта) и прибавляем это к адресу начала массива.

Во втором цикле используется обратная инструкция

`LDR R2, [SP, R4, LSL#2]`. Она загружает из массива нужное значение и указатель на него вычисляется точно так же.

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
_main
        PUSH    {R4,R5,LR}
; выделить место для 20 переменных типа int + еще одной переменной:
        SUB     SP, SP, #0x54
; первый цикл:
        MOVS    R0, #0           ; i
        MOV     R5, SP           ; указатель на первый элемент массива
loc_1CE      LSLS   R1, R0, #1     ; R1=i<<1 (то же что и i*2)
        LSLS   R2, R0, #2     ; R2=i<<2 (то же что и i*4)
        ADDS   R0, R0, #1     ; i=i+1
        CMP     R0, #20        ; i<20?
        STR     R1, [R5,R2]     ; сохранить R1 в *(R5+R2) (то же что и R5+i*4)
        BLT     loc_1CE        ; да, i<20, запустить тело цикла снова
; второй цикл:
        MOVS    R4, #0           ; i=0
loc_1DC      LSLS   R0, R4, #2     ; R0=i<<2 (то же что и i*4)
        LDR     R2, [R5,R0]     ; загрузить из *(R5+R0) (то же что и R5+i*4)
        MOVS    R1, R4
        ADR     R0, aADD         ; "a[%d]=%d\n"
        BL      __2printf
        ADDS   R4, R4, #1     ; i=i+1
```

1.20. МАССИВЫ

```
CMP    R4, #20          ; i<20?
BLT    loc_1DC          ; да, i<20, запустить тело цикла снова
MOVS   R0, #0           ; значение для возврата
; освободить блок в стеке, выделенное для 20-и переменных типа int и еще одной переменной:
ADD    SP, SP, #0x54
POP    {R4,R5,PC}
```

Код для Thumb очень похожий. В Thumb имеются отдельные инструкции для битовых сдвигов (как LSLs), вычисляющие и число для записи в массив и адрес каждого элемента массива.

Компилятор почему-то выделил в локальном стеке немного больше места, однако последние 4 байта не используются.

Неоптимизирующий GCC 4.9.1 (ARM64)

Листинг 1.222: Неоптимизирующий GCC 4.9.1 (ARM64)

```
.LC0:
.string "a[%d]=%d\n"
main:
; сохранить FP и LR в стековом фрейме:
stp    x29, x30, [sp, -112]!
; установить стековый фрейм (FP=SP)
add    x29, sp, 0
; установить начальное значение счетчика в 0 (WZR это регистр всегда содержащий ноль):
str    wzr, [x29,108]
; перейти на код проверки условия цикла:
b      .L2
.L3:
; загрузить значение переменной "i":
ldr    w0, [x29,108]
; умножить на 2:
lsl    w2, w0, 1
; найти место массива в локальном стеке:
add    x0, x29, 24
; загрузить 32-битное число из локального стека и расширить его до 64-битного учитывая знак:
ldrsb  x1, [x29,108]
; вычислить адрес элемента (X0+X1<<2=array address+i*4) и записать W2 (i*2) там:
str    w2, [x0,x1,lsl 2]
; инкремент счетчика (i):
ldr    w0, [x29,108]
add    w0, w0, 1
str    w0, [x29,108]
.L2:
; проверить, закончили ли:
ldr    w0, [x29,108]
cmp    w0, 19
; перейти на L3 (начало тела цикла), если нет:
ble    .L3
; здесь начинается вторая часть функции.
; устанавливаем первичного значение счетчика в 0.
; кстати, это же место в локальном стеке было уже использовано под счетчик
; потому что та же локальная переменная (i) используется как счетчик.
str    wzr, [x29,108]
b      .L4
.L5:
; вычислить адрес массива:
add    x0, x29, 24
; загрузить переменную "i":
ldrsb  x1, [x29,108]
; загрузить значение из массива по адресу (X0+X1<<2 = адрес массива + i*4)
ldr    w2, [x0,x1,lsl 2]
; загрузить адрес строки "a[%d]=%d\n" :
adrp   x0, .LC0
add    x0, x0, :lo12:.LC0
; загрузить переменную "i" в W1 и передать её в printf() как второй аргумент:
ldr    w1, [x29,108]
; W2 всё еще содержит загруженный элемент из массива.
```


1.20. МАССИВЫ

```
; вызов printf():
    bl      printf
; инкремент переменной "i":
    ldr     w0, [x29,108]
    add     w0, w0, 1
    str     w0, [x29,108]
.L4:
; закончили?
    ldr     w0, [x29,108]
    cmp     w0, 19
; перейти на начало тела цикла, если нет:
    ble     .L5
; возврат 0
    mov     w0, 0
; восстановить FP и LR:
    ldp     x29, x30, [sp], 112
    ret
```

MIPS

Функция использует много S-регистров, которые должны быть сохранены. Вот почему их значения сохраняются в прологе функции и восстанавливаются в эпилоге.

Листинг 1.223: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
main:
var_70          = -0x70
var_68          = -0x68
var_14          = -0x14
var_10          = -0x10
var_C           = -0xC
var_8           = -8
var_4           = -4
; пролог функции:
    lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
    addiu   $sp, -0x80
    la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
    sw      $ra, 0x80+var_4($sp)
    sw      $s3, 0x80+var_8($sp)
    sw      $s2, 0x80+var_C($sp)
    sw      $s1, 0x80+var_10($sp)
    sw      $s0, 0x80+var_14($sp)
    sw      $gp, 0x80+var_70($sp)
    addiu   $s1, $sp, 0x80+var_68
    move     $v1, $s1
    move     $v0, $zero
; это значение используется как терминатор цикла.
; оно было вычислено компилятором GCC на стадии компиляции:
    li      $a0, 0x28 # '('

loc_34:                                # CODE XREF: main+3C
; сохранить значение в памяти:
    sw      $v0, 0($v1)
; увеличивать значение (которое будет записано) на 2 на каждой итерации:
    addiu   $v0, 2
; дошли до терминатора цикла?
    bne     $v0, $a0, loc_34
; в любом случае, добавляем 4 к адресу:
    addiu   $v1, 4
; цикл заполнения массива закончился
; начало второго цикла
    la      $s3, $LC0          # "a[%d]=%d\n"
; переменная "i" будет находится в $s0:
    move     $s0, $zero
    li      $s2, 0x14

loc_54:                                # CODE XREF: main+70
```

1.20. МАССИВЫ

```
; вызов printf():
        lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
        lw      $a2, 0($s1)
        move    $a1, $s0
        move    $a0, $s3
        jalr    $t9
; инкремент "i":
        addiu   $s0, 1
        lw      $gp, 0x80+var_70($sp)
; перейти на начало тела цикла, если конец еще не достигнут:
        bne     $s0, $s2, loc_54
; передвинуть указатель на следующее 32-битное слово:
        addiu   $s1, 4
; эпилог функции
        lw      $ra, 0x80+var_4($sp)
        move    $v0, $zero
        lw      $s3, 0x80+var_8($sp)
        lw      $s2, 0x80+var_C($sp)
        lw      $s1, 0x80+var_10($sp)
        lw      $s0, 0x80+var_14($sp)
        jr      $ra
        addiu   $sp, 0x80

$LC0:   .ascii "a[%d]=%d\n"<0>    # DATA XREF: main+44
```

Интересная вещь: здесь два цикла и в первом не нужна переменная *i*, а нужна только переменная $i * 2$ (скачущая через 2 на каждой итерации) и ещё адрес в памяти (скачущий через 4 на каждой итерации).

Так что мы видим здесь две переменных: одна (в $\$V0$) увеличивается на 2 каждый раз, и вторая (в $\$V1$) — на 4.

Второй цикл содержит вызов `printf()`. Он должен показывать значение *i* пользователю, поэтому здесь есть переменная, увеличивающаяся на 1 каждый раз (в $\$S0$), а также адрес в памяти (в $\$S1$) увеличивающийся на 4 каждый раз.

Это напоминает нам оптимизацию циклов, которую мы рассматривали ранее: [3.7](#) (стр. 480). Цель оптимизации в том, чтобы избавиться от операций умножения.

1.20.2. Переполнение буфера

Чтение за пределами массива

Итак, индексация массива — это просто *массив[индекс]*. Если вы присмотритесь к коду, в цикле печати значений массива через `printf()` вы не увидите проверок индекса, *меньше ли он двадцати?* А что будет если он будет 20 или больше? Эта одна из особенностей Си/Си++, за которую их, собственно, и ругают.

Вот код, который и компилируется и работает:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int a[20];
    int i;

    for (i=0; i<20; i++)
        a[i]=i*2;

    printf ("a[20]=%d\n", a[20]);

    return 0;
};
```

Вот результат компиляции в (MSVC 2008):

```

$SG2474 DB      'a[20]=%d', 0aH, 00H

_i$ = -84 ; size = 4
_a$ = -80 ; size = 80
_main PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 84
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], 0
    jmp     SHORT $LN3@main
$LN2@main:
    mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp]
    add     eax, 1
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN3@main:
    cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 20
    jge     SHORT $LN1@main
    mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
    shl     ecx, 1
    mov     edx, DWORD PTR _i$[ebp]
    mov     DWORD PTR _a$[ebp+edx*4], ecx
    jmp     SHORT $LN2@main
$LN1@main:
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp+80]
    push    eax
    push    OFFSET $SG2474 ; 'a[20]=%d'
    call    DWORD PTR __imp__printf
    add     esp, 8
    xor     eax, eax
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
_TEXT     ENDS
END

```

Данный код при запуске выдал вот такой результат:

Листинг 1.225: OllyDbg: вывод в консоль

```
a[20]=1638280
```

Это просто *что-то*, что волею случая лежало в стеке рядом с массивом, через 80 байт от его первого элемента.

1.20. МАССИВЫ

Попробуем узнать в OllyDbg, что это за значение. Загружаем и находим это значение, находящееся точно после последнего элемента массива:

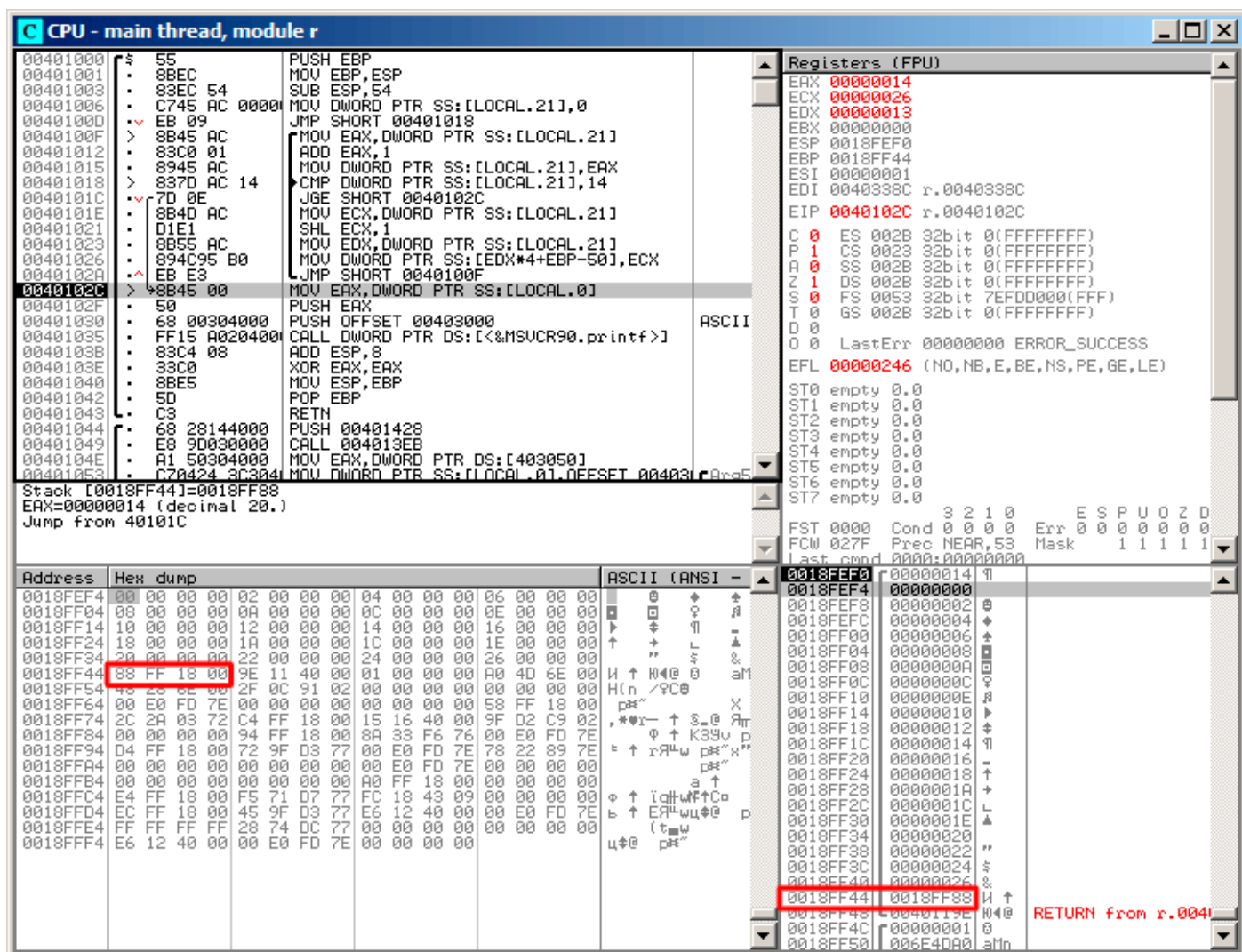


Рис. 1.80: OllyDbg: чтение 20-го элемента и вызов printf()

Что это за значение? Судя по разметке стека, это сохраненное значение регистра EBP.

Трассируем далее, и видим, как оно восстанавливается:

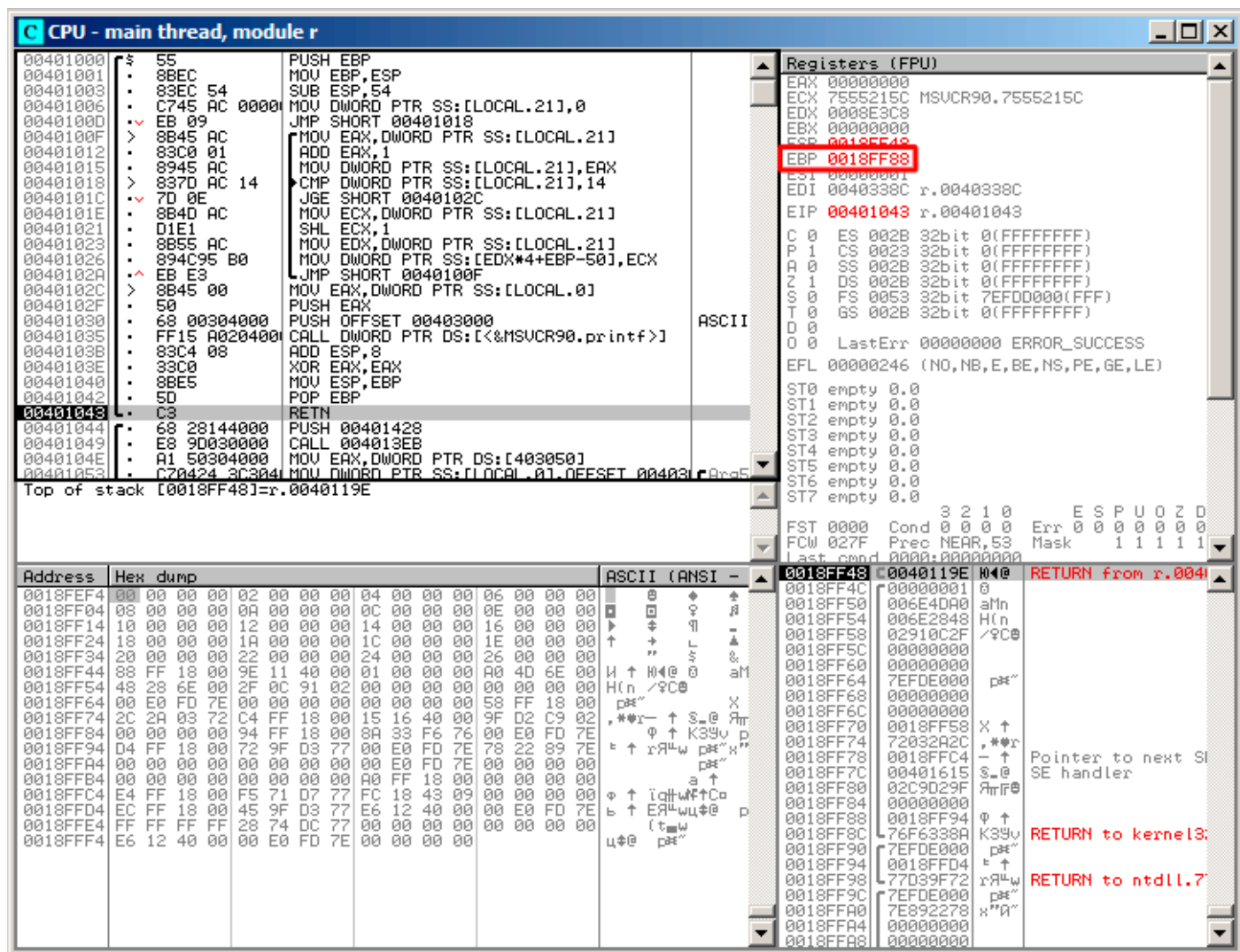


Рис. 1.81: OllyDbg: восстановление EBP

Действительно, а как могло бы быть иначе? Компилятор мог бы встроить какой-то код, каждый раз проверяющий индекс на соответствие пределам массива, как в языках программирования более высокого уровня¹³³, что делало бы запускаемый код медленнее.

Запись за пределы массива

Итак, мы прочитали какое-то число из стека явно *нелегально*, а что если мы запишем?

Вот что мы пишем:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int a[20];
    int i;

    for (i=0; i<30; i++)
        a[i]=i;

    return 0;
};
```

¹³³Java, Python, итд.

И вот что имеем на ассемблере:

Листинг 1.226: Неоптимизирующий MSVC 2008

```

_TEXT      SEGMENT
_i$ = -84 ; size = 4
_a$ = -80 ; size = 80
_main      PROC
push       ebp
mov        ebp, esp
sub        esp, 84
mov        DWORD PTR _i$[ebp], 0
jmp        SHORT $LN3@main
$LN2@main:
mov        eax, DWORD PTR _i$[ebp]
add        eax, 1
mov        DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN3@main:
cmp        DWORD PTR _i$[ebp], 30 ; 0000001eH
jge        SHORT $LN1@main
mov        ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
mov        edx, DWORD PTR _i$[ebp] ; явный промах компилятора. эта инструкция лишняя.
mov        DWORD PTR _a$[ebp+ecx*4], edx ; а здесь в качестве второго операнда подошел бы ECX.
jmp        SHORT $LN2@main
$LN1@main:
xor        eax, eax
mov        esp, ebp
pop        ebp
ret        0
_main      ENDP

```

Запускаете скомпилированную программу, и она падает. Немудрено. Но давайте теперь узнаем, где именно.

1.20. МАССИВЫ

Загружаем в OllyDbg, трассируем пока запишутся все 30 элементов:

The screenshot shows the OllyDbg interface with the following components:

- Assembly View:** Displays assembly code for the main thread. The instruction at address 0040102F is highlighted, showing a RETN instruction. The stack pointer (ESP) is at 0040102F.
- Registers (FPU):** A list of registers. The EBP register is highlighted with a red box and contains the value 00000014. Other registers like EAX, ECX, EDX, etc., are also visible.
- Memory Dump:** A table showing the stack contents. The top of the stack is at address 0018FF48, which is highlighted with a red box. The dump shows a sequence of 30 elements, each represented by a hex value and its ASCII representation.

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00401000	55	
00401001	8BEC	
00401003	83EC 54	
00401006	C745 AC 0000	
0040100D	EB 09	
0040100F	8B45 AC	
00401012	83C0 01	
00401015	8945 AC	
00401018	837D AC 1E	
0040101C	7D 0C	
0040101E	8B4D AC	
00401021	8B55 AC	
00401024	89548D B0	
00401028	EB E5	
0040102A	33C0	
0040102C	8BE5	
0040102E	5D	
0040102F	C3	
00401030	68 14144000	
00401035	E8 9D030000	
0040103A	A1 40304000	
0040103F	C70424 2C3040	
00401046	FF35 3C304000	

Рис. 1.82: OllyDbg: после восстановления EBP

Доходим до конца функции:

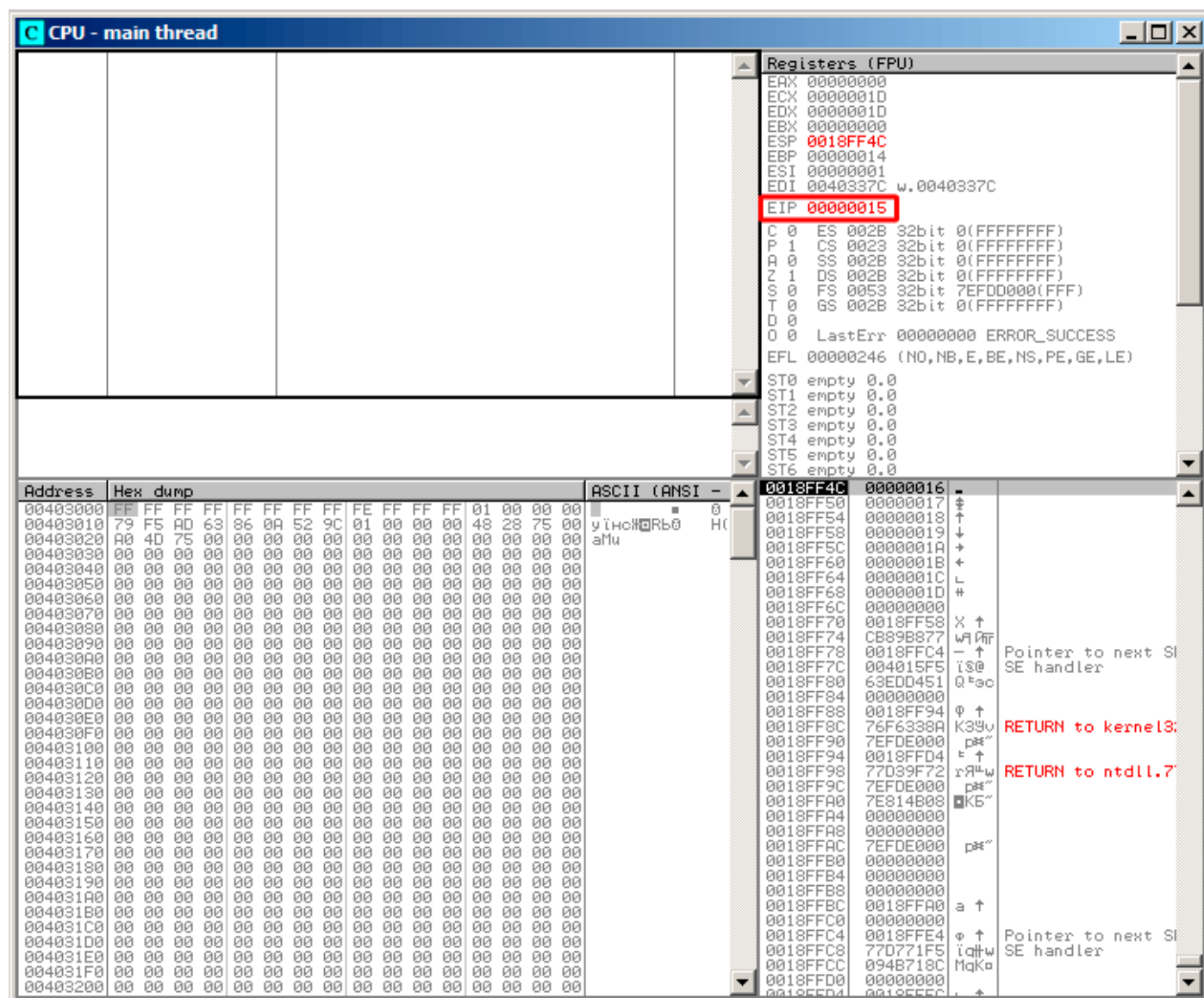


Рис. 1.83: OllyDbg: EIP восстановлен, но OllyDbg не может дизассемблировать по адресу 0x15

Итак, следите внимательно за регистрами.

EIP теперь 0x15. Это явно нелегальный адрес для кода — по крайней мере, win32-кода! Мы там как-то очутились, причем, сами того не хотели. Интересен также тот факт, что в EBP хранится 0x14, а в ECX и EDX хранится 0x1D.

Ещё немного изучим разметку стека.

После того как управление передалось в `main()`, в стек было сохранено значение EBP. Затем для массива и переменной `i` было выделено 84 байта. Это $(20+1)*\text{sizeof}(\text{int})$. ESP сейчас указывает на переменную `_i` в локальном стеке и при исполнении следующего `PUSH` что-либо, что-либо появится рядом с `_i`.

Вот так выглядит разметка стека пока управление находится внутри `main()`:

ESP	4 байта выделенных для переменной <code>i</code>
ESP+4	80 байт выделенных для массива <code>a[20]</code>
ESP+84	сохраненное значение EBP
ESP+88	адрес возврата

Выражение `a[19]=что_нибудь` записывает последний `int` в пределах массива (пока что в пределах!).

Выражение `a[20]=что_нибудь` записывает что-нибудь на место где сохранено значение EBP.

1.20. МАССИВЫ

Обратите внимание на состояние регистров на момент падения процесса. В нашем случае в 20-й элемент записалось значение 20. И вот всё дело в том, что заканчиваясь, эпилог функции восстанавливал значение EBP (20 в десятичной системе это как раз 0x14 в шестнадцатеричной). Далее выполнялась инструкция RET, которая на самом деле эквивалентна POP EIP.

Инструкция RET вытащила из стека адрес возврата (это адрес где-то внутри CRT, которая вызвала main()), а там было записано 21 в десятичной системе, то есть 0x15 в шестнадцатеричной. И вот процессор оказался по адресу 0x15, но исполняемого кода там нет, так что случилось исключение.

Добро пожаловать! Это называется *buffer overflow*¹³⁴.

Замените массив *int* на строку (массив *char*), нарочно создайте слишком длинную строку, передайте её в ту программу, в ту функцию, которая не проверяя длину строки скопирует её в слишком короткий буфер, и вы сможете указать программе, по какому именно адресу перейти. Не всё так просто в реальности, конечно, но началось всё с этого. Классическая статья об этом: [Aleph One, *Smashing The Stack For Fun And Profit*, (1996)]¹³⁵.

GCC

Попробуем то же самое в GCC 4.4.1. У нас выходит такое:

```
main      public main
          proc near
a          = dword ptr -54h
i          = dword ptr -4

          push    ebp
          mov     ebp, esp
          sub     esp, 60h ; 96
          mov     [ebp+i], 0
          jmp     short loc_80483D1

loc_80483C3:
          mov     eax, [ebp+i]
          mov     edx, [ebp+i]
          mov     [ebp+eax*4+a], edx
          add     [ebp+i], 1

loc_80483D1:
          cmp     [ebp+i], 1Dh
          jle     short loc_80483C3
          mov     eax, 0
          leave
          retn
main      endp
```

Запуск этого в Linux выдаст: Segmentation fault.

Если запустить полученное в отладчике GDB, получим:

```
(gdb) r
Starting program: /home/dennis/RE/1

Program received signal SIGSEGV, Segmentation fault.
0x00000016 in ?? ()
(gdb) info registers
eax          0x0          0
ecx          0xd2f96388    -755407992
edx          0x1d         29
ebx          0x26eff4      2551796
esp          0xbffff4b0    0xbffff4b0
ebp          0x15         0x15
esi          0x0          0
edi          0x0          0
eip          0x16         0x16
eflags      0x10202      [ IF RF ]
cs          0x73         115
```

¹³⁴[wikipedia](#)

¹³⁵Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17266>

1.20. МАССИВЫ

ss	0x7b	123
ds	0x7b	123
es	0x7b	123
fs	0x0	0
gs	0x33	51
(gdb)		

Значения регистров немного другие, чем в примере win32, потому что разметка стека чуть другая.

1.20.3. Защита от переполнения буфера

В наше время пытаются бороться с переполнением буфера невзирая на халатность программистов на Си/Си++. В MSVC есть опции вроде¹³⁶:

```
/RTCs Stack Frame runtime checking
/GZ Enable stack checks (/RTCs)
```

Одним из методов является вставка в прологе функции некоего случайного значения в область локальных переменных и проверка этого значения в эпилоге функции перед выходом. Если проверка не прошла, то не выполнять инструкцию RET, а остановиться (или зависнуть). Процесс зависнет, но это лучше, чем удаленная атака на ваш компьютер.

Это случайное значение иногда называют «канарейкой»¹³⁷, по аналогии с шахтной канарейкой¹³⁸. Раньше использовали шахтеры, чтобы определять, есть ли в шахте опасный газ.

Канарейки очень к нему чувствительны и либо проявляли сильное беспокойство, либо гибли от газа.

Если скомпилировать наш простейший пример работы с массивом (1.20.1 (стр. 258)) в MSVC с опцией RTC1 или RTCs, в конце нашей функции будет вызов функции @ _RTC_CheckStackVars@8, проверяющей корректность «канарейки».

Посмотрим, как дела обстоят в GCC. Возьмем пример из секции про alloca() (1.7.2 (стр. 35)):

```
#ifdef __GNUC__
#include <alloca.h> // GCC
#else
#include <malloc.h> // MSVC
#endif
#include <stdio.h>

void f()
{
    char *buf=(char*)alloca (600);
#ifdef __GNUC__
    snprintf (buf, 600, "hi! %d, %d, %d\n", 1, 2, 3); // GCC
#else
    _snprintf (buf, 600, "hi! %d, %d, %d\n", 1, 2, 3); // MSVC
#endif

    puts (buf);
};
```

По умолчанию, без дополнительных ключей, GCC 4.7.3 вставит в код проверку «канарейки»:

Листинг 1.227: GCC 4.7.3

```
.LC0:
.string "hi! %d, %d, %d\n"
f:
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ebx
    sub     esp, 676
    lea     ebx, [esp+39]
```

¹³⁶Описания защит, которые компилятор может вставлять в код: wikipedia.org/wiki/Buffer_overflow_protection

¹³⁷«canary» в англоязычной литературе

¹³⁸miningwiki.ru/wiki/Канарейка_в_шахте

1.20. МАССИВЫ

```
and     ebx, -16
mov     DWORD PTR [esp+20], 3
mov     DWORD PTR [esp+16], 2
mov     DWORD PTR [esp+12], 1
mov     DWORD PTR [esp+8], OFFSET FLAT:.LC0 ; "hi! %d, %d, %d\n"
mov     DWORD PTR [esp+4], 600
mov     DWORD PTR [esp], ebx
mov     eax, DWORD PTR gs:20 ; канарейка
mov     DWORD PTR [ebp-12], eax
xor     eax, eax
call    _snprintf
mov     DWORD PTR [esp], ebx
call    puts
mov     eax, DWORD PTR [ebp-12]
xor     eax, DWORD PTR gs:20 ; проверка канарейки
jne     .L5
mov     ebx, DWORD PTR [ebp-4]
leave
ret
.L5:
call    __stack_chk_fail
```

Случайное значение находится в `gs:20`. Оно записывается в стек, затем, в конце функции, значение в стеке сравнивается с корректной «канарейкой» в `gs:20`. Если значения не равны, будет вызвана функция `__stack_chk_fail` и в консоли мы увидим что-то вроде такого (Ubuntu 13.04 x86):

```
*** buffer overflow detected ***: ./2_1 terminated
===== Backtrace: =====
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(__fortify_fail+0x63)[0xb7699bc3]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(+0x10593a)[0xb769893a]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(+0x105008)[0xb7698008]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(_IO_default_xsputn+0x8c)[0xb7606e5c]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(_IO_vfprintf+0x165)[0xb75d7a45]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(__vsprintf_chk+0xc9)[0xb76980d9]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(__sprintf_chk+0x2f)[0xb7697fef]
./2_1[0x8048404]
/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6(__libc_start_main+0xf5)[0xb75ac935]
===== Memory map: =====
08048000-08049000 r-xp 00000000 08:01 2097586 /home/dennis/2_1
08049000-0804a000 r--p 00000000 08:01 2097586 /home/dennis/2_1
0804a000-0804b000 rw-p 00001000 08:01 2097586 /home/dennis/2_1
094d1000-094f2000 rw-p 00000000 00:00 0 [heap]
b7560000-b757b000 r-xp 00000000 08:01 1048602 /lib/i386-linux-gnu/libgcc_s.so.1
b757b000-b757c000 r--p 0001a000 08:01 1048602 /lib/i386-linux-gnu/libgcc_s.so.1
b757c000-b757d000 rw-p 0001b000 08:01 1048602 /lib/i386-linux-gnu/libgcc_s.so.1
b7592000-b7593000 rw-p 00000000 00:00 0
b7593000-b7740000 r-xp 00000000 08:01 1050781 /lib/i386-linux-gnu/libc-2.17.so
b7740000-b7742000 r--p 001ad000 08:01 1050781 /lib/i386-linux-gnu/libc-2.17.so
b7742000-b7743000 rw-p 001af000 08:01 1050781 /lib/i386-linux-gnu/libc-2.17.so
b7743000-b7746000 rw-p 00000000 00:00 0
b775a000-b775d000 rw-p 00000000 00:00 0
b775d000-b775e000 r-xp 00000000 00:00 0 [vdso]
b775e000-b777e000 r-xp 00000000 08:01 1050794 /lib/i386-linux-gnu/ld-2.17.so
b777e000-b777f000 r--p 0001f000 08:01 1050794 /lib/i386-linux-gnu/ld-2.17.so
b777f000-b7780000 rw-p 00020000 08:01 1050794 /lib/i386-linux-gnu/ld-2.17.so
b7ff35000-b7ff56000 rw-p 00000000 00:00 0 [stack]
Aborted (core dumped)
```

`gs` это так называемый сегментный регистр. Эти регистры широко использовались во времена MS-DOS и DOS-экстендеров. Сейчас их функция немного изменилась. Если говорить кратко, в Linux `gs` всегда указывает на [TLS¹³⁹](#) (6.2 (стр. 721)) — там находится различная информация, специфичная для выполняющегося потока.

Кстати, в win32 эту же роль играет сегментный регистр `fs`, он всегда указывает на [TIB^{140 141}](#).

Больше информации можно почерпнуть из исходных кодов Linux (по крайней мере, в версии 3.11): в файле `arch/x86/include/asm/stackprotector.h` в комментариях описывается эта переменная.

¹³⁹Thread Local Storage

¹⁴⁰Thread Information Block

¹⁴¹wikipedia.org/wiki/Win32_Thread_Information_Block

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

Возвращаясь к нашему простому примеру (1.20.1 (стр. 258)), можно посмотреть, как LLVM добавит проверку «канарейки»:

```
_main
var_64      = -0x64
var_60      = -0x60
var_5C      = -0x5C
var_58      = -0x58
var_54      = -0x54
var_50      = -0x50
var_4C      = -0x4C
var_48      = -0x48
var_44      = -0x44
var_40      = -0x40
var_3C      = -0x3C
var_38      = -0x38
var_34      = -0x34
var_30      = -0x30
var_2C      = -0x2C
var_28      = -0x28
var_24      = -0x24
var_20      = -0x20
var_1C      = -0x1C
var_18      = -0x18
canary      = -0x14
var_10      = -0x10

    PUSH    {R4-R7,LR}
    ADD     R7, SP, #0xC
    STR.W   R8, [SP,#0xC+var_10]!
    SUB     SP, SP, #0x54
    MOVW    R0, #a0bjc_methtype ; "objc_methtype"
    MOVS    R2, #0
    MOVT.W  R0, #0
    MOVS    R5, #0
    ADD     R0, PC
    LDR.W   R8, [R0]
    LDR.W   R0, [R8]
    STR     R0, [SP,#0x64+canary]
    MOVS    R0, #2
    STR     R2, [SP,#0x64+var_64]
    STR     R0, [SP,#0x64+var_60]
    MOVS    R0, #4
    STR     R0, [SP,#0x64+var_5C]
    MOVS    R0, #6
    STR     R0, [SP,#0x64+var_58]
    MOVS    R0, #8
    STR     R0, [SP,#0x64+var_54]
    MOVS    R0, #0xA
    STR     R0, [SP,#0x64+var_50]
    MOVS    R0, #0xC
    STR     R0, [SP,#0x64+var_4C]
    MOVS    R0, #0xE
    STR     R0, [SP,#0x64+var_48]
    MOVS    R0, #0x10
    STR     R0, [SP,#0x64+var_44]
    MOVS    R0, #0x12
    STR     R0, [SP,#0x64+var_40]
    MOVS    R0, #0x14
    STR     R0, [SP,#0x64+var_3C]
    MOVS    R0, #0x16
    STR     R0, [SP,#0x64+var_38]
    MOVS    R0, #0x18
    STR     R0, [SP,#0x64+var_34]
    MOVS    R0, #0x1A
    STR     R0, [SP,#0x64+var_30]
    MOVS    R0, #0x1C
```

1.20. МАССИВЫ

```
STR    R0, [SP,#0x64+var_2C]
MOVS   R0, #0x1E
STR    R0, [SP,#0x64+var_28]
MOVS   R0, #0x20
STR    R0, [SP,#0x64+var_24]
MOVS   R0, #0x22
STR    R0, [SP,#0x64+var_20]
MOVS   R0, #0x24
STR    R0, [SP,#0x64+var_1C]
MOVS   R0, #0x26
STR    R0, [SP,#0x64+var_18]
MOV    R4, 0xFDA ; "a[%d]=%d\n"
MOV    R0, SP
ADDS   R6, R0, #4
ADD    R4, PC
B      loc_2F1C
```

; начало второго цикла

```
loc_2F14
ADDS   R0, R5, #1
LDR.W  R2, [R6,R5,LSL#2]
MOV    R5, R0
```

```
loc_2F1C
MOV    R0, R4
MOV    R1, R5
BLX    _printf
CMP    R5, #0x13
BNE    loc_2F14
LDR.W  R0, [R8]
LDR    R1, [SP,#0x64+canary]
CMP    R0, R1
ITTTT EQ ; канарейка все еще верна?
MOVEQ  R0, #0
ADDEQ  SP, SP, #0x54
LDREQ.W R8, [SP+0x64+var_64],#4
POPEQ  {R4-R7,PC}
BLX    __stack_chk_fail
```

Во-первых, LLVM «развернул» цикл и все значения записываются в массив по одному, уже вычисленные, потому что LLVM посчитал что так будет быстрее.

Кстати, инструкции режима ARM позволяют сделать это ещё быстрее и это может быть вашим домашним заданием.

В конце функции мы видим сравнение «канареек» — той что лежит в локальном стеке и корректной, на которую ссылается регистр R8.

Если они равны, срабатывает блок из четырех инструкций при помощи ITTTT EQ. Это запись 0 в R0, эпилог функции и выход из нее.

Если «канарейки» не равны, блок не срабатывает и происходит переход на функцию `__stack_chk_fail`, которая остановит работу программы.

1.20.4. Еще немного о массивах

Теперь понятно, почему нельзя написать в исходном коде на Си/Си++ что-то вроде:

```
void f(int size)
{
    int a[size];
    ...
};
```

Чтобы выделить место под массив в локальном стеке, компилятору нужно знать размер массива, чего он на стадии компиляции, разумеется, знать не может.

1.20. МАССИВЫ

Если вам нужен массив произвольной длины, то выделите столько, сколько нужно, через `malloc()`, а затем обращайтесь к выделенному блоку байт как к массиву того типа, который вам нужен.

Либо используйте возможность стандарта C99 [ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard), (2007)6.7.5/2], и внутри это очень похоже на `alloca()` (1.7.2 (стр. 35)).

Для работы в с памятью, можно также воспользоваться библиотекой сборщика мусора в Си.

А для языка Си++ есть библиотеки с поддержкой умных указателей.

1.20.5. Массив указателей на строки

Вот пример массива указателей.

Листинг 1.228: Получить имя месяца

```
#include <stdio.h>

const char* month1[]=
{
    "January", "February", "March", "April",
    "May", "June", "July", "August",
    "September", "October", "November", "December"
};

// в пределах 0..11
const char* get_month1 (int month)
{
    return month1[month];
};
```

x64

Листинг 1.229: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
_DATA    SEGMENT
month1    DQ      FLAT:$SG3122
          DQ      FLAT:$SG3123
          DQ      FLAT:$SG3124
          DQ      FLAT:$SG3125
          DQ      FLAT:$SG3126
          DQ      FLAT:$SG3127
          DQ      FLAT:$SG3128
          DQ      FLAT:$SG3129
          DQ      FLAT:$SG3130
          DQ      FLAT:$SG3131
          DQ      FLAT:$SG3132
          DQ      FLAT:$SG3133
$SG3122   DB      'January', 00H
$SG3123   DB      'February', 00H
$SG3124   DB      'March', 00H
$SG3125   DB      'April', 00H
$SG3126   DB      'May', 00H
$SG3127   DB      'June', 00H
$SG3128   DB      'July', 00H
$SG3129   DB      'August', 00H
$SG3130   DB      'September', 00H
$SG3156   DB      '%s', 0aH, 00H
$SG3131   DB      'October', 00H
$SG3132   DB      'November', 00H
$SG3133   DB      'December', 00H
_DATA    ENDS

month$ = 8
get_month1 PROC
    movsxd    rax, ecx
    lea       rcx, OFFSET FLAT:month1
    mov       rax, QWORD PTR [rcx+rax*8]
```

1.20. МАССИВЫ

```
ret 0
get_month1 ENDP
```

Код очень простой:

- Первая инструкция `MOVSXD` копирует 32-битное значение из `ECX` (где передается аргумент *month*) в `RAX` со знаковым расширением (потому что аргумент *month* имеет тип *int*).

Причина расширения в том, что это значение будет использоваться в вычислениях наряду с другими 64-битными значениями.

Таким образом, оно должно быть расширено до 64-битного ¹⁴².

- Затем адрес таблицы указателей загружается в `RCX`.
- В конце концов, входное значение (*month*) умножается на 8 и прибавляется к адресу. Действительно: мы в 64-битной среде и все адреса (или указатели) требуют для хранения именно 64 бита (или 8 байт). Следовательно, каждый элемент таблицы имеет ширину в 8 байт. Вот почему для выбора элемента под нужным номером нужно пропустить *month* * 8 байт от начала. Это то, что делает `MOV`. Эта инструкция также загружает элемент по этому адресу. Для 1, элемент будет указателем на строку, содержащую «February», итд.

Оптимизирующий GCC 4.9 может это сделать даже лучше ¹⁴³:

Листинг 1.230: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
movsx rdi, edi
mov rax, QWORD PTR month1[0+rdi*8]
ret
```

32-bit MSVC

Скомпилируем также в 32-битном компиляторе MSVC:

Листинг 1.231: Оптимизирующий MSVC 2013 x86

```
_month$ = 8
_get_month1 PROC
    mov     eax, DWORD PTR _month$[esp-4]
    mov     eax, DWORD PTR _month1[eax*4]
    ret     0
_get_month1 ENDP
```

Входное значение не нужно расширять до 64-битного значения, так что оно используется как есть. И оно умножается на 4, потому что элементы таблицы имеют ширину 32 бита или 4 байта.

32-битный ARM

ARM в режиме ARM

Листинг 1.232: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
get_month1 PROC
    LDR     r1, |L0.100|
    LDR     r0, [r1, r0, LSL #2]
    BX     lr
ENDP

|L0.100|
    DCD     ||.data||
```

¹⁴²Это немного странная вещь, но отрицательный индекс массива может быть передан как *month* (отрицательные индексы массивов будут рассмотрены позже: 3.19 (стр. 585)). И если так будет, отрицательное значение типа *int* будет расширено со знаком корректно и соответствующий элемент перед таблицей будет выбран. Всё это не будет корректно работать без знакового расширения.

¹⁴³В листинге осталась «0+», потому что вывод ассемблера GCC не так скрупулёзен, чтобы убрать это. Это *displacement* и он здесь нулевой.

1.20. МАССИВЫ

```
DCB      "January",0
DCB      "February",0
DCB      "March",0
DCB      "April",0
DCB      "May",0
DCB      "June",0
DCB      "July",0
DCB      "August",0
DCB      "September",0
DCB      "October",0
DCB      "November",0
DCB      "December",0

AREA ||.data||, DATA, ALIGN=2
month1
DCD      ||.conststring||
DCD      ||.conststring||+0x8
DCD      ||.conststring||+0x11
DCD      ||.conststring||+0x17
DCD      ||.conststring||+0x1d
DCD      ||.conststring||+0x21
DCD      ||.conststring||+0x26
DCD      ||.conststring||+0x2b
DCD      ||.conststring||+0x32
DCD      ||.conststring||+0x3c
DCD      ||.conststring||+0x44
DCD      ||.conststring||+0x4d
```

Адрес таблицы загружается в R1.

Всё остальное делается, используя только одну инструкцию LDR.

Входное значение *month* сдвигается влево на 2 (что тоже самое что и умножение на 4), это значение прибавляется к R1 (где находится адрес таблицы) и затем элемент таблицы загружается по этому адресу.

32-битный элемент таблицы загружается в R0 из таблицы.

ARM в режиме Thumb

Код почти такой же, только менее плотный, потому что здесь, в инструкции LDR, нельзя задать суффикс LSL:

```
get_month1 PROC
    LSLS    r0,r0,#2
    LDR     r1,|L0.64|
    LDR     r0,[r1,r0]
    BX      lr
ENDP
```

ARM64

Листинг 1.233: Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64

```
get_month1:
    adrp    x1, .LANCHOR0
    add     x1, x1, :lo12:.LANCHOR0
    ldr     x0, [x1,w0,sxtw 3]
    ret

.LANCHOR0 = . + 0
.type      month1, %object
.size      month1, 96
month1:
    .xword  .LC2
    .xword  .LC3
    .xword  .LC4
```


1.20. МАССИВЫ

```
.xword .LC5
.xword .LC6
.xword .LC7
.xword .LC8
.xword .LC9
.xword .LC10
.xword .LC11
.xword .LC12
.xword .LC13
.LC2:
.string "January"
.LC3:
.string "February"
.LC4:
.string "March"
.LC5:
.string "April"
.LC6:
.string "May"
.LC7:
.string "June"
.LC8:
.string "July"
.LC9:
.string "August"
.LC10:
.string "September"
.LC11:
.string "October"
.LC12:
.string "November"
.LC13:
.string "December"
```

Адрес таблицы загружается в X1 используя пару ADRP/ADD.

Соответствующий элемент выбирается используя одну инструкцию LDR, которая берет W0 (регистр, где находится значение входного аргумента *month*), сдвигает его на 3 бита влево (что то же самое что и умножение на 8), расширяет его, учитывая знак (это то, что означает суффикс «sxtw») и прибавляет к X0.

Затем 64-битное значение загружается из таблицы в X0.

MIPS

Листинг 1.234: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
get_month1:
; загрузить адрес таблицы в $v0:
    la      $v0, month1
; взять входное значение и умножить его на 4:
    sll     $a0, 2
; сложить адрес таблицы и умноженное значение:
    addu    $a0, $v0
; загрузить элемент таблицы по этому адресу в $v0:
    lw      $v0, 0($a0)
; возврат
    jr      $ra
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP

    .data # .data.rel.local
    .globl month1
month1:
    .word aJanuary      # "January"
    .word aFebruary     # "February"
    .word aMarch         # "March"
    .word aApril         # "April"
    .word aMay           # "May"
    .word aJune          # "June"
    .word aJuly          # "July"
```

1.20. МАССИВЫ

```
.word aAugust      # "August"
.word aSeptember   # "September"
.word aOctober     # "October"
.word aNovember    # "November"
.word aDecember    # "December"

.data # .rodata.str1.4
aJanuary: .ascii "January"<0>
aFebruary: .ascii "February"<0>
aMarch: .ascii "March"<0>
aApril: .ascii "April"<0>
aMay: .ascii "May"<0>
aJune: .ascii "June"<0>
aJuly: .ascii "July"<0>
aAugust: .ascii "August"<0>
aSeptember: .ascii "September"<0>
aOctober: .ascii "October"<0>
aNovember: .ascii "November"<0>
aDecember: .ascii "December"<0>
```

Переполнение массива

Наша функция принимает значения в пределах 0..11, но что будет, если будет передано 12?

В таблице в этом месте нет элемента. Так что функция загрузит какое-то значение, которое волею случая находится там, и вернет его.

Позже, какая-то другая функция попытается прочитать текстовую строку по этому адресу и, возможно, упадет.

Скомпилируем этот пример в MSVC для win64 и откроем его в [IDA](#) чтобы посмотреть, что линкер расположил после таблицы:

Листинг 1.235: Исполняемый файл в IDA

```
off_140011000 dq offset aJanuary_1 ; DATA XREF: .text:0000000140001003
; "January"
dq offset aFebruary_1 ; "February"
dq offset aMarch_1 ; "March"
dq offset aApril_1 ; "April"
dq offset aMay_1 ; "May"
dq offset aJune_1 ; "June"
dq offset aJuly_1 ; "July"
dq offset aAugust_1 ; "August"
dq offset aSeptember_1 ; "September"
dq offset aOctober_1 ; "October"
dq offset aNovember_1 ; "November"
dq offset aDecember_1 ; "December"
aJanuary_1 db 'January',0 ; DATA XREF: sub_140001020+4
; .data:off_140011000
aFebruary_1 db 'February',0 ; DATA XREF: .data:0000000140011008
align 4
aMarch_1 db 'March',0 ; DATA XREF: .data:0000000140011010
align 4
aApril_1 db 'April',0 ; DATA XREF: .data:0000000140011018
```

Имена месяцев идут сразу после. Наша программа все-таки крошечная, так что здесь не так уж много данных (всего лишь названия месяцев) для расположения их в сегменте данных.

Но нужно заметить, что там может быть действительно *что угодно*, что линкер решит там расположить, случайным образом.

Так что будет если 12 будет передано в функцию? Вернется 13-й элемент таблицы. Посмотрим, как CPU обходится с байтами как с 64-битным значением:

Листинг 1.236: Исполняемый файл в IDA

```
off_140011000 dq offset qword_140011060
; DATA XREF: .text:0000000140001003
dq offset aFebruary_1 ; "February"
```

1.20. МАССИВЫ

```

dq offset aMarch_1      ; "March"
dq offset aApril_1      ; "April"
dq offset aMay_1        ; "May"
dq offset aJune_1       ; "June"
dq offset aJuly_1       ; "July"
dq offset aAugust_1     ; "August"
dq offset aSeptember_1  ; "September"
dq offset aOctober_1    ; "October"
dq offset aNovember_1   ; "November"
dq offset aDecember_1   ; "December"
qword_140011060 dq 797261756E614Ah ; DATA XREF: sub_140001020+4
                                ; .data:off_140011000
aFebruary_1 db 'February',0      ; DATA XREF: .data:00000000140011008
                                align 4
aMarch_1 db 'March',0           ; DATA XREF: .data:00000000140011010
```

И это 0x797261756E614A. После этого, какая-то другая функция (вероятно, работающая со строками) попытается загрузить байты по этому адресу, ожидая найти там Си-строку.

И скорее всего упадет, потому что это значение не выглядит как действительный адрес.

Защита от переполнения массива

Если какая-нибудь неприятность может случиться, она случается

Закон Мерфи

Немного наивно ожидать что всякий программист, кто будет использовать вашу функцию или библиотеку, никогда не передаст аргумент больше 11.

Существует также хорошая философия «fail early and fail loudly» или «fail-fast», которая учит сообщать об ошибках как можно раньше и останавливаться.

Один из таких методов в Си/Си++ это макрос `assert()`.

Мы можем немного изменить нашу программу, чтобы она падала при передаче неверного значения:

Листинг 1.237: `assert()` добавлен

```
const char* get_month1_checked (int month)
{
    assert (month<12);
    return month1[month];
};
```

Макрос будет проверять на верные значения во время каждого старта функции и падать если выражение возвращает `false`.

Листинг 1.238: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
$SG3143 DB 'm', 00H, 'o', 00H, 'n', 00H, 't', 00H, 'h', 00H, '.', 00H
        DB 'c', 00H, 00H, 00H
$SG3144 DB 'm', 00H, 'o', 00H, 'n', 00H, 't', 00H, 'h', 00H, '<', 00H
        DB '1', 00H, '2', 00H, 00H, 00H

month$ = 48
get_month1_checked PROC
$LN5:
    push    rbx
    sub     rsp, 32
    movsxd  rbx, ecx
    cmp     ebx, 12
    jl      SHORT $LN3@get_month1
    lea     rdx, OFFSET FLAT:$SG3143
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG3144
    mov     r8d, 29
    call    _wassert
$LN3@get_month1:
```

1.20. МАССИВЫ

```
    lea    rcx, OFFSET FLAT:month1
    mov    rax, QWORD PTR [rcx+rbx*8]
    add    rsp, 32
    pop    rbx
    ret    0
get_month1_checked ENDP
```

На самом деле, `assert()` это не функция, а макрос. Он проверяет условие и передает также номер строки и название файла в другую функцию, которая покажет эту информацию пользователю.

Мы видим, что здесь и имя файла и выражение закодировано в UTF-16.

Номер строки также передается (это 29).

Этот механизм, пожалуй, одинаковый во всех компиляторах.

Вот что делает GCC:

Листинг 1.239: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
.LC1:
    .string "month.c"
.LC2:
    .string "month<12"

get_month1_checked:
    cmp    edi, 11
    jg     .L6
    movsx  rdi, edi
    mov    rax, QWORD PTR month1[0+rdi*8]
    ret
.L6:
    push   rax
    mov    ecx, OFFSET FLAT: __PRETTY_FUNCTION__.2423
    mov    edx, 29
    mov    esi, OFFSET FLAT:.LC1
    mov    edi, OFFSET FLAT:.LC2
    call   __assert_fail

__PRETTY_FUNCTION__.2423:
    .string "get_month1_checked"
```

Так что макрос в GCC также передает и имя функции, для удобства.

Ничего не бывает бесплатным и проверки на корректность тоже.

Это может замедлить работу вашей программы, особенно если макрос `assert()` используется в маленькой критичной ко времени функции.

Так что, например, MSVC оставляет проверки в отладочных сборках, но в окончательных сборках они исчезают.

Ядра Microsoft [Windows NT](#) также идут в виде сборок «checked» и «free»¹⁴⁴. В первых есть проверки на корректность аргументов (отсюда «checked»), а во вторых — нет (отсюда «free», т.е. «свободные» от проверок).

Разумеется, «checked»-ядро работает медленнее из-за всех этих проверок, поэтому его обычно используют только на время отладки драйверов, либо самого ядра.

Доступ к определенному символу

К массиву указателей на строки можно обращаться так:

```
#include <stdio.h>

const char* month[]=
{
    "January", "February", "March", "April",
    "May", "June", "July", "August",
    "September", "October", "November", "December"
```

¹⁴⁴[msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/hardware/ff543450\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/hardware/ff543450(v=vs.85).aspx)

1.20. МАССИВЫ

```
};

int main()
{
    // 4-й месяц, 5-й символ:
    printf ("%c\n", month[3][4]);
};
```

...так как, выражение `month[3]` имеет тип `const char*`. И затем, 5-й символ берется из этого выражения прибавлением 4-й байт к его адресу.

Кстати, список аргументов передаваемый в ф-цию `main()` имеет такой же тип:

```
#include <stdio.h>

int main(int argc, char *argv[])
{
    printf ("3-й аргумент, 2-й символ: %c\n", argv[3][1]);
};
```

Очень важно понимать, что не смотря на одинаковый синтаксис, всё это отличается от двумерных массивов, которые мы будем рассматривать позже.

Еще одна важная вещь, которую нужно отметить: адресуемые строки должны быть закодированы в системе, в которой каждый символ занимает один байт, как [ASCII](#)¹⁴⁵ и расширенная [ASCII](#). UTF-8 здесь не будет работать.

1.20.6. Многомерные массивы

Внутри многомерный массив выглядит так же как и линейный.

Ведь память компьютера линейная, это одномерный массив. Но для удобства этот одномерный массив легко представить как многомерный.

К примеру, вот как элементы массива 3x4 расположены в одномерном массиве из 12 ячеек:

Смещение в памяти	элемент массива
0	[0][0]
1	[0][1]
2	[0][2]
3	[0][3]
4	[1][0]
5	[1][1]
6	[1][2]
7	[1][3]
8	[2][0]
9	[2][1]
10	[2][2]
11	[2][3]

Таблица 1.3: Двухмерный массив представляется в памяти как одномерный

Вот по каким адресам в памяти располагается каждая ячейка двумерного массива 3*4:

0	1	2	3
4	5	6	7
8	9	10	11

Таблица 1.4: Адреса в памяти каждой ячейки двумерного массива

Чтобы вычислить адрес нужного элемента, сначала умножаем первый индекс (строку) на 4 (ширину массива), затем прибавляем второй индекс (столбец).

¹⁴⁵American Standard Code for Information Interchange

1.20. МАССИВЫ

Это называется *row-major order*, и такой способ представления массивов и матриц используется по крайней мере в Си/Си++ и Python. Термин *row-major order* означает по-русски примерно следующее: «сначала записываем элементы первой строки, затем второй, ... и элементы последней строки в самом конце».

Другой способ представления называется *column-major order* (индексы массива используются в обратном порядке) и это используется по крайней мере в Фортране, MATLAB и R. Термин *column-major order* означает по-русски следующее: «сначала записываем элементы первого столбца, затем второго, ... и элементы последнего столбца в самом конце».

Какой из способов лучше? В терминах производительности и кэш-памяти, лучший метод организации данных это тот, при котором к данным обращаются последовательно.

Так что если ваша функция обращается к данным построчно, то *row-major order* лучше, и наоборот.

Пример с двумерным массивом

Мы будем работать с массивом типа *char*. Это значит, что каждый элемент требует только одного байта в памяти.

Пример с заполнением строки

Заполняем вторую строку значениями 0..3:

Листинг 1.240: Пример с заполнением строки

```
#include <stdio.h>

char a[3][4];

int main()
{
    int x, y;

    // очистить массив
    for (x=0; x<3; x++)
        for (y=0; y<4; y++)
            a[x][y]=0;

    // заполнить вторую строку значениями 0..3:
    for (y=0; y<4; y++)
        a[1][y]=y;
};
```

Все три строки обведены красным. Видно, что во второй теперь имеются байты 0, 1, 2 и 3:

Address	Hex dump
00C33370	00 00 00 00 00 01 02 03 00 00 00 00 00 00 00 00
00C33380	02 00 00 00 C3 66 47 4E C3 66 47 4E 00 00 00 00
00C33390	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00C333A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
00C333B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

Рис. 1.84: OllyDbg: массив заполнен

Пример с заполнением столбца

Заполняем третий столбец значениями 0..2:

Листинг 1.241: Пример с заполнением столбца

```
#include <stdio.h>

char a[3][4];

int main()
```

1.20. МАССИВЫ

```
{
    int x, y;

    // очистить массив
    for (x=0; x<3; x++)
        for (y=0; y<4; y++)
            a[x][y]=0;

    // заполнить третий столбец значениями 0..2:
    for (x=0; x<3; x++)
        a[x][2]=x;
};
```

Здесь также обведены красным три строки. Видно, что в каждой строке, на третьей позиции, теперь записаны 0, 1 и 2.

Address	Hex dump
01033380	00 00 00 00 00 00 01 00 00 00 02 00 02 00 00 00
01033390	00 00 00 00 1E HH EF 31 1E HH EF 31 00 00 00 00
010333A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
010333B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

Рис. 1.85: OllyDbg: массив заполнен

Работа с двумерным массивом как с одномерным

Мы можем легко убедиться, что можно работать с двумерным массивом как с одномерным, используя по крайней мере два метода:

```
#include <stdio.h>

char a[3][4];

char get_by_coordinates1 (char array[3][4], int a, int b)
{
    return array[a][b];
};

char get_by_coordinates2 (char *array, int a, int b)
{
    // обращаться с входным массивом как с одномерным
    // 4 здесь это ширина массива
    return array[a*4+b];
};

char get_by_coordinates3 (char *array, int a, int b)
{
    // обращаться с входным массивом как с указателем,
    // вычислить адрес, получить значение оттуда
    // 4 здесь это ширина массива
    return *(array+a*4+b);
};

int main()
{
    a[2][3]=123;
    printf ("%d\n", get_by_coordinates1(a, 2, 3));
    printf ("%d\n", get_by_coordinates2(a, 2, 3));
    printf ("%d\n", get_by_coordinates3(a, 2, 3));
};
```

Компилируете¹⁴⁶ и запускаете: мы увидим корректные значения.

Очарователен результат работы MSVC 2013 — все три процедуры одинаковые!

Листинг 1.242: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

¹⁴⁶Эта программа именно для Си а не Си++, компилируя в MSVC нужно сохранить файл с расширением .c

1.20. МАССИВЫ

```
array$ = 8
a$ = 16
b$ = 24
get_by_coordinates3 PROC
; RCX=адрес массива
; RDX=a
; R8=b
    movsxd    rax, r8d
; EAX=b
    movsxd    r9, edx
; R9=a
    add       rax, rcx
; RAX=b+адрес массива
    movzx     eax, BYTE PTR [rax+r9*4]
; AL=загрузить байт по адресу RAX+R9*4=b+адрес массива+a*4=адрес массива+a*4+b
    ret      0
get_by_coordinates3 ENDP

array$ = 8
a$ = 16
b$ = 24
get_by_coordinates2 PROC
    movsxd    rax, r8d
    movsxd    r9, edx
    add       rax, rcx
    movzx     eax, BYTE PTR [rax+r9*4]
    ret      0
get_by_coordinates2 ENDP

array$ = 8
a$ = 16
b$ = 24
get_by_coordinates1 PROC
    movsxd    rax, r8d
    movsxd    r9, edx
    add       rax, rcx
    movzx     eax, BYTE PTR [rax+r9*4]
    ret      0
get_by_coordinates1 ENDP
```

GCC сгенерировал практически одинаковые процедуры:

Листинг 1.243: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
; RDIадрес= массива
; RSI=a
; RDX=b

get_by_coordinates1:
; расширить входные 32-битные значения "a" и "b" до 64-битных
    movsx     rsi, esi
    movsx     rdx, edx
    lea       rax, [rdi+rsi*4]
; RAX=RDI+RSI*4=адрес массива+a*4
    movzx     eax, BYTE PTR [rax+rdx]
; AL=загрузить байт по адресу RAX+RDX=адрес массива+a*4+b
    ret

get_by_coordinates2:
    lea       eax, [rdx+rsi*4]
; RAX=RDX+RSI*4=b+a*4
    cdqe
    movzx     eax, BYTE PTR [rdi+rax]
; AL=загрузить байт по адресу RDI+RAX=адрес массива+b+a*4
    ret

get_by_coordinates3:
    sal       esi, 2
; ESI=a<<2=a*4
; расширить входные 32-битные значения "a*4" и "b" до 64-битных
    movsx     rdx, edx
```


1.20. МАССИВЫ

```
movsx    rsi, esi
add      rdi, rsi
; RDI=RDI+RSI=адрес массива+a*4
movzx    eax, BYTE PTR [rdi+rdx]
; AL=загрузить байт по адресу RDI+RDX=адрес массива+a*4+b
ret
```

Пример с трехмерным массивом

То же самое и для многомерных массивов. На этот раз будем работать с массивом типа *int*: каждый элемент требует 4 байта в памяти.

Попробуем:

Листинг 1.244: простой пример

```
#include <stdio.h>

int a[10][20][30];

void insert(int x, int y, int z, int value)
{
    a[x][y][z]=value;
};
```

x86

В итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.245: MSVC 2010

```
_DATA    SEGMENT
COMM     _a:DWORD:01770H
_DATA    ENDS
PUBLIC   _insert
_TEXT    SEGMENT
_x$ = 8           ; size = 4
_y$ = 12          ; size = 4
_z$ = 16          ; size = 4
_value$ = 20      ; size = 4
_insert  PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _x$[ebp]
    imul    eax, 2400           ; eax=600*4*x
    mov     ecx, DWORD PTR _y$[ebp]
    imul    ecx, 120           ; ecx=30*4*y
    lea     edx, DWORD PTR _a[edx+ecx] ; edx=a + 600*4*x + 30*4*y
    mov     eax, DWORD PTR _z$[ebp]
    mov     ecx, DWORD PTR _value$[ebp]
    mov     DWORD PTR [edx+eax*4], ecx ; *(edx+z*4)=значение
    pop     ebp
    ret     0
_insert  ENDP
_TEXT    ENDS
```

В принципе, ничего удивительного. В `insert()` для вычисления адреса нужного элемента массива три входных аргумента перемножаются по формуле $address = 600 \cdot 4 \cdot x + 30 \cdot 4 \cdot y + 4z$, чтобы представить массив трехмерным. Не забывайте также, что тип *int* 32-битный (4 байта), поэтому все коэффициенты нужно умножить на 4.

Листинг 1.246: GCC 4.4.1

```
insert    public insert
insert    proc near

x          = dword ptr 8
```

1.20. МАССИВЫ

```
y      = dword ptr 0Ch
z      = dword ptr 10h
value  = dword ptr 14h

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        push    ebx
        mov     ebx, [ebp+x]
        mov     eax, [ebp+y]
        mov     ecx, [ebp+z]
        lea     edx, [eax+eax]      ; edx=y*2
        mov     eax, edx           ; eax=y*2
        shl     eax, 4             ; eax=(y*2)<<4 = y*2*16 = y*32
        sub     eax, edx           ; eax=y*32 - y*2=y*30
        imul    edx, ebx, 600      ; edx=x*600
        add     eax, edx           ; eax=eax+edx=y*30 + x*600
        lea     edx, [eax+ecx]     ; edx=y*30 + x*600 + z
        mov     eax, [ebp+value]
        mov     dword ptr ds:a[edx*4], eax ; *(a+edx*4)=значение
        pop     ebx
        pop     ebp
        retn
insert  endp
```

Компилятор GCC решил всё сделать немного иначе. Для вычисления одной из операций ($30y$), GCC создал код, где нет самой операции умножения.

Происходит это так: $(y + y) \ll 4 - (y + y) = (2y) \ll 4 - 2y = 2 \cdot 16 \cdot y - 2y = 32y - 2y = 30y$. Таким образом, для вычисления $30y$ используется только операция сложения, операция битового сдвига и операция вычитания. Это работает быстрее.

ARM + Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

Листинг 1.247: Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

```
_insert
value  = -0x10
z      = -0xC
y      = -8
x      = -4

; выделить место в локальном стеке для 4 переменных типа int
SUB     SP, SP, #0x10
MOV     R9, 0xFC2 ; a
ADD     R9, PC
LDR.W   R9, [R9] ; получить указатель на массив
STR     R0, [SP,#0x10+x]
STR     R1, [SP,#0x10+y]
STR     R2, [SP,#0x10+z]
STR     R3, [SP,#0x10+value]
LDR     R0, [SP,#0x10+value]
LDR     R1, [SP,#0x10+z]
LDR     R2, [SP,#0x10+y]
LDR     R3, [SP,#0x10+x]
MOV     R12, 2400
MUL.W   R3, R3, R12
ADD     R3, R9
MOV     R9, 120
MUL.W   R2, R2, R9
ADD     R2, R3
LSLS    R1, R1, #2 ; R1=R1<<2
ADD     R1, R2
STR     R0, [R1] ; R1 – адрес элемента массива
; освободить блок в локальном стеке, выделенное для 4 переменных
ADD     SP, SP, #0x10
BX      LR
```

1.20. МАССИВЫ

Неоптимизирующий LLVM сохраняет все переменные в локальном стеке, хотя это и избыточно.

Адрес элемента массива вычисляется по уже рассмотренной формуле.

ARM + Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

Листинг 1.248: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb)

```
_insert
MOVW    R9, #0x10FC
MOV.W   R12, #2400
MOVT.W  R9, #0
RSB.W   R1, R1, R1, LSL#4 ; R1 = y. R1=y<<4 - y = y*16 - y = y*15
ADD     R9, PC
LDR.W   R9, [R9]          ; R9 = указатель на массив
MLA.W   R0, R0, R12, R9    ; R0 = x, R12 = 2400, R9 = указатель на а. R0=x*2400 + указатель на а
ADD.W   R0, R0, R1, LSL#3  ; R0 = R0+R1<<3 = R0+R1*8 = x*2400 + указатель на а + y*15*8 =
                          ; указатель на а + y*30*4 + x*600*4
STR.W   R3, [R0, R2, LSL#2] ; R2 = z, R3 = значение. адрес=R0+z*4 =
                          ; указатель на а + y*30*4 + x*600*4 + z*4
BX      LR
```

Тут используются уже описанные трюки для замены умножения на операции сдвига, сложения и вычитания.

Также мы видим новую для себя инструкцию RSB (*Reverse Subtract*). Она работает так же, как и SUB, только меняет операнды местами.

Зачем? SUB и RSB это те инструкции, ко второму операнду которых можно применить коэффициент сдвига, как мы видим и здесь: (LSL#4). Но этот коэффициент можно применить только ко второму операнду.

Для коммутативных операций, таких как сложение или умножение, операнды можно менять местами и это не влияет на результат.

Но вычитание — операция некоммутативная, так что для этих случаев существует инструкция RSB.

MIPS

Мой пример такой крошечный, что компилятор GCC решил разместить массив *a* в 64KiB-области, адресуемой при помощи Global Pointer.

Листинг 1.249: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
insert:
; $a0=x
; $a1=y
; $a2=z
; $a3=значение
        sll     $v0, $a0, 5
; $v0 = $a0<<5 = x*32
        sll     $a0, 3
; $a0 = $a0<<3 = x*8
        addu    $a0, $v0
; $a0 = $a0+$v0 = x*8+x*32 = x*40
        sll     $v1, $a1, 5
; $v1 = $a1<<5 = y*32
        sll     $v0, $a0, 4
; $v0 = $a0<<4 = x*40*16 = x*640
        sll     $a1, 1
; $a1 = $a1<<1 = y*2
        subu    $a1, $v1, $a1
; $a1 = $v1-$a1 = y*32-y*2 = y*30
        subu    $a0, $v0, $a0
; $a0 = $v0-$a0 = x*640-x*40 = x*600
        la     $gp, __gnu_local_gp
        addu    $a0, $a1, $a0
; $a0 = $a1+$a0 = y*30+x*600
```

1.20. МАССИВЫ

```
        addu    $a0, $a2
; $a0 = $a0+$a2 = y*30+x*600+z
; загрузить адрес таблицы:
        lw      $v0, (a & 0xFFFF)($gp)
; умножить индекс на 4 для поиска элемента таблицы:
        sll     $a0, 2
; сложить умноженный индекс и адрес таблицы:
        addu    $a0, $v0, $a0
; записать значение в таблицу и вернуть управление:
        jr      $ra
        sw      $a3, 0($a0)

        .comm a:0x1770
```

Ещё примеры

Компьютерный экран представляет собой двумерный массив, но видеобuffer это линейный одномерный массив. Мы рассматриваем это здесь: [8.12.2](#) (стр. 890).

Еще один пример в этой книге это игра “Сапер”: её поле это тоже двухмерный массив: [8.3](#).

1.20.7. Набор строк как двухмерный массив

Снова вернемся к примеру, который возвращает название месяца: листинг.1.228. Как видно, нужна как минимум одна операция загрузки из памяти для подготовки указателя на строку, состоящую из имени месяца.

Возможно ли избавиться от операции загрузки из памяти?

Да, если представить список строк как двумерный массив:

```
#include <stdio.h>
#include <assert.h>

const char month2[12][10]=
{
    { 'J','a','n','u','a','r','y', 0, 0, 0 },
    { 'F','e','b','r','u','a','r','y', 0, 0 },
    { 'M','a','r','c','h', 0, 0, 0, 0, 0 },
    { 'A','p','r','i','l', 0, 0, 0, 0, 0 },
    { 'M','a','y', 0, 0, 0, 0, 0, 0 },
    { 'J','u','n','e', 0, 0, 0, 0, 0, 0 },
    { 'J','u','l','y', 0, 0, 0, 0, 0, 0 },
    { 'A','u','g','u','s','t', 0, 0, 0, 0 },
    { 'S','e','p','t','e','m','b','e','r', 0 },
    { 'O','c','t','o','b','e','r', 0, 0, 0 },
    { 'N','o','v','e','m','b','e','r', 0, 0 },
    { 'D','e','c','e','m','b','e','r', 0, 0 }
};

// в пределах 0..11
const char* get_month2 (int month)
{
    return &month2[month][0];
};
```

Вот что получаем:

Листинг 1.250: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

month2	DB	04aH
	DB	061H
	DB	06eH
	DB	075H
	DB	061H
	DB	072H
	DB	079H

1.20. МАССИВЫ

```
DB    00H
DB    00H
DB    00H
...
get_month2 PROC
; расширить входное значение до 64-битного, учитывая знак
    movsxd    rax, ecx
    lea       rcx, QWORD PTR [rax+rax*4]
; RCX=месяц*4=месяц*5
    lea       rax, OFFSET FLAT:month2
; RAX=указатель на таблицу
    lea       rax, QWORD PTR [rax+rcx*2]
; RAX=указатель на таблицу + RCX*2=указатель на таблицу + месяц*5*2=указатель на таблицу +
    ↪ месяц*10
    ret       0
get_month2 ENDP
```

Здесь нет обращений к памяти вообще. Эта функция только вычисляет место, где находится первый символ названия месяца:

*pointer_to_the_table + month * 10*. Там также две инструкции LEA, которые работают как несколько инструкций MUL и MOV.

Ширина массива — 10 байт. Действительно, самая длинная строка это «September» (9 байт) плюс оконечивающий ноль, получается 10 байт.

Остальные названия месяцев дополнены нулевыми байтами, чтобы они занимали столько же места (10 байт).

Таким образом, наша функция и работает быстрее, потому что все строки начинаются с тех адресов, которые легко вычислить.

Оптимизирующий GCC 4.9 может ещё короче:

Листинг 1.251: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
movsx    rdi, edi
lea      rax, [rdi+rdi*4]
lea      rax, month2[rax+rax]
ret
```

LEA здесь также используется для умножения на 10.

Неоптимизирующие компиляторы делают умножение по-разному.

Листинг 1.252: Неоптимизирующий GCC 4.9 x64

```
get_month2:
    push     rbp
    mov     rbp, rsp
    mov     DWORD PTR [rbp-4], edi
    mov     eax, DWORD PTR [rbp-4]
    movsx   rdx, eax
; RDX = входное значение, расширенное учитывая знак
    mov     rax, rdx
; RAX = месяц
    sal     rax, 2
; RAX = месяц<<2 = месяц*4
    add     rax, rdx
; RAX = RAX+RDX = месяц*4+месяц = месяц*5
    add     rax, rax
; RAX = RAX*2 = месяц*5*2 = месяц*10
    add     rax, OFFSET FLAT:month2
; RAX = месяц*10 + указатель на таблицу
    pop     rbp
    ret
```

Неоптимизирующий MSVC просто использует инструкцию IMUL:

Листинг 1.253: Неоптимизирующий MSVC 2013 x64

```
month$ = 8
```

1.20. МАССИВЫ

```
get_month2 PROC
    mov     DWORD PTR [rsp+8], ecx
    movsxd  rax, DWORD PTR month$[rsp]
; RAX = расширенное до 64-битного входное значение, учитывая знак
    imul    rax, rax, 10
; RAX = RAX*10
    lea     rcx, OFFSET FLAT:month2
; RCX = указатель на таблицу
    add     rcx, rax
; RCX = RCX+RAX = указатель на таблицу+month*10
    mov     rax, rcx
; RAX = указатель на таблицу+месяц*10
    mov     ecx, 1
; RCX = 1
    imul    rcx, rcx, 0
; RCX = 1*0 = 0
    add     rax, rcx
; RAX = указатель на таблицу+месяц*10 + 0 = указатель на таблицу+месяц*10
    ret     0
get_month2 ENDP
```

Но вот что странно: зачем добавлять умножение на ноль и добавлять ноль к конечному результату?

Это выглядит как странность кодегенератора компилятора, который не был покрыт тестами компилятора. Но так или иначе, итоговый код работает корректно. Мы сознательно рассматриваем такие фрагменты кода, чтобы читатель понимал, что иногда не нужно ломать себе голову над подобными артефактами компиляторов.

32-bit ARM

Оптимизирующий Keil для режима Thumb использует инструкцию умножения MULS:

Листинг 1.254: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
; R0 = месяц
    MOVS    r1,#0xa
; R1 = 10
    MULS    r0,r1,r0
; R0 = R1*R0 = 10*месяц
    LDR     r1,|L0.68|
; R1 = указатель на таблицу
    ADDS    r0,r0,r1
; R0 = R0+R1 = 10*месяц + указатель на таблицу
    BX      lr
```

Оптимизирующий Keil для режима ARM использует операции сложения и сдвига:

Листинг 1.255: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
; R0 = месяц
    LDR     r1,|L0.104|
; R1 = указатель на таблицу
    ADD     r0,r0,r0,LSL #2
; R0 = R0+R0<<2 = R0+R0*4 = месяц*5
    ADD     r0,r1,r0,LSL #1
; R0 = R1+R0<<2 = указатель на таблицу + месяц*5*2 = указатель на таблицу + месяц*10
    BX      lr
```

ARM64

Листинг 1.256: Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64

```
; W0 = месяц
    sxtw    x0, w0
; X0 = расширить входное значение учитывая знак
    adrp    x1, .ANCHOR1
    add     x1, x1, :lo12:.ANCHOR1
```

1.20. МАССИВЫ

```
; X1 = указатель на таблицу
    add    x0, x0, x0, lsl 2
; X0 = X0+X0<<2 = X0+X0*4 = X0*5
    add    x0, x1, x0, lsl 1
; X0 = X1+X0<<1 = X1+X0*2 = указатель на таблицу + X0*10
    ret
```

SXTW используется для знакового расширения и расширения входного 32-битного значения в 64-битное и сохранения его в X0.

Пара ADRP/ADD используется для загрузки адреса таблицы.

У инструкции ADD также есть суффикс LSL, что помогает с умножением.

MIPS

Листинг 1.257: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
.globl get_month2
get_month2:
; $a0=месяц
    sll    $v0, $a0, 3
; $v0 = $a0<<3 = месяц*8
    sll    $a0, 1
; $a0 = $a0<<1 = месяц*2
    addu   $a0, $v0
; $a0 = месяц*2+месяц*8 = месяц*10
; загрузить адрес таблицы:
    la     $v0, month2
; сложить адрес таблицы и вычисленный индекс и вернуть управление:
    jr     $ra
    addu   $v0, $a0

month2:
    .ascii "January"<0>
    .byte 0, 0
aFebruary:
    .ascii "February"<0>
    .byte 0
aMarch:
    .ascii "March"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0
aApril:
    .ascii "April"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0
aMay:
    .ascii "May"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0, 0, 0
aJune:
    .ascii "June"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0, 0
aJuly:
    .ascii "July"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0, 0
aAugust:
    .ascii "August"<0>
    .byte 0, 0, 0
aSeptember:
    .ascii "September"<0>
aOctober:
    .ascii "October"<0>
    .byte 0, 0
aNovember:
    .ascii "November"<0>
    .byte 0
aDecember:
    .ascii "December"<0>
    .byte 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0
```

Вывод

Это немного олд-скульная техника для хранения текстовых строк. Много такого можно найти в Oracle RDBMS, например. Трудно сказать, стоит ли оно того на современных компьютерах. Так или иначе, это был хороший пример массивов, поэтому он был добавлен в эту книгу.

1.20.8. Вывод

Массив это просто набор значений в памяти, расположенных рядом друг с другом.

Это справедливо для любых типов элементов, включая структуры.

Доступ к определенному элементу массива это просто вычисление его адреса.

1.21. Кстати

Итак, указатель на массив и адрес первого элемента — это одно и то же. Вот почему выражения `ptr[0]` и `*ptr` в Си/Си++ равноценны. Любопытно что Hex-Rays часто заменяет первое вторым. Он делает это в тех случаях, когда не знает, что имеет дело с указателем на целый массив, и думает, что это указатель только на одну переменную.

1.21.1. Упражнения

- <http://challenges.re/62>
- <http://challenges.re/63>
- <http://challenges.re/64>
- <http://challenges.re/65>
- <http://challenges.re/66>

1.22. Работа с отдельными битами

Немало функций задают различные флаги в аргументах при помощи битовых полей¹⁴⁷.

Наверное, вместо этого можно было бы использовать набор переменных типа *bool*, но это было бы не очень экономно.

1.22.1. Проверка какого-либо бита

x86

Например в Win32 API:

```
HANDLE fh;

fh=CreateFile ("file", GENERIC_WRITE | GENERIC_READ, FILE_SHARE_READ, NULL, OPEN_ALWAYS,
↵ , FILE_ATTRIBUTE_NORMAL, NULL);
```

Получаем (MSVC 2010):

Листинг 1.258: MSVC 2010

```
push    0
push    128                ; 00000080H
push    4
push    0
push    1
push    -1073741824        ; c0000000H
push    OFFSET $SG78813
call    DWORD PTR __imp__CreateFileA@28
mov     DWORD PTR _fh$[ebp], eax
```

Заглянем в файл WinNT.h:

¹⁴⁷bit fields в англоязычной литературе

Листинг 1.259: WinNT.h

```
#define GENERIC_READ          (0x80000000L)
#define GENERIC_WRITE         (0x40000000L)
#define GENERIC_EXECUTE       (0x20000000L)
#define GENERIC_ALL           (0x10000000L)
```

Всё ясно, `GENERIC_READ | GENERIC_WRITE = 0x80000000 | 0x40000000 = 0xC0000000`, и это значение используется как второй аргумент для функции `CreateFile()` ¹⁴⁸.

Как `CreateFile()` будет проверять флаги? Заглянем в `KERNEL32.DLL` от Windows XP SP3 x86 и найдем в функции `CreateFileW()` в том числе и такой фрагмент кода:

Листинг 1.260: KERNEL32.DLL (Windows XP SP3 x86)

```
.text:7C83D429    test    byte ptr [ebp+dwDesiredAccess+3], 40h
.text:7C83D42D    mov     [ebp+var_8], 1
.text:7C83D434    jz      short loc_7C83D417
.text:7C83D436    jmp     loc_7C810817
```

Здесь мы видим инструкцию `TEST`. Впрочем, она берет не весь второй аргумент функции, а только его самый старший байт (`ebp+dwDesiredAccess+3`) и проверяет его на флаг `0x40` (имеется ввиду флаг `GENERIC_WRITE`).

`TEST` это то же что и `AND`, только без сохранения результата (вспомните что `CMP` это то же что и `SUB`, только без сохранения результатов (1.9.3 (стр. 86))).

Логика данного фрагмента кода примерно такая:

```
if ((dwDesiredAccess&0x40000000) == 0) goto loc_7C83D417
```

Если после операции `AND` останется этот бит, то флаг `ZF` не будет поднят и условный переход `JZ` не сработает. Переход возможен, только если в переменной `dwDesiredAccess` отсутствует бит `0x40000000` — тогда результат `AND` будет 0, флаг `ZF` будет поднят и переход сработает.

Попробуем GCC 4.4.1 и Linux:

```
#include <stdio.h>
#include <fcntl.h>

void main()
{
    int handle;

    handle=open ("file", O_RDWR | O_CREAT);
};
```

Получим:

Листинг 1.261: GCC 4.4.1

```
main      public main
          proc near

var_20    = dword ptr -20h
var_1C    = dword ptr -1Ch
var_4     = dword ptr -4

          push    ebp
          mov     ebp, esp
          and     esp, 0FFFFFFF0h
          sub     esp, 20h
          mov     [esp+20h+var_1C], 42h
          mov     [esp+20h+var_20], offset aFile ; "file"
          call    _open
          mov     [esp+20h+var_4], eax
          leave
          retn
main      endp
```

¹⁴⁸[msdn.microsoft.com/en-us/library/aa363858\(VS.85\).aspx](http://msdn.microsoft.com/en-us/library/aa363858(VS.85).aspx)

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Заглянем в реализацию функции `open()` в библиотеке `libc.so.6`, но обнаружим что там только системный вызов:

Листинг 1.262: `open()` (`libc.so.6`)

```
.text:000BE69B    mov     edx, [esp+4+mode] ; mode
.text:000BE69F    mov     ecx, [esp+4+flags] ; flags
.text:000BE6A3    mov     ebx, [esp+4+filename] ; filename
.text:000BE6A7    mov     eax, 5
.text:000BE6AC    int     80h                ; LINUX - sys_open
```

Значит, битовые поля флагов `open()` проверяются где-то в ядре Linux.

Разумеется, и стандартные библиотеки Linux и ядро Linux можно получить в виде исходников, но нам интересно попробовать разобраться без них.

При системном вызове `sys_open` управление в конечном итоге передается в `do_sys_open` в ядре Linux 2.6. Оттуда — в `do_filp_open()` (эта функция находится в исходниках ядра в файле `fs/namei.c`).

N.B. Помимо передачи параметров функции через стек, существует также возможность передавать некоторые из них через регистры. Такое соглашение о вызове называется `fastcall` (6.1.3 (стр. 714)). Оно работает немного быстрее, так как для чтения аргументов процессору не нужно обращаться к стеку, лежащему в памяти. В GCC есть опция `regparm`¹⁴⁹, и с её помощью можно задать, сколько аргументов можно передать через регистры.

Ядро Linux 2.6 собирается с опцией `-mregparm=3`^{150 151}.

Для нас это означает, что первые три аргумента функции будут передаваться через регистры EAX, EDX и ECX, а остальные через стек. Разумеется, если аргументов у функции меньше трех, то будет задействована только часть этих регистров.

Итак, качаем ядро 2.6.31, собираем его в Ubuntu, открываем в IDA, находим функцию `do_filp_open()`. В начале мы увидим что-то такое (комментарии мои):

Листинг 1.263: `do_filp_open()` (linux kernel 2.6.31)

```
do_filp_open    proc near
...
    push     ebp
    mov     ebp, esp
    push     edi
    push     esi
    push     ebx
    mov     ebx, ecx
    add     ebx, 1
    sub     esp, 98h
    mov     esi, [ebp+arg_4] ; acc_mode (пятый аргумент)
    test    bl, 3
    mov     [ebp+var_80], eax ; dfd (первый аргумент)
    mov     [ebp+var_7C], edx ; pathname (второй аргумент)
    mov     [ebp+var_78], ecx ; open_flag (третий аргумент)
    jnz     short loc_C01EF684
    mov     ebx, ecx        ; ebx <- open_flag
```

GCC сохраняет значения первых трех аргументов в локальном стеке. Иначе, если эти три регистра не трогать вообще, то функции компилятора, распределяющей переменные по регистрам (так называемый `register allocator`), будет очень тесно.

Далее находим примерно такой фрагмент кода:

Листинг 1.264: `do_filp_open()` (linux kernel 2.6.31)

```
loc_C01EF6B4:    ; CODE XREF: do_filp_open+4F
                test    bl, 40h        ; 0_CREAT
                jnz     loc_C01EF810
                mov     edi, ebx
                shr     edi, 11h
                xor     edi, 1
```

¹⁴⁹ohse.de/uwe/articles/gcc-attributes.html#func-regparm

¹⁵⁰kernelnewbies.org/Linux_2_6_20#head-042c62f290834eb1fe0a1942bbf5bb9a4accbc8f

¹⁵¹См. также файл `arch/x86/include/asm/calling.h` в исходниках ядра

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
and    edi, 1
test   ebx, 10000h
jz     short loc_C01EF6D3
or     edi, 2
```

0x40 — это значение макроса O_CREAT. open_flag проверяется на наличие бита 0x40 и если бит равен 1, то выполняется следующие за JNZ инструкции.

ARM

В ядре Linux 3.8.0 бит O_CREAT проверяется немного иначе.

Листинг 1.265: linux kernel 3.8.0

```
struct file *do_filp_open(int dfd, struct filename *pathname,
                          const struct open_flags *op)
{
    ...
    filp = path_openat(dfd, pathname, &nd, op, flags | LOOKUP_RCU);
    ...
}

static struct file *path_openat(int dfd, struct filename *pathname,
                                struct nameidata *nd, const struct open_flags *op, int flags)
{
    ...
    error = do_last(nd, &path, file, op, &opened, pathname);
    ...
}

static int do_last(struct nameidata *nd, struct path *path,
                  struct file *file, const struct open_flags *op,
                  int *opened, struct filename *name)
{
    ...
    if (!(open_flag & O_CREAT)) {
        ...
        error = lookup_fast(nd, path, &inode);
        ...
    } else {
        ...
        error = complete_walk(nd);
    }
    ...
}
```

Вот как это выглядит в [IDA](#), ядро скомпилированное для режима ARM:

Листинг 1.266: do_last() из vmlinux (IDA)

```
.text:C0169EA8    MOV     R9, R3 ; R3 - (4th argument) open_flag
...
.text:C0169ED4    LDR     R6, [R9] ; R6 - open_flag
...
.text:C0169F68    TST     R6, #0x40 ; jumptable C0169F00 default case
.text:C0169F6C    BNE     loc_C016A128
.text:C0169F70    LDR     R2, [R4, #0x10]
.text:C0169F74    ADD     R12, R4, #8
.text:C0169F78    LDR     R3, [R4, #0xC]
.text:C0169F7C    MOV     R0, R4
.text:C0169F80    STR     R12, [R11, #var_50]
.text:C0169F84    LDRB    R3, [R2, R3]
.text:C0169F88    MOV     R2, R8
.text:C0169F8C    CMP     R3, #0
.text:C0169F90    ORRNE   R1, R1, #3
.text:C0169F94    STRNE   R1, [R4, #0x24]
.text:C0169F98    ANDS    R3, R6, #0x200000
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
.text:C0169F9C      MOV      R1, R12
.text:C0169FA0      LDRNE     R3, [R4,#0x24]
.text:C0169FA4      ANDNE     R3, R3, #1
.text:C0169FA8      EORNE     R3, R3, #1
.text:C0169FAC      STR      R3, [R11,#var_54]
.text:C0169FB0      SUB      R3, R11, #-var_38
.text:C0169FB4      BL       lookup_fast
...
.text:C016A128      loc_C016A128    ; CODE XREF: do_last.isra.14+DC
.text:C016A128      MOV      R0, R4
.text:C016A12C      BL       complete_walk
...
```

TST это аналог инструкции TEST в x86. Мы можем «узнать» визуально этот фрагмент кода по тому что в одном случае исполнится функция `lookup_fast()`, а в другом `complete_walk()`. Это соответствует исходному коду функции `do_last()`. Макрос `0_CREAT` здесь так же равен `0x40`.

1.22.2. Установка и сброс отдельного бита

Например:

```
#include <stdio.h>

#define IS_SET(flag, bit)      ((flag) & (bit))
#define SET_BIT(var, bit)      ((var) |= (bit))
#define REMOVE_BIT(var, bit)   ((var) &= ~(bit))

int f(int a)
{
    int rt=a;

    SET_BIT (rt, 0x4000);
    REMOVE_BIT (rt, 0x200);

    return rt;
};

int main()
{
    f(0x12340678);
};
```

x86

Неоптимизирующий MSVC

Имеем в итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.267: MSVC 2010

```
_rt$ = -4          ; size = 4
_a$ = 8            ; size = 4
_f  PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    ecx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    mov     DWORD PTR _rt$[ebp], eax
    mov     ecx, DWORD PTR _rt$[ebp]
    or      ecx, 16384          ; 00004000H
    mov     DWORD PTR _rt$[ebp], ecx
    mov     edx, DWORD PTR _rt$[ebp]
    and     edx, -513           ; ffffffffH
    mov     DWORD PTR _rt$[ebp], edx
    mov     eax, DWORD PTR _rt$[ebp]
    mov     esp, ebp
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
    pop     ebp
    ret     0
_f: ENDP
```

Инструкция OR здесь устанавливает регистре один бит, игнорируя остальные биты-единицы.

А AND сбрасывает некий бит. Можно также сказать, что AND здесь копирует все биты, кроме одного. Действительно, во втором операнде AND выставлены в единицу те биты, которые нужно сохранить, кроме одного, копировать который мы не хотим (и который 0 в битовой маске). Так проще понять и запомнить.

(0b10010001101000000011001111000). Видим, как оно загрузилось:

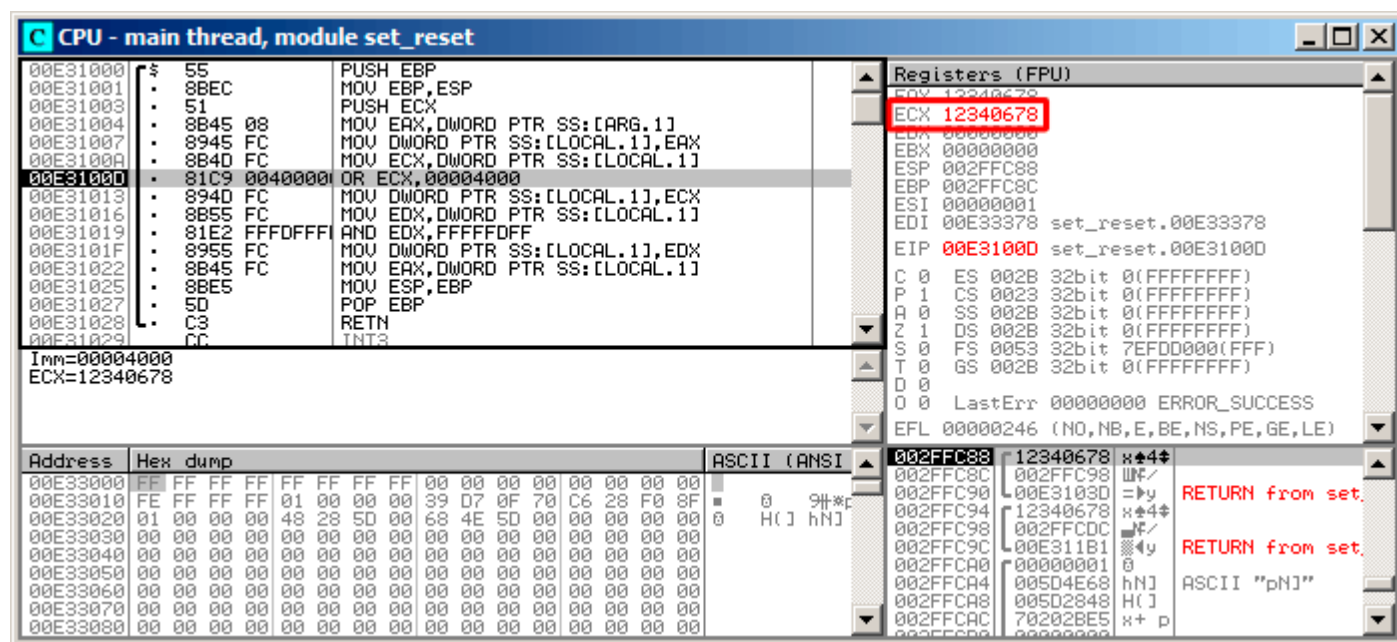


Рис. 1.86: OllyDbg: значение загружено в ECX

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

OR исполнилась:

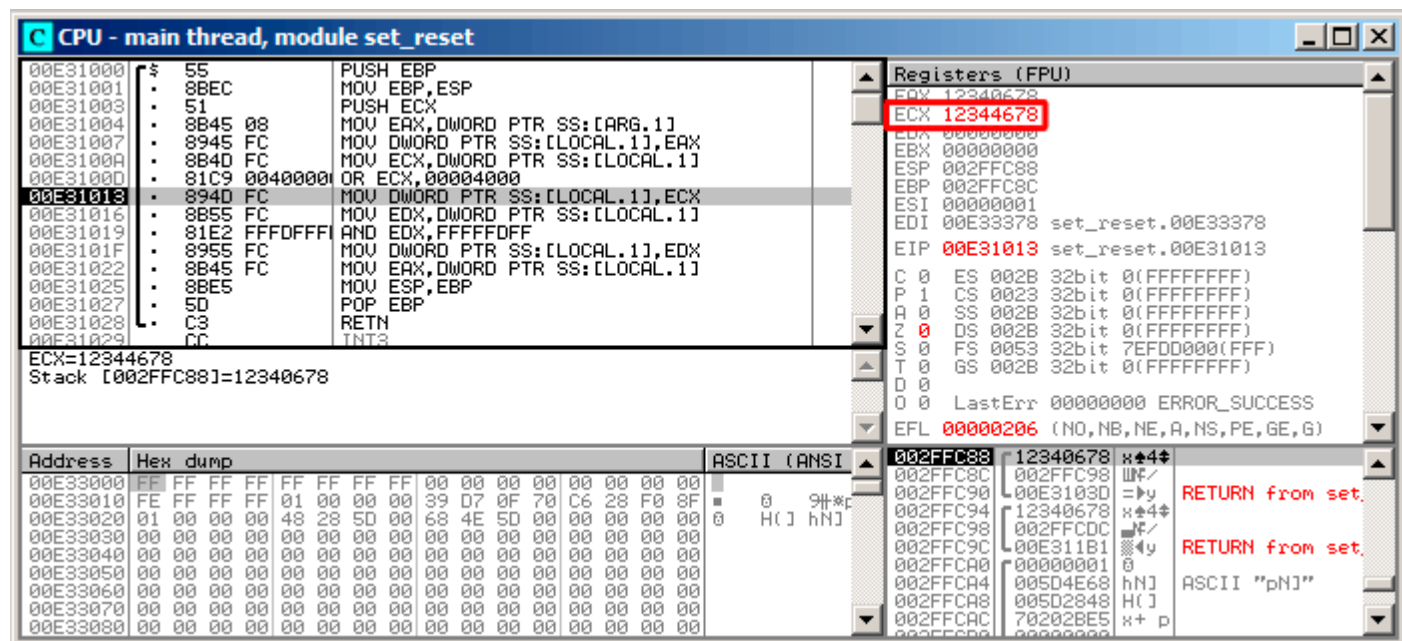


Рис. 1.87: OllyDbg: OR сработал

15-й бит выставлен: 0x12344678
(0b10010001101000100011001111000).

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Значение перезагружается снова (потому что использовался режим компилятора без оптимизации):

CPU - main thread, module set_reset

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00E31000	55	
00E31001	8BEC	
00E31003	51	
00E31004	8B45 08	
00E31007	8945 FC	
00E3100A	8B4D FC	
00E3100D	81C9 00400000	
00E31007	894D FC	
00E31013	8B55 FC	
00E31016	81E2 FFFDFFF	
00E3101F	8955 FC	
00E31022	8B45 FC	
00E31025	8B55 FC	
00E31027	5D	
00E31028	C3	
00E31029	CC	

Imm=FFFFFFDFF
EDX=12344678

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	12340678
ECX	12344678
EDX	12344678
EBX	00000000
ESP	002FFC88
EBP	002FFC8C
ESI	00000001
EDI	00E33378 set_reset.00E33378
EIP	00E31019 set_reset.00E31019

002FFC88 12344678 xF4#

002FFC8C 002FFC98 xF4#

002FFC90 00E3103D xF4#

002FFC94 12340678 xF4#

002FFC98 002FFCDC xF4#

002FFC9C 00E311B1 xF4#

002FFCA0 00000001 0

002FFCA4 005D4E68 hNJ

002FFCA8 005D2848 H(J

002FFCAC 70202BES x+ p

002FFCD0 00000000

RETURN from set.
RETURN from set.
ASCII "pNJ"

Рис. 1.88: OllyDbg: значение перезагрузилось в EDX

AND исполнилась:

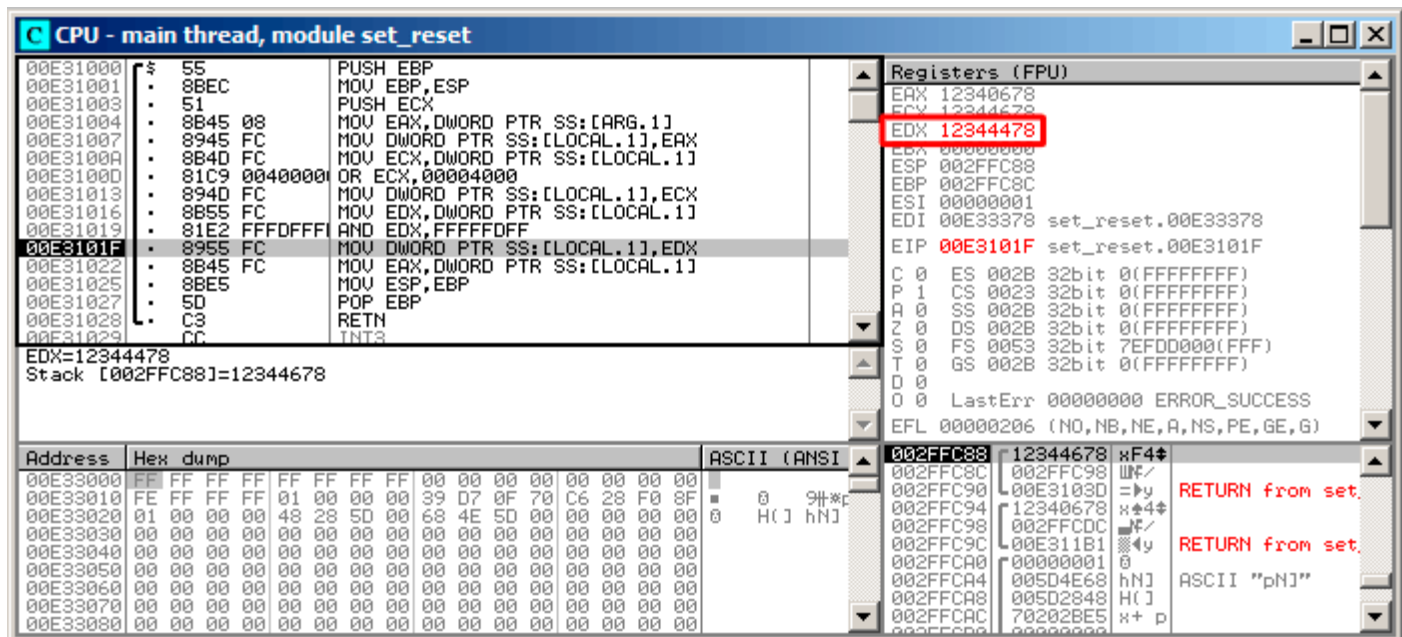


Рис. 1.89: OllyDbg: AND сработал

10-й бит очищен (или, иным языком, оставлены все биты кроме 10-го) и итоговое значение это 0x12344478 (0b100100011010001000100011111000).

Оптимизирующий MSVC

Если скомпилировать в MSVC с оптимизацией (/Ox), то код еще короче:

Листинг 1.268: Оптимизирующий MSVC

```
_a$ = 8 ; size = 4
_f PROC
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    and     eax, -513 ; fffffdffh
    or      eax, 16384 ; 00004000h
    ret     0
_f ENDP
```

Неоптимизирующий GCC

Попробуем GCC 4.4.1 без оптимизации:

Листинг 1.269: Неоптимизирующий GCC

```
f
public f
proc near

var_4 = dword ptr -4
arg_0 = dword ptr 8

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 10h
    mov     eax, [ebp+arg_0]
    mov     [ebp+var_4], eax
    or      [ebp+var_4], 4000h
    and     [ebp+var_4], 0FFFFFFFh
    mov     eax, [ebp+var_4]
    leave
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
f          retn
          endp
```

Также избыточный код, хотя короче, чем у MSVC без оптимизации.

Попробуем теперь GCC с оптимизацией -O3:

Оптимизирующий GCC

Листинг 1.270: Оптимизирующий GCC

```
f          public f
          proc near
arg_0      = dword ptr 8

          push    ebp
          mov     ebp, esp
          mov     eax, [ebp+arg_0]
          pop     ebp
          or      ah, 40h
          and     ah, 0FDh
          retn
f          endp
```

Уже короче. Важно отметить, что через регистр AH компилятор работает с частью регистра EAX. Это его часть от 8-го до 15-го бита включительно.

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RAX ^{x64}							
				EAX			
						AX	
						AH	AL

N.B. В 16-битном процессоре 8086 аккумулятор имел название AX и состоял из двух 8-битных половин — AL (младшая часть) и AH (старшая). В 80386 регистры были расширены до 32-бит, аккумулятор стал называться EAX, но в целях совместимости, к его *более старым* частям всё ещё можно обращаться как к AX/AH/AL.

Из-за того, что все x86 процессоры — наследники 16-битного 8086, эти *старые* 16-битные опкоды короче нежели более новые 32-битные. Поэтому инструкция `or ah, 40h` занимает только 3 байта. Было бы логичнее сгенерировать здесь `or eax, 04000h`, но это уже 5 байт, или даже 6 (если регистр в первом операнде не EAX).

Оптимизирующий GCC и regparm

Если мы скомпилируем этот же пример не только с включенной оптимизацией -O3, но ещё и с опцией `regparm=3`, о которой я писал немного выше, то получится ещё короче:

Листинг 1.271: Оптимизирующий GCC

```
f          public f
          proc near
          push    ebp
          or      ah, 40h
          mov     ebp, esp
          and     ah, 0FDh
          pop     ebp
          retn
f          endp
```

Действительно — первый аргумент уже загружен в EAX, и прямо здесь можно начинать с ним работать. Интересно, что и пролог функции (`push ebp / mov ebp, esp`) и эпилог (`pop ebp`) функции можно смело выкинуть за ненадобностью, но возможно GCC ещё не так хорош для подобных оптимизаций по размеру кода. Впрочем, в реальной жизни подобные короткие функции лучше всего автоматически делать в виде *inline-функций* (3.11 (стр. 498)).

ARM + Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.272: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

02 0C C0 E3	BIC	R0, R0, #0x200
01 09 80 E3	ORR	R0, R0, #0x4000
1E FF 2F E1	BX	LR

BIC (*Bitwise bit Clear*) это инструкция сбрасывающая заданные биты. Это как аналог AND, но только с инвертированным операндом.

Т.е. это аналог инструкций NOT +AND.

ORR это «логическое или», аналог OR в x86.

Пока всё понятно.

ARM + Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb), style=customasmARM

Листинг 1.273: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

01 21 89 03	MOVS	R1, 0x4000
08 43	ORRS	R0, R1
49 11	ASRS	R1, R1, #5 ; generate 0x200 and place to R1
88 43	BICS	R0, R1
70 47	BX	LR

Вероятно, Keil решил, что код в режиме Thumb, получающий 0x200 из 0x4000, более компактный, нежели код, записывающий 0x200 в какой-нибудь регистр.

Поэтому при помощи инструкции ASRS (арифметический сдвиг вправо), это значение вычисляется как 0x4000 >> 5.

ARM + Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

Листинг 1.274: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

42 0C C0 E3	BIC	R0, R0, #0x4200
01 09 80 E3	ORR	R0, R0, #0x4000
1E FF 2F E1	BX	LR

Код, который был сгенерирован LLVM, в исходном коде, на самом деле, выглядел бы так:

```
REMOVE_BIT (rt, 0x4200);
SET_BIT (rt, 0x4000);
```

И он делает в точности что нам нужно. Но почему 0x4200? Возможно, это артефакт оптимизатора LLVM ¹⁵². Возможно, ошибка оптимизатора компилятора, но создаваемый код всё же работает верно.

Об аномалиях компиляторов, подробнее читайте здесь (10.4 (стр. 975)).

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) для режима Thumb генерирует точно такой же код.

ARM: ещё об инструкции BIC

Если немного переделать пример:

```
int f(int a)
{
    int rt=a;

    REMOVE_BIT (rt, 0x1234);

    return rt;
};
```

¹⁵²Это был LLVM build 2410.2.00 входящий в состав Apple Xcode 4.6.3

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

То оптимизирующий Keil 5.03 в режиме ARM делает такое:

```
f PROC
    BIC    r0,r0,#0x1000
    BIC    r0,r0,#0x234
    BX     lr
ENDP
```

Здесь две инструкции BIC, т.е. биты 0x1234 сбрасываются в два прохода.

Это потому что в инструкции BIC нельзя закодировать значение 0x1234, но можно закодировать 0x1000 либо 0x234.

ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Оптимизирующий GCC, компилирующий для ARM64, может использовать AND вместо BIC:

Листинг 1.275: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    and    w0, w0, -513      ; 0xFFFFFFFFFFFFDFF
    orr    w0, w0, 16384     ; 0x4000
    ret
```

ARM64: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Неоптимизирующий GCC генерирует больше избыточного кода, но он работает также:

Листинг 1.276: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
f:
    sub    sp, sp, #32
    str    w0, [sp,12]
    ldr    w0, [sp,12]
    str    w0, [sp,28]
    ldr    w0, [sp,28]
    orr    w0, w0, 16384     ; 0x4000
    str    w0, [sp,28]
    ldr    w0, [sp,28]
    and    w0, w0, -513     ; 0xFFFFFFFFFFFFDFF
    str    w0, [sp,28]
    ldr    w0, [sp,28]
    add    sp, sp, 32
    ret
```

MIPS

Листинг 1.277: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
; $a0=a
    ori    $a0, 0x4000
; $a0=a|0x4000
    li     $v0, 0xFFFFDFF
    jr     $ra
    and    $v0, $a0, $v0
; на выходе: $v0 = $a0&$v0 = a|0x4000 & 0xFFFFDFF
```

ORI это, конечно, операция «ИЛИ», «I» в имени инструкции означает, что значение встроено в машинный код.

И напротив, есть AND. Здесь нет возможности использовать ANDI, потому что невозможно встроить число 0xFFFFDFF в одну инструкцию, так что компилятору приходится в начале загружать значение 0xFFFFDFF в регистр \$V0, а затем генерировать AND, которая возьмет все значения из регистров.

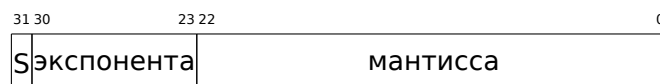
1.22.3. Сдвиги

Битовые сдвиги в Си/Си++ реализованы при помощи операторов \ll и \gg . В x86 есть инструкции SHL (SHift Left) и SHR (SHift Right) для этого. Инструкции сдвига также активно применяются при делении или умножении на числа-степени двойки: 2^n (т.е. 1, 2, 4, 8, итд.): [1.18.1](#) (стр. 202), [1.18.2](#) (стр. 207).

Операции сдвига ещё потому так важны, потому что они часто используются для изолирования определенного бита или для конструирования значения из нескольких разрозненных бит.

1.22.4. Установка и сброс отдельного бита: пример с FPU

Как мы уже можем знать, вот как биты расположены в значении типа *float* в формате IEEE 754:



(S — знак)

Знак числа — это [MSB¹⁵³](#). Возможно ли работать со знаком числа с плавающей точкой, не используя FPU-инструкций?

```
#include <stdio.h>

float my_abs (float i)
{
    unsigned int tmp=*(unsigned int*)&i & 0x7FFFFFFF;
    return *(float*)&tmp;
};

float set_sign (float i)
{
    unsigned int tmp=*(unsigned int*)&i | 0x80000000;
    return *(float*)&tmp;
};

float negate (float i)
{
    unsigned int tmp=*(unsigned int*)&i ^ 0x80000000;
    return *(float*)&tmp;
};

int main()
{
    printf ("my_abs():\n");
    printf ("%f\n", my_abs (123.456));
    printf ("%f\n", my_abs (-456.123));
    printf ("set_sign():\n");
    printf ("%f\n", set_sign (123.456));
    printf ("%f\n", set_sign (-456.123));
    printf ("negate():\n");
    printf ("%f\n", negate (123.456));
    printf ("%f\n", negate (-456.123));
};
```

Придется использовать эти трюки в Си/Си++ с типами данных чтобы копировать из значения типа *float* и обратно без конверсии. Так что здесь три функции: *my_abs()* сбрасывает [MSB](#); *set_sign()* устанавливает [MSB](#) и *negate()* меняет его на противоположный.

XOR может использоваться для смены бита: [2.6](#) (стр. 452).

x86

Код прямолинеен:

¹⁵³Most significant bit (самый старший бит)

```

_tmp$ = 8
_i$ = 8
_my_abs PROC
    and     DWORD PTR _i$[esp-4], 2147483647 ; 7fffffffH
    fld     DWORD PTR _tmp$[esp-4]
    ret     0
_my_abs ENDP

_tmp$ = 8
_i$ = 8
_set_sign PROC
    or      DWORD PTR _i$[esp-4], -2147483648 ; 80000000H
    fld     DWORD PTR _tmp$[esp-4]
    ret     0
_set_sign ENDP

_tmp$ = 8
_i$ = 8
_negate PROC
    xor     DWORD PTR _i$[esp-4], -2147483648 ; 80000000H
    fld     DWORD PTR _tmp$[esp-4]
    ret     0
_negate ENDP

```

Входное значение типа *float* берется из стека, но мы обходимся с ним как с целочисленным значением.

AND и OR сбрасывают и устанавливают нужный бит. XOR переворачивает его.

В конце измененное значение загружается в ST0, потому что числа с плавающей точкой возвращаются в этом регистре.

Попробуем оптимизирующий MSVC 2012 для x64:

Листинг 1.279: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```

tmp$ = 8
i$ = 8
my_abs PROC
    movss   DWORD PTR [rsp+8], xmm0
    mov     eax, DWORD PTR i$[rsp]
    btr     eax, 31
    mov     DWORD PTR tmp$[rsp], eax
    movss   xmm0, DWORD PTR tmp$[rsp]
    ret     0
my_abs ENDP
_TEXT ENDS

tmp$ = 8
i$ = 8
set_sign PROC
    movss   DWORD PTR [rsp+8], xmm0
    mov     eax, DWORD PTR i$[rsp]
    bts     eax, 31
    mov     DWORD PTR tmp$[rsp], eax
    movss   xmm0, DWORD PTR tmp$[rsp]
    ret     0
set_sign ENDP

tmp$ = 8
i$ = 8
negate PROC
    movss   DWORD PTR [rsp+8], xmm0
    mov     eax, DWORD PTR i$[rsp]
    btc     eax, 31
    mov     DWORD PTR tmp$[rsp], eax
    movss   xmm0, DWORD PTR tmp$[rsp]
    ret     0
negate ENDP

```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Во-первых, входное значение передается в XMM0, затем оно копируется в локальный стек и затем мы видим новые для нас инструкции: BTR, BTS, BTC. Эти инструкции используются для сброса определенного бита (BTR: «reset»), установки (BTS: «set») и инвертирования (BTC: «complement»). 31-й бит это **MSB**, если считать начиная с нуля. И наконец, результат копируется в регистр XMM0, потому что значения с плавающей точкой возвращаются в регистре XMM0 в среде Win64.

MIPS

GCC 4.4.5 для MIPS делает почти то же самое:

Листинг 1.280: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
my_abs:
; скопировать из сопроцессора 1:
        mfc1    $v1, $f12
        li      $v0, 0x7FFFFFFF
; $v0=0x7FFFFFFF
; применить И:
        and     $v0, $v1
; скопировать в сопроцессор 1:
        mtc1    $v0, $f0
; возврат
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot

set_sign:
; скопировать из сопроцессора 1:
        mfc1    $v0, $f12
        lui     $v1, 0x8000
; $v1=0x80000000
; применить ИЛИ:
        or      $v0, $v1, $v0
; скопировать в сопроцессор 1:
        mtc1    $v0, $f0
; возврат
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot

negate:
; скопировать из сопроцессора 1:
        mfc1    $v0, $f12
        lui     $v1, 0x8000
; $v1=0x80000000
; применить исключающее ИЛИ:
        xor     $v0, $v1, $v0
; скопировать в сопроцессор 1:
        mtc1    $v0, $f0
; возврат
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot
```

Для загрузки константы 0x80000000 в регистр используется только одна инструкция LUI, потому что LUI сбрасывает младшие 16 бит и это нули в константе, так что одной LUI без ORI достаточно.

ARM

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 1.281: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
my_abs PROC
; очистить бит:
        BIC     r0, r0, #0x80000000
        BX      lr
ENDP
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
set_sign PROC
; применить ИЛИ:
    ORR    r0,r0,#0x80000000
    BX     lr
ENDP

negate PROC
; применить исключающее ИЛИ:
    EOR    r0,r0,#0x80000000
    BX     lr
ENDP
```

Пока всё понятно. В ARM есть инструкция BIC для сброса заданных бит.

EOR это инструкция в ARM которая делает то же что и XOR («Exclusive OR»).

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 1.282: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
my_abs PROC
    LSL    r0,r0,#1
; r0=i<<1
    LSR    r0,r0,#1
; r0=(i<<1)>>1
    BX     lr
ENDP

set_sign PROC
    MOVS   r1,#1
; r1=1
    LSL    r1,r1,#31
; r1=1<<31=0x80000000
    ORRS   r0,r0,r1
; r0=r0 | 0x80000000
    BX     lr
ENDP

negate PROC
    MOVS   r1,#1
; r1=1
    LSL    r1,r1,#31
; r1=1<<31=0x80000000
    EORS   r0,r0,r1
; r0=r0 ^ 0x80000000
    BX     lr
ENDP
```

В режиме Thumb 16-битные инструкции, в которых нельзя задать много данных, поэтому здесь применяется пара инструкций MOVN/LSL для формирования константы 0x80000000.

Это работает как выражение: $1 \ll 31 = 0x80000000$.

Код my_abs выглядит странно и работает как выражение: $(i \ll 1) \gg 1$. Это выражение выглядит бессмысленным. Но тем не менее, когда выполняется $input \ll 1$, MSB (бит знака) просто выбрасывается. Когда выполняется следующее выражение $result \gg 1$, все биты становятся на свои места, а MSB ноль, потому что все «новые» биты появляющиеся во время операций сдвига это всегда нули. Таким образом, пара инструкций LSL/LSR сбрасывают MSB.

Оптимизирующий GCC 4.6.3 (Raspberry Pi, Режим ARM)

Листинг 1.283: Оптимизирующий GCC 4.6.3 для Raspberry Pi (Режим ARM)

```
my_abs
; скопировать из S0 в R2:
    FMRS   R2, S0
; очистить бит:
```


1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
BIC      R3, R2, #0x80000000
; скопировать из R3 в S0:
FMSR     S0, R3
BX       LR

set_sign
; скопировать из S0 в R2:
FMRS     R2, S0
; применить ИЛИ:
ORR      R3, R2, #0x80000000
; скопировать из R3 в S0:
FMSR     S0, R3
BX       LR

negate
; скопировать из S0 в R2:
FMRS     R2, S0
; применить операцию сложения:
ADD      R3, R2, #0x80000000
; скопировать из R3 в S0:
FMSR     S0, R3
BX       LR
```

Запустим Raspberry Pi Linux в QEMU и он эмулирует FPU в ARM, так что здесь используются S-регистры для передачи значений с плавающей точкой вместо R-регистров.

Инструкция FMRS копирует данные из GPR в FPU и назад. `my_abs()` и `set_sign()` выглядят предсказуемо, но `negate()`? Почему там ADD вместо XOR?

Трудно поверить, но инструкция `ADD register, 0x80000000` работает так же как и `XOR register, 0x80000000`. Прежде всего, какая наша цель? Цель в том, чтобы поменять MSB на противоположный, и давайте забудем пока об операции XOR.

Из школьной математики мы можем помнить, что прибавление числа вроде 1000 к другому никогда не затрагивает последние 3 цифры.

Например: $1234567 + 10000 = 1244567$ (последние 4 цифры никогда не меняются). Но мы работаем с двоичной системой исчисления, и `0x80000000` это `0b10000000000000000000000000000000` в двоичной системе, т.е. только старший бит установлен.

Прибавление `0x80000000` к любому значению никогда не затронет младших 31 бит, а только MSB.

Прибавление 1 к 0 в итоге даст 1. Прибавление 1 к 1 даст `0b10` в двоичном виде, но 32-й бит (считая с нуля) выброшен, потому что наши регистры имеют ширину в 32 бита. Так что результат — 0.

Вот почему XOR здесь можно заменить на ADD. Трудно сказать, почему GCC решил сделать так, но это работает корректно.

1.22.5. Подсчет выставленных бит

Вот этот несложный пример иллюстрирует функцию, считающую количество бит-единиц во входном значении.

Эта операция также называется «population count»¹⁵⁴.

```
#include <stdio.h>

#define IS_SET(flag, bit)      ((flag) & (bit))

int f(unsigned int a)
{
    int i;
    int rt=0;

    for (i=0; i<32; i++)
        if (IS_SET (a, 1<<i))
            rt++;
}
```

¹⁵⁴современные x86-процессоры (поддерживающие SSE4) даже имеют инструкцию POPCNT для этого

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```

    return rt;
};

int main()
{
    f(0x12345678); // test
};

```

В этом цикле счетчик итераций i считает от 0 до 31, а $1 \ll i$ будет от 1 до $0x80000000$. Описывая это словами, можно сказать *сдвинуть единицу на n бит влево*. Т.е. в некотором смысле, выражение $1 \ll i$ последовательно выдает все возможные позиции бит в 32-битном числе. Освободившийся бит справа всегда обнуляется.

Вот таблица всех возможных значений $1 \ll i$ для $i = 0 \dots 31$:

Выражение	Степень двойки	Десятичная форма	Шестнадцатеричная
$1 \ll 0$	1	1	1
$1 \ll 1$	2^1	2	2
$1 \ll 2$	2^2	4	4
$1 \ll 3$	2^3	8	8
$1 \ll 4$	2^4	16	0x10
$1 \ll 5$	2^5	32	0x20
$1 \ll 6$	2^6	64	0x40
$1 \ll 7$	2^7	128	0x80
$1 \ll 8$	2^8	256	0x100
$1 \ll 9$	2^9	512	0x200
$1 \ll 10$	2^{10}	1024	0x400
$1 \ll 11$	2^{11}	2048	0x800
$1 \ll 12$	2^{12}	4096	0x1000
$1 \ll 13$	2^{13}	8192	0x2000
$1 \ll 14$	2^{14}	16384	0x4000
$1 \ll 15$	2^{15}	32768	0x8000
$1 \ll 16$	2^{16}	65536	0x10000
$1 \ll 17$	2^{17}	131072	0x20000
$1 \ll 18$	2^{18}	262144	0x40000
$1 \ll 19$	2^{19}	524288	0x80000
$1 \ll 20$	2^{20}	1048576	0x100000
$1 \ll 21$	2^{21}	2097152	0x200000
$1 \ll 22$	2^{22}	4194304	0x400000
$1 \ll 23$	2^{23}	8388608	0x800000
$1 \ll 24$	2^{24}	16777216	0x1000000
$1 \ll 25$	2^{25}	33554432	0x2000000
$1 \ll 26$	2^{26}	67108864	0x4000000
$1 \ll 27$	2^{27}	134217728	0x8000000
$1 \ll 28$	2^{28}	268435456	0x10000000
$1 \ll 29$	2^{29}	536870912	0x20000000
$1 \ll 30$	2^{30}	1073741824	0x40000000
$1 \ll 31$	2^{31}	2147483648	0x80000000

Это числа-константы (битовые маски), которые крайне часто попадают в практике reverse engineering, и их нужно уметь распознавать.

Числа в десятичном виде, до 65536 и числа в шестнадцатеричном виде легко запомнить и так. А числа в десятичном виде после 65536, пожалуй, заучивать не нужно.

Эти константы очень часто используются для определения отдельных бит как флагов.

Например, это из файла `ssl_private.h` из исходников Apache 2.4.6:

```

/**
 * Define the SSL options
 */
#define SSL_OPT_NONE          (0)
#define SSL_OPT_RELSET        (1<<0)
#define SSL_OPT_STDENVVARS    (1<<1)
#define SSL_OPT_EXPORTCERTDATA (1<<3)
#define SSL_OPT_FAKEBASICAUTH (1<<4)
#define SSL_OPT_STRICTREQUIRE (1<<5)
#define SSL_OPT_OPTRENEGOTIATE (1<<6)

```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
#define SSL_OPT_LEGACYDNFORMAT (1<<7)
```

Вернемся назад к нашему примеру.

Макрос IS_SET проверяет наличие этого бита в *a*.

Макрос IS_SET на самом деле это операция логического И (AND) и она возвращает 0 если бита там нет, либо эту же битовую маску, если бит там есть. В Си/Си++, конструкция if() срабатывает, если выражение внутри её не ноль, пусть хоть 123456, поэтому все будет работать.

x86

MSVC

Компилируем (MSVC 2010):

Листинг 1.284: MSVC 2010

```
_rt$ = -8          ; size = 4
_i$ = -4          ; size = 4
_a$ = 8           ; size = 4
_f PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 8
    mov     DWORD PTR _rt$[ebp], 0
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], 0
    jmp     SHORT $LN4@f
$LN3@f:
    mov     eax, DWORD PTR _i$[ebp]    ; инкремент i
    add     eax, 1
    mov     DWORD PTR _i$[ebp], eax
$LN4@f:
    cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 32     ; 00000020H
    jge     SHORT $LN2@f               ; цикл закончился?
    mov     edx, 1
    mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
    shl     edx, cl                    ; EDX=EDX<<CL
    and     edx, DWORD PTR _a$[ebp]
    je      SHORT $LN1@f               ; результат исполнения инструкции AND был 0?
                                         ; тогда пропускаем следующие команды
    mov     eax, DWORD PTR _rt$[ebp]   ; нет, не ноль
    add     eax, 1                     ; инкремент rt
    mov     DWORD PTR _rt$[ebp], eax
$LN1@f:
    jmp     SHORT $LN3@f
$LN2@f:
    mov     eax, DWORD PTR _rt$[ebp]
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_f ENDP
```

OllyDbg

Загрузим этот пример в OllyDbg. Входное значение для функции пусть будет 0x12345678.

Для $i = 1$, мы видим, как i загружается в ECX:

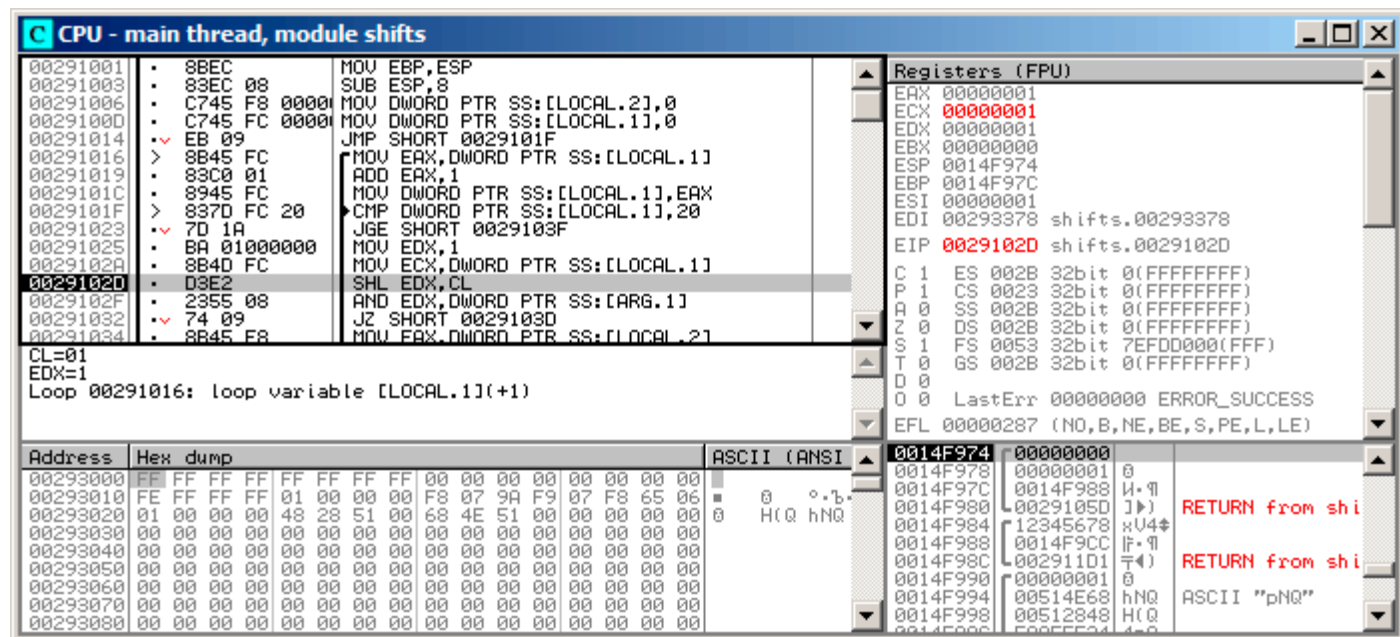


Рис. 1.90: OllyDbg: $i = 1$, i загружено в ECX

EDX содержит 1. Сейчас будет исполнена SHL.

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

SHL исполнилась:

CPU - main thread, module shifts

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00291003	83EC 08	SUB ESP,8
00291006	C745 F8 0000	MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.2],0
0029100D	C745 FC 0000	MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.1],0
00291014	EB 09	JMP SHORT 0029101F
00291016	8B45 FC	MOV EAX,DWORD PTR SS:[LOCAL.1]
00291019	83C0 01	ADD EAX,1
0029101C	8945 FC	MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.1],EAX
0029101F	837D FC 20	CMP DWORD PTR SS:[LOCAL.1],20
00291023	7D 1A	JGE SHORT 0029103F
00291025	BA 01000000	MOV EDI,1
0029102A	8B4D FC	MOV ECX,DWORD PTR SS:[LOCAL.1]
0029102D	D3E2	SHL EDI,CL
0029102F	2355 08	AND EDX,DWORD PTR SS:[ARG.1]
00291032	74 09	JZ SHORT 0029103D
00291034	8B45 F8	MOV EAX,DWORD PTR SS:[LOCAL.2]
00291037	83C0 01	ADD EAX,1

Stack [0014F984]=12345678
EDX=00000002
Loop 00291016: loop variable [LOCAL.1](+1)

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00000001
ECX	00000001
EDX	00000002
EBX	00000000
ESP	0014F974
EBP	0014F97C
ESI	00000001
EDI	00293378 shifts.00293378
EIP	0029102F shifts.0029102F
C	0 ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P	0 CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A	0 SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z	0 DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S	0 FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
T	0 GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
O	0
LastErr	00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000202 (NO,NB,NE,A,NS,PO,GE,G)

0014F974 00000000

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
0014F974	00000000	
0014F978	00000001	
0014F97C	0014F988	
0014F980	0029105D	
0014F984	12345678	
0014F988	0014F9CC	
0014F98C	00291101	
0014F990	00000001	
0014F994	00514E68	
0014F998	00512848	
0014F99C	00055534	

RETURN from shi
RETURN from shi
ASCII "pNQ"

Рис. 1.91: OllyDbg: $i = 1$, $EDX = 1 \ll 1 = 2$

EDX содержит $1 \ll 1$ (или 2). Это битовая маска.

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

AND устанавливает ZF в 1, что означает, что входное значение (0x12345678) умножается¹⁵⁵ с 2 давая в результате 0:

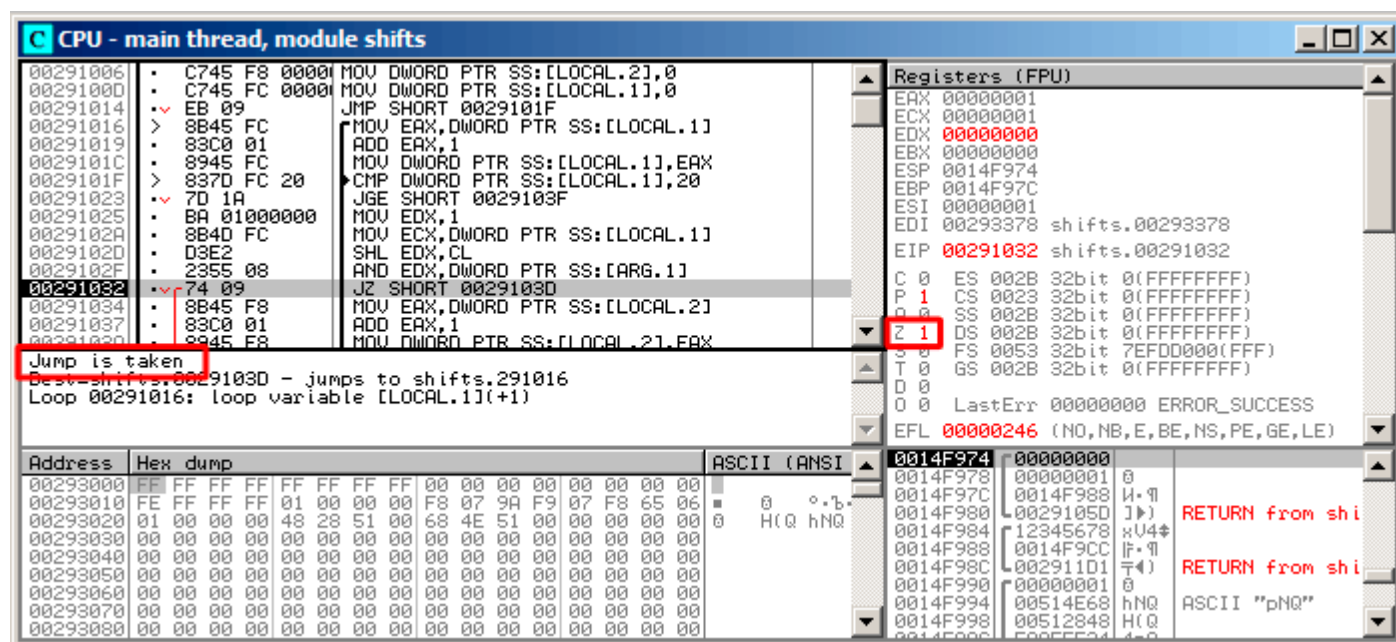


Рис. 1.92: OllyDbg: $i = 1$, есть ли этот бит во входном значении? Нет. (ZF = 1)

Так что во входном значении соответствующего бита нет. Участок кода, увеличивающий счетчик бит на единицу, не будет исполнен: инструкция JZ *обойдет* его.

¹⁵⁵ Логическое «И»

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Немного потрассируем далее и i теперь 4.

SHL исполнилась:

The screenshot shows the OllyDbg interface with the following components:

- Assembly Window (CPU - main thread, module shifts):**
 - Address 00291001: MOV EBP, ESP
 - Address 00291003: SUB ESP, 8
 - Address 00291006: MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.2], 0
 - Address 0029100D: MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.1], 0
 - Address 00291014: JMP SHORT 0029101F
 - Address 00291016: MOV EAX, DWORD PTR SS:[LOCAL.1]
 - Address 00291019: ADD EAX, 1
 - Address 0029101C: MOV DWORD PTR SS:[LOCAL.1], EAX
 - Address 0029101F: CMP DWORD PTR SS:[LOCAL.1], 20
 - Address 00291023: JGE SHORT 0029103F
 - Address 00291025: MOV EDX, 1
 - Address 0029102A: MOV ECX, DWORD PTR SS:[LOCAL.1]
 - Address 0029102D: SHL EDX, CL
 - Address 0029102F: AND EDX, DWORD PTR SS:[ARG.1]
 - Address 00291032: JZ SHORT 0029103D
 - Address 00291034: MOV FAX, DWORD PTR SS:[LOCAL.2]
- Registers (FPU) Window:**
 - EAX: 00000004
 - ECX: 00000004
 - EDX: 00000001
 - EBX: 00000000
 - ESP: 0014F974
 - EBP: 0014F97C
 - ESI: 00000001
 - EDI: 00293378
 - EIP: 0029102D
 - C 1: ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
 - P 1: CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
 - A 0: SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
 - Z 0: DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
 - S 1: FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
 - T 0: GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
 - D 0
 - O 0: LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
 - EFL: 00000287 (NO,B,NE,BE,S,PE,L,LE)
- Memory Dump Window:**
 - Address 00293000: FF FF FF FF FF FF FF 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293010: FE FF FF FF 01 00 00 00 F8 07 9A F9 07 F8 65 06
 - Address 00293020: 01 00 00 00 48 28 51 00 68 4E 51 00 00 00 00 00
 - Address 00293030: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293040: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293050: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293060: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293070: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00
 - Address 00293080: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00

Рис. 1.93: OllyDbg: $i = 4$, i загружено в ECX

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

EDX = $1 \ll 4$ (или $0x10$ или 16):

CPU - main thread, module shifts

Address	Hex dump	ASCII (ANSI)
00291003	83EC 08	
00291006	C745 F8 0000	
0029100D	C745 FC 0000	
00291014	EB 09	
00291016	8B45 FC	
00291019	83C0 01	
0029101C	8945 FC	
0029101F	837D FC 20	
00291023	7D 1A	
00291025	BA 01000000	
0029102A	8B4D FC	
0029102D	03E2	
0029102F	2355 08	
00291032	74 09	
00291034	8B45 F8	
00291037	83C0 01	

Stack [0014F984]=12345678
EDX=00000010
Loop 00291016: loop variable [LOCAL.1](+1)

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	00000004
ECX	00000004
EDX	00000010
ESP	0014F974
EBP	0014F97C
ESI	00000001
EDI	00293378 shifts.00293378
EIP	0029102F shifts.0029102F

0014F974 00000001 0

0014F978 00000004 0
0014F97C 0014F988 0
0014F980 0029105D 1
0014F984 12345678 0
0014F988 0014F9CC 0
0014F98C 00291101 0
0014F990 00000001 0
0014F994 00514E68 hNQ
0014F998 00512848 H(Q

Рис. 1.94: OllyDbg: $i = 4$, $EDX = 1 \ll 4 = 0x10$

Это ещё одна битовая маска.

AND исполнилась:

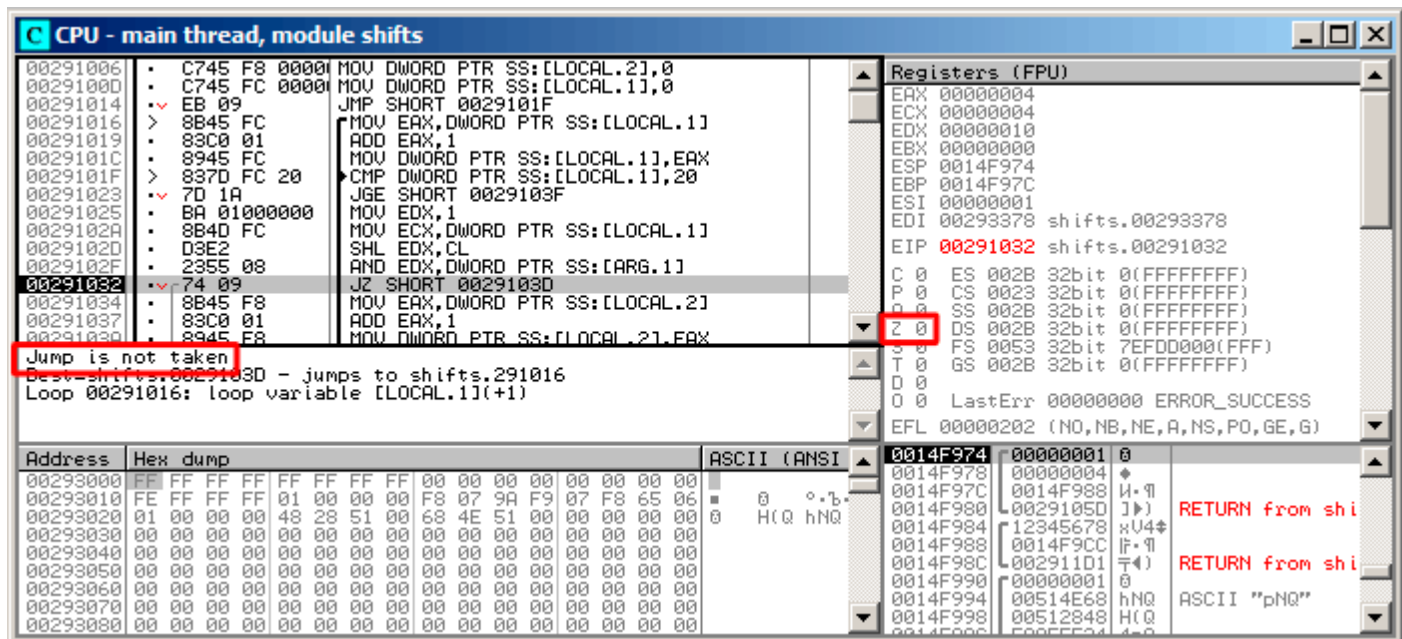


Рис. 1.95: OllyDbg: $i = 4$, есть ли этот бит во входном значении? Да. (ZF = 0)

ZF сейчас 0 потому что этот бит присутствует во входном значении.

Действительно, $0x12345678 \& 0x10 = 0x10$. Этот бит считается: переход не сработает и счетчик бит будет увеличен на единицу.

Функция возвращает 13. Это количество установленных бит в значении $0x12345678$.

GCC

Скомпилируем то же и в GCC 4.4.1:

Листинг 1.285: GCC 4.4.1

```

f
public f
proc near

rt
= dword ptr -0Ch
i
= dword ptr -8
arg_0
= dword ptr 8

push    ebp
mov     ebp, esp
push    ebx
sub     esp, 10h
mov     [ebp+rt], 0
mov     [ebp+i], 0
jmp     short loc_80483D0

loc_80483D0:
mov     eax, [ebp+i]
mov     edx, 1
mov     ebx, edx
mov     ecx, eax
shl     ebx, cl
mov     eax, ebx
and     eax, [ebp+arg_0]
test    eax, eax
jz      short loc_80483EB
add     [ebp+rt], 1

loc_80483EB:
add     [ebp+i], 1

loc_80483EF:
  
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
        cmp     [ebp+i], 1Fh
        jle     short loc_80483D0
        mov     eax, [ebp+rt]
        add     esp, 10h
        pop     ebx
        pop     ebp
        retn
f       endp
```

x64

Немного изменим пример, расширив его до 64-х бит:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

#define IS_SET(flag, bit)      ((flag) & (bit))

int f(uint64_t a)
{
    uint64_t i;
    int rt=0;

    for (i=0; i<64; i++)
        if (IS_SET (a, 1ULL<<i))
            rt++;

    return rt;
};
```

Неоптимизирующий GCC 4.8.2

Пока всё просто.

Листинг 1.286: Неоптимизирующий GCC 4.8.2

```
f:
    push     rbp
    mov     rbp, rsp
    mov     QWORD PTR [rbp-24], rdi ; a
    mov     DWORD PTR [rbp-12], 0    ; rt=0
    mov     QWORD PTR [rbp-8], 0     ; i=0
    jmp     .L2

.L4:
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-8]
    mov     rdx, QWORD PTR [rbp-24]
; RAX = i, RDX = a
    mov     ecx, eax
; ECX = i
    shr     rdx, cl
; RDX = RDX>>CL = a>>i
    mov     rax, rdx
; RAX = RDX = a>>i
    and     eax, 1
; EAX = EAX&1 = (a>>i)&1
    test    rax, rax
; последний бит был нулевым?
; пропустить следующую инструкцию ADD, если это было так.
    je     .L3
    add     DWORD PTR [rbp-12], 1    ; rt++

.L3:
    add     QWORD PTR [rbp-8], 1     ; i++

.L2:
    cmp     QWORD PTR [rbp-8], 63    ; i<63?
    jbe     .L4                      ; перейти на начало тела цикла, если это так
    mov     eax, DWORD PTR [rbp-12] ; возврат rt
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
pop    rbp
ret
```

Оптимизирующий GCC 4.8.2

Листинг 1.287: Оптимизирующий GCC 4.8.2

```
1 f:
2     xor     eax, eax           ; переменная rt будет находиться в регистре EAX
3     xor     ecx, ecx           ; переменная i будет находиться в регистре ECX
4 .L3:
5     mov     rsi, rdi           ; загрузить входное значение
6     lea     edx, [rax+1]       ; EDX=EAX+1
7 ; EDX здесь это новая версия rt,
8 ; которая будет записана в переменную rt, если последний бит был 1
9     shr     rsi, cl            ; RSI=RSI>>CL
10    and     esi, 1             ; ESI=ESI&1
11 ; последний бит был 1? Тогда записываем новую версию rt в EAX
12    cmovne  eax, edx
13    add     rcx, 1             ; RCX++
14    cmp     rcx, 64
15    jne     .L3
16    rep ret                    ; AKA fatret
```

Код более лаконичный, но содержит одну необычную вещь. Во всех примерах, что мы пока видели, инкремент значения переменной «rt» происходит после сравнения определенного бита с единицей, но здесь «rt» увеличивается на 1 до этого (строка 6), записывая новое значение в регистр EDX.

Затем, если последний бит был 1, инструкция CMOVNE¹⁵⁶ (которая синонимична CMOVNZ¹⁵⁷) фиксирует новое значение «rt» копируя значение из EDX («предполагаемое значение rt») в EAX («текущее rt» которое будет возвращено в конце функции). Следовательно, инкремент происходит на каждом шаге цикла, т.е. 64 раза, вне всякой связи с входным значением.

Преимущество этого кода в том, что он содержит только один условный переход (в конце цикла) вместо двух (пропускающий инкремент «rt» и ещё одного в конце цикла).

И это может работать быстрее на современных CPU с предсказателем переходов: 2.10.1 (стр. 457).

Последняя инструкция это REP RET (опкод F3 C3) которая также называется FATRET в MSVC. Это оптимизированная версия RET, рекомендуемая AMD для вставки в конце функции, если RET идет сразу после условного перехода: [Software Optimization Guide for AMD Family 16h Processors, (2013)]p.15]¹⁵⁸.

Оптимизирующий MSVC 2010

Листинг 1.288: Оптимизирующий MSVC 2010

```
a$ = 8
f      PROC
; RCX = входное значение
    xor     eax, eax
    mov     edx, 1
    lea     r8d, QWORD PTR [rax+64]
; R8D=64
    npad    5
$LL4@f:
    test    rdx, rcx
; не было такого бита во входном значении?
; тогда пропустить следующую инструкцию INC.
    je     SHORT $LN3@f
    inc     eax                ; rt++
$LN3@f:
```

¹⁵⁶Conditional MOVE if Not Equal (MOV если не равно)

¹⁵⁷Conditional MOVE if Not Zero (MOV если не ноль)

¹⁵⁸Больше об этом: <http://go.yurichev.com/17328>

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
    rol    rdx, 1 ; RDX=RDX<<1
    dec    r8      ; R8--
    jne    SHORT $LL4@f
    fatret  0
f        ENDP
```

Здесь используется инструкция ROL вместо SHL, которая на самом деле «rotate left» (прокручивать влево) вместо «shift left» (сдвиг влево), но здесь, в этом примере, она работает так же как и SHL.

Об этих «прокручивающих» инструкциях больше читайте здесь: [.1.6](#) (стр. 1009).

R8 здесь считает от 64 до 0. Это как бы инвертированная переменная *i*.

Вот таблица некоторых регистров в процессе исполнения:

RDX	R8
0x0000000000000001	64
0x0000000000000002	63
0x0000000000000004	62
0x0000000000000008	61
...	...
0x4000000000000000	2
0x8000000000000000	1

В конце видим инструкцию FATRET, которая была описана здесь: [1.22.5](#) (стр. 322).

Оптимизирующий MSVC 2012

Листинг 1.289: Оптимизирующий MSVC 2012

```
a$ = 8
f    PROC
; RCX = входное значение
    xor    eax, eax
    mov    edx, 1
    lea    r8d, QWORD PTR [rax+32]
; EDX = 1, R8D = 32
    npad   5
$LL4@f:
; проход 1 -----
    test   rdx, rcx
    je     SHORT $LN3@f
    inc    eax      ; rt++
$LN3@f:
    rol    rdx, 1 ; RDX=RDX<<1
; -----
; проход 2 -----
    test   rdx, rcx
    je     SHORT $LN11@f
    inc    eax      ; rt++
$LN11@f:
    rol    rdx, 1 ; RDX=RDX<<1
; -----
    dec    r8      ; R8--
    jne    SHORT $LL4@f
    fatret  0
f    ENDP
```

Оптимизирующий MSVC 2012 делает почти то же самое что и оптимизирующий MSVC 2010, но почему-то он генерирует 2 идентичных тела цикла и счетчик цикла теперь 32 вместо 64. Честно говоря, нельзя сказать, почему. Какой-то трюк с оптимизацией? Может быть, телу цикла лучше быть немного длиннее?

Так или иначе, такой код здесь уместен, чтобы показать, что результат компилятора иногда может быть очень странный и нелогичный, но прекрасно работающий, конечно же.

Листинг 1.290: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```

loc_2E54      MOV     R1, R0
              MOV     R0, #0
              MOV     R2, #1
              MOV     R3, R0

              TST     R1, R2, LSL R3 ; установить флаги в соответствии с R1 & (R2<<R3)
              ADD     R3, R3, #1      ; R3++
              ADDNE   R0, R0, #1      ; если флаг ZF сброшен TST, то R0++
              CMP     R3, #32
              BNE     loc_2E54
              BX      LR

```

TST это то же что и TEST в x86.

Как уже было указано (3.9.3 (стр. 490)), в режиме ARM нет отдельной инструкции для сдвигов.

Однако, модификаторами LSL (*Logical Shift Left*), LSR (*Logical Shift Right*), ASR (*Arithmetic Shift Right*), ROR (*Rotate Right*) и RRX (*Rotate Right with Extend*) можно дополнять некоторые инструкции, такие как MOV, TST, CMP, ADD, SUB, RSB¹⁵⁹.

Эти модификаторы указывают, как сдвигать второй операнд, и на сколько.

Таким образом, инструкция «TST R1, R2, LSL R3» здесь работает как $R1 \wedge (R2 \ll R3)$.

ARM + Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

Почти такое же, только здесь применяется пара инструкций LSL.W/TST вместо одной TST, ведь в режиме Thumb нельзя добавлять модификатор LSL прямо в TST.

```

loc_2F7A      MOV     R1, R0
              MOVS    R0, #0
              MOV.W   R9, #1
              MOVS    R3, #0

              LSL.W   R2, R9, R3
              TST     R2, R1
              ADD.W   R3, R3, #1
              IT      NE
              ADDNE   R0, #1
              CMP     R3, #32
              BNE     loc_2F7A
              BX      LR

```

ARM64 + Оптимизирующий GCC 4.9

Возьмем 64-битный пример, который уже был здесь использован: 1.22.5 (стр. 321).

Листинг 1.291: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.8

```

f:
    mov     w2, 0          ; rt=0
    mov     x5, 1
    mov     w1, w2

.L2:
    lsl     x4, x5, x1      ; w4 = w5<<w1 = 1<<i
    add     w3, w2, 1       ; new_rt=rt+1
    tst     x4, x0          ; (1<<i) & a
    add     w1, w1, 1       ; i++
; результат TST был ненулевой?
; тогда w2=w3 или rt=new_rt.
; в противном случае: w2=w2 или rt=rt (холостая операция)
    csel    w2, w3, w2, ne

```

¹⁵⁹Эти инструкции также называются «data processing instructions»

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
cmp    w1, 64          ; i<64?
bne     .L2             ; да
mov     w0, w2          ; возврат rt
ret
```

Результат очень похож на тот, что GCC сгенерировал для x64: [1.287](#) (стр. [322](#)).

Инструкция CSEL это «Conditional SElect» (выбор при условии). Она просто выбирает одну из переменных, в зависимости от флагов выставленных TST и копирует значение в регистр W2, содержащий переменную «rt».

ARM64 + Неоптимизирующий GCC 4.9

И снова будем использовать 64-битный пример, который мы использовали ранее: [1.22.5](#) (стр. [321](#)). Код более многословный, как обычно.

Листинг 1.292: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.8

```
f:
    sub    sp, sp, #32
    str     x0, [sp,8]      ; сохранить значение "a" в Register Save Area
    str     wzr, [sp,24]    ; rt=0
    str     wzr, [sp,28]    ; i=0
    b       .L2
.L4:
    ldr     w0, [sp,28]
    mov     x1, 1
    lsl     x0, x1, x0      ; X0 = X1<<X0 = 1<<i
    mov     x1, x0
; X1 = 1<<i
    ldr     x0, [sp,8]
; X0 = a
    and     x0, x1, x0
; X0 = X1&X0 = (1<<i) & a
; X0 содержит ноль? тогда перейти на .L3, пропуская инкремент "rt"
    cmp     x0, xzr
    beq     .L3
; rt++
    ldr     w0, [sp,24]
    add     w0, w0, 1
    str     w0, [sp,24]
.L3:
; i++
    ldr     w0, [sp,28]
    add     w0, w0, 1
    str     w0, [sp,28]
.L2:
; i<=63? тогда перейти на .L4
    ldr     w0, [sp,28]
    cmp     w0, 63
    ble     .L4
; возврат rt
    ldr     w0, [sp,24]
    add     sp, sp, 32
    ret
```

MIPS

Неоптимизирующий GCC

Листинг 1.293: Неоптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
; IDA не знает об именах переменных, мы присвоили их вручную:
rt      = -0x10
i       = -0xC
```

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

```
var_4      = -4
a          = 0

        addiu    $sp, -0x18
        sw       $fp, 0x18+var_4($sp)
        move     $fp, $sp
        sw       $a0, 0x18+a($fp)
; инициализировать переменные rt и i в ноль:
        sw       $zero, 0x18+rt($fp)
        sw       $zero, 0x18+i($fp)
; перейти на инструкции проверки цикла:
        b        loc_68
        or       $at, $zero ; branch delay slot, NOP

loc_20:
        li       $v1, 1
        lw       $v0, 0x18+i($fp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        sllv     $v0, $v1, $v0
; $v0 = 1<<i
        move     $v1, $v0
        lw       $v0, 0x18+a($fp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        and      $v0, $v1, $v0
; $v0 = a&(1<<i)
; a&(1<<i) равен нулю? тогда перейти на loc_58:
        beqz     $v0, loc_58
        or       $at, $zero
; переход не случился, это значит что a&(1<<i)!=0, так что инкрементируем "rt":
        lw       $v0, 0x18+rt($fp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        addiu    $v0, 1
        sw       $v0, 0x18+rt($fp)

loc_58:
; инкремент i:
        lw       $v0, 0x18+i($fp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        addiu    $v0, 1
        sw       $v0, 0x18+i($fp)

loc_68:
; загрузить i и сравнить его с 0x20 (32).
; перейти на loc_20, если это меньше чем 0x20 (32):
        lw       $v0, 0x18+i($fp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        slti     $v0, 0x20 # ' '
        bnez     $v0, loc_20
        or       $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; эпилог функции. возврат rt:
        lw       $v0, 0x18+rt($fp)
        move     $sp, $fp ; load delay slot
        lw       $fp, 0x18+var_4($sp)
        addiu    $sp, 0x18 ; load delay slot
        jr       $ra
        or       $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

Это многословно: все локальные переменные расположены в локальном стеке и перезагружаются каждый раз, когда нужны. Инструкция SLLV это «Shift Word Left Logical Variable», она отличается от SLL только тем что количество бит для сдвига кодируется в SLL (и, следовательно, фиксировано), а SLL берет количество из регистра.

Оптимизирующий GCC

Это более сжато. Здесь две инструкции сдвигов вместо одной. Почему? Можно заменить первую инструкцию SLLV на инструкцию безусловного перехода, передав управление прямо на вторую SLLV.

1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Но это ещё одна инструкция перехода в функции, а от них избавляться всегда выгодно: [2.10.1](#) (стр. 457).

Листинг 1.294: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
; $a0=a
; переменная rt будет находиться в $v0:
        move    $v0, $zero
; переменная i будет находиться в $v1:
        move    $v1, $zero
        li      $t0, 1
        li      $a3, 32
        sllv    $a1, $t0, $v1
; $a1 = $t0<<$v1 = 1<<i

loc_14:
        and     $a1, $a0
; $a1 = a&(1<<i)
; инкремент i:
        addiu   $v1, 1
; переход на loc_28 если a&(1<<i)==0 и инкремент rt:
        beqz    $a1, loc_28
        addiu   $a2, $v0, 1
; если BEQZ не сработала, сохранить обновленную rt в $v0:
        move    $v0, $a2

loc_28:
; если i!=32, перейти на loc_14 а также подготовить следующее сдвинутое значение:
        bne     $v1, $a3, loc_14
        sllv    $a1, $t0, $v1
; возврат
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

1.22.6. Вывод

Инструкции сдвига, аналогичные операторам Си/Си++ «и», в x86 это SHR/SHL (для беззнаковых значений), SAR/SHL (для знаковых значений).

Инструкции сдвига в ARM это LSR/LSL (для беззнаковых значений), ASR/LSL (для знаковых значений).

Можно также добавлять суффикс сдвига для некоторых инструкций (которые называются «data processing instructions»).

Проверка определенного бита (известного на стадии компиляции)

Проверить, присутствует ли бит 0b1000000 (0x40) в значении в регистре:

Листинг 1.295: Си/Си++

```
if (input&0x40)
    ...
```

Листинг 1.296: x86

```
TEST REG, 40h
JNZ is_set
; бит не установлен
```

Листинг 1.297: x86

```
TEST REG, 40h
JZ is_cleared
; бит установлен
```


1.22. РАБОТА С ОТДЕЛЬНЫМИ БИТАМИ

Листинг 1.298: ARM (Режим ARM)

```
TST REG, #0x40
BNE is_set
; бит не установлен
```

Иногда AND используется вместо TEST, но флаги выставляются точно также.

Проверка определенного бита (заданного во время исполнения)

Это обычно происходит при помощи вот такого фрагмента на Си/Си++ (сдвинуть значение на n бит вправо, затем отрезать самый младший бит):

Листинг 1.299: Си/Си++

```
if ((value>>n)&1)
....
```

Это обычно реализуется в x86-коде так:

Листинг 1.300: x86

```
; REG=input_value
; CL=n
SHR REG, CL
AND REG, 1
```

Или (сдвинуть 1 n раз влево, изолировать этот же бит во входном значении и проверить, не ноль ли он):

Листинг 1.301: Си/Си++

```
if (value & (1<<n))
....
```

Это обычно так реализуется в x86-коде:

Листинг 1.302: x86

```
; CL=n
MOV REG, 1
SHL REG, CL
AND input_value, REG
```

Установка определенного бита (известного во время компиляции)

Листинг 1.303: Си/Си++

```
value=value|0x40;
```

Листинг 1.304: x86

```
OR REG, 40h
```

Листинг 1.305: ARM (Режим ARM) и ARM64

```
ORR R0, R0, #0x40
```

Установка определенного бита (заданного во время исполнения)

Листинг 1.306: Си/Си++

```
value=value|(1<<n);
```

Это обычно так реализуется в x86-коде:

1.23. ЛИНЕЙНЫЙ КОНГРУЭНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Листинг 1.307: x86

```
; CL=n
MOV REG, 1
SHL REG, CL
OR input_value, REG
```

Сброс определенного бита (известного во время компиляции)

Просто исполните операцию логического «И» (AND) с инвертированным значением:

Листинг 1.308: Си/Си++

```
value=value&(~0x40);
```

Листинг 1.309: x86

```
AND REG, 0FFFFFFBFh
```

Листинг 1.310: x64

```
AND REG, 0FFFFFFFFFFFFFFBFh
```

Это на самом деле сохранение всех бит кроме одного.

В ARM в режиме ARM есть инструкция BIC, работающая как две инструкции NOT +AND:

Листинг 1.311: ARM (Режим ARM)

```
BIC R0, R0, #0x40
```

Сброс определенного бита (заданного во время исполнения)

Листинг 1.312: Си/Си++

```
value=value&(~(1<<n));
```

Листинг 1.313: x86

```
; CL=n
MOV REG, 1
SHL REG, CL
NOT REG
AND input_value, REG
```

1.22.7. Упражнения

- <http://challenges.re/67>
- <http://challenges.re/68>
- <http://challenges.re/69>
- <http://challenges.re/70>

1.23. Линейный конгруэнтный генератор как генератор псевдослучайных чисел

Линейный конгруэнтный генератор, пожалуй, самый простой способ генерировать псевдослучайные числа.

Он не в почете в наше время¹⁶⁰, но он настолько прост (только одно умножение, одно сложение и одна операция «И»), что мы можем использовать его в качестве примера.

¹⁶⁰Вихрь Мерсенна куда лучше

```
#include <stdint.h>

// константы из книги Numerical Recipes
#define RNG_a 1664525
#define RNG_c 1013904223

static uint32_t rand_state;

void my_srand (uint32_t init)
{
    rand_state=init;
}

int my_rand ()
{
    rand_state=rand_state*RNG_a;
    rand_state=rand_state+RNG_c;
    return rand_state & 0x7fff;
}
```

Здесь две функции: одна используется для инициализации внутреннего состояния, а вторая вызывается собственно для генерации псевдослучайных чисел.

Мы видим, что в алгоритме применяются две константы. Они взяты из [William H. Press and Saul A. Teukolsky and William T. Vetterling and Brian P. Flannery, *Numerical Recipes*, (2007)]. Определим их используя выражение Си/Си++ `#define`. Это макрос.

Разница между макросом в Си/Си++ и константой в том, что все макросы заменяются на значения препроцессором Си/Си++ и они не занимают места в памяти как переменные.

А константы, напротив, это переменные только для чтения.

Можно взять указатель (или адрес) переменной-константы, но это невозможно сделать с макросом.

Последняя операция «И» нужна, потому что согласно стандарту Си `my_rand()` должна возвращать значение в пределах 0..32767.

Если вы хотите получать 32-битные псевдослучайные значения, просто уберите последнюю операцию «И».

1.23.1. x86

Листинг 1.314: Оптимизирующий MSVC 2013

```
_BSS    SEGMENT
_rand_state DD  01H DUP (?)
_BSS    ENDS

_init$ = 8
_srand  PROC
    mov     eax, DWORD PTR _init$[esp-4]
    mov     DWORD PTR _rand_state, eax
    ret     0
_srand  ENDP

_TEXT   SEGMENT
_rand   PROC
    imul    eax, DWORD PTR _rand_state, 1664525
    add     eax, 1013904223 ; 3c6ef35fH
    mov     DWORD PTR _rand_state, eax
    and     eax, 32767 ; 00007fffH
    ret     0
_rand   ENDP
_TEXT   ENDS
```

Вот мы это и видим: обе константы встроены в код.

1.23. ЛИНЕЙНЫЙ КОНГРУЭНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

Память для них не выделяется. Функция `my_srand()` просто копирует входное значение во внутреннюю переменную `rand_state`.

`my_rand()` берет её, вычисляет следующее состояние `rand_state`, обрезает его и оставляет в регистре EAX.

Неоптимизированная версия побольше:

Листинг 1.315: Неоптимизирующий MSVC 2013

```
_BSS    SEGMENT
_rand_state DD    01H DUP (?)
_BSS    ENDS

_init$ = 8
_srand  PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _init$[ebp]
    mov     DWORD PTR _rand_state, eax
    pop     ebp
    ret     0
_srand  ENDP

_TEXT   SEGMENT
_rand   PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    imul    eax, DWORD PTR _rand_state, 1664525
    mov     DWORD PTR _rand_state, eax
    mov     ecx, DWORD PTR _rand_state
    add     ecx, 1013904223 ; 3c6ef35fH
    mov     DWORD PTR _rand_state, ecx
    mov     eax, DWORD PTR _rand_state
    and     eax, 32767      ; 00007fffH
    pop     ebp
    ret     0
_rand   ENDP

_TEXT   ENDS
```

1.23.2. x64

Версия для x64 почти такая же, и использует 32-битные регистры вместо 64-битных (потому что мы работаем здесь с переменными типа *int*).

Но функция `my_srand()` берет входной аргумент из регистра ECX, а не из стека:

Листинг 1.316: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
_BSS    SEGMENT
rand_state DD    01H DUP (?)
_BSS    ENDS

init$ = 8
my_srand PROC
; ECX = входной аргумент
    mov     DWORD PTR rand_state, ecx
    ret     0
my_srand ENDP

_TEXT   SEGMENT
my_rand PROC
    imul    eax, DWORD PTR rand_state, 1664525 ; 0019660dH
    add     eax, 1013904223 ; 3c6ef35fH
    mov     DWORD PTR rand_state, eax
    and     eax, 32767      ; 00007fffH
    ret     0
my_rand ENDP
```

```
_TEXT    ENDS
```

GCC делает почти такой же код.

1.23.3. 32-bit ARM

Листинг 1.317: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
my_srand PROC
    LDR    r1, |L0.52| ; загрузить указатель на rand_state
    STR    r0, [r1, #0] ; сохранить rand_state
    BX     lr
ENDP

my_rand PROC
    LDR    r0, |L0.52| ; загрузить указатель на rand_state
    LDR    r2, |L0.56| ; загрузить RNG_a
    LDR    r1, [r0, #0] ; загрузить rand_state
    MUL    r1, r2, r1
    LDR    r2, |L0.60| ; загрузить RNG_c
    ADD    r1, r1, r2
    STR    r1, [r0, #0] ; сохранить rand_state
; AND с 0x7FFF:
    LSL    r0, r1, #17
    LSR    r0, r0, #17
    BX     lr
ENDP

|L0.52|
DCD      |.data|
|L0.56|
DCD      0x0019660d
|L0.60|
DCD      0x3c6ef35f

AREA |.data|, DATA, ALIGN=2

rand_state
DCD      0x00000000
```

В ARM инструкцию невозможно встроить 32-битную константу, так что Keil-у приходится размещать их отдельно и дополнительно загружать. Вот еще что интересно: константу 0x7FFF также нельзя встроить. Поэтому Keil сдвигает `rand_state` влево на 17 бит и затем сдвигает вправо на 17 бит. Это аналогично Си/Си++-выражению $(rand_state \ll 17) \gg 17$. Выглядит как бессмысленная операция, но тем не менее, что она делает это очищает старшие 17 бит, оставляя младшие 15 бит нетронутыми, и это наша цель, в конце концов.

Оптимизирующий Keil для режима Thumb делает почти такой же код.

1.23.4. MIPS

Листинг 1.318: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
my_srand:
; записать $a0 в rand_state:
    lui    $v0, (rand_state >> 16)
    jr     $ra
    sw     $a0, rand_state

my_rand:
; загрузить rand_state в $v0:
    lui    $v1, (rand_state >> 16)
    lw     $v0, rand_state
    or     $at, $zero ; load delay slot
; умножить rand_state в $v0 на 1664525 (RNG_a):
    sll    $a1, $v0, 2
    sll    $a0, $v0, 4
```

1.23. ЛИНЕЙНЫЙ КОНГРУЭНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

```
        addu    $a0, $a1, $a0
        sll     $a1, $a0, 6
        subu    $a0, $a1, $a0
        addu    $a0, $v0
        sll     $a1, $a0, 5
        addu    $a0, $a1
        sll     $a0, 3
        addu    $v0, $a0, $v0
        sll     $a0, $v0, 2
        addu    $v0, $a0
; прибавить 1013904223 (RNG_c)
; инструкция LI объединена в IDA из LUI и ORI
        li      $a0, 0x3C6EF35F
        addu    $v0, $a0
; сохранить в rand_state:
        sw      $v0, (rand_state & 0xFFFF)($v1)
        jr      $ra
        andi    $v0, 0x7FFF ; branch delay slot
```

Ух, мы видим здесь только одну константу (0x3C6EF35F или 1013904223). Где же вторая (1664525)?

Похоже, умножение на 1664525 сделано только при помощи сдвигов и прибавлений!

Проверим эту версию:

```
#define RNG_a 1664525

int f (int a)
{
    return a*RNG_a;
}
```

Листинг 1.319: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
        sll     $v1, $a0, 2
        sll     $v0, $a0, 4
        addu    $v0, $v1, $v0
        sll     $v1, $v0, 6
        subu    $v0, $v1, $v0
        addu    $v0, $a0
        sll     $v1, $v0, 5
        addu    $v0, $v1
        sll     $v0, 3
        addu    $a0, $v0, $a0
        sll     $v0, $a0, 2
        jr      $ra
        addu    $v0, $a0, $v0 ; branch delay slot
```

Действительно!

Перемещения в MIPS («relocs»)

Ещё поговорим о том, как на самом деле происходят операции загрузки из памяти и запись в память.

Листинги здесь были сделаны в IDA, которая убирает немного деталей.

Запустим objdump дважды: чтобы получить дизассемблированный листинг и список перемещений:

Листинг 1.320: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (objdump)

```
# objdump -D rand_03.o

...

00000000 <my_srand>:
 0: 3c020000      lui     v0,0x0
 4: 03e00008      jr      ra
 8: ac440000      sw      a0,0(v0)
```

1.23. ЛИНЕЙНЫЙ КОНГРУЭНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР

```
0000000c <my_rand>:
  c:  3c030000      lui      v1,0x0
 10:  8c620000      lw       v0,0(v1)
 14:  00200825      move    at,at
 18:  00022880      sll     a1,v0,0x2
 1c:  00022100      sll     a0,v0,0x4
 20:  00a42021      addu    a0,a1,a0
 24:  00042980      sll     a1,a0,0x6
 28:  00a42023      subu    a0,a1,a0
 2c:  00822021      addu    a0,a0,v0
 30:  00042940      sll     a1,a0,0x5
 34:  00852021      addu    a0,a0,a1
 38:  000420c0      sll     a0,a0,0x3
 3c:  00821021      addu    v0,a0,v0
 40:  00022080      sll     a0,v0,0x2
 44:  00441021      addu    v0,v0,a0
 48:  3c043c6e      lui     a0,0x3c6e
 4c:  3484f35f      ori     a0,a0,0xf35f
 50:  00441021      addu    v0,v0,a0
 54:  ac620000      sw      v0,0(v1)
 58:  03e00008      jr      ra
 5c:  30427fff      andi    v0,v0,0x7fff

...

# objdump -r rand_03.o

...

RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
OFFSET      TYPE          VALUE
00000000 R_MIPS_HI16      .bss
00000008 R_MIPS_L016      .bss
0000000c R_MIPS_HI16      .bss
00000010 R_MIPS_L016      .bss
00000054 R_MIPS_L016      .bss

...
```

Рассмотрим два перемещения для функции `my_srand()`.

Первое, для адреса 0, имеет тип `R_MIPS_HI16`, и второе, для адреса 8, имеет тип `R_MIPS_L016`.

Это значит, что адрес начала сегмента `.bss` будет записан в инструкцию по адресу 0 (старшая часть адреса) и по адресу 8 (младшая часть адреса).

Ведь переменная `rand_state` находится в самом начале сегмента `.bss`.

Так что мы видим нули в операндах инструкций `LUI` и `SW` потому что там пока ничего нет — компилятор не знает, что туда записать.

Линкер это исправит и старшая часть адреса будет записана в операнд инструкции `LUI` и младшая часть адреса — в операнд инструкции `SW`.

`SW` просуммирует младшую часть адреса и то что находится в регистре `$V0` (там старшая часть).

Та же история и с функцией `my_rand()`: перемещение `R_MIPS_HI16` указывает линкеру записать старшую часть адреса сегмента `.bss` в инструкцию `LUI`.

Так что старшая часть адреса переменной `rand_state` находится в регистре `$V1`.

Инструкция `LW` по адресу `0x10` просуммирует старшую и младшую часть и загрузит значение переменной `rand_state` в `$V0`.

Инструкция `SW` по адресу `0x54` также просуммирует и затем запишет новое значение в глобальную переменную `rand_state`.

IDA обрабатывает перемещения при загрузке, и таким образом эти детали скрываются.

Но мы должны о них помнить.

1.23.5. Версия этого примера для многопоточной среды

Версия примера для многопоточной среды будет рассмотрена позже: [6.2.1](#) (стр. [722](#)).

1.24. Структуры

В принципе, структура в Си/Си++ это, с некоторыми допущениями, просто всегда лежащий рядом, и в той же последовательности, набор переменных, не обязательно одного типа ¹⁶¹.

1.24.1. MSVC: Пример SYSTEMTIME

Возьмем, к примеру, структуру SYSTEMTIME¹⁶² из win32 описывающую время.

Она объявлена так:

Листинг 1.321: WinBase.h

```
typedef struct _SYSTEMTIME {
    WORD wYear;
    WORD wMonth;
    WORD wDayOfWeek;
    WORD wDay;
    WORD wHour;
    WORD wMinute;
    WORD wSecond;
    WORD wMilliseconds;
} SYSTEMTIME, *PSYSTEMTIME;
```

Пишем на Си функцию для получения текущего системного времени:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

void main()
{
    SYSTEMTIME t;
    GetSystemTime (&t);

    printf ("%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d\n",
        t.wYear, t.wMonth, t.wDay,
        t.wHour, t.wMinute, t.wSecond);

    return;
};
```

Что в итоге (MSVC 2010):

Листинг 1.322: MSVC 2010 /GS-

```
_t$ = -16 ; size = 16
_main    PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 16
    lea     eax, DWORD PTR _t$[ebp]
    push    eax
    call    DWORD PTR __imp__GetSystemTime@4
    movzx   ecx, WORD PTR _t$[ebp+12] ; wSecond
    push    ecx
    movzx   edx, WORD PTR _t$[ebp+10] ; wMinute
    push    edx
    movzx   eax, WORD PTR _t$[ebp+8] ; wHour
    push    eax
    movzx   ecx, WORD PTR _t$[ebp+6] ; wDay
```

¹⁶¹ АКА «гетерогенный контейнер»

¹⁶² MSDN: [SYSTEMTIME structure](#)

1.24. СТРУКТУРЫ

```
push    ecx
movzx   edx, WORD PTR _t$[ebp+2] ; wMonth
push    edx
movzx   eax, WORD PTR _t$[ebp] ; wYear
push    eax
push    OFFSET $SG78811 ; '%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d', 0aH, 00H
call    _printf
add     esp, 28
xor     eax, eax
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
_main   ENDP
```

Под структуру в стеке выделено 16 байт — именно столько будет `sizeof(WORD)*8` (в структуре 8 переменных с типом `WORD`).

Обратите внимание на тот факт, что структура начинается с поля `wYear`. Можно сказать, что в качестве аргумента для `GetSystemTime()`¹⁶³ передается указатель на структуру `SYSTEMTIME`, но можно также сказать, что передается указатель на поле `wYear`, что одно и тоже! `GetSystemTime()` пишет текущий год в тот `WORD` на который указывает переданный указатель, затем сдвигается на 2 байта вправо, пишет текущий месяц, итд, итд.

¹⁶³[MSDN: GetSystemTime function](#)

Компилируем этот пример в MSVC 2010 с ключами /GS- /MD и запускаем в OllyDbg. Открываем окна данных и стека по адресу, который передается в качестве первого аргумента в функцию GetSystemTime(), ждем пока эта функция исполнится, и видим следующее:

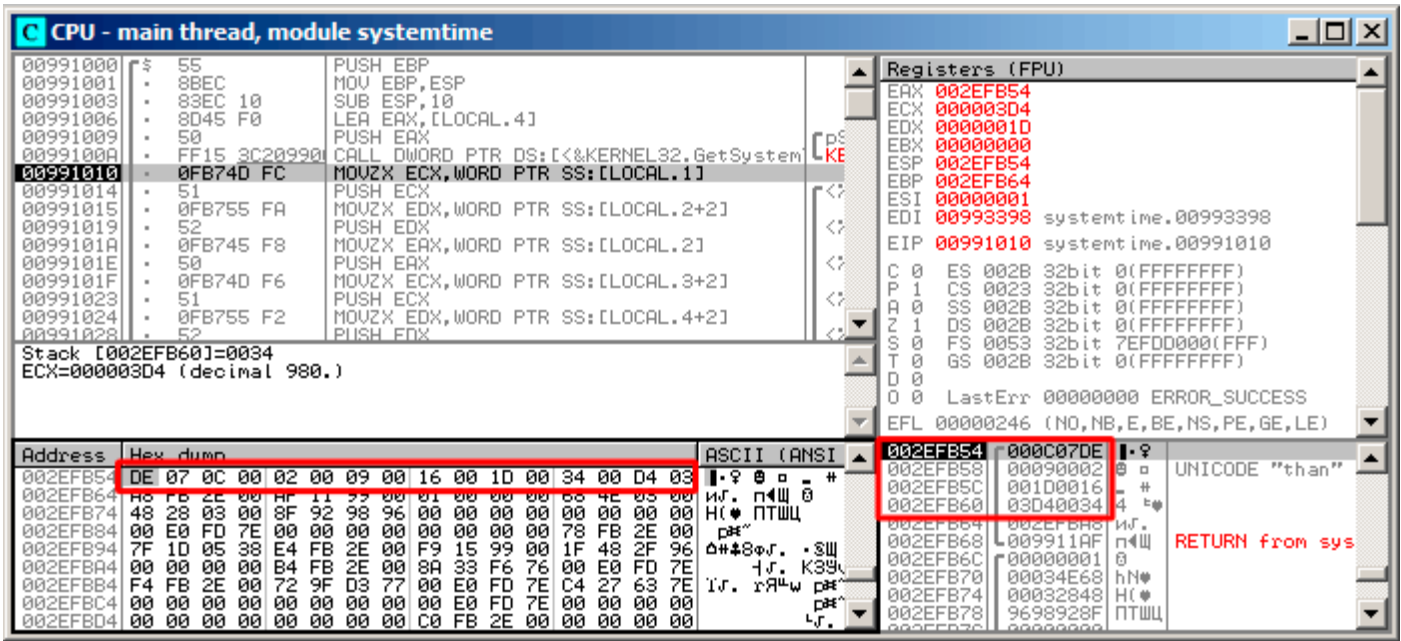


Рис. 1.96: OllyDbg: GetSystemTime() только что исполнилась

Точное системное время на моем компьютере, в которое исполнилась функция, это 9 декабря 2014, 22:29:52:

Листинг 1.323: Вывод printf()

```
2014-12-09 22:29:52
```

Таким образом, в окне данных мы видим следующие 16 байт:

```
DE 07 0C 00 02 00 09 00 16 00 1D 00 34 00 D4 03
```

Каждые два байта отражают одно поле структуры. А так как порядок байт ([endianness](#)) *little endian*, то в начале следует младший байт, затем старший. Следовательно, вот какие 16-битные числа сейчас записаны в памяти:

Шестнадцатеричное число	десятичное число	имя поля
0x07DE	2014	wYear
0x000C	12	wMonth
0x0002	2	wDayOfWeek
0x0009	9	wDay
0x0016	22	wHour
0x001D	29	wMinute
0x0034	52	wSecond
0x03D4	980	wMilliseconds

В окне стека, видны те же значения, только они сгруппированы как 32-битные значения. Затем printf() просто берет нужные значения и выводит их на консоль. Некоторые поля printf() не выводит (wDayOfWeek и wMilliseconds), но они находятся в памяти и доступны для использования.

Замена структуры массивом

Тот факт, что поля структуры — это просто переменные расположенные рядом, легко проиллюстрировать следующим образом.

1.24. СТРУКТУРЫ

Глядя на описание структуры SYSTEMTIME, можно переписать этот простой пример так:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

void main()
{
    WORD array[8];
    GetSystemTime (array);

    printf ("%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d\n",
        array[0] /* wYear */, array[1] /* wMonth */, array[3] /* wDay */,
        array[4] /* wHour */, array[5] /* wMinute */, array[6] /* wSecond */);

    return;
};
```

Компилятор немного ворчит:

```
systemtime2.c(7) : warning C4133: 'function' : incompatible types - from 'WORD [8]' to 'LPSYSTEMTIME'
↳ LPSYSTEMTIME'
```

Тем не менее, выдает такой код:

Листинг 1.324: Неоптимизирующий MSVC 2010

```
$SG78573 DB      '%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d', 0aH, 00H

_array$ = -16    ; size = 16
_main PROC
    push     ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 16
    lea     eax, DWORD PTR _array$[ebp]
    push     eax
    call    DWORD PTR __imp__GetSystemTime@4
    movzx   ecx, WORD PTR _array$[ebp+12] ; wSecond
    push     ecx
    movzx   edx, WORD PTR _array$[ebp+10] ; wMinute
    push     edx
    movzx   eax, WORD PTR _array$[ebp+8] ; wHour
    push     eax
    movzx   ecx, WORD PTR _array$[ebp+6] ; wDay
    push     ecx
    movzx   edx, WORD PTR _array$[ebp+2] ; wMonth
    push     edx
    movzx   eax, WORD PTR _array$[ebp] ; wYear
    push     eax
    push     OFFSET $SG78573
    call    _printf
    add     esp, 28
    xor     eax, eax
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_main ENDP
```

И это работает так же!

Любопытно что результат на ассемблере неотличим от предыдущего. Таким образом, глядя на этот код, никогда нельзя сказать с уверенностью, была ли там объявлена структура, либо просто набор переменных.

Тем не менее, никто в здравом уме делать так не будет.

Потому что это неудобно. К тому же, иногда, поля в структуре могут меняться разработчиками, переставляться местами, итд.

С OllyDbg этот пример изучать не будем, потому что он будет точно такой же, как и в случае со структурой.

1.24.2. Выделяем место для структуры через malloc()

Однако, бывает и так, что проще хранить структуры не в стеке, а в [куче](#):

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

void main()
{
    SYSTEMTIME *t;

    t=(SYSTEMTIME *)malloc (sizeof (SYSTEMTIME));

    GetSystemTime (t);

    printf ("%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d\n",
        t->wYear, t->wMonth, t->wDay,
        t->wHour, t->wMinute, t->wSecond);

    free (t);

    return;
};
```

Скомпилируем на этот раз с оптимизацией (/Ox) чтобы было проще увидеть то, что нам нужно.

Листинг 1.325: Оптимизирующий MSVC

```
_main      PROC
    push    esi
    push    16
    call    _malloc
    add     esp, 4
    mov     esi, eax
    push    esi
    call    DWORD PTR __imp__GetSystemTime@4
    movzx   eax, WORD PTR [esi+12] ; wSecond
    movzx   ecx, WORD PTR [esi+10] ; wMinute
    movzx   edx, WORD PTR [esi+8] ; wHour
    push    eax
    movzx   eax, WORD PTR [esi+6] ; wDay
    push    ecx
    movzx   ecx, WORD PTR [esi+2] ; wMonth
    push    edx
    movzx   edx, WORD PTR [esi] ; wYear
    push    eax
    push    ecx
    push    edx
    push    OFFSET $SG78833
    call    _printf
    push    esi
    call    _free
    add     esp, 32
    xor     eax, eax
    pop     esi
    ret     0
_main      ENDP
```

Итак, `sizeof(SYSTEMTIME) = 16`, именно столько байт выделяется при помощи `malloc()`. Она возвращает указатель на только что выделенный блок памяти в EAX, который копируется в ESI. Win32 функция `GetSystemTime()` обязуется сохранить состояние ESI, поэтому здесь оно нигде не сохраняется и продолжает использоваться после вызова `GetSystemTime()`.

Новая инструкция — `MOVZX` (*Move with Zero eXtend*). Она нужна почти там же где и `MOVSB`, только всегда очищает остальные биты в 0. Дело в том, что `printf()` требует 32-битный тип `int`, а в структуре лежит `WORD` — это 16-битный беззнаковый тип. Поэтому копируя значение из `WORD` в `int`, нужно очистить биты от 16 до 31, иначе там будет просто случайный мусор, оставшийся от предыдущих действий с регистрами.

В этом примере можно также представить структуру как массив 8-и `WORD`-ов:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

void main()
{
    WORD *t;

    t=(WORD *)malloc (16);

    GetSystemTime (t);

    printf ("%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d\n",
        t[0] /* wYear */, t[1] /* wMonth */, t[3] /* wDay */,
        t[4] /* wHour */, t[5] /* wMinute */, t[6] /* wSecond */);

    free (t);

    return;
};
```

Получим такое:

Листинг 1.326: Оптимизирующий MSVC

```
$SG78594 DB      '%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d', 0aH, 00H

_main  PROC
    push    esi
    push    16
    call    _malloc
    add     esp, 4
    mov     esi, eax
    push    esi
    call    DWORD PTR __imp__GetSystemTime@4
    movzx   eax, WORD PTR [esi+12]
    movzx   ecx, WORD PTR [esi+10]
    movzx   edx, WORD PTR [esi+8]
    push    eax
    movzx   eax, WORD PTR [esi+6]
    push    ecx
    movzx   ecx, WORD PTR [esi+2]
    push    edx
    movzx   edx, WORD PTR [esi]
    push    eax
    push    ecx
    push    edx
    push    OFFSET $SG78594
    call    _printf
    push    esi
    call    _free
    add     esp, 32
    xor     eax, eax
    pop     esi
    ret     0
_main  ENDP
```

И снова мы получаем идентичный код, неотличимый от предыдущего.

Но и снова нужно отметить, что в реальности так лучше не делать, если только вы не знаете точно, что вы делаете.

1.24.3. UNIX: struct tm

Linux

В Линуксе, для примера, возьмем структуру tm из time.h:

```

#include <stdio.h>
#include <time.h>

void main()
{
    struct tm t;
    time_t unix_time;

    unix_time=time(NULL);

    localtime_r (&unix_time, &t);

    printf ("Year: %d\n", t.tm_year+1900);
    printf ("Month: %d\n", t.tm_mon);
    printf ("Day: %d\n", t.tm_mday);
    printf ("Hour: %d\n", t.tm_hour);
    printf ("Minutes: %d\n", t.tm_min);
    printf ("Seconds: %d\n", t.tm_sec);
};

```

Компилируем при помощи GCC 4.4.1:

Листинг 1.327: GCC 4.4.1

```

main proc near
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, 0FFFFFF0h
    sub     esp, 40h
    mov     dword ptr [esp], 0 ; первый аргумент для time()
    call    time
    mov     [esp+3Ch], eax
    lea     eax, [esp+3Ch] ; берем указатель на то что вернула time()
    lea     edx, [esp+10h] ; по ESP+10h будет начинаться структура struct tm
    mov     [esp+4], edx ; передаем указатель на начало структуры
    mov     [esp], eax ; передаем указатель на результат time()
    call    localtime_r
    mov     eax, [esp+24h] ; tm_year
    lea     edx, [eax+76Ch] ; edx=eax+1900
    mov     eax, offset format ; "Year: %d\n"
    mov     [esp+4], edx
    mov     [esp], eax
    call    printf
    mov     edx, [esp+20h] ; tm_mon
    mov     eax, offset aMonthD ; "Month: %d\n"
    mov     [esp+4], edx
    mov     [esp], eax
    call    printf
    mov     edx, [esp+1Ch] ; tm_mday
    mov     eax, offset aDayD ; "Day: %d\n"
    mov     [esp+4], edx
    mov     [esp], eax
    call    printf
    mov     edx, [esp+18h] ; tm_hour
    mov     eax, offset aHourD ; "Hour: %d\n"
    mov     [esp+4], edx
    mov     [esp], eax
    call    printf
    mov     edx, [esp+14h] ; tm_min
    mov     eax, offset aMinutesD ; "Minutes: %d\n"
    mov     [esp+4], edx
    mov     [esp], eax
    call    printf
    mov     edx, [esp+10h] ; tm_sec
    mov     eax, offset aSecondsD ; "Seconds: %d\n"
    mov     [esp+4], edx ; tm_sec
    mov     [esp], eax
    call    printf
    leave
    retn

```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
main endp
```

К сожалению, по какой-то причине, [IDA](#) не сформировала названия локальных переменных в стеке. Но так как мы уже опытные реверсеры :-)) то можем обойтись и без этого в таком простом примере.

Обратите внимание на `lea edx, [eax+76Ch]` — эта инструкция прибавляет `0x76C` (1900) к `EAX`, но не модифицирует флаги. См. также соответствующий раздел об инструкции `LEA` ([1.6](#) (стр. 1003)).

GDB

Попробуем загрузить пример в GDB [164](#):

Листинг 1.328: GDB

```
dennis@ubuntuvm:~/polygon$ date
Mon Jun  2 18:10:37 EEST 2014
dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gcc GCC_tm.c -o GCC_tm
dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gdb GCC_tm
GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
...
Reading symbols from /home/dennis/polygon/GCC_tm...(no debugging symbols found)...done.
(gdb) b printf
Breakpoint 1 at 0x8048330
(gdb) run
Starting program: /home/dennis/polygon/GCC_tm

Breakpoint 1, __printf (format=0x80485c0 "Year: %d\n") at printf.c:29
29      printf.c: No such file or directory.
(gdb) x/20x $esp
0xbffff0dc:    0x080484c3    0x080485c0    0x000007de    0x00000000
0xbffff0ec:    0x08048301    0x538c93ed    0x00000025    0x0000000a
0xbffff0fc:    0x00000012    0x00000002    0x00000005    0x00000072
0xbffff10c:    0x00000001    0x00000098    0x00000001    0x00002a30
0xbffff11c:    0x0804b090    0x08048530    0x00000000    0x00000000
(gdb)
```

Мы легко находим нашу структуру в стеке. Для начала, посмотрим, как она объявлена в *time.h*:

Листинг 1.329: time.h

```
struct tm
{
    int    tm_sec;
    int    tm_min;
    int    tm_hour;
    int    tm_mday;
    int    tm_mon;
    int    tm_year;
    int    tm_wday;
    int    tm_yday;
    int    tm_isdst;
};
```

Обратите внимание что здесь 32-битные *int* вместо `WORD` в `SYSTEMTIME`. Так что, каждое поле занимает 32-битное слово.

Вот поля нашей структуры в стеке:

0xbffff0dc:	0x080484c3	0x080485c0	0x000007de	0x00000000
0xbffff0ec:	0x08048301	0x538c93ed	0x00000025	sec 0x0000000a min
0xbffff0fc:	0x00000012	hour 0x00000002	mday 0x00000005	mon 0x00000072 year
0xbffff10c:	0x00000001	wday 0x00000098	yday 0x00000001	isdst0x00002a30
0xbffff11c:	0x0804b090	0x08048530	0x00000000	0x00000000

Либо же, в виде таблицы:

¹⁶⁴Результат работы *date* немного подправлен в целях демонстрации. Конечно же, в реальности, нельзя так быстро запустить GDB, чтобы значение секунд осталось бы таким же.

1.24. СТРУКТУРЫ

Шестнадцатеричное число	десятичное число	имя поля
0x00000025	37	tm_sec
0x0000000a	10	tm_min
0x00000012	18	tm_hour
0x00000002	2	tm_mday
0x00000005	5	tm_mon
0x00000072	114	tm_year
0x00000001	1	tm_wday
0x00000098	152	tm_yday
0x00000001	1	tm_isdst

Как и в примере с SYSTEMTIME (1.24.1 (стр. 335)), здесь есть и другие поля, готовые для использования, но в нашем примере они не используются, например, tm_wday, tm_yday, tm_isdst.

ARM

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Этот же пример:

Листинг 1.330: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
var_38 = -0x38
var_34 = -0x34
var_30 = -0x30
var_2C = -0x2C
var_28 = -0x28
var_24 = -0x24
timer  = -0xC

    PUSH    {LR}
    MOVS    R0, #0          ; timer
    SUB     SP, SP, #0x34
    BL      time
    STR     R0, [SP,#0x38+timer]
    MOV     R1, SP          ; tp
    ADD     R0, SP, #0x38+timer ; timer
    BL      localtime_r
    LDR     R1, =0x76C
    LDR     R0, [SP,#0x38+var_24]
    ADDS    R1, R0, R1
    ADR     R0, aYearD      ; "Year: %d\n"
    BL      __2printf
    LDR     R1, [SP,#0x38+var_28]
    ADR     R0, aMonthD     ; "Month: %d\n"
    BL      __2printf
    LDR     R1, [SP,#0x38+var_2C]
    ADR     R0, aDayD       ; "Day: %d\n"
    BL      __2printf
    LDR     R1, [SP,#0x38+var_30]
    ADR     R0, aHourD      ; "Hour: %d\n"
    BL      __2printf
    LDR     R1, [SP,#0x38+var_34]
    ADR     R0, aMinutesD   ; "Minutes: %d\n"
    BL      __2printf
    LDR     R1, [SP,#0x38+var_38]
    ADR     R0, aSecondsD   ; "Seconds: %d\n"
    BL      __2printf
    ADD     SP, SP, #0x34
    POP     {PC}
```

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

1.24. СТРУКТУРЫ

IDA «узнала» структуру tm (потому что IDA «знает» типы аргументов библиотечных функций, таких как localtime_r()), поэтому показала здесь обращения к отдельным элементам структуры и присвоила им имена.

Листинг 1.331: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```
var_38 = -0x38
var_34 = -0x34

    PUSH {R7,LR}
    MOV R7, SP
    SUB SP, SP, #0x30
    MOVS R0, #0 ; time_t *
    BLX _time
    ADD R1, SP, #0x38+var_34 ; struct tm *
    STR R0, [SP,#0x38+var_38]
    MOV R0, SP ; time_t *
    BLX _localtime_r
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34.tm_year]
    MOV R0, 0xF44 ; "Year: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    ADDW R1, R1, #0x76C
    BLX _printf
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34.tm_mon]
    MOV R0, 0xF3A ; "Month: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    BLX _printf
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34.tm_mday]
    MOV R0, 0xF35 ; "Day: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    BLX _printf
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34.tm_hour]
    MOV R0, 0xF2E ; "Hour: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    BLX _printf
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34.tm_min]
    MOV R0, 0xF28 ; "Minutes: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    BLX _printf
    LDR R1, [SP,#0x38+var_34]
    MOV R0, 0xF25 ; "Seconds: %d\n"
    ADD R0, PC ; char *
    BLX _printf
    ADD SP, SP, #0x30
    POP {R7,PC}

...

00000000 tm      struc ; (sizeof=0x2C, standard type)
00000000 tm_sec   DCD ?
00000004 tm_min   DCD ?
00000008 tm_hour  DCD ?
0000000C tm_mday  DCD ?
00000010 tm_mon   DCD ?
00000014 tm_year  DCD ?
00000018 tm_wday  DCD ?
0000001C tm_yday  DCD ?
00000020 tm_isdst DCD ?
00000024 tm_gmtoff DCD ?
00000028 tm_zone  DCD ? ; offset
0000002C tm      ends
```

MIPS

Листинг 1.332: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
1 main:
2
3 ; IDA не в курсе имен полей структуры, мы назвали их так вручную:
```

1.24. СТРУКТУРЫ

```

4
5 var_40      = -0x40
6 var_38      = -0x38
7 seconds     = -0x34
8 minutes     = -0x30
9 hour        = -0x2C
10 day        = -0x28
11 month      = -0x24
12 year       = -0x20
13 var_4      = -4
14
15          lui    $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
16          addiu  $sp, -0x50
17          la     $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
18          sw     $ra, 0x50+var_4($sp)
19          sw     $gp, 0x50+var_40($sp)
20          lw     $t9, (time & 0xFFFF)($gp)
21          or     $at, $zero ; load delay slot, NOP
22          jalr   $t9
23          move   $a0, $zero ; branch delay slot, NOP
24          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
25          addiu  $a0, $sp, 0x50+var_38
26          lw     $t9, (localtime_r & 0xFFFF)($gp)
27          addiu  $a1, $sp, 0x50+seconds
28          jalr   $t9
29          sw     $v0, 0x50+var_38($sp) ; branch delay slot
30          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
31          lw     $a1, 0x50+year($sp)
32          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
33          la     $a0, $LC0      # "Year: %d\n"
34          jalr   $t9
35          addiu  $a1, 1900 ; branch delay slot
36          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
37          lw     $a1, 0x50+month($sp)
38          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
39          lui    $a0, ($LC1 >> 16) # "Month: %d\n"
40          jalr   $t9
41          la     $a0, ($LC1 & 0xFFFF) # "Month: %d\n" ; branch delay slot
42          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
43          lw     $a1, 0x50+day($sp)
44          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
45          lui    $a0, ($LC2 >> 16) # "Day: %d\n"
46          jalr   $t9
47          la     $a0, ($LC2 & 0xFFFF) # "Day: %d\n" ; branch delay slot
48          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
49          lw     $a1, 0x50+hour($sp)
50          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
51          lui    $a0, ($LC3 >> 16) # "Hour: %d\n"
52          jalr   $t9
53          la     $a0, ($LC3 & 0xFFFF) # "Hour: %d\n" ; branch delay slot
54          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
55          lw     $a1, 0x50+minutes($sp)
56          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
57          lui    $a0, ($LC4 >> 16) # "Minutes: %d\n"
58          jalr   $t9
59          la     $a0, ($LC4 & 0xFFFF) # "Minutes: %d\n" ; branch delay slot
60          lw     $gp, 0x50+var_40($sp)
61          lw     $a1, 0x50+seconds($sp)
62          lw     $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
63          lui    $a0, ($LC5 >> 16) # "Seconds: %d\n"
64          jalr   $t9
65          la     $a0, ($LC5 & 0xFFFF) # "Seconds: %d\n" ; branch delay slot
66          lw     $ra, 0x50+var_4($sp)
67          or     $at, $zero ; load delay slot, NOP
68          jr     $ra
69          addiu  $sp, 0x50
70
71 $LC0:      .ascii "Year: %d\n"<0>
72 $LC1:      .ascii "Month: %d\n"<0>
73 $LC2:      .ascii "Day: %d\n"<0>

```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
74 $LC3:          .ascii "Hour: %d\n"<0>
75 $LC4:          .ascii "Minutes: %d\n"<0>
76 $LC5:          .ascii "Seconds: %d\n"<0>
```

Это тот пример, где branch delay slot-ы могут нас запутать.

Например, в строке 35 есть инструкция `addiu $a1, 1900`, добавляющая 1900 к числу года.

Но она выполняется перед исполнением соответствующей JALR в строке 34, не забывайте.

Структура как набор переменных

Чтобы проиллюстрировать то что структура — это просто набор переменных, лежащих в одном месте, переделаем немного пример, еще раз заглянув в описание структуры `tm`: листинг.1.329.

```
#include <stdio.h>
#include <time.h>

void main()
{
    int tm_sec, tm_min, tm_hour, tm_mday, tm_mon, tm_year, tm_wday, tm_yday, tm_isdst;
    time_t unix_time;

    unix_time=time(NULL);

    localtime_r (&unix_time, &tm_sec);

    printf ("Year: %d\n", tm_year+1900);
    printf ("Month: %d\n", tm_mon);
    printf ("Day: %d\n", tm_mday);
    printf ("Hour: %d\n", tm_hour);
    printf ("Minutes: %d\n", tm_min);
    printf ("Seconds: %d\n", tm_sec);
};
```

N.B. В `localtime_r` передается указатель именно на `tm_sec`, т.е. на первый элемент «структуры».

В итоге, и этот компилятор поворчит:

Листинг 1.333: GCC 4.7.3

```
GCC_tm2.c: In function 'main':
GCC_tm2.c:11:5: warning: passing argument 2 of 'localtime_r' from incompatible pointer type [↵
↳ enabled by default]
In file included from GCC_tm2.c:2:0:
/usr/include/time.h:59:12: note: expected 'struct tm *' but argument is of type 'int *'
```

Тем не менее, сгенерирует такое:

Листинг 1.334: GCC 4.7.3

```
main      proc near
var_30    = dword ptr -30h
var_2C    = dword ptr -2Ch
unix_time = dword ptr -1Ch
tm_sec    = dword ptr -18h
tm_min    = dword ptr -14h
tm_hour   = dword ptr -10h
tm_mday   = dword ptr -0Ch
tm_mon    = dword ptr -8
tm_year   = dword ptr -4

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        and     esp, 0FFFFFFF0h
        sub     esp, 30h
        call    __main
        mov     [esp+30h+var_30], 0 ; arg 0
        call    time
```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
    mov     [esp+30h+unix_time], eax
    lea     eax, [esp+30h+tm_sec]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    lea     eax, [esp+30h+unix_time]
    mov     [esp+30h+var_30], eax
    call    localtime_r
    mov     eax, [esp+30h+tm_year]
    add     eax, 1900
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aYearD ; "Year: %d\n"
    call    printf
    mov     eax, [esp+30h+tm_mon]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aMonthD ; "Month: %d\n"
    call    printf
    mov     eax, [esp+30h+tm_mday]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aDayD ; "Day: %d\n"
    call    printf
    mov     eax, [esp+30h+tm_hour]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aHourD ; "Hour: %d\n"
    call    printf
    mov     eax, [esp+30h+tm_min]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aMinutesD ; "Minutes: %d\n"
    call    printf
    mov     eax, [esp+30h+tm_sec]
    mov     [esp+30h+var_2C], eax
    mov     [esp+30h+var_30], offset aSecondsD ; "Seconds: %d\n"
    call    printf
    leave
    retn
main      endp
```

Этот код почти идентичен уже рассмотренному, и нельзя сказать, была ли структура в оригинальном исходном коде либо набор переменных.

И это работает. Однако, в реальности так лучше не делать. Обычно, неоптимизирующий компилятор располагает переменные в локальном стеке в том же порядке, в котором они объявляются в функции.

Тем не менее, никакой гарантии нет.

Кстати, какой-нибудь другой компилятор может предупредить, что переменные `tm_year`, `tm_mon`, `tm_mday`, `tm_hour`, `tm_min`, но не `tm_sec`, используются без инициализации. Действительно, ведь компилятор не знает что они будут заполнены при вызове функции `localtime_r()`.

Мы выбрали именно этот пример для иллюстрации, потому что все члены структуры имеют тип *int*. Это не сработает, если поля структуры будут иметь размер 16 бит (WORD), как в случае со структурой `SYSTEMTIME` — `GetSystemTime()` заполнит их неверно (потому что локальные переменные выровнены по 32-битной границе). Читайте об этом в следующей секции: «Упаковка полей в структуре» (1.24.4 (стр. 350)).

Так что, структура — это просто набор переменных лежащих в одном месте, рядом.

Можно было бы сказать, что структура — это инструкция компилятору, заставляющая его удерживать переменные в одном месте.

Кстати, когда-то, в очень ранних версиях Си (перед 1972) структур не было вовсе [Dennis M. Ritchie, *The development of the C language*, (1993)]¹⁶⁵.

Здесь нет примера с отладчиком: потому что он будет полностью идентичным тому, что вы уже видели.

Структура как массив 32-битных слов

¹⁶⁵Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17264>

```

#include <stdio.h>
#include <time.h>

void main()
{
    struct tm t;
    time_t unix_time;
    int i;

    unix_time=time(NULL);

    localtime_r (&unix_time, &t);

    for (i=0; i<9; i++)
    {
        int tmp=((int*)&t)[i];
        printf ("0x%08X (%d)\n", tmp, tmp);
    };
};

```

Мы просто приводим (*cast*) указатель на структуру к массиву *int*-ов. И это работает! Запускаем пример 23:51:45 26-July-2014.

```

0x0000002D (45)
0x00000033 (51)
0x00000017 (23)
0x0000001A (26)
0x00000006 (6)
0x00000072 (114)
0x00000006 (6)
0x000000CE (206)
0x00000001 (1)

```

Переменные здесь в том же порядке, в котором они перечислены в определении структуры: [1.329](#) (стр. [342](#)).

Вот как это компилируется:

Листинг 1.335: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```

main      proc near
          push    ebp
          mov     ebp, esp
          push    esi
          push    ebx
          and     esp, 0FFFFFF0h
          sub     esp, 40h
          mov     dword ptr [esp], 0 ; timer
          lea     ebx, [esp+14h]
          call    _time
          lea     esi, [esp+38h]
          mov     [esp+4], ebx      ; tp
          mov     [esp+10h], eax
          lea     eax, [esp+10h]
          mov     [esp], eax       ; timer
          call    _localtime_r
          nop
          lea     esi, [esi+0]     ; NOP
loc_80483D8:
; EBX здесь это указатель на структуру, ESI – указатель на её конец.
          mov     eax, [ebx]       ; загрузить 32-битное слово из массива
          add     ebx, 4           ; следующее поле в структуре
          mov     dword ptr [esp+4], offset a0x08xD ; "0x%08X (%d)\n"
          mov     dword ptr [esp], 1
          mov     [esp+0Ch], eax   ; передать значение в printf()
          mov     [esp+8], eax     ; передать значение в printf()
          call    __printf_chk
          cmp     ebx, esi        ; достигли конца структуры?
          jnz     short loc_80483D8 ; нет – тогда загрузить следующее значение
          lea     esp, [ebp-8]

```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
main      pop     ebx
           pop     esi
           pop     ebp
           retn
           endp
```

И действительно: место в локальном стеке в начале используется как структура, затем как массив. Возможно даже модифицировать поля структуры через указатель.

И снова, это сомнительный хакерский способ, который не рекомендуется использовать в настоящем коде.

Упражнение

В качестве упражнения, попробуйте модифицировать (увеличить на 1) текущий номер месяца обращаясь со структурой как с массивом.

Структура как массив байт

Можно пойти еще дальше. Можно привести (*cast*) указатель к массиву байт и вывести его:

```
#include <stdio.h>
#include <time.h>

void main()
{
    struct tm t;
    time_t unix_time;
    int i, j;

    unix_time=time(NULL);

    localtime_r (&unix_time, &t);

    for (i=0; i<9; i++)
    {
        for (j=0; j<4; j++)
            printf ("0x%02X ", ((unsigned char*)&t)[i*4+j]);
        printf ("\n");
    }
};
```

```
0x2D 0x00 0x00 0x00
0x33 0x00 0x00 0x00
0x17 0x00 0x00 0x00
0x1A 0x00 0x00 0x00
0x06 0x00 0x00 0x00
0x72 0x00 0x00 0x00
0x06 0x00 0x00 0x00
0xCE 0x00 0x00 0x00
0x01 0x00 0x00 0x00
```

Мы также запускаем этот пример в 23:51:45 26-July-2014 ¹⁶⁶. Переменные точно такие же, как и в предыдущем выводе (1.24.3 (стр. 348)), и конечно, младший байт идет в самом начале, потому что это архитектура little-endian (2.8 (стр. 455)).

Листинг 1.336: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
main      proc near
           push    ebp
           mov     ebp, esp
           push    edi
           push    esi
           push    ebx
```

¹⁶⁶Время и дата такая же в целях демонстрации. Значения байт были подправлены.

1.24. СТРУКТУРЫ

```
and     esp, 0FFFFFF0h
sub     esp, 40h
mov     dword ptr [esp], 0 ; timer
lea     esi, [esp+14h]
call    _time
lea     edi, [esp+38h] ; struct end
mov     [esp+4], esi ; tp
mov     [esp+10h], eax
lea     eax, [esp+10h]
mov     [esp], eax ; timer
call    _localtime_r
lea     esi, [esi+0] ; NOP
; ESI здесь это указатель на структуру в локальном стеке. EDI это указатель на конец структуры.
loc_8048408:
xor     ebx, ebx ; j=0

loc_804840A:
movzx   eax, byte ptr [esi+ebx] ; загрузить байт
add     ebx, 1 ; j=j+1
mov     dword ptr [esp+4], offset a0x02x ; "0x%02X "
mov     dword ptr [esp], 1
mov     [esp+8], eax ; передать загруженный байт в printf()
call    ___printf_chk
cmp     ebx, 4
jnz     short loc_804840A
; вывести символ перевода каретки (CR)
mov     dword ptr [esp], 0Ah ; c
add     esi, 4
call    _putchar
cmp     esi, edi ; достигли конца структуры?
jnz     short loc_8048408 ; j=0
lea     esp, [ebp-0Ch]
pop     ebx
pop     esi
pop     edi
pop     ebp
retn
main    endp
```

1.24.4. Упаковка полей в структуре

Достаточно немаловажный момент, это упаковка полей в структурах¹⁶⁷.

Возьмем простой пример:

```
#include <stdio.h>

struct s
{
    char a;
    int b;
    char c;
    int d;
};

void f(struct s s)
{
    printf ("a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n", s.a, s.b, s.c, s.d);
};

int main()
{
    struct s tmp;
    tmp.a=1;
    tmp.b=2;
    tmp.c=3;
```

¹⁶⁷См. также: [Wikipedia: Выравнивание данных](#)

1.24. СТРУКТУРЫ

```
    tmp.d=4;
    f(tmp);
};
```

Как видно, мы имеем два поля *char* (занимающий один байт) и еще два — *int* (по 4 байта).

x86

Компилируется это все в:

Листинг 1.337: MSVC 2012 /GS- /Ob0

```
1  _tmp$ = -16
2  _main PROC
3      push    ebp
4      mov     ebp, esp
5      sub     esp, 16
6      mov     BYTE PTR _tmp$[ebp], 1      ; установить поле a
7      mov     DWORD PTR _tmp$[ebp+4], 2   ; установить поле b
8      mov     BYTE PTR _tmp$[ebp+8], 3    ; установить поле c
9      mov     DWORD PTR _tmp$[ebp+12], 4   ; установить поле d
10     sub     esp, 16                      ; выделить место для временной структуры
11     mov     eax, esp
12     mov     ecx, DWORD PTR _tmp$[ebp]    ; скопировать нашу структуру во временную
13     mov     DWORD PTR [eax], ecx
14     mov     edx, DWORD PTR _tmp$[ebp+4]
15     mov     DWORD PTR [eax+4], edx
16     mov     ecx, DWORD PTR _tmp$[ebp+8]
17     mov     DWORD PTR [eax+8], ecx
18     mov     edx, DWORD PTR _tmp$[ebp+12]
19     mov     DWORD PTR [eax+12], edx
20     call    _f
21     add     esp, 16
22     xor     eax, eax
23     mov     esp, ebp
24     pop     ebp
25     ret     0
26 _main ENDP
27
28 _s$ = 8 ; size = 16
29 ?f@@YAXUs@@@Z PROC ; f
30     push    ebp
31     mov     ebp, esp
32     mov     eax, DWORD PTR _s$[ebp+12]
33     push    eax
34     movsx   ecx, BYTE PTR _s$[ebp+8]
35     push    ecx
36     mov     edx, DWORD PTR _s$[ebp+4]
37     push    edx
38     movsx   eax, BYTE PTR _s$[ebp]
39     push    eax
40     push    OFFSET $SG3842
41     call    _printf
42     add     esp, 20
43     pop     ebp
44     ret     0
45 ?f@@YAXUs@@@Z ENDP ; f
46 _TEXT ENDS
```

Кстати, мы передаем всю структуру, но в реальности, как видно, структура в начале копируется во временную структуру (выделение места под нее в стеке происходит в строке 10, а все 4 поля, по одному, копируются в строках 12 ... 19), затем передается только указатель на нее (или адрес).

Структура копируется, потому что неизвестно, будет ли функция *f()* модифицировать структуру или нет. И если да, то структура внутри *main()* должна остаться той же.

Мы могли бы использовать указатели на Си/Си++, и итоговый код был бы почти такой же, только копирования не было бы.

1.24. СТРУКТУРЫ

Мы видим здесь что адрес каждого поля в структуре выравнивается по 4-байтной границе. Так что каждый *char* здесь занимает те же 4 байта что и *int*. Зачем? Затем что процессору удобнее обращаться по таким адресам и кэшировать данные из памяти.

Но это не экономично по размеру данных.

Попробуем скомпилировать тот же исходник с опцией (/Zp1) (/Zp[n] pack structures on n-byte boundary).

Листинг 1.338: MSVC 2012 /GS- /Zp1

```
1  _main      PROC
2      push   ebp
3      mov    ebp, esp
4      sub    esp, 12
5      mov    BYTE PTR _tmp$[ebp], 1      ; установить поле a
6      mov    DWORD PTR _tmp$[ebp+1], 2   ; установить поле b
7      mov    BYTE PTR _tmp$[ebp+5], 3    ; установить поле c
8      mov    DWORD PTR _tmp$[ebp+6], 4   ; установить поле d
9      sub    esp, 12                     ; выделить место для временной структуры
10     mov    eax, esp
11     mov    ecx, DWORD PTR _tmp$[ebp]    ; скопировать 10 байт
12     mov    DWORD PTR [eax], ecx
13     mov    edx, DWORD PTR _tmp$[ebp+4]
14     mov    DWORD PTR [eax+4], edx
15     mov    cx, WORD PTR _tmp$[ebp+8]
16     mov    WORD PTR [eax+8], cx
17     call   _f
18     add    esp, 12
19     xor    eax, eax
20     mov    esp, ebp
21     pop    ebp
22     ret    0
23 _main      ENDP
24
25 _TEXT      SEGMENT
26 _s$ = 8 ; size = 10
27 ?f@@YAXUs@@@Z PROC      ; f
28     push   ebp
29     mov    ebp, esp
30     mov    eax, DWORD PTR _s$[ebp+6]
31     push   eax
32     movsx  ecx, BYTE PTR _s$[ebp+5]
33     push   ecx
34     mov    edx, DWORD PTR _s$[ebp+1]
35     push   edx
36     movsx  eax, BYTE PTR _s$[ebp]
37     push   eax
38     push   OFFSET $SG3842
39     call   _printf
40     add    esp, 20
41     pop    ebp
42     ret    0
43 ?f@@YAXUs@@@Z ENDP      ; f
```

Теперь структура занимает 10 байт и все *char* занимают по байту. Что это дает? Экономии места. Недостаток — процессор будет обращаться к этим полям не так эффективно по скорости, как мог бы.

Структура так же копируется в `main()`. Но не по одному полю, а 10 байт, при помощи трех пар `MOV`. Почему не 4? Компилятор рассудил, что будет лучше скопировать 10 байт при помощи 3 пар `MOV`, чем копировать два 32-битных слова и два байта при помощи 4 пар `MOV`.

Кстати, подобная реализация копирования при помощи `MOV` взамен вызова функции `memcpy()`, например, это очень распространенная практика, потому что это в любом случае работает быстрее чем вызов `memcpy()` — если речь идет о коротких блоках, конечно: [3.11.1](#) (стр. [502](#)).

Как нетрудно догадаться, если структура используется много в каких исходниках и объектных файлах, все они должны быть откомпилированы с одним и тем же соглашением об упаковке структур.

1.24. СТРУКТУРЫ

Помимо ключа MSVC /Zp, указывающего, по какой границе упаковывать поля структур, есть также опция компилятора #pragma pack, её можно указывать прямо в исходнике. Это справедливо и для MSVC¹⁶⁸ и GCC¹⁶⁹.

Давайте теперь вернемся к SYSTEMTIME, которая состоит из 16-битных полей. Откуда наш компилятор знает что их надо паковать по однобайтной границе?

В файле WinNT.h попадаете такое:

Листинг 1.339: WinNT.h

```
#include "pshpack1.h"
```

И такое:

Листинг 1.340: WinNT.h

```
#include "pshpack4.h"           // 4 byte packing is the default
```

Сам файл PshPack1.h выглядит так:

Листинг 1.341: PshPack1.h

```
#if ! (defined(lint) || defined(RC_INVOKED))
#if ( _MSC_VER >= 800 && !defined(_M_I86)) || defined(_PUSHPOP_SUPPORTED)
#pragma warning(disable:4103)
#if !(defined( MIDL_PASS )) || defined( __midl )
#pragma pack(push,1)
#else
#pragma pack(1)
#endif
#else
#pragma pack(1)
#endif
#endif
#endif /* ! (defined(lint) || defined(RC_INVOKED)) */
```

Собственно, так и задается компилятору, как паковать объявленные после #pragma pack структуры.

¹⁶⁸MSDN: Working with Packing Structures

¹⁶⁹Structure-Packing Pragma

Попробуем в OllyDbg наш пример, где поля выровнены по умолчанию (4 байта):

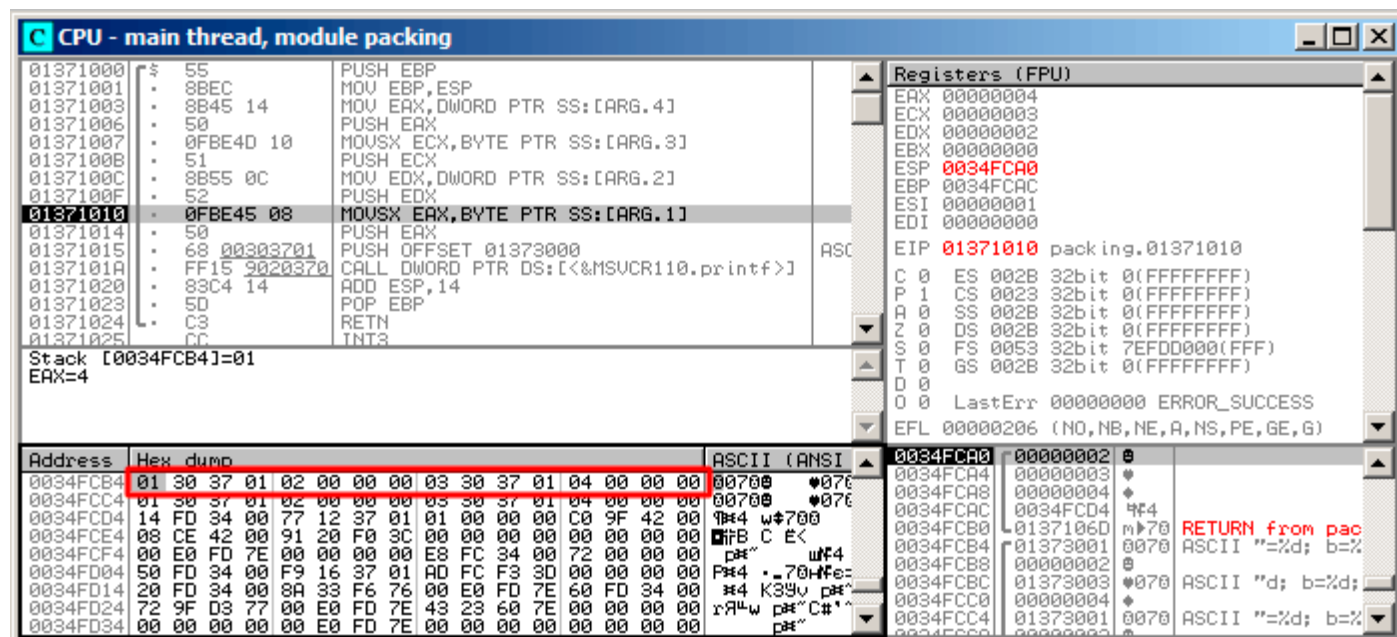


Рис. 1.97: OllyDbg: Перед исполнением printf()

В окне данных видим наши четыре поля. Вот только, откуда взялись случайные байты (0x30, 0x37, 0x01) рядом с первым (а) и третьим (с) полем?

Если вернетесь к листингу 1.337 (стр. 351), то увидите, что первое и третье поле имеет тип *char*, а следовательно, туда записывается только один байт, 1 и 3 соответственно (строки 6 и 8).

Остальные три байта 32-битного слова не будут модифицироваться в памяти!

А, следовательно, там остается случайный мусор. Этот мусор никак не будет влиять на работу `printf()`, потому что значения для нее готовятся при помощи инструкции `MOVSB`, которая загружает из памяти байты а не слова: листинг.1.337 (строки 34 и 38).

Кстати, здесь используется именно `MOVSB` (расширяющая знак), потому что тип *char* — знаковый по умолчанию в MSVC и GCC.

Если бы здесь был тип `unsigned char` или `uint8_t`, то здесь была бы инструкция `MOVZB`.

OllyDbg + упаковка полей по границе в 1 байт

Здесь всё куда понятнее: 4 поля занимают 10 байт и значения сложены в памяти друг к другу

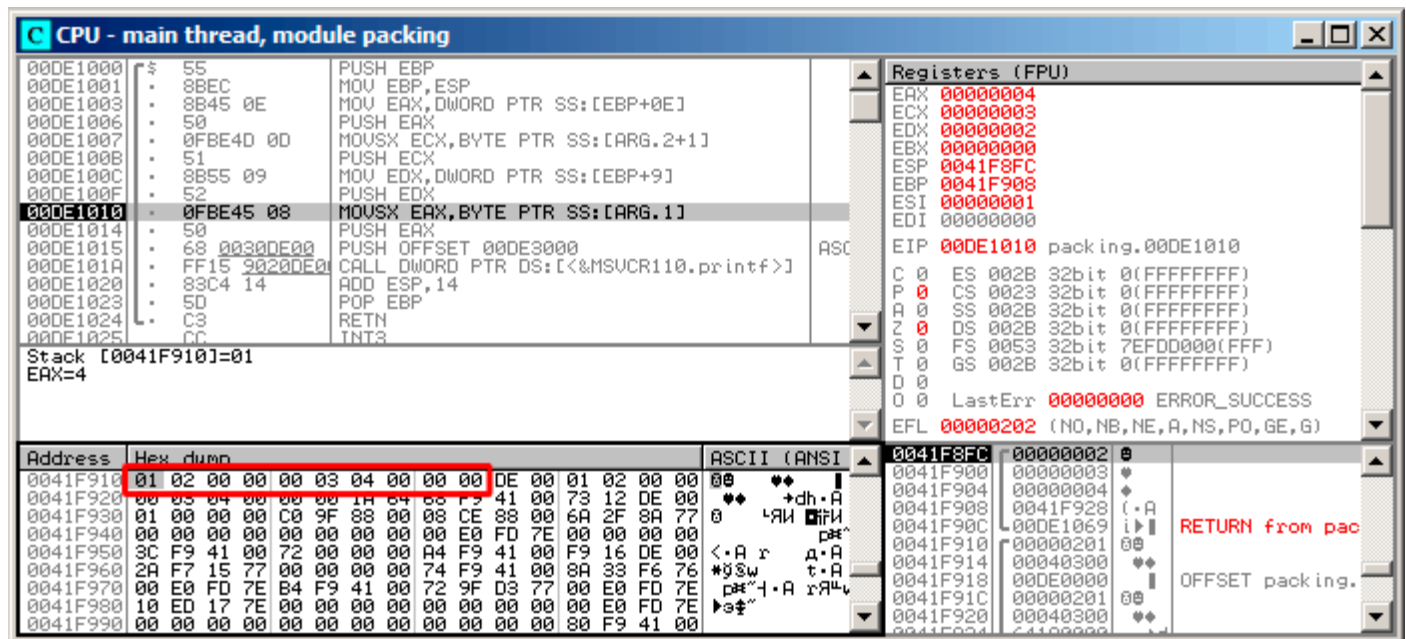


Рис. 1.98: OllyDbg: Перед исполнением printf()

ARM**Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)**

Листинг 1.342: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

.text:0000003E	exit ; CODE XREF: f+16
.text:0000003E 05 B0	ADD SP, SP, #0x14
.text:00000040 00 BD	POP {PC}
.text:00000280	f
.text:00000280	
.text:00000280	var_18 = -0x18
.text:00000280	a = -0x14
.text:00000280	b = -0x10
.text:00000280	c = -0xC
.text:00000280	d = -8
.text:00000280 0F B5	PUSH {R0-R3,LR}
.text:00000282 81 B0	SUB SP, SP, #4
.text:00000284 04 98	LDR R0, [SP,#16] ; d
.text:00000286 02 9A	LDR R2, [SP,#8] ; b
.text:00000288 00 90	STR R0, [SP]
.text:0000028A 68 46	MOV R0, SP
.text:0000028C 03 7B	LDRB R3, [R0,#12] ; c
.text:0000028E 01 79	LDRB R1, [R0,#4] ; a
.text:00000290 59 A0	ADR R0, aADBDCDDD ; "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n"
.text:00000292 05 F0 AD FF	BL __2printf
.text:00000296 D2 E6	B exit

Как мы помним, здесь передается не указатель на структуру, а сама структура, а так как в ARM первые 4 аргумента функции передаются через регистры, то поля структуры передаются через R0-R3.

Инструкция LDRB загружает один байт из памяти и расширяет до 32-бит учитывая знак.

1.24. СТРУКТУРЫ

Это то же что и инструкция MOVSH в x86. Она здесь применяется для загрузки полей *a* и *c* из структуры.

Еще что бросается в глаза, так это то что вместо эпилога функции, переход на эпилог другой функции!

Действительно, то была совсем другая, не относящаяся к этой, функция, однако, она имела точно такой же эпилог (видимо, тоже хранила в стеке 5 локальных переменных ($5 * 4 = 0x14$)). К тому же, она находится рядом (обратите внимание на адреса).

Действительно, нет никакой разницы, какой эпилог исполнять, если он работает так же, как нам нужно.

Keil решил использовать часть другой функции, вероятно, из-за экономии.

Эпилог занимает 4 байта, а переход — только 2.

ARM + Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

Листинг 1.343: Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```
var_C = -0xC

    PUSH    {R7,LR}
    MOV     R7, SP
    SUB     SP, SP, #4
    MOV     R9, R1 ; b
    MOV     R1, R0 ; a
    MOVW    R0, #0xF10 ; "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n"
    SXTB    R1, R1 ; prepare a
    MOVT.W  R0, #0
    STR     R3, [SP,#0xC+var_C] ; place d to stack for printf()
    ADD     R0, PC ; format-string
    SXTB    R3, R2 ; prepare c
    MOV     R2, R9 ; b
    BLX     _printf
    ADD     SP, SP, #4
    POP     {R7,PC}
```

SXTB (*Signed Extend Byte*) это также аналог MOVSH в x86. Всё остальное — так же.

MIPS

Листинг 1.344: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
1 f:
2
3 var_18      = -0x18
4 var_10      = -0x10
5 var_4       = -4
6 arg_0       = 0
7 arg_4       = 4
8 arg_8       = 8
9 arg_C       = 0xC
10
11 ; $a0=s.a
12 ; $a1=s.b
13 ; $a2=s.c
14 ; $a3=s.d
15         lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
16         addiu   $sp, -0x28
17         la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
18         sw      $ra, 0x28+var_4($sp)
19         sw      $gp, 0x28+var_10($sp)
20 ; подготовить байт из 32-битного big-endian значения:
21         sra     $t0, $a0, 24
22         move    $v1, $a1
23 ; подготовить байт из 32-битного big-endian значения:
```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
24      sra      $v0, $a2, 24
25      lw       $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
26      sw       $a0, 0x28+arg_0($sp)
27      lui      $a0, ($LC0 >> 16) # "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n"
28      sw       $a3, 0x28+var_18($sp)
29      sw       $a1, 0x28+arg_4($sp)
30      sw       $a2, 0x28+arg_8($sp)
31      sw       $a3, 0x28+arg_C($sp)
32      la       $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n"
33      move     $a1, $t0
34      move     $a2, $v1
35      jalr     $t9
36      move     $a3, $v0 ; branch delay slot
37      lw       $ra, 0x28+var_4($sp)
38      or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
39      jr       $ra
40      addiu    $sp, 0x28 ; branch delay slot
41
42 $LC0:      .ascii "a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n"<0>
```

Поля структуры приходят в регистрах \$A0..\$A3 и затем перетасовываются в регистры \$A1..\$A3 для printf(), в то время как 4-е поле (из \$A3) передается через локальный стек используя SW.

Но здесь есть две инструкции SRA («Shift Word Right Arithmetic»), которые готовят поля типа *char*.

Почему? По умолчанию, MIPS это big-endian архитектура [2.8](#) (стр. [455](#)), и Debian Linux в котором мы работаем, также big-endian.

Так что когда один байт расположен в 32-битном элементе структуры, он занимает биты 31..24.

И когда переменную типа *char* нужно расширить до 32-битного значения, она должна быть сдвинута вправо на 24 бита.

char это знаковый тип, так что здесь нужно использовать арифметический сдвиг вместо логического.

Еще кое-что

Передача структуры как аргумент функции (вместо передачи указателя на структуру) это то же что и передача всех полей структуры по одному.

Если поля в структуре пакуются по умолчанию, то функцию f() можно переписать так:

```
void f(char a, int b, char c, int d)
{
    printf ("a=%d; b=%d; c=%d; d=%d\n", a, b, c, d);
};
```

И в итоге будет такой же код.

1.24.5. Вложенные структуры

Теперь, как насчет ситуаций, когда одна структура определена внутри другой структуры?

```
#include <stdio.h>

struct inner_struct
{
    int a;
    int b;
};

struct outer_struct
{
    char a;
    int b;
    struct inner_struct c;
    char d;
```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
int e;
};

void f(struct outer_struct s)
{
    printf ("a=%d; b=%d; c.a=%d; c.b=%d; d=%d; e=%d\n",
           s.a, s.b, s.c.a, s.c.b, s.d, s.e);
};

int main()
{
    struct outer_struct s;
    s.a=1;
    s.b=2;
    s.c.a=100;
    s.c.b=101;
    s.d=3;
    s.e=4;
    f(s);
};
```

...в этом случае, оба поля `inner_struct` просто будут располагаться между полями `a,b` и `d,e` в `outer_struct`.

Компилируем (MSVC 2010):

Листинг 1.345: Оптимизирующий MSVC 2010 /Ob0

```
$SG2802 DB      'a=%d; b=%d; c.a=%d; c.b=%d; d=%d; e=%d', 0aH, 00H

_TEXT      SEGMENT
_s$ = 8
_f        PROC
    mov     eax, DWORD PTR _s$[esp+16]
    movsx   ecx, BYTE PTR _s$[esp+12]
    mov     edx, DWORD PTR _s$[esp+8]
    push    eax
    mov     eax, DWORD PTR _s$[esp+8]
    push    ecx
    mov     ecx, DWORD PTR _s$[esp+8]
    push    edx
    movsx   edx, BYTE PTR _s$[esp+8]
    push    eax
    push    ecx
    push    edx
    push    OFFSET $SG2802 ; 'a=%d; b=%d; c.a=%d; c.b=%d; d=%d; e=%d'
    call    _printf
    add     esp, 28
    ret     0
_f        ENDP

_s$ = -24
_main     PROC
    sub     esp, 24
    push    ebx
    push    esi
    push    edi
    mov     ecx, 2
    sub     esp, 24
    mov     eax, esp
; С этого момента, EAX это синоним ESP:
    mov     BYTE PTR _s$[esp+60], 1
    mov     ebx, DWORD PTR _s$[esp+60]
    mov     DWORD PTR [eax], ebx
    mov     DWORD PTR [eax+4], ecx
    lea     edx, DWORD PTR [ecx+98]
    lea     esi, DWORD PTR [ecx+99]
    lea     edi, DWORD PTR [ecx+2]
    mov     DWORD PTR [eax+8], edx
    mov     BYTE PTR _s$[esp+76], 3
    mov     ecx, DWORD PTR _s$[esp+76]
```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
mov     DWORD PTR [eax+12], esi
mov     DWORD PTR [eax+16], ecx
mov     DWORD PTR [eax+20], edi
call    _f
add     esp, 24
pop     edi
pop     esi
xor     eax, eax
pop     ebx
add     esp, 24
ret     0
_main   ENDP
```

Очень любопытный момент в том, что глядя на этот код на ассемблере, мы даже не видим, что была использована какая-то еще другая структура внутри этой! Так что, пожалуй, можно сказать, что все вложенные структуры в итоге разворачиваются в одну, *линейную* или *одномерную* структуру.

Конечно, если заменить объявление `struct inner_struct c;` на `struct inner_struct *c;` (объявляя таким образом указатель), ситуация будет совсем иная.

Загружаем пример в OllyDbg и смотрим на `outer_struct` в памяти:

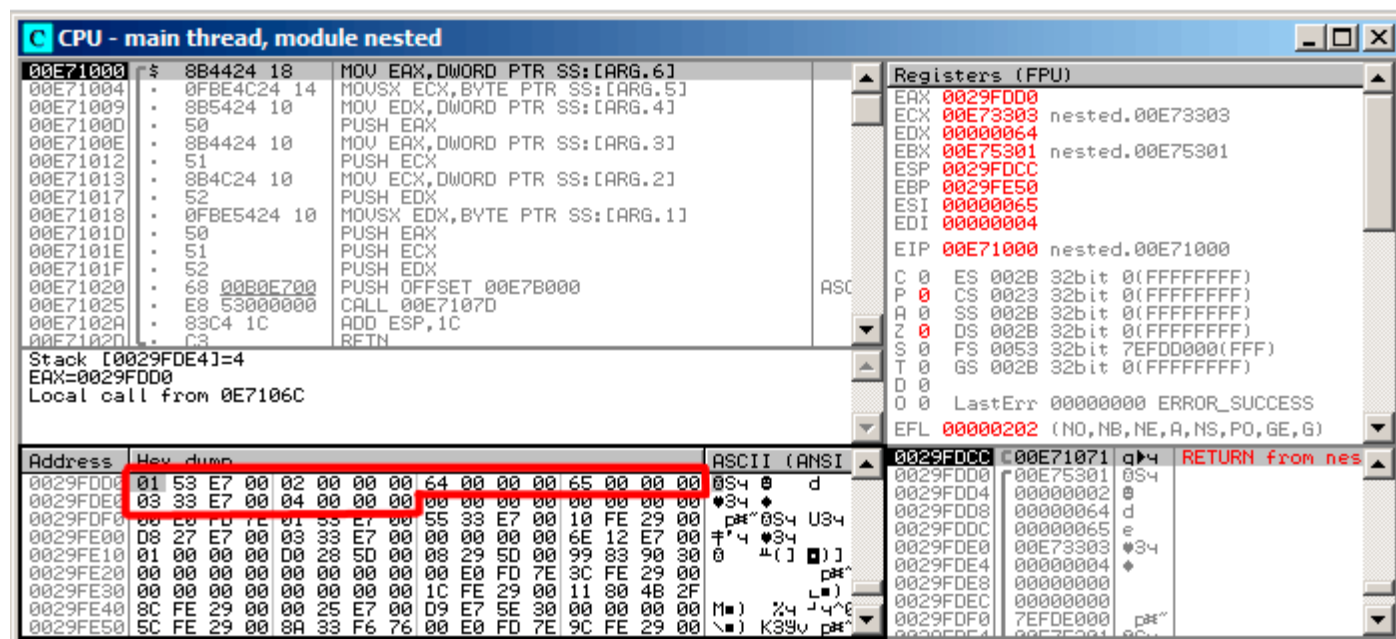


Рис. 1.99: OllyDbg: Перед исполнением `printf()`

Вот как расположены значения в памяти:

- `(outer_struct.a)` (байт) 1 + 3 байта случайного мусора;
- `(outer_struct.b)` (32-битное слово) 2;
- `(inner_struct.a)` (32-битное слово) 0x64 (100);
- `(inner_struct.b)` (32-битное слово) 0x65 (101);
- `(outer_struct.d)` (байт) 3 + 3 байта случайного мусора;
- `(outer_struct.e)` (32-битное слово) 4.

1.24.6. Работа с битовыми полями в структуре

Пример CPUID

Язык Си/Си++ позволяет указывать, сколько именно бит отвести для каждого поля структуры. Это удобно если нужно экономить место в памяти. К примеру, для переменной типа `bool` достаточно одного бита. Но, это не очень удобно, если нужна скорость.

Рассмотрим пример с инструкцией `CPUID`¹⁷⁰. Эта инструкция возвращает информацию о том, какой процессор имеется в наличии и какие возможности он имеет.

Если перед исполнением инструкции в `EAX` будет 1, то `CPUID` вернет упакованную в `EAX` такую информацию о процессоре:

3:0 (4 бита)	Stepping
7:4 (4 бита)	Model
11:8 (4 бита)	Family
13:12 (2 бита)	Processor Type
19:16 (4 бита)	Extended Model
27:20 (8 бит)	Extended Family

MSVC 2010 имеет макрос для `CPUID`, а GCC 4.4.1 — нет. Поэтому для GCC сделаем эту функцию сами, используя его встроенный ассемблер¹⁷¹.

¹⁷⁰ [wikipedia](#)

¹⁷¹ [Подробнее о встроенном ассемблере GCC](#)

```

#include <stdio.h>

#ifdef __GNUC__
static inline void cpuid(int code, int *a, int *b, int *c, int *d) {
    asm volatile("cpuid":"=a"(*a), "=b"(*b), "=c"(*c), "=d"(*d):"a"(code));
}
#endif

#ifdef _MSC_VER
#include <intrin.h>
#endif

struct CPUID_1_EAX
{
    unsigned int stepping:4;
    unsigned int model:4;
    unsigned int family_id:4;
    unsigned int processor_type:2;
    unsigned int reserved1:2;
    unsigned int extended_model_id:4;
    unsigned int extended_family_id:8;
    unsigned int reserved2:4;
};

int main()
{
    struct CPUID_1_EAX *tmp;
    int b[4];

#ifdef _MSC_VER
    __cpuid(b,1);
#endif

#ifdef __GNUC__
    cpuid (1, &b[0], &b[1], &b[2], &b[3]);
#endif

    tmp=(struct CPUID_1_EAX *)&b[0];

    printf ("stepping=%d\n", tmp->stepping);
    printf ("model=%d\n", tmp->model);
    printf ("family_id=%d\n", tmp->family_id);
    printf ("processor_type=%d\n", tmp->processor_type);
    printf ("extended_model_id=%d\n", tmp->extended_model_id);
    printf ("extended_family_id=%d\n", tmp->extended_family_id);

    return 0;
};

```

После того как CPUID заполнит EAX/EBX/ECX/EDX, у нас они отразятся в массиве `b[]`. Затем, мы имеем указатель на структуру `CPUID_1_EAX`, и мы указываем его на значение EAX из массива `b[]`.

Иными словами, мы трактуем 32-битный `int` как структуру.

Затем мы читаем отдельные биты из структуры.

MSVC

Компилируем в MSVC 2008 с опцией `/Ox`:

Листинг 1.346: Оптимизирующий MSVC 2008

```

_b$ = -16 ; size = 16
_main PROC
    sub     esp, 16
    push    ebx

    xor     ecx, ecx

```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
mov     eax, 1
cpuid
push    esi
lea     esi, DWORD PTR _b$[esp+24]
mov     DWORD PTR [esi], eax
mov     DWORD PTR [esi+4], ebx
mov     DWORD PTR [esi+8], ecx
mov     DWORD PTR [esi+12], edx

mov     esi, DWORD PTR _b$[esp+24]
mov     eax, esi
and     eax, 15
push    eax
push    OFFSET $SG15435 ; 'stepping=%d', 0aH, 00H
call    _printf

mov     ecx, esi
shr     ecx, 4
and     ecx, 15
push    ecx
push    OFFSET $SG15436 ; 'model=%d', 0aH, 00H
call    _printf

mov     edx, esi
shr     edx, 8
and     edx, 15
push    edx
push    OFFSET $SG15437 ; 'family_id=%d', 0aH, 00H
call    _printf

mov     eax, esi
shr     eax, 12
and     eax, 3
push    eax
push    OFFSET $SG15438 ; 'processor_type=%d', 0aH, 00H
call    _printf

mov     ecx, esi
shr     ecx, 16
and     ecx, 15
push    ecx
push    OFFSET $SG15439 ; 'extended_model_id=%d', 0aH, 00H
call    _printf

shr     esi, 20
and     esi, 255
push    esi
push    OFFSET $SG15440 ; 'extended_family_id=%d', 0aH, 00H
call    _printf
add     esp, 48
pop     esi

xor     eax, eax
pop     ebx

add     esp, 16
ret     0
_main   ENDP
```

Инструкция SHR сдвигает значение из EAX на то количество бит, которое нужно *пропустить*, то есть, мы игнорируем некоторые биты *справа*.

А инструкция AND очищает биты *слева* которые нам не нужны, или же, говоря иначе, она оставляет по маске только те биты в EAX, которые нам сейчас нужны.

Загрузим пример в OllyDbg и увидим, какие значения были установлены в EAX/EBX/ECX/EDX после исполнения CPUID:

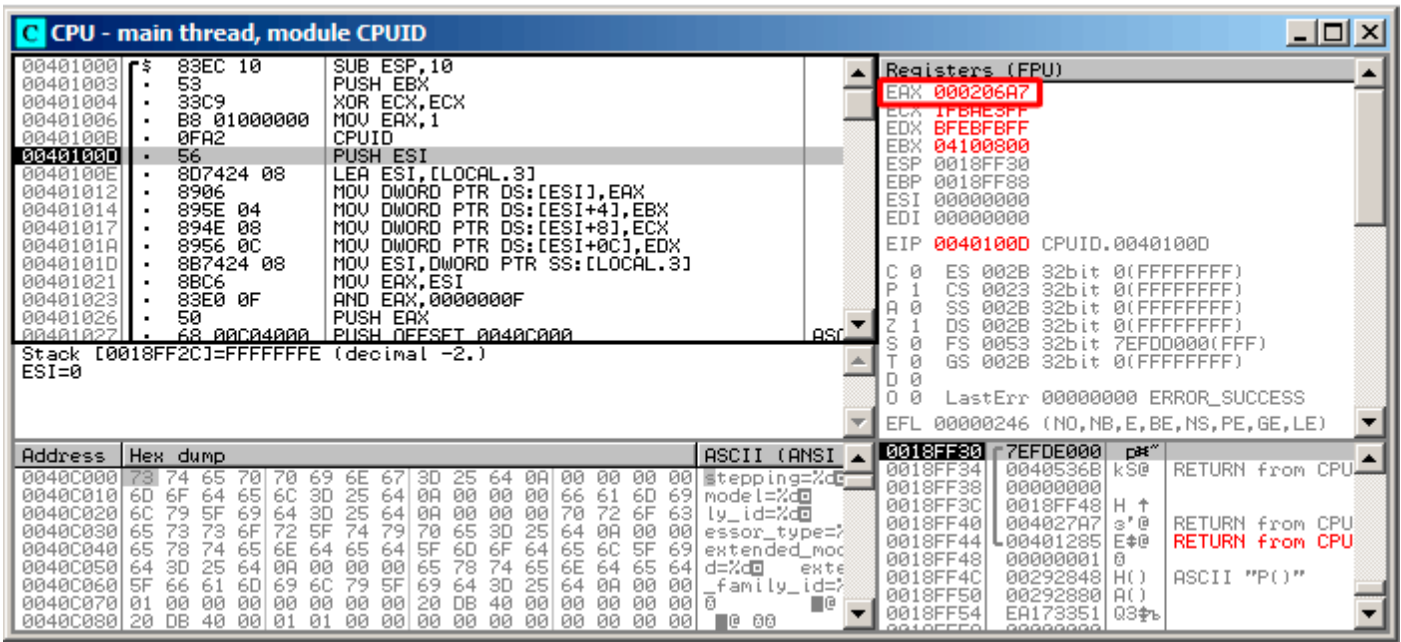


Рис. 1.100: OllyDbg: После исполнения CPUID

В EAX установлено 0x000206A7 (мой CPU — Intel Xeon E3-1220).
В двоичном виде это 0b00000000000000010000001101010011.

Вот как распределяются биты по полям в моем случае:

поле	в двоичном виде	в десятичном виде
reserved2	0000	0
extended_family_id	00000000	0
extended_model_id	0010	2
reserved1	00	0
processor_id	00	0
family_id	0110	6
model	1010	10
stepping	0111	7

Листинг 1.347: Вывод в консоль

```
stepping=7
model=10
family_id=6
processor_type=0
extended_model_id=2
extended_family_id=0
```

GCC

Попробуем GCC 4.4.1 с опцией -O3.

Листинг 1.348: Оптимизирующий GCC 4.4.1

```
main      proc near ; DATA XREF: _start+17
    push   ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, 0FFFFFF0h
    push    esi
```

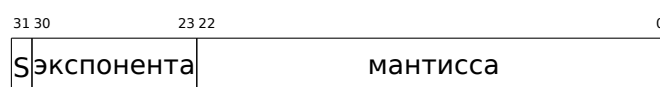
1.24. СТРУКТУРЫ

```
mov     esi, 1
push    ebx
mov     eax, esi
sub     esp, 18h
cpuid
mov     esi, eax
and     eax, 0Fh
mov     [esp+8], eax
mov     dword ptr [esp+4], offset aSteppingD ; "stepping=%d\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
mov     eax, esi
shr     eax, 4
and     eax, 0Fh
mov     [esp+8], eax
mov     dword ptr [esp+4], offset aModelD ; "model=%d\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
mov     eax, esi
shr     eax, 8
and     eax, 0Fh
mov     [esp+8], eax
mov     dword ptr [esp+4], offset aFamily_idD ; "family_id=%d\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
mov     eax, esi
shr     eax, 0Ch
and     eax, 3
mov     [esp+8], eax
mov     dword ptr [esp+4], offset aProcessor_type ; "processor_type=%d\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
mov     eax, esi
shr     eax, 10h
shr     esi, 14h
and     eax, 0Fh
and     esi, 0FFh
mov     [esp+8], eax
mov     dword ptr [esp+4], offset aExtended_model ; "extended_model_id=%d\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
mov     [esp+8], esi
mov     dword ptr [esp+4], offset unk_80486D0
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
add     esp, 18h
xor     eax, eax
pop     ebx
pop     esi
mov     esp, ebp
pop     ebp
retn
main      endp
```

Практически, то же самое. Единственное что стоит отметить это то, что GCC решил зачем-то объединить вычисление `extended_model_id` и `extended_family_id` в один блок, вместо того чтобы вычислять их перед соответствующим вызовом `printf()`.

Работа с типом `float` как со структурой

Как уже ранее указывалось в секции о FPU (1.19 (стр. 208)), и `float` и `double` содержат в себе *знак*, *мантиссу* и *экспоненту*. Однако, можем ли мы работать с этими полями напрямую? Попробуем с `float`.



```

#include <stdio.h>
#include <assert.h>
#include <stdlib.h>
#include <memory.h>

struct float_as_struct
{
    unsigned int fraction : 23; // мантисса
    unsigned int exponent : 8;  // экспонента + 0x3FF
    unsigned int sign : 1;      // бит знака
};

float f(float _in)
{
    float f=_in;
    struct float_as_struct t;

    assert (sizeof (struct float_as_struct) == sizeof (float));

    memcpy (&t, &f, sizeof (float));

    t.sign=1; // установить отрицательный знак
    t.exponent=t.exponent+2; // умножить d на 2n (n здесь 2)

    memcpy (&f, &t, sizeof (float));

    return f;
};

int main()
{
    printf ("%f\n", f(1.234));
};

```

Структура `float_as_struct` занимает в памяти столько же места сколько и `float`, то есть 4 байта или 32 бита.

Далее мы выставляем во входящем значении отрицательный знак, а также прибавляя двойку к экспоненте, мы тем самым умножаем всё значение на 2^2 , то есть на 4.

Компилируем в MSVC 2008 без включенной оптимизации:

Листинг 1.349: Неоптимизирующий MSVC 2008

```

_t$ = -8    ; size = 4
_f$ = -4    ; size = 4
__in$ = 8   ; size = 4
?f@@YAMM@Z PROC ; f
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 8

    fld     DWORD PTR __in$[ebp]
    fstp    DWORD PTR _f$[ebp]

    push    4
    lea     eax, DWORD PTR _f$[ebp]
    push    eax
    lea     ecx, DWORD PTR _t$[ebp]
    push    ecx
    call    _memcpy
    add     esp, 12

    mov     edx, DWORD PTR _t$[ebp]
    or      edx, -2147483648 ; 80000000H - выставляем знак минус
    mov     DWORD PTR _t$[ebp], edx

    mov     eax, DWORD PTR _t$[ebp]
    shr     eax, 23          ; 00000017H - выкидываем мантиссу

```

1.24. СТРУКТУРЫ

```
and     eax, 255          ; 000000ffH – оставляем здесь только экспоненту
add     eax, 2            ; прибавляем к ней 2
and     eax, 255          ; 000000ffH
shl     eax, 23           ; 00000017H – поддвигаем результат на место бит 30:23
mov     ecx, DWORD PTR _t$[ebp]
and     ecx, -2139095041 ; 807ffffffH – выкидываем экспоненту

; складываем оригинальное значение без экспоненты с новой только что вычисленной экспонентой:
or      ecx, eax
mov     DWORD PTR _t$[ebp], ecx

push    4
lea     edx, DWORD PTR _t$[ebp]
push    edx
lea     eax, DWORD PTR _f$[ebp]
push    eax
call    _memcpy
add     esp, 12

fld     DWORD PTR _f$[ebp]

mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
?f@@YAMM@Z ENDP      ; f
```

Слегка избыточно. В версии скомпилированной с флагом /Ox нет вызовов memcpy(), там работа происходит сразу с переменной f. Но по неоптимизированной версии будет проще понять.

А что сделает GCC 4.4.1 с опцией -O3?

Листинг 1.350: Оптимизирующий GCC 4.4.1

```
; f(float)
public _Zlff
_Zlff proc near

var_4 = dword ptr -4
arg_0 = dword ptr 8

push    ebp
mov     ebp, esp
sub     esp, 4
mov     eax, [ebp+arg_0]
or      eax, 80000000h ; выставить знак минуса
mov     edx, eax
and     eax, 807FFFFFFh ; оставить в EAX только знак и мантиссу
shr     edx, 23         ; подготовить экспоненту
add     edx, 2          ; прибавить 2
movzx   edx, dl         ; сбросить все биты кроме 7:0 в EAX в 0
shl     edx, 23         ; подвинуть новую только что вычисленную экспоненту на свое место
or      eax, edx        ; соединить новую экспоненту и оригинальное значение без
; экспоненты
mov     [ebp+var_4], eax
fld     [ebp+var_4]
leave
retn
_Zlff endp

main public main
proc near
push    ebp
mov     ebp, esp
and     esp, 0FFFFFF0h
sub     esp, 10h
fld     ds:dword_8048614 ; -4.936
fstp    qword ptr [esp+8]
mov     dword ptr [esp+4], offset asc_8048610 ; "%f\n"
mov     dword ptr [esp], 1
call    __printf_chk
xor     eax, eax
```

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
leave
retn
main endp
```

Да, функция `f()` в целом понятна. Однако, что интересно, еще при компиляции, невзирая на мешанину с полями структуры, GCC умудрился вычислить результат функции `f(1.234)` еще во время компиляции и сразу подставить его в аргумент для `printf()`!

1.24.7. Упражнения

- <http://challenges.re/71>
- <http://challenges.re/72>

1.25. Объединения (union)

union в Си/Си++ используется в основном для интерпретации переменной (или блока памяти) одного типа как переменной другого типа.

1.25.1. Пример генератора случайных чисел

Если нам нужны случайные значения с плавающей запятой в интервале от 0 до 1, самое простое это взять ГПСЧ вроде Mersenne twister. Он выдает случайные беззнаковые 32-битные числа (иными словами, он выдает 32 случайных бита). Затем мы можем преобразовать это число в *float* и затем разделить на

`RAND_MAX` (`0xFFFFFFFF` в данном случае) — полученное число будет в интервале от 0 до 1.

Но как известно, операция деления — это медленная операция. Да и вообще хочется избежать лишних операций с FPU. Сможем ли мы избежать деления?

Вспомним состав числа с плавающей запятой: это бит знака, биты мантиссы и биты экспоненты. Для получения случайного числа, нам нужно просто заполнить случайными битами все биты мантиссы!

Экспонента не может быть нулевой (иначе число с плавающей точкой будет денормализованным), так что в эти биты мы запишем `0b01111111` — это будет означать что экспонента равна единице. Далее заполняем мантиссу случайными битами, знак оставляем в виде 0 (что значит наше число положительное), и вуаля. Генерируемые числа будут в интервале от 1 до 2, так что нам еще нужно будет отнять единицу.

В моем примере¹⁷² применяется очень простой линейный конгруэнтный генератор случайных чисел, выдающий 32-битные числа. Генератор инициализируется текущим временем в стиле UNIX.

Далее, тип *float* представляется в виде *union* — это конструкция Си/Си++ позволяющая интерпретировать часть памяти по-разному. В нашем случае, мы можем создать переменную типа *union* и затем обращаться к ней как к *float* или как к *uint32_t*. Можно сказать, что это хак, причем грязный.

Код целочисленного ГПСЧ точно такой же, как мы уже рассматривали ранее: 1.23 (стр. 329). Так что и в скомпилированном виде этот код будет опущен.

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <time.h>

// определения, данные и ф-ции для целочисленного PRNG

// константы из книги Numerical Recipes
const uint32_t RNG_a=1664525;
const uint32_t RNG_c=1013904223;
uint32_t RNG_state; // глобальная переменная

void my_srand(uint32_t i)
{
```

¹⁷²идея взята здесь: <http://go.yurichev.com/17308>

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
    RNG_state=i;
};

uint32_t my_rand()
{
    RNG_state=RNG_state*RNG_a+RNG_c;
    return RNG_state;
};

// определения и ф-ции FPU PRNG:

union uint32_t_float
{
    uint32_t i;
    float f;
};

float float_rand()
{
    union uint32_t_float tmp;
    tmp.i=my_rand() & 0x007fffff | 0x3f800000;
    return tmp.f-1;
};

// тест

int main()
{
    my_srand(time(NULL)); // инициализация PRNG

    for (int i=0; i<100; i++)
        printf ("%f\n", float_rand());

    return 0;
};
```

x86

Листинг 1.351: Оптимизирующий MSVC 2010

```
$SG4238 DB      '%f', 0aH, 00H

__real@3fff000000000000 DQ 03fff00000000000r    ; 1

tv130 = -4
_tmp$ = -4
?float_rand@@YAMXZ PROC
    push    ecx
    call    ?my_rand@@YAIXZ
; EAX=псевдослучайное значение
    and     eax, 8388607             ; 007ffffFH
    or      eax, 1065353216          ; 3f800000H
; EAX=псевдослучайное значение & 0x007fffff | 0x3f800000
; сохранить его в локальном стеке
    mov     DWORD PTR _tmp$[esp+4], eax
; перезагрузить его как число с плавающей точкой:
    fld     DWORD PTR _tmp$[esp+4]
; вычесть 1.0:
    fsub    QWORD PTR __real@3fff000000000000
; сохранить полученное значение в локальном стеке и перезагрузить его
    fstp    DWORD PTR tv130[esp+4] ; \ эти инструкции избыточны
    fld     DWORD PTR tv130[esp+4] ; /
    pop     ecx
    ret     0
?float_rand@@YAMXZ ENDP

_main PROC
    push    esi
```

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
    xor     eax, eax
    call    _time
    push    eax
    call    ?my_srand@@YAXI@Z
    add     esp, 4
    mov     esi, 100
$LL3@main:
    call    ?float_rand@@YAMXZ
    sub     esp, 8
    fstp    QWORD PTR [esp]
    push    OFFSET $SG4238
    call    _printf
    add     esp, 12
    dec     esi
    jne     SHORT $LL3@main
    xor     eax, eax
    pop     esi
    ret     0
_main     ENDP
```

Имена функций такие странные, потому что этот пример был скомпилирован как Си++, и это манглинг имен в Си++, мы будем рассматривать это позже: [3.18.1](#) (стр. 534).

Если скомпилировать это в MSVC 2012, компилятор будет использовать SIMD-инструкции для FPU, читайте об этом здесь:

[1.30.5](#) (стр. 429).

MIPS

Листинг 1.352: Оптимизирующий GCC 4.4.5

```
float_rand:
var_10      = -0x10
var_4       = -4

    lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
    addiu   $sp, -0x20
    la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
    sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
    sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
; вызвать my_rand():
    jal     my_rand
    or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
; $v0=32-битное псевдослучайное значение
    li      $v1, 0x7FFFFFFF
; $v1=0x7FFFFFFF
    and     $v1, $v0, $v1
; $v1=псевдослучайное значение & 0x7FFFFFFF
    lui     $a0, 0x3F80
; $a0=0x3F800000
    or      $v1, $a0
; $v1=псевдослучайное значение & 0x7FFFFFFF | 0x3F800000
; смысл этой инструкции всё так же трудно понять:
    lui     $v0, ($LC0 >> 16)
; загрузить 1.0 в $f0:
    lwc1    $f0, $LC0
; скопировать значение из $v1 в первый сопроцессор (в регистр $f2)
; это работает как побитовая копия, без всякого конвертирования
    mtc1    $v1, $f2
    lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
; вычесть 1.0. оставить результат в $f0:
    sub.s   $f0, $f2, $f0
    jr      $ra
    addiu   $sp, 0x20 ; branch delay slot

main:
```

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
var_18      = -0x18
var_10      = -0x10
var_C       = -0xC
var_8       = -8
var_4       = -4

        lui      $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
        addiu    $sp, -0x28
        la       $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
        sw       $ra, 0x28+var_4($sp)
        sw       $s2, 0x28+var_8($sp)
        sw       $s1, 0x28+var_C($sp)
        sw       $s0, 0x28+var_10($sp)
        sw       $gp, 0x28+var_18($sp)
        lw       $t9, (time & 0xFFFF)($gp)
        or       $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jalr     $t9
        move     $a0, $zero ; branch delay slot
        lui      $s2, ($LC1 >> 16) # "%f\n"
        move     $a0, $v0
        la       $s2, ($LC1 & 0xFFFF) # "%f\n"
        move     $s0, $zero
        jal      my_srand
        li       $s1, 0x64 # 'd' ; branch delay slot

loc_104:
        jal      float_rand
        addiu    $s0, 1
        lw       $gp, 0x28+var_18($sp)
; сконвертировать полученное из float_rand() значение в тип double (для printf()):
        cvt.d.s  $f2, $f0
        lw       $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
        mfc1     $a3, $f2
        mfc1     $a2, $f3
        jalr     $t9
        move     $a0, $s2
        bne      $s0, $s1, loc_104
        move     $v0, $zero
        lw       $ra, 0x28+var_4($sp)
        lw       $s2, 0x28+var_8($sp)
        lw       $s1, 0x28+var_C($sp)
        lw       $s0, 0x28+var_10($sp)
        jr       $ra
        addiu    $sp, 0x28 ; branch delay slot

$LC1:    .ascii "%f\n"<0>
$LC0:    .float 1.0
```

Здесь снова зачем-то добавлена инструкция LUI, которая ничего не делает. Мы уже рассматривали этот артефакт ранее: [1.19.5](#) (стр. 220).

ARM (Режим ARM)

Листинг 1.353: Оптимизирующий GCC 4.6.3 (IDA)

```
float_rand
        STMFID   SP!, {R3,LR}
        BL      my_rand
; R0=псевдослучайное значение
        FLDS     S0, =1.0
; S0=1.0
        BIC      R3, R0, #0xFF000000
        BIC      R3, R3, #0x800000
        ORR      R3, R3, #0x3F800000
; R3=псевдослучайное значение & 0x007fffff | 0x3f800000
; копировать из R3 в FPU (регистр S15).
; это работает как побитовое копирование, без всякого конвертирования
        FMSR     S15, R3
```

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
; вычесть 1.0 и оставить результат в S0:
        FSUBS    S0, S15, S0
        LDMFD    SP!, {R3,PC}

flt_5C      DCFS 1.0

main
        STMFD    SP!, {R4,LR}
        MOV      R0, #0
        BL       time
        BL       my_srand
        MOV      R4, #0x64 ; 'd'

loc_78
        BL       float_rand
; S0=псевдослучайное значение
        LDR      R0, =aF      ; "%f"
; сконвертировать значение типа float в значение типа double (это нужно для printf()):
        FCVTDS   D7, S0
; побитовое копирование из D7 в пару регистров R2/R3 (для printf()):
        FMRRD    R2, R3, D7
        BL       printf
        SUBS     R4, R4, #1
        BNE      loc_78
        MOV      R0, R4
        LDMFD    SP!, {R4,PC}

aF         DCB "%f",0xA,0
```

Мы также сделаем дамп в objdump и увидим, что FPU-инструкции имеют немного другие имена чем в [IDA](#). Наверное, разработчики IDA и binutils пользовались разной документацией? Должно быть, будет полезно знать оба варианта названий инструкций.

Листинг 1.354: Оптимизирующий GCC 4.6.3 (objdump)

```
00000038 <float_rand>:
38: e92d4008      push    {r3, lr}
3c: ebfffffe      bl      10 <my_rand>
40: ed9f0a05      vldr    s0, [pc, #20] ; 5c <float_rand+0x24>
44: e3c034ff      bic     r3, r0, #-16777216 ; 0xff000000
48: e3c33502      bic     r3, r3, #8388608 ; 0x800000
4c: e38335fe      orr     r3, r3, #1065353216 ; 0x3f800000
50: ee073a90      vmov    s15, r3
54: ee370ac0      vsub.f32 s0, s15, s0
58: e8bd8008      pop     {r3, pc}
5c: 3f800000      svccc   0x00800000

00000000 <main>:
0: e92d4010      push    {r4, lr}
4: e3a00000      mov     r0, #0
8: ebfffffe      bl      0 <time>
c: ebfffffe      bl      0 <main>
10: e3a04064      mov     r4, #100 ; 0x64
14: ebfffffe      bl      38 <main+0x38>
18: e59f0018      ldr     r0, [pc, #24] ; 38 <main+0x38>
1c: eeb77ac0      vcvtf.f64.f32 d7, s0
20: ec532b17      vmov    r2, r3, d7
24: ebfffffe      bl      0 <printf>
28: e2544001      subs    r4, r4, #1
2c: 1afffff8      bne     14 <main+0x14>
30: e1a00004      mov     r0, r4
34: e8bd8010      pop     {r4, pc}
38: 00000000      andeq   r0, r0, r0
```

Инструкции по адресам 0x5c в float_rand() и 0x38 в main() это (псевдо-)случайный мусор.

1.25.2. Вычисление машинного эпсилона

Машинный эпсилон — это самая маленькая гранула, с которой может работать FPU¹⁷³. Чем больше бит выделено для числа с плавающей точкой, тем меньше машинный эпсилон. Это $2^{-23} = 1.19e-07$ для *float* и $2^{-52} = 2.22e-16$ для *double*. См. также: [статью в Wikipedia](#).

Любопытно, что вычислить машинный эпсилон очень легко:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

union uint_float
{
    uint32_t i;
    float f;
};

float calculate_machine_epsilon(float start)
{
    union uint_float v;
    v.f=start;
    v.i++;
    return v.f-start;
}

void main()
{
    printf ("%g\n", calculate_machine_epsilon(1.0));
};
```

Что мы здесь делаем это обходимся с мантиссой числа в формате IEEE 754 как с целочисленным числом и прибавляем единицу к нему. Итоговое число с плавающей точкой будет равно *starting_value + machine_epsilon*, так что нам нужно просто вычесть изначальное значение (используя арифметику с плавающей точкой) чтобы измерить, какое число отражает один бит в одинарной точности (*float*). *union* здесь нужен чтобы мы могли обращаться к числу в формате IEEE 754 как к обычному целочисленному. Прибавление 1 к нему на самом деле прибавляет 1 к мантиссе числа, хотя, нужно сказать, переполнение также возможно, что приведет к прибавлению единицы к экспоненте.

x86

Листинг 1.355: Оптимизирующий MSVC 2010

```
tv130 = 8
_v$ = 8
_start$ = 8
_calculate_machine_epsilon PROC
    fld     DWORD PTR _start$[esp-4]
    fst     DWORD PTR _v$[esp-4]      ; это лишняя инструкция
    inc     DWORD PTR _v$[esp-4]
    fsubr   DWORD PTR _v$[esp-4]
    fstp    DWORD PTR tv130[esp-4]   ; \ эта пара инструкций также лишняя
    fld     DWORD PTR tv130[esp-4]   ; /
    ret     0
_calculate_machine_epsilon ENDP
```

Вторая инструкция FST избыточная: нет необходимости сохранять входное значение в этом же месте (компилятор решил выделить переменную *v* в том же месте локального стека, где находится и входной аргумент). Далее оно инкрементируется при помощи INC, как если это обычная целочисленная переменная. Затем оно загружается в FPU как если это 32-битное число в формате IEEE 754, FSUBR делает остальную часть работы и результат в ST0. Последняя пара инструкций FSTP/FLD избыточна, но компилятор не оптимизировал её.

ARM64

Расширим этот пример до 64-бит:

¹⁷³В русскоязычной литературе встречается также термин «машинный ноль».

1.25. ОБЪЕДИНЕНИЯ (UNION)

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

typedef union
{
    uint64_t i;
    double d;
} uint_double;

double calculate_machine_epsilon(double start)
{
    uint_double v;
    v.d=start;
    v.i++;
    return v.d-start;
}

void main()
{
    printf ("%g\n", calculate_machine_epsilon(1.0));
};
```

В ARM64 нет инструкции для добавления числа к D-регистру в FPU, так что входное значение (пришедшее в D0) в начале копируется в [GPR](#), инкрементируется, копируется в регистр FPU D1, затем происходит вычитание.

Листинг 1.356: Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64

```
calculate_machine_epsilon:
    fmov    x0, d0        ; загрузить входное значение типа double в X0
    add     x0, x0, 1      ; X0++
    fmov    d1, x0        ; переместить его в регистр FPU
    fsub    d0, d1, d0     ; вычесть
    ret
```

Смотрите также этот пример скомпилированный под x64 с SIMD-инструкциями: [1.30.4](#) (стр. 428).

MIPS

Новая для нас здесь инструкция это MTC1 («Move To Coprocessor 1»), она просто переносит данные из [GPR](#) в регистры FPU.

Листинг 1.357: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
calculate_machine_epsilon:
    mfc1    $v0, $f12
    or      $at, $zero ; NOP
    addiu   $v1, $v0, 1
    mtc1    $v1, $f2
    jr      $ra
    sub.s   $f0, $f2, $f12 ; branch delay slot
```

Вывод

Трудно сказать, понадобится ли кому-то такая эквилибристика в реальном коде, но как уже было упомянуто много раз в этой книге, этот пример хорошо подходит для объяснения формата IEEE 754 и *union* в Си/Си++.

1.25.3. Быстрое вычисление квадратного корня

Вот где еще можно на практике применить трактовку типа *float* как целочисленного, это быстрое вычисление квадратного корня.

```

* and that int is 32 bits. */
float sqrt_approx(float z)
{
    int val_int = *(int*)&z; /* Same bits, but as an int */
    /*
     * To justify the following code, prove that
     *
     * (((val_int / 2^m) - b) / 2) + b * 2^m = ((val_int - 2^m) / 2) + ((b + 1) / 2) * 2^m
     *
     * where
     *
     * b = exponent bias
     * m = number of mantissa bits
     *
     * .
     */

    val_int -= 1 << 23; /* Subtract 2^m. */
    val_int >>= 1; /* Divide by 2. */
    val_int += 1 << 29; /* Add ((b + 1) / 2) * 2^m. */

    return *(float*)&val_int; /* Interpret again as float */
}

```

В качестве упражнения, вы можете попробовать скомпилировать эту функцию и разобраться, как она работает.

Имеется также известный алгоритм быстрого вычисления $\frac{1}{\sqrt{x}}$. Алгоритм стал известным, вероятно потому, что был применен в Quake III Arena.

Описание алгоритма есть в Wikipedia: <http://go.yurichev.com/17361>.

1.26. Указатели на функции

Указатель на функцию, в целом, как и любой другой указатель, просто адрес, указывающий на начало функции в сегменте кода.

Это часто применяется для вызовов т.н. callback-функций ¹⁷⁴.

Известные примеры:

- `qsort()` ¹⁷⁵, `atexit()` ¹⁷⁶ из стандартной библиотеки Си;
- сигналы в *NIX ОС ¹⁷⁷;
- запуск тредов: `CreateThread()` (win32), `pthread_create()` (POSIX);
- множество функций win32, например `EnumChildWindows()` ¹⁷⁸.
- множество мест в ядре Linux, например, функции драйверов файловой системы вызываются через callback-и: <http://go.yurichev.com/17076>
- функции плагинов GCC также вызываются через callback-и: <http://go.yurichev.com/17077>
- Один из примеров указателей на функции это таблица в оконном менеджере «dwm» для Linux, описывающая шорт-каты.

Каждый шорт-кат имеет соответствующую функцию, которую нужно вызвать, если эта клавиша нажата: [GitHub](#). Как мы видим, с такой таблицей намного легче обходиться чем с большим выражением `switch()`.

¹⁷⁴[wikipedia](#)

¹⁷⁵[wikipedia](#)

¹⁷⁶<http://go.yurichev.com/17073>

¹⁷⁷[wikipedia](#)

¹⁷⁸[MSDN](#)

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

Итак, функция `qsort()` это реализация алгоритма «быстрой сортировки». Функция может сортировать что угодно, любые типы данных, но при условии, что вы имеете функцию сравнения этих двух элементов данных и `qsort()` может вызывать её.

Эта функция сравнения может определяться так:

```
int (*compare)(const void *, const void *)
```

Попробуем такой пример:

```
1 /* ex3 Sorting ints with qsort */
2
3 #include <stdio.h>
4 #include <stdlib.h>
5
6 int comp(const void * _a, const void * _b)
7 {
8     const int *a=(const int *)_a;
9     const int *b=(const int *)_b;
10
11     if (*a==*b)
12         return 0;
13     else
14         if (*a < *b)
15             return -1;
16         else
17             return 1;
18 }
19
20 int main(int argc, char* argv[])
21 {
22     int numbers[10]={1892,45,200,-98,4087,5,-12345,1087,88,-100000};
23     int i;
24
25     /* Sort the array */
26     qsort(numbers,10,sizeof(int),comp) ;
27     for (i=0;i<9;i++)
28         printf("Number = %d\n",numbers[ i ] ) ;
29     return 0;
30 }
```

1.26.1. MSVC

Компилируем в MSVC 2010 (некоторые части убраны для краткости) с опцией `/Ox`:

Листинг 1.359: Оптимизирующий MSVC 2010: `/GS- /MD`

```
__a$ = 8 ; size = 4
__b$ = 12 ; size = 4
_comp PROC
    mov     eax, DWORD PTR __a$[esp-4]
    mov     ecx, DWORD PTR __b$[esp-4]
    mov     eax, DWORD PTR [eax]
    mov     ecx, DWORD PTR [ecx]
    cmp     eax, ecx
    jne     SHORT $LN4@comp
    xor     eax, eax
    ret     0
$LN4@comp:
    xor     edx, edx
    cmp     eax, ecx
    setge   dl
    lea     eax, DWORD PTR [edx+edx-1]
    ret     0
_comp ENDP

_numbers$ = -40 ; size = 40
_argc$ = 8 ; size = 4
```


1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

```

_argv$ = 12                                ; size = 4
_main PROC
    sub     esp, 40                        ; 00000028H
    push    esi
    push    OFFSET _comp
    push    4
    lea     eax, DWORD PTR _numbers$[esp+52]
    push    10                            ; 0000000aH
    push    eax
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+60], 1892    ; 00000764H
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+64], 45      ; 0000002dH
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+68], 200     ; 000000c8H
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+72], -98     ; ffffffff9eH
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+76], 4087    ; 00000ff7H
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+80], 5
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+84], -12345   ; fffffcfc7H
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+88], 1087    ; 0000043fH
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+92], 88      ; 00000058H
    mov     DWORD PTR _numbers$[esp+96], -100000  ; fffe7960H
    call    _qsort
    add     esp, 16                        ; 00000010H
...

```

Ничего особо удивительного здесь мы не видим. В качестве четвертого аргумента, в `qsort()` просто передается адрес метки `_comp`, где собственно и располагается функция `comp()`, или, можно сказать, самая первая инструкция этой функции.

Как `qsort()` вызывает её?

Посмотрим в `MSVCR80.DLL` (эта DLL куда в `MSVC` вынесены функции из стандартных библиотек Си):

Листинг 1.360: `MSVCR80.DLL`

```

.text:7816CBF0 ; void __cdecl qsort(void *, unsigned int, unsigned int, int (__cdecl *)(const ↗
    ↘ void *, const void *))
.text:7816CBF0      public _qsort
.text:7816CBF0      proc near
.text:7816CBF0
.text:7816CBF0      lo          = dword ptr -104h
.text:7816CBF0      hi          = dword ptr -100h
.text:7816CBF0      var_FC      = dword ptr -0FCh
.text:7816CBF0      stkptra     = dword ptr -0F8h
.text:7816CBF0      lostk      = dword ptr -0F4h
.text:7816CBF0      histk      = dword ptr -7Ch
.text:7816CBF0      base       = dword ptr 4
.text:7816CBF0      num        = dword ptr 8
.text:7816CBF0      width      = dword ptr 0Ch
.text:7816CBF0      comp       = dword ptr 10h
.text:7816CBF0
.text:7816CBF0      sub         esp, 100h
....

.text:7816CCE0 loc_7816CCE0:                                ; CODE XREF: _qsort+B1
.text:7816CCE0      shr         eax, 1
.text:7816CCE2      imul        eax, ebp
.text:7816CCE5      add         eax, ebx
.text:7816CCE7      mov         edi, eax
.text:7816CCE9      push        edi
.text:7816CCEA      push        ebx
.text:7816CCEB      call        [esp+118h+comp]
.text:7816CCF2      add         esp, 8
.text:7816CCF5      test        eax, eax
.text:7816CCF7      jle         short loc_7816CD04

```

`comp` — это четвертый аргумент функции. Здесь просто передается управление по адресу, указанному в `comp`. Перед этим подготавливается два аргумента для функции `comp()`. Далее, проверяется результат её выполнения.

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

Вот почему использование указателей на функции — это опасно. Во-первых, если вызвать `qsort()` с неправильным указателем на функцию, то `qsort()`, дойдя до этого вызова, может передать управление неизвестно куда, процесс упадет, и эту ошибку можно будет найти не сразу.

Во-вторых, типизация callback-функции должна строго соблюдаться, вызов не той функции с не теми аргументами не того типа, может привести к плачевным результатам, хотя падение процесса это и не проблема, проблема — это найти ошибку, ведь компилятор на стадии компиляции может вас и не предупредить о потенциальных неприятностях.

MSVC + OllyDbg

Загрузим наш пример в OllyDbg и установим точку останова на функции `comp()`. Как значения сравниваются, мы можем увидеть во время самого первого вызова `comp()`:

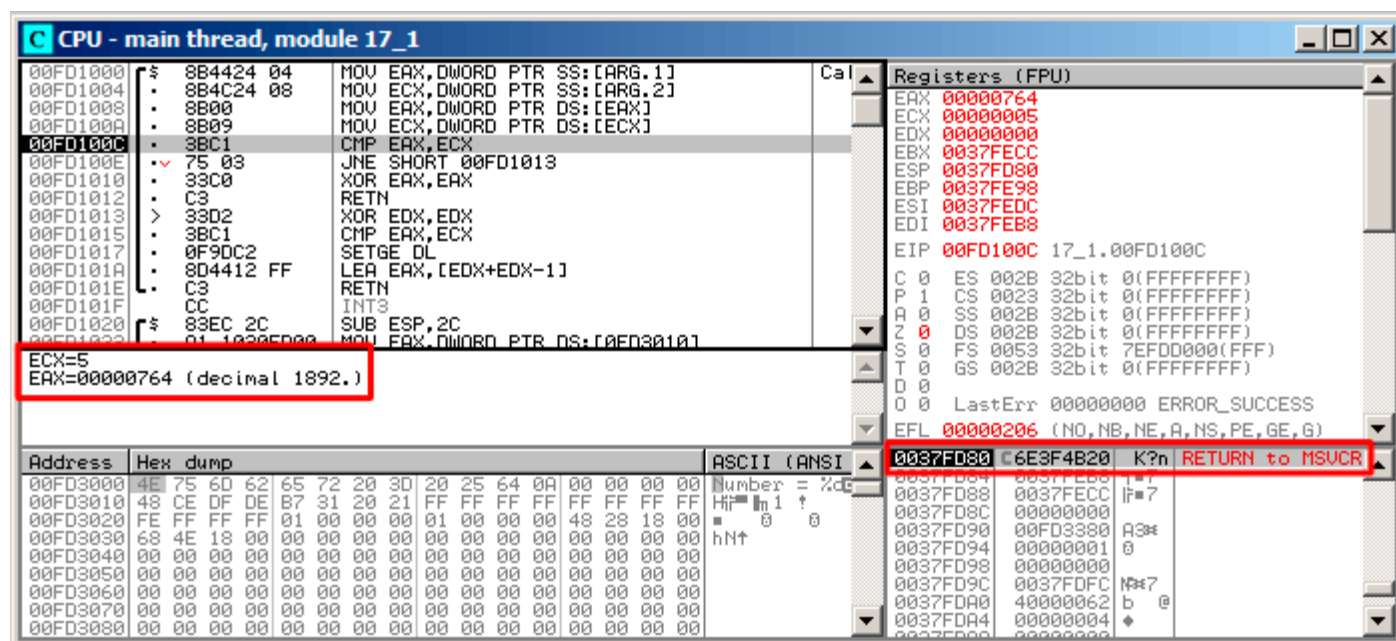


Рис. 1.101: OllyDbg: первый вызов `comp()`

Для удобства, OllyDbg показывает сравниваемые значения в окне под окном кода. Мы можем так же увидеть, что `SP` указывает на `RA` где находится место в функции `qsort()` (на самом деле, находится в `MSVCR100.DLL`).

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

Трассируя (F8) до инструкции RETN и нажав F8 еще один раз, мы возвращаемся в функцию qsort():

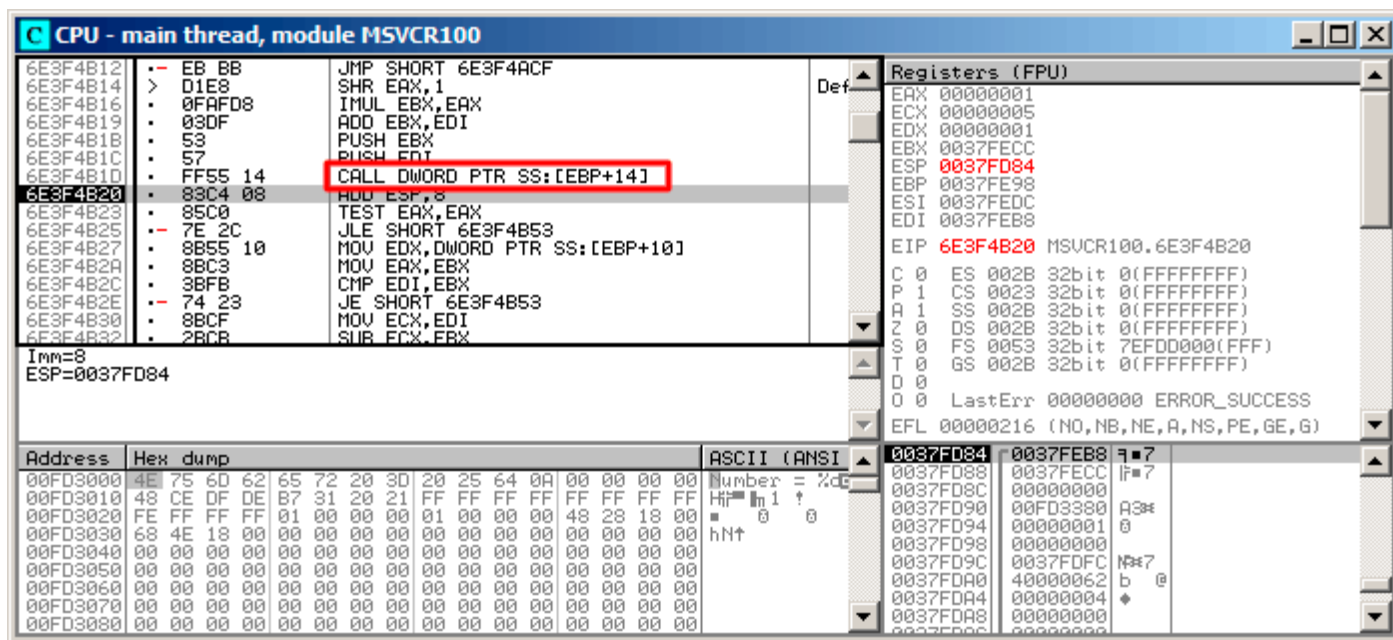


Рис. 1.102: OllyDbg: код в qsort() сразу после вызова comp()

Это был вызов функции сравнения.

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

Вот также скриншот момента второго вызова функции `comp()`—теперь сравниваемые значения другие:

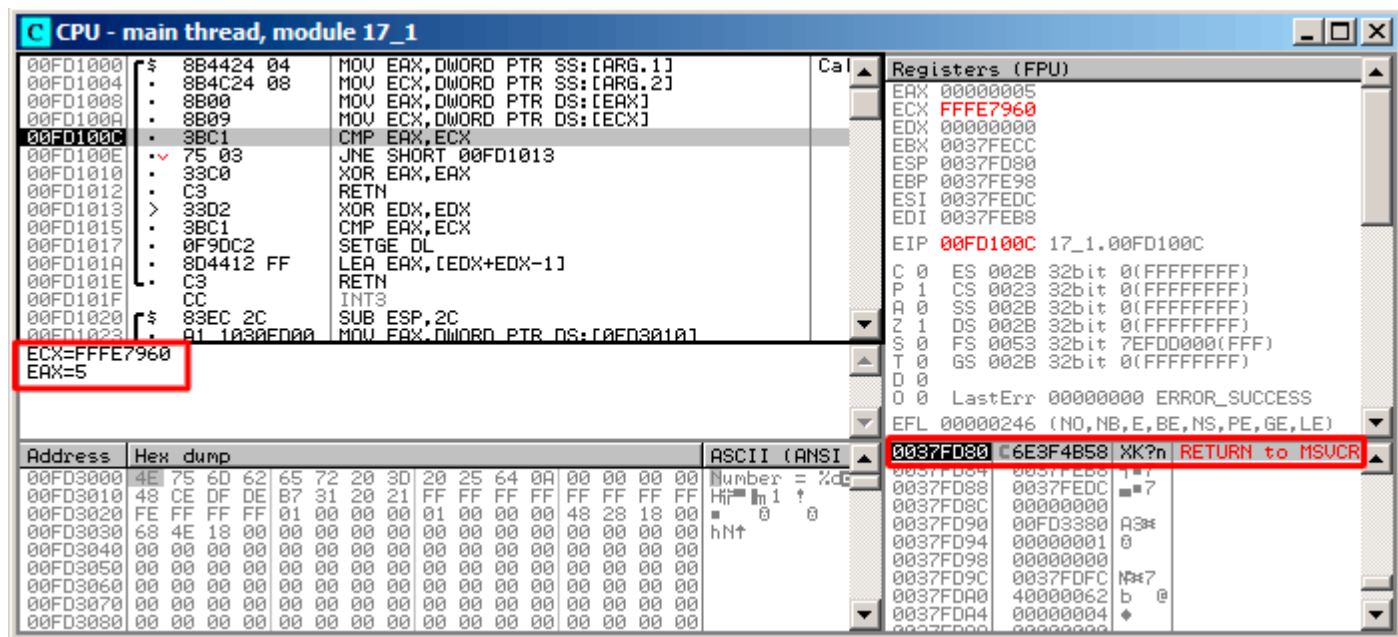


Рис. 1.103: OllyDbg: второй вызов `comp()`

MSVC + tracer

Посмотрим, какие пары сравниваются. Эти 10 чисел будут сортироваться: 1892, 45, 200, -98, 4087, 5, -12345, 1087, 88, -100000.

Найдем адрес первой инструкции `CMP` в `comp()` и это `0x0040100C` и мы ставим точку останова на ней:

```
tracer.exe -l:17_1.exe bpx=17_1.exe!0x0040100C
```

Получаем информацию о регистрах на точке останова:

```
PID=4336|New process 17_1.exe
(0) 17_1.exe!0x40100c
EAX=0x00000764 EBX=0x0051f7c8 ECX=0x00000005 EDX=0x00000000
ESI=0x0051f7d8 EDI=0x0051f7b4 EBP=0x0051f794 ESP=0x0051f67c
EIP=0x0028100c
FLAGS=IF
(0) 17_1.exe!0x40100c
EAX=0x00000005 EBX=0x0051f7c8 ECX=0xfffe7960 EDX=0x00000000
ESI=0x0051f7d8 EDI=0x0051f7b4 EBP=0x0051f794 ESP=0x0051f67c
EIP=0x0028100c
FLAGS=PF ZF IF
(0) 17_1.exe!0x40100c
EAX=0x00000764 EBX=0x0051f7c8 ECX=0x00000005 EDX=0x00000000
ESI=0x0051f7d8 EDI=0x0051f7b4 EBP=0x0051f794 ESP=0x0051f67c
EIP=0x0028100c
FLAGS=CF PF ZF IF
...
```

Отфильтруем EAX и ECX и получим:

```
EAX=0x00000764 ECX=0x00000005
EAX=0x00000005 ECX=0xfffe7960
EAX=0x00000764 ECX=0x00000005
EAX=0x0000002d ECX=0x00000005
EAX=0x00000058 ECX=0x00000005
EAX=0x0000043f ECX=0x00000005
EAX=0xffffcfc7 ECX=0x00000005
```

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

EAX=0x000000c8	ECX=0x00000005
EAX=0xffffffff9e	ECX=0x00000005
EAX=0x00000ff7	ECX=0x00000005
EAX=0x00000ff7	ECX=0x00000005
EAX=0xffffffff9e	ECX=0x00000005
EAX=0xffffffff9e	ECX=0x00000005
EAX=0xffffcfc7	ECX=0xfffe7960
EAX=0x00000005	ECX=0xffffcfc7
EAX=0xffffffff9e	ECX=0x00000005
EAX=0xffffcfc7	ECX=0xfffe7960
EAX=0xffffffff9e	ECX=0xffffcfc7
EAX=0xffffcfc7	ECX=0xfffe7960
EAX=0x000000c8	ECX=0x00000ff7
EAX=0x0000002d	ECX=0x00000ff7
EAX=0x0000043f	ECX=0x00000ff7
EAX=0x00000058	ECX=0x00000ff7
EAX=0x00000764	ECX=0x00000ff7
EAX=0x000000c8	ECX=0x00000764
EAX=0x0000002d	ECX=0x00000764
EAX=0x0000043f	ECX=0x00000764
EAX=0x00000058	ECX=0x00000764
EAX=0x000000c8	ECX=0x00000058
EAX=0x0000002d	ECX=0x000000c8
EAX=0x0000043f	ECX=0x000000c8
EAX=0x000000c8	ECX=0x00000058
EAX=0x0000002d	ECX=0x000000c8
EAX=0x0000002d	ECX=0x00000058

Это 34 пары. Следовательно, алгоритму быстрой сортировки нужно 34 операции сравнения для сортировки этих 10-и чисел.

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

MSVC + tracer (code coverage)

Но можно также и воспользоваться возможностью tracer накапливать все возможные состояния регистров и показать их в IDA.

Трассируем все инструкции в функции `comp()`:

```
tracer.exe -l:17_1.exe bpf=17_1.exe!0x00401000,trace:cc
```

Получем .idc-скрипт для загрузки в IDA и загружаем его:

```
.text:00401000
.text:00401000 ; int __cdecl PtFuncCompare(const void *, const void *)
.text:00401000 PtFuncCompare      proc near                ; DATA XREF: _main+5↓o
.text:00401000
.text:00401000 arg_0             = dword ptr 4
.text:00401000 arg_4             = dword ptr 8
.text:00401000
.text:00401000 mov     eax, [esp+arg_0] ; [ESP+4]=0x45f7ec..0x45f810(step=4), L"?\\x04?
.text:00401004 mov     ecx, [esp+arg_4] ; [ESP+8]=0x45f7ec..0x45f7f4(step=4), 0x45f7fc
.text:00401008 mov     eax, [eax]       ; [EAX]=5, 0x2d, 0x58, 0xc8, 0x43f, 0x764, 0xff
.text:0040100a mov     ecx, [ecx]       ; [ECX]=5, 0x58, 0xc8, 0x764, 0xff7, 0xfffe7960
.text:0040100c cmp     eax, ecx         ; EAX=5, 0x2d, 0x58, 0xc8, 0x43f, 0x764, 0xff7,
.text:0040100e jnz     short loc_401013 ; ZF=false
.text:00401010 xor     eax, eax
.text:00401012 retn
.text:00401013 ; -----
.text:00401013
.text:00401013 loc_401013:                ; CODE XREF: PtFuncCompare+E↑j
.text:00401013 xor     edx, edx
.text:00401015 cmp     eax, ecx         ; EAX=5, 0x2d, 0x58, 0xc8, 0x43f, 0x764, 0xff7,
.text:00401017 setnl  dl                ; SF=false,true OF=false
.text:0040101a lea     eax, [edx+edx-1]
.text:0040101e retn                     ; EAX=1, 0xffffffff
.text:0040101e PtFuncCompare      endp
.text:0040101f
```

Рис. 1.104: tracer и IDA. N.B.: некоторые значения обрезаны справа

Имя этой функции (`PtFuncCompare`) дала IDA— видимо, потому что видит что указатель на эту функцию передается в `qsort()`.

Мы видим, что указатели *a* и *b* указывают на разные места внутри массива, но шаг между указателями — 4, что логично, ведь в массиве хранятся 32-битные значения.

Видно, что инструкции по адресам `0x401010` и `0x401012` никогда не исполнялись (они и остались белыми): действительно, функция `comp()` никогда не возвращала 0, потому что в массиве нет одинаковых элементов.

1.26.2. GCC

Не слишком большая разница:

Листинг 1.361: GCC

```
lea     eax, [esp+40h+var_28]
mov     [esp+40h+var_40], eax
mov     [esp+40h+var_28], 764h
mov     [esp+40h+var_24], 2Dh
mov     [esp+40h+var_20], 0C8h
mov     [esp+40h+var_1C], 0FFFFFF9Eh
mov     [esp+40h+var_18], 0FF7h
mov     [esp+40h+var_14], 5
mov     [esp+40h+var_10], 0FFFCFC7h
mov     [esp+40h+var_C], 43Fh
mov     [esp+40h+var_8], 58h
mov     [esp+40h+var_4], 0FFFE7960h
mov     [esp+40h+var_34], offset comp
mov     [esp+40h+var_38], 4
```

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

```
mov    [esp+40h+var_3C], 0Ah
call   _qsort
```

Функция `comp()`:

```
comp      public comp
          proc near

arg_0     = dword ptr  8
arg_4     = dword ptr  0Ch

          push    ebp
          mov     ebp, esp
          mov     eax, [ebp+arg_4]
          mov     ecx, [ebp+arg_0]
          mov     edx, [eax]
          xor     eax, eax
          cmp     [ecx], edx
          jnz     short loc_8048458
          pop     ebp
          retn

loc_8048458:
          setnl   al
          movzx   eax, al
          lea     eax, [eax+eax-1]
          pop     ebp
          retn

comp      endp
```

Реализация `qsort()` находится в `libc.so.6`, и представляет собой просто wrapper¹⁷⁹ для `qsort_r()`. Она, в свою очередь, вызывает `quicksort()`, где есть вызовы определенной нами функции через переданный указатель:

Листинг 1.362: (файл `libc.so.6`, версия `glibc: 2.10.1`)

```
.text:0002DDF6      mov     edx, [ebp+arg_10]
.text:0002DDF9      mov     [esp+4], esi
.text:0002DDFD      mov     [esp], edi
.text:0002DE00      mov     [esp+8], edx
.text:0002DE04      call   [ebp+arg_C]
...
```

GCC + GDB (с исходными кодами)

Очевидно, у нас есть исходный код нашего примера на Си (1.26 (стр. 375)), так что мы можем установить точку останова (*b*) на номере строки (11-й — это номер строки где происходит первое сравнение). Нам также нужно скомпилировать наш пример с ключом `-g`, чтобы в исполняемом файле была полная отладочная информация. Мы можем так же выводить значения используя имена переменных (*p*): отладочная информация также содержит информацию о том, в каком регистре и/или элементе локального стека находится какая переменная.

Мы можем также увидеть стек (*bt*) и обнаружить что в `Glibc` используется какая-то вспомогательная функция с именем `msort_with_tmp()`.

Листинг 1.363: GDB-сессия

```
dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gcc 17_1.c -g
dennis@ubuntuvm:~/polygon$ gdb ./a.out
GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
Copyright (C) 2013 Free Software Foundation, Inc.
...
Reading symbols from /home/dennis/polygon/a.out...done.
(gdb) b 17_1.c:11
Breakpoint 1 at 0x804845f: file 17_1.c, line 11.
(gdb) run
```

¹⁷⁹понятие близкое к [thunk function](#)

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

```
Starting program: /home/dennis/polygon/./a.out
```

```
Breakpoint 1, comp (_a=0xbffff0f8, _b=_b@entry=0xbffff0fc) at 17_1.c:11
```

```
11      if (*a==*b)
```

```
(gdb) p *a
```

```
$1 = 1892
```

```
(gdb) p *b
```

```
$2 = 45
```

```
(gdb) c
```

```
Continuing.
```

```
Breakpoint 1, comp (_a=0xbffff104, _b=_b@entry=0xbffff108) at 17_1.c:11
```

```
11      if (*a==*b)
```

```
(gdb) p *a
```

```
$3 = -98
```

```
(gdb) p *b
```

```
$4 = 4087
```

```
(gdb) bt
```

```
#0  comp (_a=0xbffff0f8, _b=_b@entry=0xbffff0fc) at 17_1.c:11
```

```
#1  0xb7e42872 in msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=2) at msort.c:65
```

```
#2  0xb7e4273e in msort_with_tmp (n=2, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
```

```
#3  msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=5) at msort.c:53
```

```
#4  0xb7e4273e in msort_with_tmp (n=5, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
```

```
#5  msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=10) at msort.c:53
```

```
#6  0xb7e42cef in msort_with_tmp (n=10, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
```

```
#7  __GI_qsorth_r (b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=10, s=s@entry=4, cmp=cmp@entry=0x804844d <comp>, arg=arg@entry=0x0) at msort.c:297
```

```
#8  0xb7e42dcf in __GI_qsorth (b=0xbffff0f8, n=10, s=4, cmp=0x804844d <comp>) at msort.c:307
```

```
#9  0x0804850d in main (argc=1, argv=0xbffff1c4) at 17_1.c:26
```

```
(gdb)
```

GCC + GDB (без исходных кодов)

Но часто никаких исходных кодов нет вообще, так что мы можем дизассемблировать функцию `comp()` (`disas`), найти самую первую инструкцию `CMPL` и установить точку останова (`b`) по этому адресу. На каждой точке останова мы будем видеть содержимое регистров (`info registers`). Информация из стека так же доступна (`bt`), но частичная: здесь нет номеров строк для функции `comp()`.

Листинг 1.364: GDB-сессия

```
dennis@ubuntuv:~/polygon$ gcc 17_1.c
dennis@ubuntuv:~/polygon$ gdb ./a.out
GNU gdb (GDB) 7.6.1-ubuntu
Copyright (C) 2013 Free Software Foundation, Inc.
...
Reading symbols from /home/dennis/polygon/a.out...(no debugging symbols found)...done.
(gdb) set disassembly-flavor intel
(gdb) disas comp
Dump of assembler code for function comp:
0x0804844d <+0>:    push    ebp
0x0804844e <+1>:    mov     ebp,esp
0x08048450 <+3>:    sub     esp,0x10
0x08048453 <+6>:    mov     eax,DWORD PTR [ebp+0x8]
0x08048456 <+9>:    mov     DWORD PTR [ebp-0x8],eax
0x08048459 <+12>:   mov     eax,DWORD PTR [ebp+0xc]
0x0804845c <+15>:   mov     DWORD PTR [ebp-0x4],eax
0x0804845f <+18>:   mov     eax,DWORD PTR [ebp-0x8]
0x08048462 <+21>:   mov     edx,DWORD PTR [eax]
0x08048464 <+23>:   mov     eax,DWORD PTR [ebp-0x4]
0x08048467 <+26>:   mov     eax,DWORD PTR [eax]
0x08048469 <+28>:   cmp     edx,eax
0x0804846b <+30>:   jne     0x8048474 <comp+39>
0x0804846d <+32>:   mov     eax,0x0
0x08048472 <+37>:   jmp     0x804848e <comp+65>
0x08048474 <+39>:   mov     eax,DWORD PTR [ebp-0x8]
```

1.26. УКАЗАТЕЛИ НА ФУНКЦИИ

```
0x08048477 <+42>:  mov     edx,DWORD PTR [eax]
0x08048479 <+44>:  mov     eax,DWORD PTR [ebp-0x4]
0x0804847c <+47>:  mov     eax,DWORD PTR [eax]
0x0804847e <+49>:  cmp     edx,eax
0x08048480 <+51>:  jge     0x8048489 <comp+60>
0x08048482 <+53>:  mov     eax,0xffffffff
0x08048487 <+58>:  jmp     0x804848e <comp+65>
0x08048489 <+60>:  mov     eax,0x1
0x0804848e <+65>:  leave
0x0804848f <+66>:  ret
```

End of assembler dump.

(gdb) b *0x08048469

Breakpoint 1 at 0x8048469

(gdb) run

Starting program: /home/dennis/polygon/./a.out

Breakpoint 1, 0x08048469 in comp ()

(gdb) info registers

eax	0x2d	45
ecx	0xbffff0f8	-1073745672
edx	0x764	1892
ebx	0xb7fc0000	-1208221696
esp	0xbffffeeb8	0xbffffeeb8
ebp	0xbffffeec8	0xbffffeec8
esi	0xbffff0fc	-1073745668
edi	0xbffff010	-1073745904
eip	0x8048469	0x8048469 <comp+28>
eflags	0x286	[PF SF IF]
cs	0x73	115
ss	0x7b	123
ds	0x7b	123
es	0x7b	123
fs	0x0	0
gs	0x33	51

(gdb) c

Continuing.

Breakpoint 1, 0x08048469 in comp ()

(gdb) info registers

eax	0xff7	4087
ecx	0xbffff104	-1073745660
edx	0xffffffff9e	-98
ebx	0xb7fc0000	-1208221696
esp	0xbffffee58	0xbffffee58
ebp	0xbffffee68	0xbffffee68
esi	0xbffff108	-1073745656
edi	0xbffff010	-1073745904
eip	0x8048469	0x8048469 <comp+28>
eflags	0x282	[SF IF]
cs	0x73	115
ss	0x7b	123
ds	0x7b	123
es	0x7b	123
fs	0x0	0
gs	0x33	51

(gdb) c

Continuing.

Breakpoint 1, 0x08048469 in comp ()

(gdb) info registers

eax	0xffffffff9e	-98
ecx	0xbffff100	-1073745664
edx	0xc8	200
ebx	0xb7fc0000	-1208221696
esp	0xbffffeeb8	0xbffffeeb8
ebp	0xbffffeec8	0xbffffeec8
esi	0xbffff104	-1073745660
edi	0xbffff010	-1073745904
eip	0x8048469	0x8048469 <comp+28>
eflags	0x286	[PF SF IF]

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
cs          0x73      115
ss          0x7b      123
ds          0x7b      123
es          0x7b      123
fs          0x0        0
gs          0x33      51
(gdb) bt
#0  0x08048469 in comp ()
#1  0xb7e42872 in msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=2)
    at msort.c:65
#2  0xb7e4273e in msort_with_tmp (n=2, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
#3  msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=5) at msort.c:53
#4  0xb7e4273e in msort_with_tmp (n=5, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
#5  msort_with_tmp (p=p@entry=0xbffff07c, b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=10) at msort.c:53
#6  0xb7e42cef in msort_with_tmp (n=10, b=0xbffff0f8, p=0xbffff07c) at msort.c:45
#7  __GI_qsort_r (b=b@entry=0xbffff0f8, n=n@entry=10, s=s@entry=4, cmp=cmp@entry=0x804844d <↵
    ↵ comp>,
    arg=arg@entry=0x0) at msort.c:297
#8  0xb7e42dcf in __GI_qsort (b=0xbffff0f8, n=10, s=4, cmp=0x804844d <comp>) at msort.c:307
#9  0x0804850d in main ()
```

1.26.3. Опасность указателей на ф-ции

Как мы можем видеть, ф-ция `qsort()` ожидает указатель на ф-цию, которая берет на вход два аргумента типа `void*` и возвращает целочисленное число. Если в вашем коде есть несколько разных ф-ций сравнения (одна сравнивает строки, другая — числа, итд), очень легко их перепутать друг с другом. Вы можете попытаться отсортировать массив строк используя ф-цию сравнивающую числа, и компилятор не предупредит вас об ошибке.

1.27. 64-битные значения в 32-битной среде

В среде, где [GPR](#)-ы 32-битные, 64-битные значения хранятся и передаются как пары 32-битных значений ¹⁸⁰.

1.27.1. Возврат 64-битного значения

```
#include <stdint.h>

uint64_t f ()
{
    return 0x1234567890ABCDEF;
};
```

x86

64-битные значения в 32-битной среде возвращаются из функций в паре регистров EDX:EAX.

Листинг 1.365: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_f      PROC
        mov     eax, -1867788817 ; 90abcdefH
        mov     edx, 305419896   ; 12345678H
        ret     0
_f      ENDP
```

¹⁸⁰Кстати, в 16-битной среде, 32-битные значения передаются 16-битными парами точно так же: [3.27.4](#) (стр. 628)

ARM

64-битное значение возвращается в паре регистров R0-R1 — (R1 это старшая часть и R0 — младшая часть):

Листинг 1.366: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
||f|| PROC
    LDR    r0, |L0.12|
    LDR    r1, |L0.16|
    BX     lr
    ENDP

|L0.12|
DCD      0x90abcdef
|L0.16|
DCD      0x12345678
```

MIPS

64-битное значение возвращается в паре регистров V0-V1 (\$2-\$3) — (V0 (\$2) это старшая часть и V1 (\$3) — младшая часть):

Листинг 1.367: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (assembly listing)

```
li    $3, -1867841536    # 0xffffffff90ab0000
li    $2, 305397760      # 0x12340000
ori   $3, $3, 0xcdef
j     $31
ori   $2, $2, 0x5678
```

Листинг 1.368: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
lui    $v1, 0x90AB
lui    $v0, 0x1234
li     $v1, 0x90ABCDEF
jr     $ra
li     $v0, 0x12345678
```

1.27.2. Передача аргументов, сложение, вычитание

```
#include <stdint.h>

uint64_t f_add (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a+b;
};

void f_add_test ()
{
#ifdef __GNUC__
    printf ("%lld\n", f_add(12345678901234, 23456789012345));
#else
    printf ("%I64d\n", f_add(12345678901234, 23456789012345));
#endif
};

uint64_t f_sub (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a-b;
};
```

Листинг 1.369: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob1

```

_a$ = 8      ; size = 8
_b$ = 16     ; size = 8
_f_add PROC
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    add     eax, DWORD PTR _b$[esp-4]
    mov     edx, DWORD PTR _a$[esp]
    adc     edx, DWORD PTR _b$[esp]
    ret     0
_f_add ENDP

_f_add_test PROC
    push    5461          ; 00001555H
    push    1972608889    ; 75939f79H
    push    2874          ; 00000b3aH
    push    1942892530    ; 73ce2ff_subH
    call    _f_add
    push    edx
    push    eax
    push    OFFSET $SG1436 ; '%I64d', 0aH, 00H
    call    _printf
    add     esp, 28
    ret     0
_f_add_test ENDP

_f_sub PROC
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    sub     eax, DWORD PTR _b$[esp-4]
    mov     edx, DWORD PTR _a$[esp]
    sbb     edx, DWORD PTR _b$[esp]
    ret     0
_f_sub ENDP

```

В `f_add_test()` видно, как каждое 64-битное число передается двумя 32-битными значениями, сначала старшая часть, затем младшая.

Сложение и вычитание происходит также парами.

При сложении, в начале складываются младшие 32 бита. Если при сложении был перенос, выставляется флаг CF. Следующая инструкция ADC складывает старшие части чисел, но также прибавляет единицу если $CF = 1$.

Вычитание также происходит парами. Первый SUB может также включить флаг переноса CF, который затем будет проверяться в SBB: если флаг переноса включен, то от результата отнимется единица.

Легко увидеть, как результат работы `f_add()` затем передается в `printf()`.

Листинг 1.370: GCC 4.8.1 -O1 -fno-inline

```

_f_add:
    mov     eax, DWORD PTR [esp+12]
    mov     edx, DWORD PTR [esp+16]
    add     eax, DWORD PTR [esp+4]
    adc     edx, DWORD PTR [esp+8]
    ret

_f_add_test:
    sub     esp, 28
    mov     DWORD PTR [esp+8], 1972608889 ; 75939f79H
    mov     DWORD PTR [esp+12], 5461      ; 00001555H
    mov     DWORD PTR [esp], 1942892530   ; 73ce2ff_subH
    mov     DWORD PTR [esp+4], 2874       ; 00000b3aH
    call    _f_add
    mov     DWORD PTR [esp+4], eax
    mov     DWORD PTR [esp+8], edx
    mov     DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:LC0 ; "%lld\12\0"
    call    _printf

```

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
    add     esp, 28
    ret

_f_sub:
    mov     eax, DWORD PTR [esp+4]
    mov     edx, DWORD PTR [esp+8]
    sub     eax, DWORD PTR [esp+12]
    sbb     edx, DWORD PTR [esp+16]
    ret
```

Код GCC почти такой же.

ARM

Листинг 1.371: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
f_add PROC
    ADDS     r0,r0,r2
    ADC      r1,r1,r3
    BX       lr
ENDP

f_sub PROC
    SUBS     r0,r0,r2
    SBC      r1,r1,r3
    BX       lr
ENDP

f_add_test PROC
    PUSH     {r4,lr}
    LDR      r2,|L0.68| ; 0x75939f79
    LDR      r3,|L0.72| ; 0x00001555
    LDR      r0,|L0.76| ; 0x73ce2ff2
    LDR      r1,|L0.80| ; 0x00000b3a
    BL       f_add
    POP      {r4,lr}
    MOV      r2,r0
    MOV      r3,r1
    ADR      r0,|L0.84| ; "%I64d\n"
    B        __2printf
ENDP

|L0.68|
DCD         0x75939f79
|L0.72|
DCD         0x00001555
|L0.76|
DCD         0x73ce2ff2
|L0.80|
DCD         0x00000b3a
|L0.84|
DCB         "%I64d\n",0
```

Первое 64-битное значение передается в паре регистров R0 и R1, второе — в паре R2 и R3. В ARM также есть инструкция ADC (учитывающая флаг переноса) и SBC («subtract with carry» — вычесть с переносом). Важная вещь: когда младшие части слагаются/вычитаются, используются инструкции ADDS и SUBS с суффиксом -S. Суффикс -S означает «set flags» (установить флаги), а флаги (особенно флаг переноса) это то что однозначно нужно последующим инструкциями ADC/SBC. А иначе инструкции без суффикса -S здесь вполне бы подошли (ADD и SUB).

MIPS

Листинг 1.372: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f_add:
; $a0 – старшая часть a
```

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
; $a1 – младшая часть a
; $a2 – старшая часть b
; $a3 – младшая часть b
        addu    $v1, $a3, $a1 ; суммировать младшие части
        addu    $a0, $a2, $a0 ; суммировать старшие части
; будет ли перенос сгенерирован во время суммирования младших частей?
; установить $v0 в 1, если да
        sltu    $v0, $v1, $a3
        jr      $ra
; прибавить 1 к старшей части результата, если перенос должен был быть сгенерирован
        addu    $v0, $a0 ; branch delay slot
; $v0 – старшая часть результата
; $v1 – младшая часть результата

f_sub:
; $a0 – старшая часть a
; $a1 – младшая часть a
; $a2 – старшая часть b
; $a3 – младшая часть b
        subu    $v1, $a1, $a3 ; вычитать младшие части
        subu    $v0, $a0, $a2 ; вычитать старшие части
; будет ли перенос сгенерирован во время вычитания младших частей?
; установить $a0 в 1, если да
        sltu    $a1, $v1
        jr      $ra
; вычесть 1 из старшей части результата, если перенос должен был быть сгенерирован
        subu    $v0, $a1 ; branch delay slot
; $v0 – старшая часть результата
; $v1 – младшая часть результата

f_add_test:

var_10      = -0x10
var_4       = -4

        lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
        addiu   $sp, -0x20
        la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
        sw      $ra, 0x20+var_4($sp)
        sw      $gp, 0x20+var_10($sp)
        lui     $a1, 0x73CE
        lui     $a3, 0x7593
        li      $a0, 0xB3A
        li      $a3, 0x75939F79
        li      $a2, 0x1555
        jal     f_add
        li      $a1, 0x73CE2FF2
        lw      $gp, 0x20+var_10($sp)
        lui     $a0, ($LC0 >> 16) # "%lld\n"
        lw      $t9, (printf & 0xFFFF)($gp)
        lw      $ra, 0x20+var_4($sp)
        la      $a0, ($LC0 & 0xFFFF) # "%lld\n"
        move    $a3, $v1
        move    $a2, $v0
        jr      $t9
        addiu   $sp, 0x20

$LC0:      .ascii "%lld\n"<0>
```

В MIPS нет регистра флагов, так что эта информация не присутствует после исполнения арифметических операций.

Так что здесь нет инструкций как ADC или SBB в x86. Чтобы получить информацию о том, был бы выставлен флаг переноса, происходит сравнение (используя инструкцию SLTU), которая выставляет целевой регистр в 1 или 0.

Эта 1 или 0 затем прибавляется к итоговому результату, или вычитается.

1.27.3. Умножение, деление

```
#include <stdint.h>

uint64_t f_mul (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a*b;
};

uint64_t f_div (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a/b;
};

uint64_t f_rem (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a % b;
};
```

x86

Листинг 1.373: Оптимизирующий MSVC 2013 /Ob1

```
_a$ = 8 ; size = 8
_b$ = 16 ; size = 8
_f_mul PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _b$[ebp+4]
    push    eax
    mov     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    push    ecx
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp+4]
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    push    eax
    call    __allmul ; long long multiplication (умножение значений типа long long)
    pop     ebp
    ret     0
_f_mul ENDP

_a$ = 8 ; size = 8
_b$ = 16 ; size = 8
_f_div PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _b$[ebp+4]
    push    eax
    mov     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    push    ecx
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp+4]
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    push    eax
    call    __aulldiv ; unsigned long long division (деление беззнаковых значений типа long
    ↪ long)
    pop     ebp
    ret     0
_f_div ENDP

_a$ = 8 ; size = 8
_b$ = 16 ; size = 8
_f_rem PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _b$[ebp+4]
    push    eax
    mov     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
```


1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
    push    ecx
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp+4]
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    push    eax
    call    __aullrem ; unsigned long long remainder (вычисление беззнакового остатка)
    pop     ebp
    ret     0
_f_rem    ENDP
```

Умножение и деление — это более сложная операция, так что обычно, компилятор встраивает вызовы библиотечных функций, делающих это.

Значение этих библиотечных функций, здесь: [.5](#) (стр. [1019](#)).

Листинг 1.374: Оптимизирующий GCC 4.8.1 -fno-inline

```
_f_mul:
    push    ebx
    mov     edx, DWORD PTR [esp+8]
    mov     eax, DWORD PTR [esp+16]
    mov     ebx, DWORD PTR [esp+12]
    mov     ecx, DWORD PTR [esp+20]
    imul    ebx, eax
    imul    ecx, edx
    mul     edx
    add     ecx, ebx
    add     edx, ecx
    pop     ebx
    ret

_f_div:
    sub     esp, 28
    mov     eax, DWORD PTR [esp+40]
    mov     edx, DWORD PTR [esp+44]
    mov     DWORD PTR [esp+8], eax
    mov     eax, DWORD PTR [esp+32]
    mov     DWORD PTR [esp+12], edx
    mov     edx, DWORD PTR [esp+36]
    mov     DWORD PTR [esp], eax
    mov     DWORD PTR [esp+4], edx
    call    __udivdi3 ; unsigned division (беззнаковое деление)
    add     esp, 28
    ret

_f_rem:
    sub     esp, 28
    mov     eax, DWORD PTR [esp+40]
    mov     edx, DWORD PTR [esp+44]
    mov     DWORD PTR [esp+8], eax
    mov     eax, DWORD PTR [esp+32]
    mov     DWORD PTR [esp+12], edx
    mov     edx, DWORD PTR [esp+36]
    mov     DWORD PTR [esp], eax
    mov     DWORD PTR [esp+4], edx
    call    __umoddi3 ; unsigned modulo (беззнаковый остаток)
    add     esp, 28
    ret
```

GCC делает почти то же самое, тем не менее, встраивает код умножения прямо в функцию, посчитав что так будет эффективнее. У GCC другие имена библиотечных функций: [.4](#) (стр. [1019](#)).

ARM

Keil для режима Thumb вставляет вызовы библиотечных функций:

Листинг 1.375: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
||f_mul|| PROC
```

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
PUSH    {r4,lr}
BL      __aeabi_lmul
POP     {r4,pc}
ENDP

||f_div|| PROC
PUSH    {r4,lr}
BL      __aeabi_udivmod
POP     {r4,pc}
ENDP

||f_rem|| PROC
PUSH    {r4,lr}
BL      __aeabi_udivmod
MOVS    r0,r2
MOVS    r1,r3
POP     {r4,pc}
ENDP
```

Keil для режима ARM, тем не менее, может сгенерировать код для умножения 64-битных чисел:

Листинг 1.376: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
||f_mul|| PROC
PUSH    {r4,lr}
UMULL   r12,r4,r0,r2
MLA     r1,r2,r1,r4
MLA     r1,r0,r3,r1
MOV     r0,r12
POP     {r4,pc}
ENDP

||f_div|| PROC
PUSH    {r4,lr}
BL      __aeabi_udivmod
POP     {r4,pc}
ENDP

||f_rem|| PROC
PUSH    {r4,lr}
BL      __aeabi_udivmod
MOV     r0,r2
MOV     r1,r3
POP     {r4,pc}
ENDP
```

MIPS

Оптимизирующий GCC для MIPS может генерировать код для 64-битного умножения, но для 64-битного деления приходится вызывать библиотечную функцию:

Листинг 1.377: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f_mul:
    mult    $a2, $a1
    mflo    $v0
    or      $at, $zero ; NOP
    or      $at, $zero ; NOP
    mult    $a0, $a3
    mflo    $a0
    addu    $v0, $a0
    or      $at, $zero ; NOP
    multu   $a3, $a1
    mfhi    $a2
    mflo    $v1
    jr      $ra
    addu    $v0, $a2

f_div:
```

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
var_10 = -0x10
var_4  = -4

    lui    $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
    addiu  $sp, -0x20
    la     $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
    sw     $ra, 0x20+var_4($sp)
    sw     $gp, 0x20+var_10($sp)
    lw     $t9, (__udivdi3 & 0xFFFF)($gp)
    or     $at, $zero
    jalr   $t9
    or     $at, $zero
    lw     $ra, 0x20+var_4($sp)
    or     $at, $zero
    jr     $ra
    addiu  $sp, 0x20
```

f_rem:

```
var_10 = -0x10
var_4  = -4

    lui    $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
    addiu  $sp, -0x20
    la     $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
    sw     $ra, 0x20+var_4($sp)
    sw     $gp, 0x20+var_10($sp)
    lw     $t9, (__umoddi3 & 0xFFFF)($gp)
    or     $at, $zero
    jalr   $t9
    or     $at, $zero
    lw     $ra, 0x20+var_4($sp)
    or     $at, $zero
    jr     $ra
    addiu  $sp, 0x20
```

Тут также много **NOP**-ов, это возможно заполнение delay slot-ов после инструкции умножения (она ведь работает медленнее прочих инструкций).

1.27.4. Сдвиг вправо

```
#include <stdint.h>

uint64_t f (uint64_t a)
{
    return a>>7;
};
```

x86

Листинг 1.378: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob1

```
_a$ = 8      ; size = 8
_f          PROC
    mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
    mov     edx, DWORD PTR _a$[esp]
    shrd    eax, edx, 7
    shr     edx, 7
    ret     0
_f          ENDP
```

Листинг 1.379: Оптимизирующий GCC 4.8.1 -fno-inline

```
_f:
    mov     edx, DWORD PTR [esp+8]
```

1.27. 64-БИТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ В 32-БИТНОЙ СРЕДЕ

```
mov     eax, DWORD PTR [esp+4]
shrd    eax, edx, 7
shr     edx, 7
ret
```

Сдвиг происходит также в две операции: в начале сдвигается младшая часть, затем старшая. Но младшая часть сдвигается при помощи инструкции SHRD, она сдвигает значение в EAX на 7 бит, но подтягивает новые биты из EDX, т.е. из старшей части. Другими словами, 64-битное значение из пары регистров EDX:EAX, как одно целое, сдвигается на 7 бит и младшие 32 бита результата сохраняются в EAX. Старшая часть сдвигается куда более популярной инструкцией SHR: действительно, ведь освободившиеся биты в старшей части нужно просто заполнить нулями.

ARM

В ARM нет такой инструкции как SHRD в x86, так что компилятору Keil приходится всё это делать, используя простые сдвиги и операции «ИЛИ»:

Листинг 1.380: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
||f|| PROC
    LSR     r0,r0,#7
    ORR     r0,r0,r1,LSL #25
    LSR     r1,r1,#7
    BX      lr
ENDP
```

Листинг 1.381: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
||f|| PROC
    LSLS    r2,r1,#25
    LSRS    r0,r0,#7
    ORRS    r0,r0,r2
    LSRS    r1,r1,#7
    BX      lr
ENDP
```

MIPS

GCC для MIPS реализует тот же алгоритм, что сделал Keil для режима Thumb:

Листинг 1.382: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
f:
    sll     $v0, $a0, 25
    srl     $v1, $a1, 7
    or      $v1, $v0, $v1
    jr      $ra
    srl     $v0, $a0, 7
```

1.27.5. Конвертирование 32-битного значения в 64-битное

```
#include <stdint.h>

int64_t f (int32_t a)
{
    return a;
};
```

Листинг 1.383: Оптимизирующий MSVC 2012

```

_a$ = 8
_f    PROC
      mov     eax, DWORD PTR _a$[esp-4]
      cdq
      ret     0
_f    ENDP

```

Здесь появляется необходимость расширить 32-битное знаковое значение в 64-битное знаковое. Конвертировать беззнаковые значения очень просто: нужно просто выставить в 0 все биты в старшей части. Но для знаковых типов это не подходит: знак числа должен быть скопирован в старшую часть числа-результата. Здесь это делает инструкция CDQ, она берет входное значение в EAX, расширяет его до 64-битного, и оставляет его в паре регистров EDX:EAX. Иными словами, инструкция CDQ узнает знак числа в EAX (просто берет самый старший бит в EAX) и в зависимости от этого, выставляет все 32 бита в EDX в 0 или в 1. Её работа в каком-то смысле напоминает работу инструкции MOVVSX.

ARM

Листинг 1.384: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```

||f|| PROC
      ASR     r1,r0,#31
      BX     lr
      ENDP

```

Keil для ARM работает иначе: он просто сдвигает (арифметически) входное значение на 31 бит вправо. Как мы знаем, бит знака это **MSB**, и арифметический сдвиг копирует бит знака в «появляющихся» битах.

Так что после инструкции ASR r1,r0,#31, R1 будет содержать 0xFFFFFFFF если входное значение было отрицательным, или 0 в противном случае. R1 содержит старшую часть возвращаемого 64-битного значения. Другими словами, этот код просто копирует **MSB** (бит знака) из входного значения в R0 во все биты старшей 32-битной части итогового 64-битного значения.

MIPS

GCC для MIPS делает то же, что сделал Keil для режима ARM:

Листинг 1.385: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

f:
      sra     $v0, $a0, 31
      jr     $ra
      move    $v1, $a0

```

1.28. SIMD

SIMD это акроним: *Single Instruction, Multiple Data*.

Как можно судить по названию, это обработка множества данных исполняя только одну инструкцию.

Как и **FPU**, эта подсистема процессора выглядит так же отдельным процессором внутри x86.

SIMD в x86 начался с MMX. Появилось 8 64-битных регистров MM0-MM7.

Каждый MMX-регистр может содержать 2 32-битных значения, 4 16-битных или же 8 байт. Например, складывая значения двух MMX-регистров, можно складывать одновременно 8 8-битных значений.

1.28. SIMD

Простой пример, это некий графический редактор, который хранит открытое изображение как двумерный массив. Когда пользователь меняет яркость изображения, редактору нужно, например, прибавить некий коэффициент ко всем пикселям, или отнять. Для простоты можно представить, что изображение у нас бело-серо-черное и каждый пиксель занимает один байт, то с помощью MMX можно менять яркость сразу у восьми пикселей.

Кстати, вот причина почему в SIMD присутствуют инструкции с *насыщением* (*saturation*).

Когда пользователь в графическом редакторе изменяет яркость, переполнение и антипереполнение (*underflow*) не нужны, так что в SIMD имеются, например, инструкции сложения, которые ничего не будут прибавлять если максимальное значение уже достигнуто, итд.

Когда MMX только появилось, эти регистры на самом деле располагались в FPU-регистрах. Можно было использовать либо FPU либо MMX в одно и то же время. Можно подумать, что Intel решило немного сэкономить на транзисторах, но на самом деле причина такого симбиоза проще — более старая ОС не знающая о дополнительных регистрах процессора не будет сохранять их во время переключения задач, а вот регистры FPU сохранять будет. Таким образом, процессор с MMX + старая ОС + задача, использующая возможности MMX = все это может работать вместе.

SSE — это расширение регистров до 128 бит, теперь уже отдельно от FPU.

AVX — расширение регистров до 256 бит.

Немного о практическом применении.

Конечно же, это копирование блоков в памяти (*memstru*), сравнение (*memstr*), и подобное.

Еще пример: имеется алгоритм шифрования DES, который берет 64-битный блок, 56-битный ключ, шифрует блок с ключом и образуется 64-битный результат. Алгоритм DES можно легко представить в виде очень большой электронной цифровой схемы, с проводами, элементами И, ИЛИ, НЕ.

Идея *bitslice DES*¹⁸¹ — это обработка сразу группы блоков и ключей одновременно. Скажем, на x86 переменная типа *unsigned int* вмещает в себе 32 бита, так что там можно хранить промежуточные результаты сразу для 32-х блоков-ключей, используя 64+56 переменных типа *unsigned int*.

Существует утилита для перебора паролей/хешей Oracle RDBMS (которые основаны на алгоритме DES), реализующая алгоритм *bitslice DES* для SSE2 и AVX — и теперь возможно шифровать одновременно 128 или 256 блоков-ключей:

<http://go.yurichev.com/17313>

1.28.1. Векторизация

Векторизация¹⁸² это когда у вас есть цикл, который берет на вход несколько массивов и выдает, например, один массив данных. Тело цикла берет некоторые элементы из входных массивов, что-то делает с ними и помещает в выходной. Векторизация — это обрабатывать несколько элементов одновременно.

Векторизация — это не самая новая технология: автор сих строк видел её по крайней мере на линейке суперкомпьютеров Cray Y-MP от 1988, когда работал на его версии-«лайт» Cray Y-MP EL¹⁸³.

Например:

```
for (i = 0; i < 1024; i++)
{
    C[i] = A[i]*B[i];
}
```

Этот фрагмент кода берет элементы из A и B, перемножает и сохраняет результат в C.

Если представить, что каждый элемент массива — это 32-битный *int*, то их можно загружать сразу по 4 из A в 128-битный XMM-регистр, из B в другой XMM-регистр и выполнив инструкцию *PMULLD* (*Перемножить запакованные знаковые DWORD и сохранить младшую часть результата*) и *PMULHW* (*Перемножить запакованные знаковые DWORD и сохранить старшую часть результата*), можно получить 4 64-битных *произведения* сразу.

¹⁸¹<http://go.yurichev.com/17329>

¹⁸²[Wikipedia: vectorization](https://en.wikipedia.org/wiki/Vectorization)

¹⁸³Удаленно. Он находится в музее суперкомпьютеров: <http://go.yurichev.com/17081>

1.28. SIMD

Таким образом, тело цикла выполняется $1024/4$ раз вместо 1024, что в 4 раза меньше, и, конечно, быстрее.

Пример сложения

Некоторые компиляторы умеют делать автоматическую векторизацию в простых случаях, например, Intel C++¹⁸⁴.

Вот очень простая функция:

```
int f (int sz, int *ar1, int *ar2, int *ar3)
{
    for (int i=0; i<sz; i++)
        ar3[i]=ar1[i]+ar2[i];

    return 0;
};
```

Intel C++

Компилируем её при помощи Intel C++ 11.1.051 win32:

```
icl intel.cpp /QaxSSE2 /Faintel.asm /Ox
```

Имеем такое (в IDA):

```
; int __cdecl f(int, int *, int *, int *)
                public ?f@@YAHHPAH00@Z
?f@@YAHHPAH00@Z proc near

var_10 = dword ptr -10h
sz      = dword ptr  4
ar1     = dword ptr  8
ar2     = dword ptr 0Ch
ar3     = dword ptr 10h

    push     edi
    push     esi
    push     ebx
    push     esi
    mov     edx, [esp+10h+sz]
    test    edx, edx
    jle     loc_15B
    mov     eax, [esp+10h+ar3]
    cmp     edx, 6
    jle     loc_143
    cmp     eax, [esp+10h+ar2]
    jbe     short loc_36
    mov     esi, [esp+10h+ar2]
    sub     esi, eax
    lea     ecx, ds:0[edx*4]
    neg     esi
    cmp     ecx, esi
    jbe     short loc_55

loc_36: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+21
    cmp     eax, [esp+10h+ar2]
    jnb     loc_143
    mov     esi, [esp+10h+ar2]
    sub     esi, eax
    lea     ecx, ds:0[edx*4]
    cmp     esi, ecx
    jb     loc_143

loc_55: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+34
```

¹⁸⁴Еще о том, как Intel C++ умеет автоматически векторизовать циклы: [Excerpt: Effective Automatic Vectorization](#)

1.28. SIMD

```
cmp     eax, [esp+10h+ar1]
jbe     short loc_67
mov     esi, [esp+10h+ar1]
sub     esi, eax
neg     esi
cmp     ecx, esi
jbe     short loc_7F
```

loc_67: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+59

```
cmp     eax, [esp+10h+ar1]
jnb     loc_143
mov     esi, [esp+10h+ar1]
sub     esi, eax
cmp     esi, ecx
jb      loc_143
```

loc_7F: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+65

```
mov     edi, eax          ; edi = ar3
and     edi, 0Fh          ; ar3 выровнен по 16-байтной границе?
jz      short loc_9A      ; да
test    edi, 3
jnz     loc_162
neg     edi
add     edi, 10h
shr     edi, 2
```

loc_9A: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+84

```
lea     ecx, [edi+4]
cmp     edx, ecx
jl      loc_162
mov     ecx, edx
sub     ecx, edi
and     ecx, 3
neg     ecx
add     ecx, edx
test    edi, edi
jbe     short loc_D6
mov     ebx, [esp+10h+ar2]
mov     [esp+10h+var_10], ecx
mov     ecx, [esp+10h+ar1]
xor     esi, esi
```

loc_C1: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+CD

```
mov     edx, [ecx+esi*4]
add     edx, [ebx+esi*4]
mov     [eax+esi*4], edx
inc     esi
cmp     esi, edi
jb      short loc_C1
mov     ecx, [esp+10h+var_10]
mov     edx, [esp+10h+sz]
```

loc_D6: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+B2

```
mov     esi, [esp+10h+ar2]
lea     esi, [esi+edi*4] ; ar2+i*4 выровнен по 16-байтной границе?
test    esi, 0Fh
jz      short loc_109     ; да!
mov     ebx, [esp+10h+ar1]
mov     esi, [esp+10h+ar2]
```

loc_ED: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+105

```
movdqu  xmm1, xmmword ptr [ebx+edi*4] ; ar1+i*4
movdqu  xmm0, xmmword ptr [esi+edi*4] ; ar2+i*4 не выровнен по 16-байтной границе, так ↗
```

↙ что загружаем это в XMM0

```
padd    xmm1, xmm0
movdqa  xmmword ptr [eax+edi*4], xmm1 ; ar3+i*4
add     edi, 4
cmp     edi, ecx
jb      short loc_ED
jmp     short loc_127
```


1.28. SIMD

```
loc_109: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+E3
        mov     ebx, [esp+10h+ar1]
        mov     esi, [esp+10h+ar2]

loc_111: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+125
        movdqu  xmm0, xmmword ptr [ebx+edi*4]
        paddb   xmm0, xmmword ptr [esi+edi*4]
        movdqa  xmmword ptr [eax+edi*4], xmm0
        add     edi, 4
        cmp     edi, ecx
        jnb     short loc_111

loc_127: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+107
        ; f(int,int *,int *,int *)+164
        cmp     ecx, edx
        jnb     short loc_15B
        mov     esi, [esp+10h+ar1]
        mov     edi, [esp+10h+ar2]

loc_133: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+13F
        mov     ebx, [esi+ecx*4]
        add     ebx, [edi+ecx*4]
        mov     [eax+ecx*4], ebx
        inc     ecx
        cmp     ecx, edx
        jnb     short loc_133
        jmp     short loc_15B

loc_143: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+17
        ; f(int,int *,int *,int *)+3A ...
        mov     esi, [esp+10h+ar1]
        mov     edi, [esp+10h+ar2]
        xor     ecx, ecx

loc_14D: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+159
        mov     ebx, [esi+ecx*4]
        add     ebx, [edi+ecx*4]
        mov     [eax+ecx*4], ebx
        inc     ecx
        cmp     ecx, edx
        jnb     short loc_14D

loc_15B: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+A
        ; f(int,int *,int *,int *)+129 ...
        xor     eax, eax
        pop     ecx
        pop     ebx
        pop     esi
        pop     edi
        retn

loc_162: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+8C
        ; f(int,int *,int *,int *)+9F
        xor     ecx, ecx
        jmp     short loc_127
?f@@YAHHPAH00@Z endp
```

Инструкции, имеющие отношение к SSE2 это:

- **MOVDQU** (*Move Unaligned Double Quadword*) — она просто загружает 16 байт из памяти в XMM-регистр.
- **PADD** (*Add Packed Integers*) — складывает сразу 4 пары 32-битных чисел и оставляет в первом операнде результат. Кстати, если произойдет переполнение, то исключения не произойдет и никакие флаги не установятся, запишутся просто младшие 32 бита результата. Если один из операндов **PADD** — адрес значения в памяти, то требуется чтобы адрес был выровнен по 16-байтной границе. Если он не выровнен, произойдет исключение ¹⁸⁵.

¹⁸⁵О выравнивании данных см. также: [Wikipedia: Выравнивание данных](#)

1.28. SIMD

- **MOVDQA (Move Aligned Double Quadword)** — тоже что и **MOVDQU**, только подразумевает что адрес в памяти выровнен по 16-байтной границе. Если он не выровнен, произойдет исключение. **MOVDQA** работает быстрее чем **MOVDQU**, но требует вышеозначенного.

Итак, эти SSE2-инструкции исполняются только в том случае если еще осталось просуммировать 4 пары переменных типа *int* плюс если указатель *ar3* выровнен по 16-байтной границе.

Более того, если еще и *ar2* выровнен по 16-байтной границе, то будет выполняться этот фрагмент кода:

```
movdqu xmm0, xmmword ptr [ebx+edi*4] ; ar1+i*4
padd    xmm0, xmmword ptr [esi+edi*4] ; ar2+i*4
movdqa  xmmword ptr [eax+edi*4], xmm0 ; ar3+i*4
```

А иначе, значение из *ar2* загрузится в **XMM0** используя инструкцию **MOVDQU**, которая не требует выровненного указателя, зато может работать чуть медленнее:

```
movdqu xmm1, xmmword ptr [ebx+edi*4] ; ar1+i*4
movdqu xmm0, xmmword ptr [esi+edi*4] ; ar2+i*4 не выровнен по 16-байтной границе, так что ↴
    ↴ загружаем это в XMM0
padd    xmm1, xmm0
movdqa  xmmword ptr [eax+edi*4], xmm1 ; ar3+i*4
```

А во всех остальных случаях, будет исполняться код, который был бы, как если бы не была включена поддержка SSE2.

GCC

Но и GCC умеет кое-что векторизировать¹⁸⁶, если компилировать с опциями `-O3` и включить поддержку SSE2: `-msse2`.

Вот что вышло (GCC 4.4.1):

```
; f(int, int *, int *, int *)
      public _Z1fiPiS_S_
_Z1fiPiS_S_ proc near

var_18      = dword ptr -18h
var_14      = dword ptr -14h
var_10      = dword ptr -10h
arg_0       = dword ptr  8
arg_4       = dword ptr  0Ch
arg_8       = dword ptr  10h
arg_C       = dword ptr  14h

      push    ebp
      mov     ebp, esp
      push    edi
      push    esi
      push    ebx
      sub     esp, 0Ch
      mov     ecx, [ebp+arg_0]
      mov     esi, [ebp+arg_4]
      mov     edi, [ebp+arg_8]
      mov     ebx, [ebp+arg_C]
      test    ecx, ecx
      jle     short loc_80484D8
      cmp     ecx, 6
      lea     eax, [ebx+10h]
      ja      short loc_80484E8

loc_80484C1: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+4B
              ; f(int,int *,int *,int *)+61 ...
      xor     eax, eax
      nop
      lea     esi, [esi+0]
```

¹⁸⁶Подробнее о векторизации в GCC: <http://go.yurichev.com/17083>

1.28. SIMD

```
loc_80484C8: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+36
        mov     edx, [edi+eax*4]
        add     edx, [esi+eax*4]
        mov     [ebx+eax*4], edx
        add     eax, 1
        cmp     eax, ecx
        jnz     short loc_80484C8

loc_80484D8: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+17
        ; f(int,int *,int *,int *)+A5
        add     esp, 0Ch
        xor     eax, eax
        pop     ebx
        pop     esi
        pop     edi
        pop     ebp
        retn

        align 8

loc_80484E8: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+1F
        test    bl, 0Fh
        jnz     short loc_80484C1
        lea     edx, [esi+10h]
        cmp     ebx, edx
        jbe     loc_8048578

loc_80484F8: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+E0
        lea     edx, [edi+10h]
        cmp     ebx, edx
        ja      short loc_8048503
        cmp     edi, eax
        jbe     short loc_80484C1

loc_8048503: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+5D
        mov     eax, ecx
        shr     eax, 2
        mov     [ebp+var_14], eax
        shl     eax, 2
        test    eax, eax
        mov     [ebp+var_10], eax
        jz      short loc_8048547
        mov     [ebp+var_18], ecx
        mov     ecx, [ebp+var_14]
        xor     eax, eax
        xor     edx, edx
        nop

loc_8048520: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+9B
        movdqu  xmm1, xmmword ptr [edi+eax]
        movdqu  xmm0, xmmword ptr [esi+eax]
        add     edx, 1
        padd    xmm0, xmm1
        movdqa  xmmword ptr [ebx+eax], xmm0
        add     eax, 10h
        cmp     edx, ecx
        jb      short loc_8048520
        mov     ecx, [ebp+var_18]
        mov     eax, [ebp+var_10]
        cmp     ecx, eax
        jz      short loc_80484D8

loc_8048547: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+73
        lea     edx, ds:0[eax*4]
        add     esi, edx
        add     edi, edx
        add     ebx, edx
        lea     esi, [esi+0]

loc_8048558: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+CC
```

1.28. SIMD

```
        mov     edx, [edi]
        add     eax, 1
        add     edi, 4
        add     edx, [esi]
        add     esi, 4
        mov     [ebx], edx
        add     ebx, 4
        cmp     ecx, eax
        jg      short loc_8048558
        add     esp, 0Ch
        xor     eax, eax
        pop     ebx
        pop     esi
        pop     edi
        pop     ebp
        retn

loc_8048578: ; CODE XREF: f(int,int *,int *,int *)+52
        cmp     eax, esi
        jnb     loc_80484C1
        jmp     loc_80484F8
_Z1fiPiS_S_ endp
```

Почти то же самое, хотя и не так дотошно, как Intel C++.

Пример копирования блоков

Вернемся к простому примеру memcpy() ([1.16.2](#) (стр. 185)):

```
#include <stdio.h>

void my_memcpy (unsigned char* dst, unsigned char* src, size_t cnt)
{
    size_t i;
    for (i=0; i<cnt; i++)
        dst[i]=src[i];
};
```

И вот что делает оптимизирующий GCC 4.9.1:

Листинг 1.386: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
my_memcpy:
; RDI = адрес назначения
; RSI = исходный адрес
; RDX = размер блока
        test    rdx, rdx
        je      .L41
        lea     rax, [rdi+16]
        cmp     rsi, rax
        lea     rax, [rsi+16]
        setae   cl
        cmp     rdi, rax
        setae   al
        or      cl, al
        je      .L13
        cmp     rdx, 22
        jbe     .L13
        mov     rcx, rsi
        push    rbp
        push    rbx
        neg     rcx
        and     ecx, 15
        cmp     rcx, rdx
        cmova   rcx, rdx
        xor     eax, eax
        test    rcx, rcx
        je      .L4
        movzx   eax, BYTE PTR [rsi]
```

1.28. SIMD

```

cmp    rcx, 1
mov    BYTE PTR [rdi], al
je     .L15
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+1]
cmp    rcx, 2
mov    BYTE PTR [rdi+1], al
je     .L16
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+2]
cmp    rcx, 3
mov    BYTE PTR [rdi+2], al
je     .L17
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+3]
cmp    rcx, 4
mov    BYTE PTR [rdi+3], al
je     .L18
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+4]
cmp    rcx, 5
mov    BYTE PTR [rdi+4], al
je     .L19
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+5]
cmp    rcx, 6
mov    BYTE PTR [rdi+5], al
je     .L20
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+6]
cmp    rcx, 7
mov    BYTE PTR [rdi+6], al
je     .L21
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+7]
cmp    rcx, 8
mov    BYTE PTR [rdi+7], al
je     .L22
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+8]
cmp    rcx, 9
mov    BYTE PTR [rdi+8], al
je     .L23
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+9]
cmp    rcx, 10
mov    BYTE PTR [rdi+9], al
je     .L24
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+10]
cmp    rcx, 11
mov    BYTE PTR [rdi+10], al
je     .L25
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+11]
cmp    rcx, 12
mov    BYTE PTR [rdi+11], al
je     .L26
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+12]
cmp    rcx, 13
mov    BYTE PTR [rdi+12], al
je     .L27
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+13]
cmp    rcx, 15
mov    BYTE PTR [rdi+13], al
jne    .L28
movzx  eax, BYTE PTR [rsi+14]
mov    BYTE PTR [rdi+14], al
mov    eax, 15

```

.L4:

```

mov    r10, rdx
lea    r9, [rdx-1]
sub    r10, rcx
lea    r8, [r10-16]
sub    r9, rcx
shr    r8, 4
add    r8, 1
mov    r11, r8
sal    r11, 4
cmp    r9, 14
jbe    .L6

```

1.28. SIMD

```
    lea    rbp, [rsi+rcx]
    xor    r9d, r9d
    add    rcx, rdi
    xor    ebx, ebx

.L7:
    movdqa xmm0, XMMWORD PTR [rbp+0+r9]
    add    rbx, 1
    movups XMMWORD PTR [rcx+r9], xmm0
    add    r9, 16
    cmp    rbx, r8
    jb     .L7
    add    rax, r11
    cmp    r10, r11
    je     .L1

.L6:
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+rax], cl
    lea    rcx, [rax+1]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+1+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+1+rax], cl
    lea    rcx, [rax+2]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+2+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+2+rax], cl
    lea    rcx, [rax+3]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+3+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+3+rax], cl
    lea    rcx, [rax+4]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+4+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+4+rax], cl
    lea    rcx, [rax+5]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+5+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+5+rax], cl
    lea    rcx, [rax+6]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+6+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+6+rax], cl
    lea    rcx, [rax+7]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+7+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+7+rax], cl
    lea    rcx, [rax+8]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+8+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+8+rax], cl
    lea    rcx, [rax+9]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+9+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+9+rax], cl
    lea    rcx, [rax+10]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
    movzx  ecx, BYTE PTR [rsi+10+rax]
    mov    BYTE PTR [rdi+10+rax], cl
    lea    rcx, [rax+11]
    cmp    rdx, rcx
    jbe    .L1
```

1.28. SIMD

```
    movzx    ecx, BYTE PTR [rsi+11+rax]
    mov      BYTE PTR [rdi+11+rax], cl
    lea      rcx, [rax+12]
    cmp      rdx, rcx
    jbe      .L1
    movzx    ecx, BYTE PTR [rsi+12+rax]
    mov      BYTE PTR [rdi+12+rax], cl
    lea      rcx, [rax+13]
    cmp      rdx, rcx
    jbe      .L1
    movzx    ecx, BYTE PTR [rsi+13+rax]
    mov      BYTE PTR [rdi+13+rax], cl
    lea      rcx, [rax+14]
    cmp      rdx, rcx
    jbe      .L1
    movzx    edx, BYTE PTR [rsi+14+rax]
    mov      BYTE PTR [rdi+14+rax], dl
.L1:
    pop      rbx
    pop      rbp
.L41:
    rep ret
.L13:
    xor      eax, eax
.L3:
    movzx    ecx, BYTE PTR [rsi+rax]
    mov      BYTE PTR [rdi+rax], cl
    add      rax, 1
    cmp      rax, rdx
    jne      .L3
    rep ret
.L28:
    mov      eax, 14
    jmp      .L4
.L15:
    mov      eax, 1
    jmp      .L4
.L16:
    mov      eax, 2
    jmp      .L4
.L17:
    mov      eax, 3
    jmp      .L4
.L18:
    mov      eax, 4
    jmp      .L4
.L19:
    mov      eax, 5
    jmp      .L4
.L20:
    mov      eax, 6
    jmp      .L4
.L21:
    mov      eax, 7
    jmp      .L4
.L22:
    mov      eax, 8
    jmp      .L4
.L23:
    mov      eax, 9
    jmp      .L4
.L24:
    mov      eax, 10
    jmp      .L4
.L25:
    mov      eax, 11
    jmp      .L4
.L26:
    mov      eax, 12
    jmp      .L4
```

1.28. SIMD

```
.L27:
    mov     eax, 13
    jmp     .L4
```

1.28.2. Реализация strlen() при помощи SIMD

Прежде всего, следует заметить, что SIMD-инструкции можно вставлять в Си/Си++ код при помощи специальных макросов¹⁸⁷. В MSVC, часть находится в файле `intrin.h`.

Имеется возможность реализовать функцию `strlen()`¹⁸⁸ при помощи SIMD-инструкций, работающей в 2-2.5 раза быстрее обычной реализации. Эта функция будет загружать в XMM-регистр сразу 16 байт и проверять каждый на ноль

¹⁸⁹.

```
size_t strlen_sse2(const char *str)
{
    register size_t len = 0;
    const char *s=str;
    bool str_is_aligned=((unsigned int)str)&0xFFFFFFF0) == (unsigned int)str;

    if (str_is_aligned==false)
        return strlen (str);

    __m128i xmm0 = _mm_setzero_si128();
    __m128i xmm1;
    int mask = 0;

    for (;;)
    {
        xmm1 = _mm_load_si128((__m128i *)s);
        xmm1 = _mm_cmpeq_epi8(xmm1, xmm0);
        if ((mask = _mm_movemask_epi8(xmm1)) != 0)
        {
            unsigned long pos;
            _BitScanForward(&pos, mask);
            len += (size_t)pos;

            break;
        }
        s += sizeof(__m128i);
        len += sizeof(__m128i);
    };

    return len;
}
```

Компилируем в MSVC 2010 с опцией `/Ox`:

Листинг 1.387: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_pos$75552 = -4          ; size = 4
_str$ = 8                ; size = 4
?strlen_sse2@@YAIPBD@Z PROC ; strlen_sse2

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, -16      ; ffffffff0H
    mov     eax, DWORD PTR _str$[ebp]
    sub     esp, 12       ; 0000000cH
    push    esi
    mov     esi, eax
    and     esi, -16      ; ffffffff0H
    xor     edx, edx
    mov     ecx, eax
```

¹⁸⁷MSDN: MMX, SSE, and SSE2 Intrinsics

¹⁸⁸strlen() — стандартная функция Си для подсчета длины строки

¹⁸⁹Пример базируется на исходнике отсюда: <http://go.yurichev.com/17330>.

1.28. SIMD

```
cmp     esi, eax
je      SHORT $LN4@strlen_sse
lea     edx, DWORD PTR [eax+1]
npad    3 ; выровнять следующую метку
$LL11@strlen_sse:
mov     cl, BYTE PTR [eax]
inc     eax
test    cl, cl
jne     SHORT $LL11@strlen_sse
sub     eax, edx
pop     esi
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
$LN4@strlen_sse:
movdqa  xmm1, XMMWORD PTR [eax]
pxor    xmm0, xmm0
pcmpeqb xmm1, xmm0
pmovmskb eax, xmm1
test    eax, eax
jne     SHORT $LN9@strlen_sse
$LL3@strlen_sse:
movdqa  xmm1, XMMWORD PTR [ecx+16]
add     ecx, 16 ; 00000010H
pcmpeqb xmm1, xmm0
add     edx, 16 ; 00000010H
pmovmskb eax, xmm1
test    eax, eax
je      SHORT $LL3@strlen_sse
$LN9@strlen_sse:
bsf     eax, eax
mov     ecx, eax
mov     DWORD PTR _pos$75552[esp+16], eax
lea     eax, DWORD PTR [ecx+edx]
pop     esi
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
?strlen_sse2@@YAIPBD@Z ENDP ; strlen_sse2
```

Как это работает? Прежде всего, нужно определиться с целью этой ф-ции. Она вычисляет длину Си-строки, но можно сказать иначе — её задача это поиск нулевого байта, а затем вычисление его позиции относительно начала строки.

Итак, прежде всего, мы проверяем указатель `str`, выровнен ли он по 16-байтной границе. Если нет, то мы вызовем обычную реализацию `strlen()`.

Далее мы загружаем по 16 байт в регистр `XMM1` при помощи команды `MOVDQA`.

Наблюдательный читатель может спросить, почему в этом месте мы не можем использовать `MOVDQU`, которая может загружать откуда угодно невзирая на факт, выровнен ли указатель?

Да, можно было бы сделать вот как: если указатель выровнен, загружаем используя `MOVDQA`, иначе используем работающую чуть медленнее `MOVDQU`.

Однако здесь кроется не сразу заметная проблема, которая проявляется вот в чем:

В ОС линии [Windows NT](#) (и не только), память выделяется страницами по 4 KiB (4096 байт). Каждый win32-процесс якобы имеет в наличии 4 GiB, но на самом деле, только некоторые части этого адресного пространства присоединены к реальной физической памяти. Если процесс обратится к блоку памяти, которого не существует, сработает исключение. Так работает [VM](#)¹⁹⁰.

Так вот, функция, читающая сразу по 16 байт, имеет возможность нечаянно вылезти за границу выделенного блока памяти. Предположим, ОС выделила программе 8192 (0x2000) байт по адресу 0x008c0000. Таким образом, блок занимает байты с адреса 0x008c0000 по 0x008c1fff включительно.

За этим блоком, то есть начиная с адреса 0x008c2000 нет вообще ничего, т.е. ОС не выделяла там память. Обращение к памяти начиная с этого адреса вызовет исключение.

¹⁹⁰[wikipedia](#)

1.28. SIMD

И предположим, что программа хранит некую строку из, скажем, пяти символов почти в самом конце блока, что не является преступлением:

0x008c1ff8	'h'
0x008c1ff9	'e'
0x008c1ffa	'l'
0x008c1ffb	'l'
0x008c1ffc	'o'
0x008c1ffd	'\x00'
0x008c1ffe	здесь случайный мусор
0x008c1fff	здесь случайный мусор

В обычных условиях, программа вызывает `strlen()` передав ей указатель на строку 'hello' лежащую по адресу 0x008c1ff8. `strlen()` будет читать по одному байту до 0x008c1ffd, где ноль, и здесь она закончит работу.

Теперь, если мы напишем свою реализацию `strlen()` читающую сразу по 16 байт, с любого адреса, будь он выровнен по 16-байтной границе или нет, `MOVDQU` попытается загрузить 16 байт с адреса 0x008c1ff8 по 0x008c2008, и произойдет исключение. Это ситуация которой, конечно, хочется избежать.

Поэтому мы будем работать только с адресами, выровненными по 16 байт, что в сочетании со знанием что размер страницы [OC](#) также, как правило, выровнен по 16 байт, даст некоторую гарантию что наша функция не будет пытаться читать из мест в невыделенной памяти.

Вернемся к нашей функции.

`_mm_setzero_si128()` — это макрос, генерирующий `pxor xmm0, xmm0` — инструкция просто обнуляет регистр `XMM0`.

`_mm_load_si128()` — это макрос для `MOVDQA`, он просто загружает 16 байт по адресу из указателя в `XMM1`.

`_mm_cmpeq_epi8()` — это макрос для `PCMPEQB`, это инструкция, которая побайтово сравнивает значения из двух `XMM` регистров.

И если какой-то из байт равен другому, то в результирующем значении будет выставлено на месте этого байта 0xff, либо 0, если байты не были равны.

Например:

`XMM1: 0x11223344556677880000000000000000`

`XMM0: 0x11ab3444007877881111111111111111`

После исполнения `pcmpeqb xmm1, xmm0`, регистр `XMM1` содержит:

`XMM1: 0xff0000ff0000ffff0000000000000000`

Эта инструкция в нашем случае, сравнивает каждый 16-байтный блок с блоком состоящим из 16-и нулевых байт, выставленным в `XMM0` при помощи `pxor xmm0, xmm0`.

Следующий макрос `_mm_movemask_epi8()` — это инструкция `PMOVMASKB`.

Она очень удобна как раз для использования в паре с `PCMPEQB`.

`pmovmskb eax, xmm1`

Эта инструкция выставит самый первый бит `EAX` в единицу, если старший бит первого байта в регистре `XMM1` является единицей. Иными словами, если первый байт в регистре `XMM1` является 0xff, то первый бит в `EAX` будет также единицей, иначе нулем.

Если второй байт в регистре `XMM1` является 0xff, то второй бит в `EAX` также будет единицей. Иными словами, инструкция отвечает на вопрос, «какие из байт в `XMM1` имеют старший бит равный 1, или больше 0x7f?» В результате приготовит 16 бит и запишет в `EAX`. Остальные биты в `EAX` обнулятся.

Кстати, не забывайте также вот о какой особенности нашего алгоритма.

На вход может прийти 16 байт вроде:

15	14	13	12	11	10	9	3	2	1	0
'h'	'e'	'l'	'l'	'o'	0	мусор			0	мусор

Это строка 'hello', после нее терминирующий ноль, затем немного мусора в памяти.

1.29. 64 БИТА

Если мы загрузим эти 16 байт в XMM1 и сравним с нулевым XMM0, то в итоге получим такое ¹⁹¹:

XMM1: 0x0000ff00000000000000ff0000000000

Это означает, что инструкция сравнения обнаружила два нулевых байта, что и не удивительно.

PMOVMASKB в нашем случае подготовит EAX вот так:

0b0010000000100000.

Совершенно очевидно, что далее наша функция должна учитывать только первый встретившийся нулевой бит и игнорировать все остальное.

Следующая инструкция — BSF (*Bit Scan Forward*). Это инструкция находит самый младший бит во втором операнде и записывает его позицию в первый операнд.

EAX=0b0010000000100000

После исполнения этой инструкции `bsf eax, eax`, в EAX будет 5, что означает, что единица найдена в пятой позиции (считая с нуля).

Для использования этой инструкции, в MSVC также имеется макрос `_BitScanForward`.

А дальше все просто. Если нулевой байт найден, его позиция прибавляется к тому что мы уже насчитали и возвращается результат.

Почти всё.

Кстати, следует также отметить, что компилятор MSVC сгенерировал два тела цикла сразу, для оптимизации.

Кстати, в SSE 4.2 (который появился в Intel Core i7) все эти манипуляции со строками могут быть еще проще: <http://go.yurichev.com/17331>

1.29. 64 бита

1.29.1. x86-64

Это расширение x86-архитектуры до 64 бит.

С точки зрения начинающего reverse engineer-а, наиболее важные отличия от 32-битного x86 это:

- Почти все регистры (кроме FPU и SIMD) расширены до 64-бит и получили префикс R-. И еще 8 регистров добавлено. В итоге имеются эти GPR-ы: RAX, RBX, RCX, RDX, RBP, RSP, RSI, RDI, R8, R9, R10, R11, R12, R13, R14, R15.

К ним также можно обращаться так же, как и прежде. Например, для доступа к младшим 32 битам RAX можно использовать EAX:

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RAX ^{x64}							
				EAX			
						AX	
						AH	AL

У новых регистров R8-R15 также имеются их *младшие части*: R8D-R15D (младшие 32-битные части), R8W-R15W (младшие 16-битные части), R8L-R15L (младшие 8-битные части).

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R8							
				R8D			
						R8W	
						R8L	

Удвоено количество SIMD-регистров: с 8 до 16: XMM0-XMM15.

- В win64 передача всех параметров немного иная, это немного похоже на fastcall (6.1.3 (стр. 714)). Первые 4 аргумента записываются в регистры RCX, RDX, R8, R9, а остальные — в стек. Вызывающая функция также должна подготовить место из 32 байт чтобы вызываемая функция могла

¹⁹¹Здесь используется порядок с MSB до LSB¹⁹².

1.29. 64 БИТА

сохранить там первые 4 аргумента и использовать эти регистры по своему усмотрению. Короткие функции могут использовать аргументы прямо из регистров, но большие функции могут сохранять их значения на будущее.

Соглашение System V AMD64 ABI (Linux, *BSD, Mac OS X)[Michael Matz, Jan Hubicka, Andreas Jaeger, Mark Mitchell, *System V Application Binary Interface. AMD64 Architecture Processor Supplement*, (2013)]¹⁹³ также напоминает fastcall, использует 6 регистров RDI, RSI, RDX, RCX, R8, R9 для первых шести аргументов. Остальные передаются через стек.

См. также в соответствующем разделе о способах передачи аргументов через стек (6.1 (стр. 713)).

- `int` в Си/Си++ остается 32-битным для совместимости.
- Все указатели теперь 64-битные.

Из-за того, что регистров общего пользования теперь вдвое больше, у компиляторов теперь больше свободного места для маневра, называемого `register allocation`. Для нас это означает, что в итоговом коде будет меньше локальных переменных.

Для примера, функция вычисляющая первый S-блок алгоритма шифрования DES, она обрабатывает сразу 32/64/128/256 значений, в зависимости от типа `DES_type` (`uint32`, `uint64`, SSE2 или AVX), методом `bitslice` DES (больше об этом методе читайте здесь (1.28 (стр. 397))):

```
/*
 * Generated S-box files.
 *
 * This software may be modified, redistributed, and used for any purpose,
 * so long as its origin is acknowledged.
 *
 * Produced by Matthew Kwan - March 1998
 */

#ifdef _WIN64
#define DES_type unsigned __int64
#else
#define DES_type unsigned int
#endif

void
s1 (
    DES_type    a1,
    DES_type    a2,
    DES_type    a3,
    DES_type    a4,
    DES_type    a5,
    DES_type    a6,
    DES_type    *out1,
    DES_type    *out2,
    DES_type    *out3,
    DES_type    *out4
) {
    DES_type    x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8;
    DES_type    x9, x10, x11, x12, x13, x14, x15, x16;
    DES_type    x17, x18, x19, x20, x21, x22, x23, x24;
    DES_type    x25, x26, x27, x28, x29, x30, x31, x32;
    DES_type    x33, x34, x35, x36, x37, x38, x39, x40;
    DES_type    x41, x42, x43, x44, x45, x46, x47, x48;
    DES_type    x49, x50, x51, x52, x53, x54, x55, x56;

    x1 = a3 & ~a5;
    x2 = x1 ^ a4;
    x3 = a3 & ~a4;
    x4 = x3 | a5;
    x5 = a6 & x4;
    x6 = x2 ^ x5;
    x7 = a4 & ~a5;
    x8 = a3 ^ a4;
    x9 = a6 & ~x8;
    x10 = x7 ^ x9;
    x11 = a2 | x10;
```

¹⁹³Также доступно здесь: <https://software.intel.com/sites/default/files/article/402129/mpx-linux64-abi.pdf>

1.29. 64 БИТА

```
x12 = x6 ^ x11;
x13 = a5 ^ x5;
x14 = x13 & x8;
x15 = a5 & ~a4;
x16 = x3 ^ x14;
x17 = a6 | x16;
x18 = x15 ^ x17;
x19 = a2 | x18;
x20 = x14 ^ x19;
x21 = a1 & x20;
x22 = x12 ^ ~x21;
*out2 ^= x22;
x23 = x1 | x5;
x24 = x23 ^ x8;
x25 = x18 & ~x2;
x26 = a2 & ~x25;
x27 = x24 ^ x26;
x28 = x6 | x7;
x29 = x28 ^ x25;
x30 = x9 ^ x24;
x31 = x18 & ~x30;
x32 = a2 & x31;
x33 = x29 ^ x32;
x34 = a1 & x33;
x35 = x27 ^ x34;
*out4 ^= x35;
x36 = a3 & x28;
x37 = x18 & ~x36;
x38 = a2 | x3;
x39 = x37 ^ x38;
x40 = a3 | x31;
x41 = x24 & ~x37;
x42 = x41 | x3;
x43 = x42 & ~a2;
x44 = x40 ^ x43;
x45 = a1 & ~x44;
x46 = x39 ^ ~x45;
*out1 ^= x46;
x47 = x33 & ~x9;
x48 = x47 ^ x39;
x49 = x4 ^ x36;
x50 = x49 & ~x5;
x51 = x42 | x18;
x52 = x51 ^ a5;
x53 = a2 & ~x52;
x54 = x50 ^ x53;
x55 = a1 | x54;
x56 = x48 ^ ~x55;
*out3 ^= x56;
}
```

Здесь много локальных переменных. Конечно, далеко не все они будут в локальном стеке. Компилируем обычным MSVC 2008 с опцией /Ox:

Листинг 1.388: Оптимизирующий MSVC 2008

```
PUBLIC      _s1
; Function compile flags: /Ogtpy
_TEXT      SEGMENT
_x6$ = -20      ; size = 4
_x3$ = -16      ; size = 4
_x1$ = -12      ; size = 4
_x8$ = -8       ; size = 4
_x4$ = -4       ; size = 4
_a1$ = 8        ; size = 4
_a2$ = 12       ; size = 4
_a3$ = 16       ; size = 4
_x33$ = 20      ; size = 4
_x7$ = 20       ; size = 4
_a4$ = 20       ; size = 4
```

1.29. 64 БИТА

```

_a5$ = 24          ; size = 4
tv326 = 28         ; size = 4
_x36$ = 28         ; size = 4
_x28$ = 28         ; size = 4
_a6$ = 28          ; size = 4
_out1$ = 32        ; size = 4
_x24$ = 36         ; size = 4
_out2$ = 36        ; size = 4
_out3$ = 40        ; size = 4
_out4$ = 44        ; size = 4
_s1 PROC
    sub     esp, 20          ; 00000014H
    mov     edx, DWORD PTR _a5$[esp+16]
    push    ebx
    mov     ebx, DWORD PTR _a4$[esp+20]
    push    ebp
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _a3$[esp+28]
    push    edi
    mov     edi, ebx
    not     edi
    mov     ebp, edi
    and     edi, DWORD PTR _a5$[esp+32]
    mov     ecx, edx
    not     ecx
    and     ebp, esi
    mov     eax, ecx
    and     eax, esi
    and     ecx, ebx
    mov     DWORD PTR _x1$[esp+36], eax
    xor     eax, ebx
    mov     esi, ebp
    or      esi, edx
    mov     DWORD PTR _x4$[esp+36], esi
    and     esi, DWORD PTR _a6$[esp+32]
    mov     DWORD PTR _x7$[esp+32], ecx
    mov     edx, esi
    xor     edx, eax
    mov     DWORD PTR _x6$[esp+36], edx
    mov     edx, DWORD PTR _a3$[esp+32]
    xor     edx, ebx
    mov     ebx, esi
    xor     ebx, DWORD PTR _a5$[esp+32]
    mov     DWORD PTR _x8$[esp+36], edx
    and     ebx, edx
    mov     ecx, edx
    mov     edx, ebx
    xor     edx, ebp
    or      edx, DWORD PTR _a6$[esp+32]
    not     ecx
    and     ecx, DWORD PTR _a6$[esp+32]
    xor     edx, edi
    mov     edi, edx
    or      edi, DWORD PTR _a2$[esp+32]
    mov     DWORD PTR _x3$[esp+36], ebp
    mov     ebp, DWORD PTR _a2$[esp+32]
    xor     edi, ebx
    and     edi, DWORD PTR _a1$[esp+32]
    mov     ebx, ecx
    xor     ebx, DWORD PTR _x7$[esp+32]
    not     edi
    or      ebx, ebp
    xor     edi, ebx
    mov     ebx, edi
    mov     edi, DWORD PTR _out2$[esp+32]
    xor     ebx, DWORD PTR [edi]
    not     eax
    xor     ebx, DWORD PTR _x6$[esp+36]
    and     eax, edx
    mov     DWORD PTR [edi], ebx

```

1.29. 64 БИТА

```

mov     ebx, DWORD PTR _x7$[esp+32]
or      ebx, DWORD PTR _x6$[esp+36]
mov     edi, esi
or      edi, DWORD PTR _x1$[esp+36]
mov     DWORD PTR _x28$[esp+32], ebx
xor     edi, DWORD PTR _x8$[esp+36]
mov     DWORD PTR _x24$[esp+32], edi
xor     edi, ecx
not     edi
and     edi, edx
mov     ebx, edi
and     ebx, ebp
xor     ebx, DWORD PTR _x28$[esp+32]
xor     ebx, eax
not     eax
mov     DWORD PTR _x33$[esp+32], ebx
and     ebx, DWORD PTR _a1$[esp+32]
and     eax, ebp
xor     eax, ebx
mov     ebx, DWORD PTR _out4$[esp+32]
xor     eax, DWORD PTR [ebx]
xor     eax, DWORD PTR _x24$[esp+32]
mov     DWORD PTR [ebx], eax
mov     eax, DWORD PTR _x28$[esp+32]
and     eax, DWORD PTR _a3$[esp+32]
mov     ebx, DWORD PTR _x3$[esp+36]
or      edi, DWORD PTR _a3$[esp+32]
mov     DWORD PTR _x36$[esp+32], eax
not     eax
and     eax, edx
or      ebx, ebp
xor     ebx, eax
not     eax
and     eax, DWORD PTR _x24$[esp+32]
not     ebp
or      eax, DWORD PTR _x3$[esp+36]
not     esi
and     ebp, eax
or      eax, edx
xor     eax, DWORD PTR _a5$[esp+32]
mov     edx, DWORD PTR _x36$[esp+32]
xor     edx, DWORD PTR _x4$[esp+36]
xor     ebp, edi
mov     edi, DWORD PTR _out1$[esp+32]
not     eax
and     eax, DWORD PTR _a2$[esp+32]
not     ebp
and     ebp, DWORD PTR _a1$[esp+32]
and     edx, esi
xor     eax, edx
or      eax, DWORD PTR _a1$[esp+32]
not     ebp
xor     ebp, DWORD PTR [edi]
not     ecx
and     ecx, DWORD PTR _x33$[esp+32]
xor     ebp, ebx
not     eax
mov     DWORD PTR [edi], ebp
xor     eax, ecx
mov     ecx, DWORD PTR _out3$[esp+32]
xor     eax, DWORD PTR [ecx]
pop     edi
pop     esi
xor     eax, ebx
pop     ebp
mov     DWORD PTR [ecx], eax
pop     ebx
add     esp, 20
ret     0

```

_s1 ENDP

1.29. 64 БИТА

5 переменных компилятору пришлось разместить в локальном стеке.

Теперь попробуем то же самое только в 64-битной версии MSVC 2008:

Листинг 1.389: Оптимизирующий MSVC 2008

```
a1$ = 56
a2$ = 64
a3$ = 72
a4$ = 80
x36$1$ = 88
a5$ = 88
a6$ = 96
out1$ = 104
out2$ = 112
out3$ = 120
out4$ = 128
s1 PROC
$LN3:
    mov     QWORD PTR [rsp+24], rbx
    mov     QWORD PTR [rsp+32], rbp
    mov     QWORD PTR [rsp+16], rdx
    mov     QWORD PTR [rsp+8], rcx
    push    rsi
    push    rdi
    push    r12
    push    r13
    push    r14
    push    r15
    mov     r15, QWORD PTR a5$[rsp]
    mov     rcx, QWORD PTR a6$[rsp]
    mov     rbp, r8
    mov     r10, r9
    mov     rax, r15
    mov     rdx, rbp
    not     rax
    xor     rdx, r9
    not     r10
    mov     r11, rax
    and     rax, r9
    mov     rsi, r10
    mov     QWORD PTR x36$1$[rsp], rax
    and     r11, r8
    and     rsi, r8
    and     r10, r15
    mov     r13, rdx
    mov     rbx, r11
    xor     rbx, r9
    mov     r9, QWORD PTR a2$[rsp]
    mov     r12, rsi
    or      r12, r15
    not     r13
    and     r13, rcx
    mov     r14, r12
    and     r14, rcx
    mov     rax, r14
    mov     r8, r14
    xor     r8, rbx
    xor     rax, r15
    not     rbx
    and     rax, rdx
    mov     rdi, rax
    xor     rdi, rsi
    or      rdi, rcx
    xor     rdi, r10
    and     rbx, rdi
    mov     rcx, rdi
    or      rcx, r9
    xor     rcx, rax
    mov     rax, r13
    xor     rax, QWORD PTR x36$1$[rsp]
```


1.29. 64 БИТА

```

and    rcx, QWORD PTR a1$[rsp]
or     rax, r9
not    rcx
xor    rcx, rax
mov    rax, QWORD PTR out2$[rsp]
xor    rcx, QWORD PTR [rax]
xor    rcx, r8
mov    QWORD PTR [rax], rcx
mov    rax, QWORD PTR x36$1$[rsp]
mov    rcx, r14
or     rax, r8
or     rcx, r11
mov    r11, r9
xor    rcx, rdx
mov    QWORD PTR x36$1$[rsp], rax
mov    r8, rsi
mov    rdx, rcx
xor    rdx, r13
not    rdx
and    rdx, rdi
mov    r10, rdx
and    r10, r9
xor    r10, rax
xor    r10, rbx
not    rbx
and    rbx, r9
mov    rax, r10
and    rax, QWORD PTR a1$[rsp]
xor    rbx, rax
mov    rax, QWORD PTR out4$[rsp]
xor    rbx, QWORD PTR [rax]
xor    rbx, rcx
mov    QWORD PTR [rax], rbx
mov    rbx, QWORD PTR x36$1$[rsp]
and    rbx, rbp
mov    r9, rbx
not    r9
and    r9, rdi
or     r8, r11
mov    rax, QWORD PTR out1$[rsp]
xor    r8, r9
not    r9
and    r9, rcx
or     rdx, rbp
mov    rbp, QWORD PTR [rsp+80]
or     r9, rsi
xor    rbx, r12
mov    rcx, r11
not    rcx
not    r14
not    r13
and    rcx, r9
or     r9, rdi
and    rbx, r14
xor    r9, r15
xor    rcx, rdx
mov    rdx, QWORD PTR a1$[rsp]
not    r9
not    rcx
and    r13, r10
and    r9, r11
and    rcx, rdx
xor    r9, rbx
mov    rbx, QWORD PTR [rsp+72]
not    rcx
xor    rcx, QWORD PTR [rax]
or     r9, rdx
not    r9
xor    rcx, r8
mov    QWORD PTR [rax], rcx

```

1.29. 64 БИТА

```
mov    rax, QWORD PTR out3$[rsp]
xor     r9, r13
xor     r9, QWORD PTR [rax]
xor     r9, r8
mov     QWORD PTR [rax], r9
pop     r15
pop     r14
pop     r13
pop     r12
pop     rdi
pop     rsi
ret     0
s1      ENDP
```

Компилятор ничего не выделил в локальном стеке, а x36 это синоним для a5.

Кстати, существуют процессоры с еще большим количеством [GPR](#), например, Itanium — 128 регистров.

1.29.2. ARM

64-битные инструкции появились в ARMv8.

1.29.3. Числа с плавающей запятой

О том как происходит работа с числами с плавающей запятой в x86-64, читайте здесь: [1.30](#) (стр. [418](#)).

1.29.4. Критика 64-битной архитектуры

Некоторые люди иногда сетуют на то что указатели теперь 64-битные: ведь теперь для хранения всех указателей нужно в 2 раза больше места в памяти, в т.ч. и в кэш-памяти, не смотря на то что x64-процессоры могут адресовать только 48 бит внешней [RAM](#)¹⁹⁴.

Указатели уже настолько вышли из моды, что мне приходится вступать по этому поводу в споры. Если говорить о моем 64-разрядном компьютере, то, если действительно заботиться о производительности моего компьютера, мне приходится признать, что лучше отказаться от использования указателей, поскольку на моей машине 64-битные регистры, но всего 2 гигабайта оперативной памяти. Поэтому у указателя никогда не бывает больше 32 значащих битов. Но каждый раз, когда я использую указатель, это стоит мне 64 бита, и это удваивает размер моей структуры данных. Более того, это еще идет и в кэш-память, и половины кэш-памяти как не бывало, а за это приходится платить - кэш-память дорогая.

Поэтому я на самом деле пытаюсь сейчас пробовать новые варианты, то есть мне приходится вместо указателей использовать массивы. Я создаю сложные макросы, то есть создаю видимость использования указателей, хотя на самом деле их не использую.

(Дональд Кнут в “Кодеры за работой. Размышления о ремесле программиста”.)

Некоторые люди делают свои аллокаторы памяти. Интересен случай с [CryptoMiniSat](#)¹⁹⁵. Эта программа довольно редко использует более 4GiB памяти, но она очень активно использует указатели. Так что, на 32-битной платформе она требовала меньше памяти, чем на 64-битной. Чтобы справиться с этой проблемой, автор создал свой аллокатор (в файлах *clauseallocator.(h|cpp)*), который позволяет иметь доступ к выделенной памяти используя 32-битные идентификаторы вместо 64-битных указателей.

¹⁹⁴Random-Access Memory

¹⁹⁵<https://github.com/msoos/cryptominisat/>

1.30. Работа с числами с плавающей запятой (SIMD)

Разумеется, FPU остался в x86-совместимых процессорах в то время, когда ввели расширения [SIMD](#). [SIMD](#)-расширения (SSE2) позволяют удобнее работать с числами с плавающей запятой.

Формат чисел остается тот же (IEEE 754).

Так что современные компиляторы (включая те, что компилируют под x86-64) обычно используют [SIMD](#)-инструкции вместо FPU-инструкций.

Это, можно сказать, хорошая новость, потому что работать с ними легче.

Примеры будем использовать из секции о FPU: [1.19](#) (стр. [208](#)).

1.30.1. Простой пример

```
#include <stdio.h>

double f (double a, double b)
{
    return a/3.14 + b*4.1;
};

int main()
{
    printf ("%f\n", f(1.2, 3.4));
};
```

x64

Листинг 1.390: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
__real@4010666666666666 DQ 0401066666666666r    ; 4.1
__real@40091eb851eb851f DQ 040091eb851eb851fr   ; 3.14

a$ = 8
b$ = 16
f      PROC
        divsd    xmm0, QWORD PTR __real@40091eb851eb851f
        mulsd    xmm1, QWORD PTR __real@4010666666666666r
        addsd    xmm0, xmm1
        ret      0
f      ENDP
```

Собственно, входные значения с плавающей запятой передаются через регистры XMM0-XMM3, а остальные — через стек [196](#).

a передается через XMM0, b — через XMM1. Но XMM-регистры (как мы уже знаем из секции о [SIMD: 1.28](#) (стр. [396](#))) 128-битные, а значения типа *double* — 64-битные, так что используется только младшая половина регистра.

DIVSD это SSE-инструкция, означает «Divide Scalar Double-Precision Floating-Point Values», и просто делит значение типа *double* на другое, лежащие в младших половинах операндов.

Константы закодированы компилятором в формате IEEE 754.

MULSD и ADDSD работают так же, только производят умножение и сложение.

Результат работы функции типа *double* функция оставляет в регистре XMM0.

Как работает неоптимизирующий MSVC:

Листинг 1.391: MSVC 2012 x64

```
__real@4010666666666666 DQ 0401066666666666r    ; 4.1
__real@40091eb851eb851f DQ 040091eb851eb851fr   ; 3.14
```

¹⁹⁶[MSDN: Parameter Passing](#)

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

```
a$ = 8
b$ = 16
f      PROC
    movsdx  QWORD PTR [rsp+16], xmm1
    movsdx  QWORD PTR [rsp+8], xmm0
    movsdx  xmm0, QWORD PTR a$[rsp]
    divsd   xmm0, QWORD PTR __real@40091eb851eb851f
    movsdx  xmm1, QWORD PTR b$[rsp]
    mulsd   xmm1, QWORD PTR __real@4010666666666666
    addsd   xmm0, xmm1
    ret     0
f      ENDP
```

Чуть более избыточно. Входные аргументы сохраняются в «shadow space» (1.10.2 (стр. 101)), причем, только младшие половины регистров, т.е. только 64-битные значения типа *double*. Результат работы компилятора GCC точно такой же.

x86

Скомпилируем этот пример также и под x86. MSVC 2012 даже генерируя под x86, использует SSE2-инструкции:

Листинг 1.392: Неоптимизирующий MSVC 2012 x86

```
tv70 = -8      ; size = 8
_a$ = 8        ; size = 8
_b$ = 16       ; size = 8
_f      PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    sub     esp, 8
    movsd   xmm0, QWORD PTR _a$[ebp]
    divsd   xmm0, QWORD PTR __real@40091eb851eb851f
    movsd   xmm1, QWORD PTR _b$[ebp]
    mulsd   xmm1, QWORD PTR __real@4010666666666666
    addsd   xmm0, xmm1
    movsd   QWORD PTR tv70[ebp], xmm0
    fld     QWORD PTR tv70[ebp]
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_f      ENDP
```

Листинг 1.393: Оптимизирующий MSVC 2012 x86

```
tv67 = 8       ; size = 8
_a$ = 8        ; size = 8
_b$ = 16       ; size = 8
_f      PROC
    movsd   xmm1, QWORD PTR _a$[esp-4]
    divsd   xmm1, QWORD PTR __real@40091eb851eb851f
    movsd   xmm0, QWORD PTR _b$[esp-4]
    mulsd   xmm0, QWORD PTR __real@4010666666666666
    addsd   xmm1, xmm0
    movsd   QWORD PTR tv67[esp-4], xmm1
    fld     QWORD PTR tv67[esp-4]
    ret     0
_f      ENDP
```

Код почти такой же, правда есть пара отличий связанных с соглашениями о вызовах:

- 1) аргументы передаются не в XMM-регистрах, а через стек, как и прежде, в примерах с FPU (1.19 (стр. 208));
- 2) результат работы функции возвращается через ST(0) — для этого он через стек (через локальную переменную tv) копируется из XMM-регистра в ST(0).

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

Попробуем сооптимизированный пример в OllyDbg:

The screenshot displays the OllyDbg interface with the following components:

- Assembly Window:** Shows assembly instructions for the CPU's main thread. Key instructions include:
 - `MOVSD XMM1, QWORD PTR SS:[ESP+4]` (Address 01331006)
 - `DIUSD XMM1, QWORD PTR DS:[13320C0]` (Address 0133100E)
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR SS:[ESP+0C]` (Address 01331014)
 - `MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320D0]` (Address 0133101C)
 - `ADDSD XMM1, XMM0` (Address 01331020)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+4], XMM1` (Address 01331026)
 - `FLOD QWORD PTR SS:[ESP+4]` (Address 0133102A)
 - `RETN` (Address 0133102B)
 - `INT3` (Address 0133102C)
 - `INT3` (Address 0133102D)
 - `INT3` (Address 0133102E)
 - `INT3` (Address 0133102F)
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320C8]` (Address 01331030)
 - `SUB ESP, 10` (Address 01331038)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+8], XMM0` (Address 0133103B)
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320B8]` (Address 01331041)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP], XMM0` (Address 01331049)
 - `CALL 01331000` (Address 0133104E)
 - `FSTP QWORD PTR SS:[ESP+8]` (Address 01331053)
 - `ADD ESP, 8` (Address 01331057)
 - `PUSH OFFSET 01333000` (Address 0133105A)
 - `CALL QWORD PTR DS:[&MSUCR110.printf]` (Address 0133105F)
 - `ADD ESP, 0C` (Address 01331065)
 - `XOR EAX, EAX` (Address 01331068)
 - `RETN` (Address 0133106A)
 - `INT3` (Address 0133106B)
 - `INT3` (Address 0133106C)
 - `INT3` (Address 0133106D)
 - `INT3` (Address 0133106E)
 - `INT3` (Address 0133106F)
 - `MOV EAX, 5A4D` (Address 01331070)
 - `CMP WORD PTR DS:[<STRUCT IMAGE_DOS_HEAD` (Address 01331075)
 - `JE SHORT 01331082` (Address 0133107C)
 - `XOR EAX, EAX` (Address 0133107E)
 - `JMP SHORT 013310B6` (Address 01331080)
 - `MOV ECX, QWORD PTR DS:[133003C]` (Address 01331082)
 - `CMP QWORD PTR DS:[ECX+<STRUCT IMAGE_DOS` (Address 01331088)
 - `JNE SHORT 0133107E` (Address 01331092)
 - `MOV EAX, 10B` (Address 01331094)
 - `CMP QWORD PTR DS:[ECX+1330018], 0` (Address 01331099)
- Registers (FPU) Window:** Shows the state of floating-point registers. XMM0 and XMM1 contain values:
 - XMM0: 0.0, 1.2000000000000000
 - XMM1: 0.0, 1.2000000000000000
- Disassembly Window:** Shows the disassembly of the instruction at address 01331053: `RETURN from simple.01331000 to simple.013`.

Рис. 1.105: OllyDbg: MOVSD загрузила значение a в XMM1

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

The screenshot displays the OllyDbg interface with the following components:

- Assembly Window:** Shows instructions at addresses 01331000 to 01331099. Key instructions include:
 - `F20F104C24 0 MOVSD XMM1,QWORD PTR SS:[ESP+4]`
 - `F20F5E00 C02 DIVSD XMM1,QWORD PTR DS:[13320C0]` (This instruction is highlighted, indicating the division operation).
 - `F20F104424 0 MOVSD XMM0,QWORD PTR SS:[ESP+0C]`
 - `F20F5905 002 MULSD XMM0,QWORD PTR DS:[13320D0]`
 - `F20F58C8 ADDSD XMM1,XMM0`
 - `F20F114C24 0 MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+4],XMM1`
 - `DD4424 04 FLD QWORD PTR SS:[ESP+4]`
 - `83EC 10 SUB ESP,10`
 - `F20F114424 0 MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+8],XMM0`
 - `F20F1005 B82 MOVSD XMM0,QWORD PTR DS:[13320B8]`
 - `F20F110424 MOVSD QWORD PTR SS:[ESP],XMM0`
 - `E8 A0FFFFFF CALL 01331000`
 - `DD5C24 08 FSTP QWORD PTR SS:[ESP+8]`
 - `83C4 08 ADD ESP,8`
 - `68 00303301 PUSH OFFSET 01333000`
 - `FF15 30203300 CALL QWORD PTR DS:[&MSUCR110.printf]`
 - `83C4 0C ADD ESP,0C`
 - `33C0 XOR EAX,EAX`
 - `C3 RETN`
 - `CC INT3`
 - `CC INT3`
 - `CC INT3`
 - `CC INT3`
 - `CC INT3`
 - `B8 405A0000 MOV EAX,5A40`
 - `66:3905 0000 CMP WORD PTR DS:[<STRUCT IMAGE_DOS_HEAD`
 - `74 04 JE SHORT 01331082`
 - `33C0 XOR EAX,EAX`
 - `EB 34 JMP SHORT 013310B6`
 - `8B0D 3C003300 MOV ECX,DWORD PTR DS:[133003C]`
 - `81B9 00003300 CMP DWORD PTR DS:[ECX+<STRUCT IMAGE_DOS`
 - `75 EA JNE SHORT 0133107E`
 - `B8 0B010000 MOV EAX,10B`
 - `66:3931 1800 CMP WORD PTR DS:[ECX+1330018]`
- Registers (FPU) Window:** Shows the state of the FPU registers. The `ST0` register contains the value `0.3821656050955414`, which is the quotient of the division operation. Other registers like `ST1` through `ST7` are empty.
- Stack Window:** Shows the stack contents. The return address `0017FBC0` is visible, along with other stack data.

Рис. 1.106: OllyDbg: DIVSD вычислила **quotient** и оставила его в XMM1

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

The screenshot displays the OllyDbg interface with three main panes:

- Assembly Window:** Shows instructions starting from address 01331000. Key instructions include:
 - `MOVSD XMM1, QWORD PTR SS:[ESP+4]`
 - `MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320C8]`
 - `ADDSD XMM1, XMM0`
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320B8]`
 - `MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[ESP], XMM0`
 - `ADDSD XMM1, XMM0`
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[133003C]`
 - `MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[ECX+<STRUCT IMAGE_DOS_`
- Registers (FPU) Window:** Shows the state of the floating-point unit registers. XMM0 is highlighted with the value `13.940000000000000`. Other registers like XMM1 through XMM7 are shown with zero values.
- Memory Dump Window:** Shows the hex dump of memory starting at address 01333000. The dump shows a sequence of bytes, including `00 00 00 00` and `00 00 00 00`.

Рис. 1.107: OllyDbg: MULSD вычислила **product** и оставила его в XMM0

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

CPU - main thread, module simple

Address	Disassembly	Comment
01331000	MOVSD XMM1, QWORD PTR SS:[ESP+4]	
01331006	DIVSD XMM1, QWORD PTR DS:[13320C0]	
0133100E	MOVSD XMM0, QWORD PTR SS:[ESP+0C]	
01331014	MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320D0]	
0133101C	ADDSD XMM1, XMM0	
01331020	MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+4], XMM1	
01331026	FLOD QWORD PTR SS:[ESP+4]	
0133102A	RET	
0133102B	CC	
0133102C	CC	
0133102D	CC	
0133102E	CC	
0133102F	CC	
01331030	MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320C8]	
01331036	SUB ESP, 10	
0133103B	MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+8], XMM0	
01331041	MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320B8]	
01331049	MOVSD QWORD PTR SS:[ESP], XMM0	
0133104E	CALL 01331000	
01331053	FSTP QWORD PTR SS:[ESP+8]	
01331057	ADD ESP, 8	
0133105A	PUSH OFFSET 01333000	
0133105F	CALL QWORD PTR DS:[&MSUCR110.printf]	
01331065	ADD ESP, 0C	
01331068	XOR EAX, EAX	
0133106A	CC	
0133106B	INT3	
0133106C	CC	
0133106D	CC	
0133106E	CC	
0133106F	CC	
01331070	MOV EAX, 5A40	
01331075	CMP WORD PTR DS:[<STRUCT IMAGE_DOS_HEAD	
01331077	JE SHORT 01331082	
0133107E	XOR EAX, EAX	
01331080	JMP SHORT 013310B6	
01331082	MOV ECX, DWORD PTR DS:[133003C]	
01331088	CMP DWORD PTR DS:[ECX+<STRUCT IMAGE_DOS	
01331092	JNE SHORT 0133107E	
01331094	MOV EAX, 10B	
01331099	CMP WORD PTR DS:[ECX+1330018], 0	

Registers (FPU)

Register	Value
EAX	68F88634 MSUCR110.__initenv
ECX	0066D530
EDX	00000000
EBX	00000000
ESP	0017FBC0
EBP	0017FC10
ESI	00000001
EDI	00000000
EIP	01331020 simple.01331020
C 0	ES 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
P 0	CS 0023 32bit 0(FFFFFFFF)
A 0	SS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
Z 0	DS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
S 0	FS 0053 32bit 7EFD0000(FFF)
T 0	GS 002B 32bit 0(FFFFFFFF)
0 0	LastErr 00000000 ERROR_SUCCESS
EFL	00000202 (NO,NB,NE,A,NS,PO,GE,G)
ST0	empty 0.0
ST1	empty 0.0
ST2	empty 0.0
ST3	empty 0.0
ST4	empty 0.0
ST5	empty 0.0
ST6	empty 0.0
ST7	empty 0.0
FST	0000 Cond 0 0 0 0 Err 0 0 0 0 0 0 0 0 (GT)
FCW	027F Prec NEAR,53 Mask 1 1 1 1 1 1
Last cmnd	0000:00000000
XMM0	0.0 13.94000000000000
XMM1	0.0 14.32216560509554
XMM2	0.0
XMM3	0.0
XMM4	0.0
XMM5	0.0
XMM6	0.0
XMM7	0.0
MXCSR	00001FA0 FZ 0 DZ 0 Err 1 0 0 0 0 0 Rnd NEAR Mask 1 1 1 1 1 1

Stack [0017FBC4]=1.2000000000000000

Address	Hex dump	ASCII (A)
01333000	25 66 0A 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	%f
01333010	01 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333020	FE FF FF FF FF FF FF BB 15 5B 87 44 EA A4 78	
01333030	00 00 00 00 00 00 00 00 01 00 00 00 00 AC 66 00	
01333040	30 D5 66 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333050	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333060	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333070	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333080	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333090	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330A0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330B0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330C0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330D0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330E0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
013330F0	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333100	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	
01333110	00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00	

0017FBC0 01331053 S>30 RETURN from simple.01331000 to simple.01331053

0017FBC8 33333333 3333 RETURN from simple.01331030 to simple.01331053

0017FBCD 0066AC00 mf

0017FBED 0066D530 0ff

0017FBE4 874CE9AB nwl3

0017FBE8 00000000

0017FBEC 00000000

0017FBF0 7EFD0000 p3t

0017FBF4 00000000

0017FBF8 0017FBE4 0.5

0017FBFC 0000020A K0

0017FC00 0017FC4C Lnf

0017FC04 013316F9 -30

0017FC08 866334F3 e4h

Pointer to next SEH record SE handler

Рис. 1.108: OlyDbg: ADDSD прибавила значение в XMM0 к XMM1

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

The screenshot displays the OllyDbg interface with three main panes:

- Assembly Window:** Shows instructions at addresses 01331000 to 01331094. Key instructions include:
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR SS:[ESP+4]` (01331000)
 - `DIUSD XMM1, QWORD PTR DS:[13320C0]` (01331002)
 - `MULSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320D0]` (01331004)
 - `ADDSD XMM1, XMM0` (01331006)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+4], XMM1` (01331008)
 - `FLD QWORD PTR SS:[ESP+4]` (0133100A)
 - `RETN` (0133100C)
 - `INT3` (0133100E)
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320C8]` (01331010)
 - `SUB ESP, 10` (01331012)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP+8], XMM0` (01331014)
 - `MOVSD XMM0, QWORD PTR DS:[13320B8]` (01331016)
 - `MOVSD QWORD PTR SS:[ESP], XMM0` (01331018)
 - `CALL 01331000` (0133101A)
 - `FSTP QWORD PTR SS:[ESP+8]` (0133101C)
 - `ADD ESP, 8` (0133101E)
 - `PUSH OFFSET 01333000` (01331020)
 - `CALL DWORD PTR DS:[<MSUCR110.printf>]` (01331022)
 - `ADD ESP, 0C` (01331024)
 - `XOR EAX, EAX` (01331026)
 - `RETN` (01331028)
 - `INT3` (0133102A)
 - `MOV EAX, 5A40` (0133102C)
 - `CMP WORD PTR DS:[<STRUCT IMAGE_DOS_HEAD` (0133102E)
 - `JE SHORT 01331032` (01331030)
 - `XOR EAX, EAX` (01331032)
 - `JMP SHORT 013310B6` (01331034)
 - `MOV ECX, DWORD PTR DS:[133003C]` (01331036)
 - `CMP QWORD PTR DS:[ECX+<STRUCT IMAGE_DOS` (01331038)
 - `JNE SHORT 0133107E` (0133103A)
 - `MOV EAX, 10B` (0133103C)
 - `CMP QWORD PTR DS:[ECX+1330018], 0` (0133103E)
- Registers (FPU) Window:** Shows the state of the floating-point unit registers. ST(0) contains a valid value: `valid 14.32216560509539930`. Other registers (ST1-ST7) are empty.
- Stack Window:** Shows the current stack frame. The top of the stack is at address 0017FBC0, which corresponds to the `FLD` instruction. The stack contains various hex and ASCII values, including the return address `0017FBC0` and the instruction `RETURN from simple.01331000 to simple.013`.

Рис. 1.109: OllyDbg: FLD оставляет результат функции в ST(0)

Видно, что OllyDbg показывает XMM-регистры как пары чисел в формате *double*, но используется только *младшая* часть.

Должно быть, OllyDbg показывает их именно так, потому что сейчас исполняются SSE2-инструкции с суффиксом -SD.

Но конечно же, можно переключить отображение значений в регистрах и посмотреть содержимое как 4 *float*-числа или просто как 16 байт.

1.30.2. Передача чисел с плавающей запятой в аргументах

```
#include <math.h>
#include <stdio.h>

int main ()
{
    printf ("32.01 ^ 1.54 = %lf\n", pow (32.01,1.54));

    return 0;
}
```

Они передаются в младших половинах регистров XMM0-XMM3.

Листинг 1.394: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
$SG1354 DB      '32.01 ^ 1.54 = %lf', 0aH, 00H

__real@40400147ae147ae1 DQ 040400147ae147ae1r    ; 32.01
__real@3ff8a3d70a3d70a4 DQ 03ff8a3d70a3d70a4r    ; 1.54

main      PROC
    sub     rsp, 40                                ; 00000028H
    movsdx  xmm1, QWORD PTR __real@3ff8a3d70a3d70a4
    movsdx  xmm0, QWORD PTR __real@40400147ae147ae1
    call    pow
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG1354
    movaps  xmm1, xmm0
    movd    rdx, xmm1
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 40                                ; 00000028H
    ret     0
main      ENDP
```

Инструкции MOVSDX нет в документации от Intel и AMD ([11.1.4](#) (стр. 988)), там она называется просто MOVSD. Таким образом, в процессорах x86 две инструкции с одинаковым именем (о второй: [1.6](#) (стр. 1004)). Возможно, в Microsoft решили избежать путаницы и переименовали инструкцию в MOVSDX. Она просто загружает значение в младшую половину XMM-регистра.

Функция pow() берет аргументы из XMM0 и XMM1, и возвращает результат в XMM0. Далее он перекладывается в RDX для printf(). Почему? Может быть, это потому что printf() — функция с переменным количеством аргументов?

Листинг 1.395: Оптимизирующий GCC 4.4.6 x64

```
.LC2:
    .string "32.01 ^ 1.54 = %lf\n"

main:
    sub     rsp, 8
    movsd   xmm1, QWORD PTR .LC0[rip]
    movsd   xmm0, QWORD PTR .LC1[rip]
    call    pow
    ; результат сейчас в XMM0
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC2
    mov     eax, 1 ; количество переданных векторных регистров
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 8
    ret

.LC0:
    .long   171798692
    .long   1073259479

.LC1:
    .long   2920577761
    .long   1077936455
```

GCC работает понятнее. Значение для printf() передается в XMM0. Кстати, вот тот случай, когда в EAX для printf() записывается 1 — это значит, что будет передан один аргумент в векторных ре-

1.30. РАБОТА С ЧИСЛАМИ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАПЯТОЙ (SIMD)

гистрах, так того требует стандарт [Michael Matz, Jan Hubicka, Andreas Jaeger, Mark Mitchell, *System V Application Binary Interface. AMD64 Architecture Processor Supplement*, (2013)] ¹⁹⁷.

1.30.3. Пример со сравнением

```
#include <stdio.h>

double d_max (double a, double b)
{
    if (a>b)
        return a;

    return b;
};

int main()
{
    printf ("%f\n", d_max (1.2, 3.4));
    printf ("%f\n", d_max (5.6, -4));
};
```

x64

Листинг 1.396: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
a$ = 8
b$ = 16
d_max PROC
    comisd    xmm0, xmm1
    ja       SHORT $LN2@d_max
    movaps    xmm0, xmm1
$LN2@d_max:
    fatret    0
d_max ENDP
```

Оптимизирующий MSVC генерирует очень понятный код.

Инструкция COMISD это «Compare Scalar Ordered Double-Precision Floating-Point Values and Set EFLAGS». Собственно, это она и делает.

Неоптимизирующий MSVC генерирует более избыточно, но тоже всё понятно:

Листинг 1.397: MSVC 2012 x64

```
a$ = 8
b$ = 16
d_max PROC
    movsdx    QWORD PTR [rsp+16], xmm1
    movsdx    QWORD PTR [rsp+8], xmm0
    movsdx    xmm0, QWORD PTR a$[rsp]
    comisd    xmm0, QWORD PTR b$[rsp]
    jbe       SHORT $LN1@d_max
    movsdx    xmm0, QWORD PTR a$[rsp]
    jmp       SHORT $LN2@d_max
$LN1@d_max:
    movsdx    xmm0, QWORD PTR b$[rsp]
$LN2@d_max:
    fatret    0
d_max ENDP
```

А вот GCC 4.4.6 дошел в оптимизации дальше и применил инструкцию MAXSD («Return Maximum Scalar Double-Precision Floating-Point Value»), которая просто выбирает максимальное значение!

¹⁹⁷Также доступно здесь: <https://software.intel.com/sites/default/files/article/402129/mpx-linux64-abi.pdf>

```
d_max:
    maxsd    xmm0, xmm1
    ret
```

Скомпилируем этот пример в MSVC 2012 с включенной оптимизацией:

Листинг 1.399: Оптимизирующий MSVC 2012 x86

```

_a$ = 8          ; size = 8
_b$ = 16         ; size = 8
_d_max PROC
    movsd    xmm0, QWORD PTR _a$[esp-4]
    comisd   xmm0, QWORD PTR _b$[esp-4]
    jbe      SHORT $LN1@d_max
    fld      QWORD PTR _a$[esp-4]
    ret      0
$LN1@d_max:
    fld      QWORD PTR _b$[esp-4]
    ret      0
_d_max ENDP

```

Всё то же самое, только значения *a* и *b* берутся из стека, а результат функции оставляется в ST(0).

Если загрузить этот пример в OllyDbg, увидим, как инструкция COMISD сравнивает значения и устанавливает/сбрасывает флаги CF и PF:

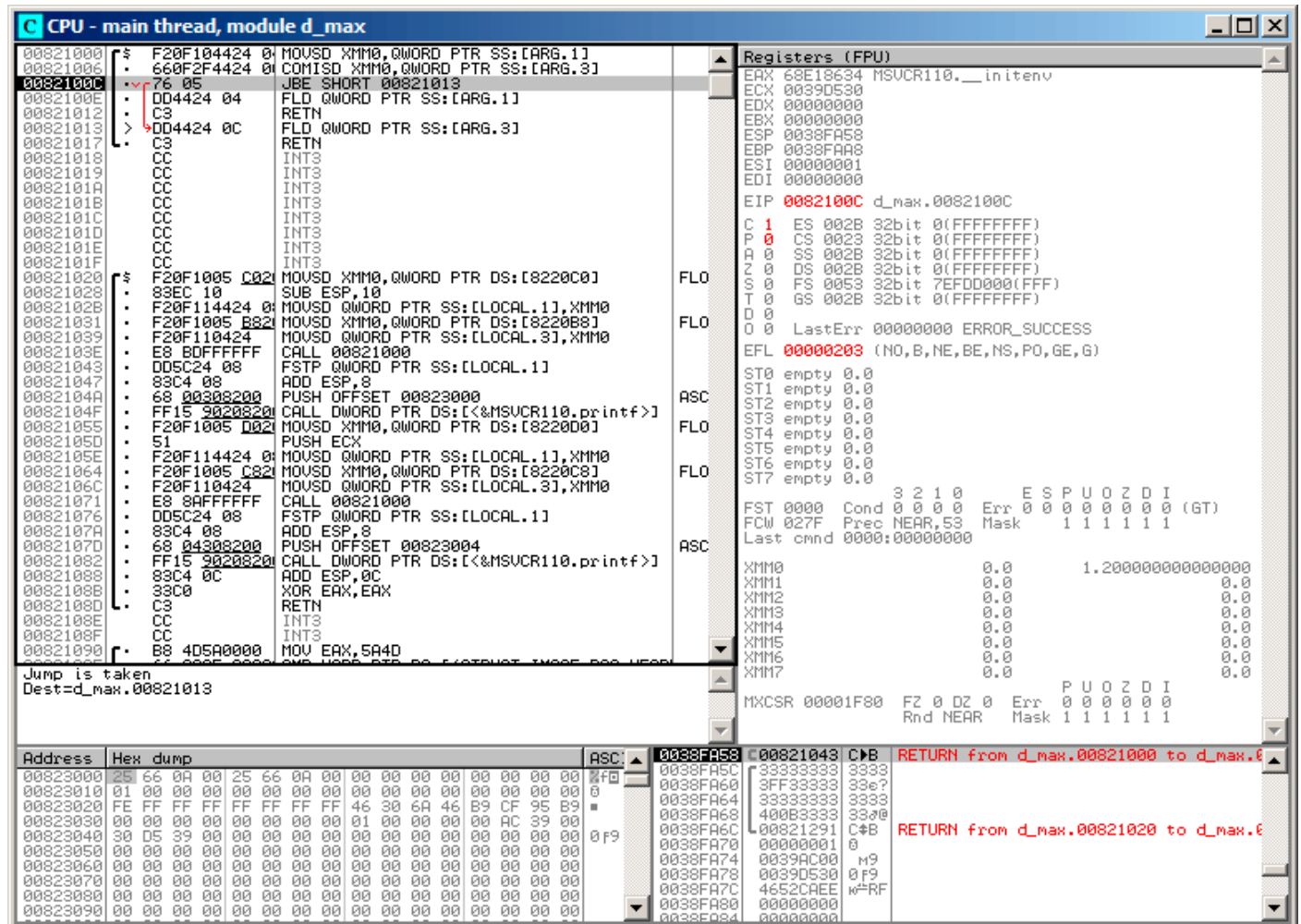


Рис. 1.110: OllyDbg: COMISD изменила флаги CF и PF

1.30.4. Вычисление машинного эпсилона: x64 и SIMD

Вернемся к примеру «вычисление машинного эпсилона» для *double* листинг.1.25.2.

Теперь скомпилируем его для x64:

```

v$ = 8
calculate_machine_epsilon PROC
    movsdx  QWORD PTR v$[rsp], xmm0
    movaps  xmm1, xmm0
    inc     QWORD PTR v$[rsp]
    movsdx  xmm0, QWORD PTR v$[rsp]
    subsd   xmm0, xmm1
    ret     0
calculate_machine_epsilon ENDP

```

Нет способа прибавить 1 к значению в 128-битном XMM-регистре, так что его нужно в начале поместить в память.

Впрочем, есть инструкция *ADDSD (Add Scalar Double-Precision Floating-Point Values)*, которая может прибавить значение к младшей 64-битной части XMM-регистра игнорируя старшую половину, но наверное MSVC 2012 пока недостаточно хорош для этого

¹⁹⁸.

Так или иначе, значение затем перезагружается в XMM-регистр и происходит вычитание.

SUBSD это «Subtract Scalar Double-Precision Floating-Point Values», т.е. операция производится над младшей 64-битной частью 128-битного XMM-регистра. Результат возвращается в регистре XMM0.

1.30.5. И снова пример генератора случайных чисел

Вернемся к примеру «пример генератора случайных чисел» листинг.1.25.1.

Если скомпилировать это в MSVC 2012, компилятор будет использовать SIMD-инструкции для FPU.

Листинг 1.401: Оптимизирующий MSVC 2012

```

__real@3f800000 DD 03f800000r ; 1

tv128 = -4
_tmp$ = -4
?float_rand@@YAMXZ PROC
    push    ecx
    call    ?my_rand@@YAIXZ
; EAX=псевдослучайное значение
    and     eax, 8388607 ; 007ffffFH
    or      eax, 1065353216 ; 3f800000H
; EAX=псевдослучайное значение & 0x007ffffF | 0x3f800000
; сохранить его в локальном стеке:
    mov     DWORD PTR _tmp$[esp+4], eax
; перезагрузить его как число с плавающей точкой:
    movss   xmm0, DWORD PTR _tmp$[esp+4]
; вычесть 1.0:
    subss   xmm0, DWORD PTR __real@3f800000
; переместить значение в ST0 поместив его во временную переменную...
    movss   DWORD PTR tv128[esp+4], xmm0
; ... и затем перезагрузив её в ST0:
    fld     DWORD PTR tv128[esp+4]
    pop     ecx
    ret     0
?float_rand@@YAMXZ ENDP

```

У всех инструкций суффикс -SS, это означает «Scalar Single».

«Scalar» означает, что только одно значение хранится в регистре.

«Single»¹⁹⁹ означает, что это тип *float*.

¹⁹⁸В качестве упражнения, вы можете попробовать переработать этот код, чтобы избавиться от использования локального стека.

¹⁹⁹Т.е., single precision.

1.30.6. Итог

Во всех приведенных примерах, в XMM-регистрах используется только младшая половина регистра, там хранится значение в формате IEEE 754.

Собственно, все инструкции с суффиксом -SD («Scalar Double-Precision») — это инструкции для работы с числами с плавающей запятой в формате IEEE 754, хранящиеся в младшей 64-битной половине XMM-регистра.

Всё удобнее чем это было в FPU, видимо, сказывается тот факт, что расширения SIMD развивались не так стихийно, как FPU в прошлом.

Стековая модель регистров не используется.

Если вы попытаетесь заменить в этих примерах *double* на *float*, то инструкции будут использоваться те же, только с суффиксом -SS («Scalar Single-Precision»), например, MOVSS, COMISS, ADDSS, итд.

«Scalar» означает, что SIMD-регистр будет хранить только одно значение, вместо нескольких.

Инструкции, работающие с несколькими значениями в регистре одновременно, имеют «Packed» в названии.

Нужно также обратить внимание, что SSE2-инструкции работают с 64-битными числами (*double*) в формате IEEE 754, в то время как внутреннее представление в FPU — 80-битные числа.

Поэтому ошибок округления (*round-off error*) в FPU может быть меньше чем в SSE2, как следствие, можно сказать, работа с FPU может давать более точные результаты вычислений.

1.31. Кое-что специфичное для ARM

1.31.1. Знак номера (#) перед числом

Компилятор Keil, IDA и objdump предваряет все числа знаком номера («#»), например:

листинг.1.16.1. Но когда GCC 4.9 выдает результат на языке ассемблера, он так не делает, например:

листинг.3.15.

Так что листинги для ARM в этой книге в каком-то смысле перемешаны.

Трудно сказать, как правильнее. Должно быть, всякий должен придерживаться тех правил, которые приняты в той среде, в которой он работает.

1.31.2. Режимы адресации

В ARM64 возможна такая инструкция:

```
ldr    x0, [x29,24]
```

И это означает прибавить 24 к значению в X29 и загрузить значение по этому адресу. Обратите внимание что 24 внутри скобок.

А если снаружи скобок, то весь смысл меняется:

```
ldr    w4, [x1],28
```

Это означает, загрузить значение по адресу в X1, затем прибавить 28 к X1.

ARM позволяет прибавлять некоторую константу к адресу, с которого происходит загрузка, либо вычитать.

Причем, позволяет это делать до загрузки или после.

Такого режима адресации в x86 нет, но он есть в некоторых других процессорах, даже на PDP-11.

Существует байка, что режимы пре-инкремента, пост-инкремента, пре-декремента и пост-декремента адреса в PDP-11, были «виновны» в появлении таких конструкций языка Си (который разрабатывался на PDP-11) как **ptr++*, **++ptr*, **ptr--*, **--ptr*. Кстати, это является трудно запоминаемой особенностью в Си.

1.31. КОЕ-ЧТО СПЕЦИФИЧНОЕ ДЛЯ ARM

Дела обстоят так:

термин в Си	термин в ARM	выражение Си	как это работает
Пост-инкремент	post-indexed addressing	*ptr++	использовать значение *ptr, затем инкремент указателя ptr
Пост-декремент	post-indexed addressing	*ptr--	использовать значение *ptr, затем декремент указателя ptr
Пре-инкремент	pre-indexed addressing	*++ptr	инкремент указателя ptr, затем использовать значение *ptr
Пре-декремент	pre-indexed addressing	*--ptr	декремент указателя ptr, затем использовать значение *ptr

Pre-indexing маркируется как восклицательный знак в ассемблере ARM. Для примера, смотрите строку 2 в листинг.1.29.

Деннис Ритчи (один из создателей ЯП Си) указывал, что, это, вероятно, придумал Кен Томпсон (еще один создатель Си), потому что подобная возможность процессора имелась еще в PDP-7 ²⁰⁰, [Dennis M. Ritchie, *The development of the C language*, (1993)]²⁰¹. Таким образом, компиляторы с ЯП Си на тот процессор, где это есть, могут использовать это.

Всё это очень удобно для работы с массивами.

1.31.3. Загрузка констант в регистр

32-битный ARM

Как мы уже знаем, все инструкции имеют длину в 4 байта в режиме ARM и 2 байта в режиме Thumb.

Как в таком случае записать в регистр 32-битное число, если его невозможно закодировать внутри одной инструкции?

Попробуем:

```
unsigned int f()
{
    return 0x12345678;
};
```

Листинг 1.402: GCC 4.6.3 -O3 Режим ARM

```
f:
    ldr    r0, .L2
    bx     lr
.L2:
    .word  305419896 ; 0x12345678
```

Т.е., значение 0x12345678 просто записано в памяти отдельно и загружается, если нужно.

Но можно обойтись и без дополнительного обращения к памяти.

Листинг 1.403: GCC 4.6.3 -O3 -march=armv7-a (Режим ARM)

```
movw    r0, #22136      ; 0x5678
movt     r0, #4660       ; 0x1234
bx       lr
```

Видно, что число загружается в регистр по частям, в начале младшая часть (при помощи инструкции MOVW), затем старшая (при помощи MOVT).

Следовательно, нужно 2 инструкции в режиме ARM, чтобы записать 32-битное число в регистр.

Это не так уж и страшно, потому что в реальном коде не так уж и много констант (кроме 0 и 1).

Значит ли это, что это выполняется медленнее чем одна инструкция, как две инструкции?

²⁰⁰http://yurichev.com/mirrors/C/c_dmr_postincrement.txt

²⁰¹Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17264>

1.31. КОЕ-ЧТО СПЕЦИФИЧНОЕ ДЛЯ ARM

Вряд ли, наверняка современные процессоры ARM наверняка умеют распознавать такие последовательности и исполнять их быстро.

А IDA легко распознает подобные паттерны в коде и дизассемблирует эту функцию как:

```
MOV    R0, 0x12345678
BX     LR
```

ARM64

```
uint64_t f()
{
    return 0x12345678ABCDEF01;
};
```

Листинг 1.404: GCC 4.9.1 -O3

```
mov     x0, 61185    ; 0xef01
movk    x0, 0xabcd, lsl 16
movk    x0, 0x5678, lsl 32
movk    x0, 0x1234, lsl 48
ret
```

MOVK означает «MOV Keep», т.е. она записывает 16-битное значение в регистр, не трогая при этом остальные биты. Суффикс LSL сдвигает значение в каждом случае влево на 16, 32 и 48 бит. Сдвиг происходит перед загрузкой. Таким образом, нужно 4 инструкции, чтобы записать в регистр 64-битное значение.

Записать числа с плавающей точкой в регистр

Некоторые числа можно записывать в D-регистр при помощи только одной инструкции.

Например:

```
double a()
{
    return 1.5;
};
```

Листинг 1.405: GCC 4.9.1 -O3 + objdump

```
0000000000000000 <a>:
 0: 1e6f1000      fmov     d0, #1.5000000000000000e+000
 4: d65f03c0      ret
```

Число 1.5 действительно было закодировано в 32-битной инструкции.

Но как? В ARM64, инструкцию FMov есть 8 бит для кодирования некоторых чисел с плавающей запятой.

В [ARM Architecture Reference Manual, ARMv8, for ARMv8-A architecture profile, (2013)]²⁰² алгоритм называется VFPEExpandImm().

Это также называется *minifloat*²⁰³. Мы можем попробовать разные: 30.0 и 31.0 компилятору удастся закодировать, а 32.0 уже нет, для него приходится выделять 8 байт в памяти и записать его там в формате IEEE 754:

```
double a()
{
    return 32;
};
```

²⁰²Также доступно здесь: [http://yurichev.com/mirrors/ARMv8-A_Architecture_Reference_Manual_\(Issue_A.a\).pdf](http://yurichev.com/mirrors/ARMv8-A_Architecture_Reference_Manual_(Issue_A.a).pdf)

²⁰³[wikipedia](https://en.wikipedia.org/wiki/Minifloat)

```

a:
    ldr    d0, .LC0
    ret

.LC0:
    .word  0
    .word  1077936128

```

1.31.4. Релоки в ARM64

Как известно, в ARM64 инструкции 4-байтные, так что записать длинное число в регистр одной инструкцией нельзя.

Тем не менее, файл может быть загружен по произвольному адресу в памяти, для этого релоки и нужны.

Больше о них (в связи с Win32 PE): [6.5.2](#) (стр. [739](#)).

В ARM64 принят следующий метод: адрес формируется при помощи пары инструкций: ADRP и ADD.

Первая загружает в регистр адрес 4KiB-страницы, а вторая прибавляет остаток.

Скомпилируем пример из «Hello, world!» (листинг. [1.8](#)) в GCC (Linaro) 4.9 под win32:

Листинг 1.407: GCC (Linaro) 4.9 и objdump объектного файла

```

...>aarch64-linux-gnu-gcc.exe hw.c -c
...>aarch64-linux-gnu-objdump.exe -d hw.o

...

0000000000000000 <main>:
 0: a9bf7bfd      stp     x29, x30, [sp,#-16]!
 4: 910003fd      mov     x29, sp
 8: 90000000      adrp    x0, 0 <main>
 c: 91000000      add     x0, x0, #0x0
10: 94000000      bl      0 <printf>
14: 52800000      mov     w0, #0x0                                // #0
18: a8c17bfd      ldp     x29, x30, [sp],#16
1c: d65f03c0      ret

...>aarch64-linux-gnu-objdump.exe -r hw.o

...

RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
OFFSET                TYPE                VALUE
0000000000000008  R_AARCH64_ADR_PREL_PG_HI21  .rodata
000000000000000c  R_AARCH64_ADD_ABS_L012_NC   .rodata
0000000000000010  R_AARCH64_CALL26            printf

```

Итак, в этом объектом файле три релока.

- Самый первый берет адрес страницы, отсекает младшие 12 бит и записывает оставшиеся старшие 21 в битовые поля инструкции ADRP. Это потому что младшие 12 бит кодировать не нужно, и в ADRP выделено место только для 21 бит.
- Второй — 12 бит адреса, относительного от начала страницы, в поля инструкции ADD.
- Последний, 26-битный, накладывается на инструкцию по адресу 0x10, где переход на функцию printf().

Все адреса инструкций в ARM64 (да и в ARM в режиме ARM) имеют нули в двух младших битах (потому что все инструкции имеют размер в 4 байта), так что нужно кодировать только старшие 26 бит из 28-битного адресного пространства ($\pm 128\text{MB}$).

В слинкованном исполняемом файле релоков в этих местах нет: потому что там уже точно известно, где будет находится строка «Hello!», и в какой странице, а также известен адрес функции puts().

1.32. КОЕ-ЧТО СПЕЦИФИЧНОЕ ДЛЯ MIPS

И поэтому там, в инструкциях AD RP, ADD и BL, уже проставлены нужные значения (их проставил линкер во время компоновки):

Листинг 1.408: objdump исполняемого файла

```
0000000000400590 <main>:
 400590:      a9bf7bfd      stp     x29, x30, [sp,#-16]!
 400594:      910003fd      mov     x29, sp
 400598:      90000000      adrp    x0, 400000 <_init-0x3b8>
 40059c:      91192000      add     x0, x0, #0x648
 4005a0:      97fffffa0      bl      400420 <puts@plt>
 4005a4:      52800000      mov     w0, #0x0                                // #0
 4005a8:      a8c17bfd      ldp     x29, x30, [sp],#16
 4005ac:      d65f03c0      ret

...

Contents of section .rodata:
 400640 01000200 00000000 48656c6c 6f210000 .....Hello!..
```

В качестве примера, попробуем дизассемблировать инструкцию BL вручную.

0x97fffffa0 это 0b100101111111111111111111111111110100000. В соответствии с [ARM Architecture Reference Manual, ARMv8, for ARMv8-A architecture profile, (2013)C5.6.26], imm26 это последние 26 бит:

imm26 = 0b111111111111111111111111111111110100000. Это 0x3FFFFFFA0, но MSB это 1, так что число отрицательное, мы можем вручную его конвертировать в удобный для нас вид. По правилам изменения знака (2.2 (стр. 445)), просто инвертируем все биты: (0b1011111=0x5F) и прибавляем 1 (0x5F+1=0x60). Так что число в знаковом виде: -0x60. Умножим -0x60 на 4 (потому что адрес записанный в опкоде разделен на 4): это -0x180. Теперь вычисляем адрес назначения: 0x4005a0 + (-0x180) = 0x400420 (пожалуйста заметьте: мы берем адрес инструкции BL, а не текущее значение PC, которое может быть другим!). Так что адрес в итоге 0x400420.

Больше о релоках связанных с ARM64: [ELF for the ARM 64-bit Architecture (AArch64), (2013)]²⁰⁴.

1.32. Кое-что специфичное для MIPS

1.32.1. Загрузка 32-битной константы в регистр

```
unsigned int f()
{
    return 0x12345678;
};
```

В MIPS, так же как и в ARM, все инструкции имеют размер 32 бита, так что невозможно закодировать 32-битную константу в инструкцию.

Так что приходится делать это используя по крайней мере две инструкции: первая загружает старшую часть 32-битного числа и вторая применяет операцию «ИЛИ», эффект от которой в том, что она просто выставляет младшие 16 бит целевого регистра:

Листинг 1.409: GCC 4.4.5 -O3 (вывод на ассемблере)

```
li      $2,305397760 # 0x12340000
j       $31
ori     $2,$2,0x5678 ; branch delay slot
```

IDA знает о таких часто встречающихся последовательностях, так что для удобства, она показывает последнюю инструкцию ORI как псевдоинструкцию LI, которая якобы загружает полное 32-битное значение в регистр \$V0.

Листинг 1.410: GCC 4.4.5 -O3 (IDA)

```
lui     $v0, 0x1234
jr      $ra
li      $v0, 0x12345678 ; branch delay slot
```

²⁰⁴Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17288>

1.32. Кое-что специфичное для MIPS

В выводе на ассемблере от GCC есть псевдоинструкция LI, но на самом деле, там LUI («Load Upper Immediate»), загружающая 16-битное значение в старшую часть регистра.

Посмотрим в выводе *objdump*:

Листинг 1.411: *objdump*

```
00000000 <f>:
 0: 3c021234      lui      v0,0x1234
 4: 03e00008      jr       ra
 8: 34425678      ori      v0,v0,0x5678
```

Загрузка 32-битной глобальной переменной в регистр

```
unsigned int global_var=0x12345678;

unsigned int f2()
{
    return global_var;
};
```

Тут немного иначе: LUI загружает старшие 16 бит из *global_var* в \$2 (или \$V0) и затем LW загружает младшие 16 бит суммируя их с содержимым \$2:

Листинг 1.412: GCC 4.4.5 -O3 (вывод на ассемблере)

```
f2:
    lui     $2,%hi(global_var)
    lw      $2,%lo(global_var)($2)
    j       $31
    nop     ; branch delay slot

    ...

global_var:
    .word   305419896
```

IDA знает о часто применяемой паре инструкций LUI/LW, так что она объединяет их в одну инструкцию LW:

Листинг 1.413: GCC 4.4.5 -O3 (IDA)

```
_f2:
        lw      $v0, global_var
        jr      $ra
        or      $at, $zero      ; branch delay slot

        ...

        .data
        .globl global_var
global_var:
        .word   0x12345678      # DATA XREF: _f2
```

Вывод *objdump* почти такой же, как ассемблерный вывод GCC. Посмотрим также релоки в объектном файле:

Листинг 1.414: *objdump*

```
objdump -D filename.o

...

00000000c <f2>:
 c: 3c020000      lui      v0,0x0
10: 8c420000      lw       v0,0(v0)
14: 03e00008      jr       ra
18: 00200825      move     at,at      ; branch delay slot
1c: 00200825      move     at,at
```

1.32. КОЕ-ЧТО СПЕЦИФИЧНОЕ ДЛЯ MIPS

Disassembly of section .data:

```
00000000 <global_var>:
  0:  12345678      beq      s1,s4,159e4 <f2+0x159d8>

...

objdump -r filename.o

...

RELOCATION RECORDS FOR [.text]:
OFFSET   TYPE           VALUE
0000000c R_MIPS_HI16      global_var
00000010 R_MIPS_LO16      global_var

...
```

Можем увидеть, что адрес *global_var* будет записываться прямо в инструкции LUI и LW во время загрузки исполняемого файла: старшая 16-битная часть *global_var* записывается в первую инструкцию (LUI), младшая 16-битная часть — во вторую (LW).

1.32.2. Книги и прочие материалы о MIPS

Dominic Sweetman, *See MIPS Run, Second Edition*, (2010).

Глава 2

Важные фундаментальные вещи



2.1. Целочисленные типы данных

Целочисленный тип данных (*integral*) это тип для значения, которое может быть сконvertировано в число. Это числа, перечисления (*enumerations*), булевые типы.

2.1.1. Бит

Очевидное использования бит это булевые значения: 0 для *ложно/false* и 1 для *true/истинно*.

Набор булевых значений можно упаковать в **слово**: в 32-битном слове будет 32 булевых значения, итд. Этот метод также называется *bitmap* или *bitfield*.

Но есть очевидные накладные расходы: тасовка бит, изоляция одних, итд. В то время как использование **слова** (или типа *int*) для булевого значения это не экономично, но очень эффективно.

В среде Си/Си++, 0 это *false/ложно* и любое ненулевое значение это *true/истинно*. Например:

```
if (1234)
    printf ("это всегда будет исполняться\n");
else
    printf ("а это никогда\n");
```

Это популярный способ перечислить все символы в Си-строке:

```
char *input=...;

while(*input) // исполнять тело, если в *input character не ноль
{
    // делать что-то с *input
    input++;
};
```

2.1.2. Ниббл АКА nibble АКА nybble

АКА полубайт, тетрада. Равняется 4-м битам.

Все эти термины в ходу и сегодня.

Двоично-десятичный код (**BCD**¹)

4-битные нибблы использовались в 4-битных процессорах, например, в легендарном Intel 4004 (который использовался в калькуляторах).

Интересно знать, что числа там представлялись в виде *binary-coded decimal (BCD)*. Десятичный 0 кодировался как 0b0000, десятичная 9 как 0b1001, а остальные значения не использовались. Десятичное 1234 представлялось как 0x1234. Конечно, этот способ не очень экономичный.

Тем не менее, он имеет одно преимущество: очень легко конвертировать значения из десятичного в **BCD**-запакованное и назад. BCD-числа можно складывать, вычитать, итд, но нужна дополнительная корректировка. В x86 CPUs для этого есть редкие инструкции: AAA/DAA (adjust after addition: корректировка после сложения), AAS/DAS (adjust after subtraction: корректировка после вычитания), AAM (after multiplication: после умножения), AAD (after division: после деления).

Необходимость поддерживать **BCD**-числа в CPU это причина, почему существуют флаги *half-carry flag* (флаг полупереноса) (в 8080/Z80) и *auxiliary flag* (вспомогательный флаг) (AF в x86): это флаг переноса, генерируемый после обработки младших 4-х бит. Флаг затем используется корректирующими инструкциями.

Тот факт, что числа легко конвертировать, привел к популярности этой книги: [Peter Abel, *IBM PC assembly language and programming* (1987)]. Но кроме этой книги, автор этих заметок, никогда не видел **BCD**-числа на практике, исключая *magic numbers* (5.6.1 (стр. 690)), как, например, дата чьего-то дня рождения, закодированная как 0x19791011 — это действительно запакованное **BCD**-число.

¹Binary-Coded Decimal

2.1. ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ

Инструкции для BCD в x86 часто использовались для других целей, использовались их недокументированные особенности, например:

```
cmp al,10
sbb al,69h
das
```

Этот запутанный код конвертирует число в пределах 0..15 в ASCII-символ '0'..'9', 'A'..'F'.

Z80

Z80 был клоном 8-битного Intel 8080 CPU, и из-за экономии места, он имеет 4-битный АЛУ, т.е., каждая операция над двумя 8-битными числами происходит за два шага. Один из побочных эффектов в том, что легко генерировать *half-carry flag* (флаг полупереноса).

2.1.3. Байт

Байт, в первую очередь, применяется для хранения символов. 8-битные байты не всегда были популярны, как сейчас. Перфоленты для телетайпов имели 5 и 6 возможных дырок, это 5 или 6 бит на байт.

Чтобы подчеркнуть тот факт, что в байте 8 бит, байт иногда называется *октетом* (*octet*): по крайней мере *fetchmail* использует эту терминологию.

9-битные байты существовали на 36-битных архитектурах: 4 9-битных байта помещались в одно слово. Вероятно из-за этого, стандарты Си/Си++ говорят что в *char* должно быть как минимум 8 бит, но может быть и больше.

Например, в ранней документации к языку Си², можно найти такое:

```
char one byte character (PDP-11, IBM360: 8 bits; H6070: 9 bits)
```

Под H6070, вероятно, подразумевается Honeywell 6070, с 36-битными словами.

Стандартная ASCII-таблица

7-битная ASCII-таблица стандартная, которая содержит только 128 возможных символов. Раннее ПО для передачи e-мейлов работало только с 7-битными ASCII-символами, так что понадобился стандарт MIME³ для кодирования сообщений в нелатинских системах письменности. 7-битные ASCII коды дополнялись битом чётности, давая в итоге 8 бит.

Data Encryption Standard (DES⁴) имеет 56-битный ключ, это 8 7-битных байт, оставляя место для бита чётности для каждого символа.

Заучивать на память всю таблицу ASCII незачем, но можно запомнить интервалы. [0..0x1F] это управляющие символы (непечатные). [0x20..0x7E] это печатные. Коды начиная с 0x80 обычно используются для нелатинских систем письменности и/или псевдографики.

Некоторые важные коды, которые легко запомнить: 0 (конец Си-строки, '\0' в C/C++); 0xA или 10 (*line feed* (перевод строки), '\n' в C/C++); 0xD или 13 (*carriage return* (возврат каретки), '\r' в C/C++).

0x20 (пробел) также часто запоминается.

8-битные процессоры

x86 имеют возможность работать с байтами на уровне регистров (потому что они наследники 8-битного процессора 8080), а RISC как ARM и MIPS — нет.

²<https://yurichev.com/mirrors/C/bwk-tutor.html>

³Multipurpose Internet Mail Extensions

⁴Data Encryption Standard

2.1.4. Wide char

Это попытка поддерживать многоязычную среду расширяя байт до 16-и бит. Самый известный пример это ядро Windows NT и win32-функции с суффиксом *W*. Вот почему если закодировать обычный текст на английском, то каждый латинский символ в текстовой строке будет перемежаться с нулевым байтом. Эта кодировка также называется UCS-2 или UTF-16

Обычно, *wchar_t* это синоним 16-битного типа данных *short*.

2.1.5. Знаковые целочисленные и беззнаковые

Некоторые люди могут удивляться, почему беззнаковые типы данных вообще существуют, т.к., любое беззнаковое число можно представить как знаковое. Да, но отсутствие бита знака в значении расширяет интервал в два раза. Следовательно, знаковый байт имеет интервал -128..127, а беззнаковый: 0..255. Еще одно преимущество беззнаковых типов данных это самодокументация: вы определяете переменную, которая не может принимать отрицательные значения.

Беззнаковые типы данных отсутствуют в Java, за что её критикуют. Трудно реализовать криптографические алгоритмы используя булевы операции над знаковыми типами.

Значения вроде 0xFFFFFFFF (-1) часто используются, в основном, как коды ошибок.

2.1.6. Слово (word)

Слово **слово** это неоднозначный термин, и обычно означает тип данных, помещающийся в **GPR**. Байты практичны для символов, но непрактичны для арифметических расчетов.

Так что, многие процессоры имеют **GPR** шириной 16, 32 или 64 бит. Даже 8-битные **CPU** как 8080 и Z80 предлагают работать с парами 8-битными регистров, каждая пара формирует 16-битный псевдорегистр (*BC, DE, HL*, итд.). Z80 имеет некоторые возможности для работы с парами регистров, и это, в каком-то смысле, эмуляция 16-битного CPU.

В общем, если в рекламе CPU говорят о нем как о “n-битном процессоре”, это обычно означает, что он имеет n-битные **GPR**.

Было время, когда в рекламе жестких дисков и модулей **RAM** писали, что они имеют *n* килослов вместо *b* килобайт/мегабайт.

Например, *Apollo Guidance Computer*⁵ имел 2048 слов **RAM**. Это был 16-битный компьютер, так что там было 4096 байт **RAM**.

*TX-0*⁶ имел 64K 18-битных слов памяти на магнитных сердечниках, т.е., 64 килослов.

*DECSYSTEM-2060*⁷ мог иметь вплоть до 4096 килослов *твёрдотельной памяти* (т.е., жесткие диски, ленты, итд). Это был 36-битный компьютер, так что это 18432 килобайта или 18 мегабайт.

int в Си/Си++ почти всегда связан со **словом**. (Кроме архитектуры AMD64, где *int* остался 32-битным, вероятно, ради лучшей обратной совместимости.)

int 16-битный на PDP-11 и старых компьютерах с MS-DOS. *int* 32-битный на VAX, и на x86 начиная с 80386, итд.

И даже более того, если в программе на Си/Си++ определение типа для переменной отсутствует, то по умолчанию подразумевается *int*. Вероятно, это наследие языка программирования В⁸.

GPR это обычно самый быстрый контейнер для переменной, быстрее чем запакованный бит, и иногда даже быстрее запакованного байта (потому что нет нужны изолировать единственный бит/байт из **GPR**). Даже если вы используете его как контейнер для счетчика в цикле, в интервале 0..99.

⁵https://en.wikipedia.org/wiki/Apollo_Guidance_Computer

⁶<https://en.wikipedia.org/wiki/TX-0>

⁷<https://en.wikipedia.org/wiki/DECSYSTEM-20>

⁸<http://yurichev.com/blog/typeless/>

2.1. ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ

В языке ассемблера, **word** всё еще 16-битный для x86, потому что так было во времена 16-битного 8086. *Double word* 32-битный, *quad word* 64-битный. Вот почему 16-битные слова определяются при помощи DW в ассемблере на x86, для 32-битных используется DD и для 64-битных — DQ.

Word 32-битный для ARM, MIPS, итд, 16-битные типы данных называются здесь *half-word* (полуслово). Следовательно, *double word* на 32-битном RISC это 64-битный тип данных.

В GDB такая терминология: *halfword* для 16-битных, **word** для 32-битных и *giant word* для 64-битных.

В 16-битной среде Си/Си++ на PDP-11 и MS-DOS был тип *long* шириной в 32 бита, вероятно, они имели ввиду *long word* или *long int*?

В 32-битных средах Си/Си++ имеется тип *long long* для типов данных шириной 64 бита.

Теперь вы видите, почему термин *слово* такой неоднозначный.

Нужно ли использовать *int*?

Некоторые люди говорят о том, что тип *int* лучше не использовать вообще, потому что его неоднозначность приводит к ошибкам. Например, хорошо известная библиотека *lzhuf* использует тип *int* в одном месте, и всё работает нормально на 16-битной архитектуре. Но если она портируется на архитектуру с 32-битным *int*, она может падать: <http://yurichev.com/blog/lzhuf/>.

Более однозначные типы определены в файле *stdint.h*: *uint8_t*, *uint16_t*, *uint32_t*, *uint64_t*, итд.

Некоторые люди, как Дональд Э. Кнут, предлагают⁹ более звучные слова для этих типов: *byte*/*wyde*/*tetrabyte*/*tetra*/*octabyte*/*octa*. Но эти имена менее популярны чем ясные термины с включением символа *u* (*unsigned*) и числом прямо в названии типа.

Компьютеры ориентированные на слово

Не смотря на неоднозначность термина **слово**, современные компьютеры всё еще ориентированы на слово: **RAM** и все уровни кэш-памяти организованы по словам а не байтам. Впрочем, в рекламе пишут о размере именно в байтах.

Доступ по адресу в памяти и кэш-памяти выровненный по границе слова зачастую быстрее, чем невыровненный.

При разработке структур данных, от которых ждут скорости и эффективности, всегда нужно учитывать длину **слова** CPU, на котором это будет исполняться. Иногда компилятор делает это за программиста, иногда нет.

2.1.7. Регистр адреса

Для тех, кто был воспитан на 32-битных и/или 64-битных x86, и/или RISC 90-х годов, как ARM, MIPS, PowerPC, считается обычным, что шина адреса имеет такую же ширину как **GPR** или **слово**. Тем не менее, на других архитектурах, ширина шины адреса может быть другой.

8-битный Z80 может адресовать 2^{16} байт, используя пары 8-битных регистров, или специальные регистры (*IX*, *IY*). Регистры *SP* и *PC* также 16-битные.

Суперкомпьютер Cray-1 имел 64-битные GPR, но 24-битные регистры для адресов, так что он мог адресовать 2^{24} (16 мегаслов или 128 мегабайт). Память в 1970-ые была очень дорогой, так что и не ожидалось, что даже в среде суперкомпьютеров её будет больше. Тогда зачем выделять целый 64-битный регистр для адреса или указателя?

Процессоры 8086/8088 имели крайне странную схему адресации: значения двух 16-битных регистров суммировались в очень странной манере, производя 20-битный адрес. Вероятно, то было что-то вроде игрушечной виртуализации (10.6 (стр. 978))? 8086 мог исполнять несколько программ (хотя и не одновременно).

Ранний ARM1 имеет интересный артефакт:

⁹<http://www-cs-faculty.stanford.edu/~uno/news98.html>

Another interesting thing about the register file is the PC register is missing a few bits. Since the ARM1 uses 26-bit addresses, the top 6 bits are not used. Because all instructions are aligned on a 32-bit boundary, the bottom two address bits in the PC are always zero. These 8 bits are not only unused, they are omitted from the chip entirely.

(<http://www.righto.com/2015/12/reverse-engineering-arm1-ancestor-of.html>)

Так что, значение где в двух младших битах что-то есть, невозможно записать в регистр PC просто физически. Также невозможно установить любой бит в старших 6 битах PC.

Архитектура x86-64 имеет 64-битные виртуальные указателя/адреса, но внутри адресная шина 48-битная (этого достаточно для адресации 256TB памяти).

2.1.8. Числа

Для чего используются числа?

Когда вы видите как некое число/числа меняются в регистре процесса, вы можете заинтересоваться, что это число значит. Это довольно важное качество реверс-инжинира, определять возможный тип данных по набору изменяемых чисел.

Булевы значения

Если число меняется от 0 до 1 и назад, скорее всего, это значение имеет булевый тип данных.

Счетчик циклов, индекс массива

Переменная увеличивающаяся с 0, как: 0, 1, 2, 3...— большая вероятность что это счетчик цикла и/или индекс массива.

Знаковые числа

Если вы видите переменную, которая содержит очень маленькие числа, и иногда очень большие, как 0, 1, 2, 3, и 0xFFFFFFFF, 0xFFFFFEE, 0xFFFFFDD, есть шанс что это знаковая переменная в виде *дополнительного кода* (2.2 (стр. 444)), и последние три числа это -1, -2, -3.

32-битные числа

Существуют настолько большие числа¹⁰, что для них даже существует специальная нотация (Knuth's up-arrow notation¹¹). Эти числа настолько большие, что им нет практического применения в инженерии, науке и математике.

Почти всем инженерам и ученым зачастую достаточно чисел в формате IEEE 754 в двойной точности, где максимальное значение близко к $1.8 \cdot 10^{308}$. (Для сравнения, количество атомов в наблюдаемой Вселенной оценивается от $4 \cdot 10^{79}$ до $4 \cdot 10^{81}$.)

А в практическом программировании, верхний предел значительно ниже. Если вы посмотрите в исходные коды UNIX v6 для PDP-11¹², 16-битные *int* используются везде, а 32-битные *long* не используются вообще.

Та же история была и в эпоху MS-DOS: 16-битные *int* использовались почти везде (индексы массивов, счетчики циклов), в то время как 32-битные *long* использовались редко.

Во время появления x86-64, было решено оставить тип *int* 32-битным, вероятно, потому что необходимость использования 64-битного *int* еще меньше.

Я бы сказал, что 16-битные числа в интервале 0..65535, вероятно, наиболее используемые числа в программировании вообще.

¹⁰https://en.wikipedia.org/wiki/Large_numbers

¹¹https://en.wikipedia.org/wiki/Knuth%27s_up-arrow_notation

¹²http://minnie.tuhs.org/Archive/PDP-11/Distributions/research/Dennis_v6/

2.1. ЦЕЛОЧИСЛЕННЫЕ ТИПЫ ДАННЫХ

Учитывая всё это, если вы видите необычно большое 32-битное значение вроде 0x87654321, большая вероятность, что это может быть:

- это всё еще может быть 16-битное число, но знаковое, между 0xFFFF8000 (-32768) и 0xFFFFFFFF (-1).
- адрес ячейки памяти (можно проверить используя в карте памяти в отладчике);
- упакованные байты (можно проверить визуально);
- битовые флаги;
- что-то связанное с (любительской) криптографией;
- *магическое число* (5.6.1 (стр. 690));
- число с плавающей точкой в формате IEEE 754 (тоже легко проверить).

Та же история и для 64-битных значений.

...так что, 16-битного *int* достаточно почти для всего?

Интересно заметить: в [Michael Abrash, *Graphics Programming Black Book*, 1997 глава 13] мы можем найти множество случаев, когда 16-битных переменных просто достаточно. В то же время, Майкл Абраш жалеет о том что в процессорах 80386 и 80486 маловато доступных регистров, так что он предлагает хранить два 16-битных значения в одном 32-битном регистре и затем прокручивать его используя инструкцию ROR reg, 16 (на 80386 и позже) (ROL reg, 16 тоже будет работать) или BSWAP (на 80486 и позже).

Это нам напоминает как в Z80 был набор альтернативных регистров (с апострофом в конце), на которые CPU мог переключаться (и затем переключаться назад) используя инструкцию EXX.

Размер буфера

Когда программисту нужно обозначить размер некоторого буфера, обычно используются значения вида 2^x (512 байт, 1024, итд.). Значения вида 2^x легко опознать (1.22.5 (стр. 313)) в десятичной, шестнадцатеричной и двоичной системе.

Но надо сказать что программисты также и люди со своей десятичной культурой. И иногда, в среде DBMS¹³, размер текстовых полей в БД часто выбирается в виде числа 10^x , как 100, 200. Они думают что-то вроде «Окей, 100 достаточно, погодите, лучше пусть будет 200». И они правы, конечно.

Максимальный размер типа данных VARCHAR2 в Oracle RDBMS это 4000 символов, а не 4096.

В этом нет ничего плохого, это просто еще одно место где можно встретить числа вида 10^x .

Адрес

Всегда хорошая идея это держать в памяти примерную карту памяти процесса, который вы отлаживаете. Например, многие исполняемые файлы в win32 начинаются с 0x00401000, так что адрес вроде 0x00451230 скорее всего находится в секции с исполняемым кодом. Вы увидите адреса вроде этих в регистре EIP.

Стек обычно расположен где-то ниже.

Многие отладчики могут показывать карту памяти отлаживаемого процесса, например: 1.9.2 (стр. 79).

Если значение увеличивается с шагом 4 на 32-битной архитектуре или с шагом 8 на 64-битной, это вероятно сдвигающийся адрес некоторых элементов массива.

Важно знать что win32 не использует адреса ниже 0x10000, так что если вы видите какое-то число ниже этой константы, это не может быть адресом (см.также: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/ms810627.aspx>).

Так или иначе, многие отладчики могут показывать, является ли значение в регистре адресом чего-либо. OllyDbg также может показывать ASCII-строку, если значение является её адресом.

¹³Database Management Systems

Битовые поля

Если вы видите как в значении один (или больше) бит меняются от времени к времени, как 0xABCD1234 → 0xABCD1434 и назад, это вероятно битовое поле (или *bitmap*).

Запакованные байты

Когда *strcpy()* или *memcpy()* копирует буфер, они загружают/записывают 4 (или 8) байт одновременно, так что если строка содержит «4321» и будет скопирована в другое место, в какой-то момент вы увидите значение 0x31323334 в каком-либо регистре. Это 4 запакованных байта в одном 32-битном значении.

2.2. Представление знака в числах

Методов представления чисел со знаком «плюс» или «минус» несколько¹⁴, но в компьютерах обычно применяется метод «дополнительный код» или «two's complement».

Вот таблица некоторых значений байтов:

двоичное	шестнадцатеричное	беззнаковое	знаковое
01111111	0x7f	127	127
01111110	0x7e	126	126
...			
00000110	0x6	6	6
00000101	0x5	5	5
00000100	0x4	4	4
00000011	0x3	3	3
00000010	0x2	2	2
00000001	0x1	1	1
00000000	0x0	0	0
11111111	0xff	255	-1
11111110	0xfe	254	-2
11111101	0xfd	253	-3
11111100	0xfc	252	-4
11111011	0xfb	251	-5
11111010	0xfa	250	-6
...			
10000010	0x82	130	-126
10000001	0x81	129	-127
10000000	0x80	128	-128

Разница в подходе к знаковым/беззнаковым числам, собственно, нужна потому что, например, если представить 0xFFFFFFFF и 0x00000002 как беззнаковое, то первое число (4294967294) больше второго (2). Если их оба представить как знаковые, то первое будет -2, которое, разумеется, меньше чем второе (2). Вот почему инструкции для условных переходов (1.14 (стр. 114)) представлены в обеих версиях — и для знаковых сравнений (например, JG, JL) и для беззнаковых (JA, JB).

Для простоты, вот что нужно знать:

- Числа бывают знаковые и беззнаковые.
- Знаковые типы в Си/Си++:
 - `int64_t` (-9,223,372,036,854,775,808 .. 9,223,372,036,854,775,807) (- 9.2.. 9.2 квинтиллионов) или `0x8000000000000000..0x7FFFFFFFFFFFFFFF`,
 - `int` (-2,147,483,648..2,147,483,647 (- 2.15.. 2.15Gb) или `0x80000000..0x7FFFFFFF`),
 - `char` (-128..127 или `0x80..0x7F`),
 - `ssize_t`.

¹⁴ [wikipedia](#)

2.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАКА В ЧИСЛАХ

Беззнаковые:

- `uint64_t` (0..18,446,744,073,709,551,615 (18 квинтиллионов) или 0..0xFFFFFFFFFFFFFFFF),
 - `unsigned int` (0..4,294,967,295 (4.3Gb) или 0..0xFFFFFFFF),
 - `unsigned char` (0..255 или 0..0xFF),
 - `size_t`.
- У знаковых чисел знак определяется **MSB**: 1 означает «минус», 0 означает «плюс».
 - Преобразование в большие типы данных обходится легко:
[1.27.5](#) (стр. 395).
 - Изменить знак легко: просто инвертируйте все биты и прибавьте 1. Мы можем заметить, что число другого знака находится на другой стороне на том же расстоянии от нуля. Прибавление единицы необходимо из-за присутствия нуля посередине.
 - Инструкции сложения и вычитания работают одинаково хорошо и для знаковых и для беззнаковых значений. Но для операций умножения и деления, в x86 имеются разные инструкции: `IDIV/IMUL` для знаковых и `DIV/MUL` для беззнаковых.
 - Еще инструкции работающие со знаковыми числами: `CBW/CWD/CWDE/CDQ/CDQE` ([1.6](#) (стр. 1006)), `MOVSX` ([1.17.1](#) (стр. 191)), `SAR` ([1.1.6](#) (стр. 1010)).

Таблица некоторых отрицательных и положительных значений ([2.2](#)) напоминает термометр со шкалой по Цельсию. Вот почему сложение и вычитание работает одинаково хорошо и для знаковых и беззнаковых чисел: если первое слагаемое представить как отметку на термометре, и нужно прибавить второе слагаемое, и оно положительное, то мы просто поднимаем отметку вверх на значение второго слагаемого. Если второе слагаемое отрицательное, то мы опускаем отметку вниз на абсолютное значение от второго слагаемого.

Сложение двух отрицательных чисел работает так. Например, нужно сложить -2 и -3 используя 16-битные регистры. -2 и -3 это 0xffff и 0xfffd соответственно. Если сложить эти два числа как беззнаковые, то получится 0xffff+0xfffd=0x1fffb. Но мы работаем с 16-битными регистрами, так что результат *обрезается*, первая единица выкидывается, остается 0xfffb, а это -5. Это работает потому что -2 (или 0xffff) можно описать простым русским языком так: “в этом значении не хватает двух до максимального значения в регистре + 1”. -3 можно описать “...не хватает трех до ...”. Максимальное значение 16-битного регистра + 1 это 0x10000. При складывании двух чисел, и *обрезании* по модулю 2^{16} , не хватать будет $2 + 3 = 5$.

2.2.1. Использование IMUL вместо MUL

В примере вроде листинг [3.20.2](#) где умножаются два беззнаковых значения, компилируется в листинг [3.20.2](#), где используется `IMUL` вместо `MUL`.

Это важное свойство обеих инструкций: `MUL` и `IMUL`. Прежде всего, они обе выдают 64-битное значение если перемножаются два 32-битных, либо же 128-битное значение, если перемножаются два 64-битных (максимальное возможное [произведение](#) в 32-битной среде это 0xffffffff*0xffffffff=0xfffffffffe00000001). Но в стандарте Си/Си++ нет способа добраться к старшей половине результата, а [произведение](#) всегда имеет тот же размер, что и множители. И обе инструкции `MUL` и `IMUL` работают одинаково, если старшая половина результата игнорируется, т.е., обе инструкции генерируют одинаковую младшую половину. Это важное свойство способа представления знаковых чисел «дополнительный код».

Так что компилятор Си/Си++ может использовать любую из этих инструкций.

Но `IMUL` более гибкая чем `MUL`, потому что она может брать любой регистр как вход, в то время как `MUL` требует, чтобы один из множителей находился в регистре `AX/EAX/RAX`. И даже более того: `MUL` сохраняет результат в паре `EDX:EAX` в 32-битной среде, либо в `RDY:RAX` в 64-битной, так что она всегда вычисляет полный результат. И напротив, в `IMUL` можно указать единственный регистр назначения вместо пары, тогда [CPU](#) будет вычислять только младшую половину, а это быстрее [см. Torborn Granlund, *Instruction latencies and throughput for AMD and Intel x86 processors*¹⁵).

Учитывая это, компиляторы Си/Си++ могут генерировать инструкцию `IMUL` чаще, чем `MUL`.

Тем не менее, используя *compiler intrinsic*, можно произвести беззнаковое умножение и получить *полный* результат. Иногда это называется *расширенное умножение* (*extended multiplication*). `MSVC`

¹⁵<http://yurichev.com/mirrors/x86-timing.pdf>

2.2. ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЗНАКА В ЧИСЛАХ

для этого имеет *intrinsic*, которая называется `__emul`¹⁶ и еще одну: `_umul128`¹⁷. GCC предлагает тип `__int128`, и если 64-битные множители вначале приводятся к 128-битным, затем **произведение** сохраняется в другой переменной `__int128`, затем результат сдвигается на 64 бита право, вы получаете старшую часть результата¹⁸.

Функция `MulDiv()` в Windows

В Windows есть ф-ция `MulDiv()`¹⁹, это ф-ция производящая одновременно умножение и деление, она в начале перемножает два 32-битных числа и получает промежуточное 64-битное значение, а затем делит его на третье 32-битное значение. Это проще чем использовать две *compiler intrinsic*, так что разработчики в Microsoft решили сделать специальную ф-цию для этого. И судя по использованию оной, она достаточно востребована.

2.2.2. Еще кое-что о дополнительном коде

Exercise 2-1. Write a program to determine the ranges of `char`, `short`, `int`, and `long` variables, both signed and unsigned, by printing appropriate values from standard headers and by direct computation.

Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)

Получение максимального числа для некоторого слова

Максимальное беззнаковое число это просто число, где все биты выставлены: `0xFF....FF` (это -1 если **слово** используется как знаковое целочисленное). Так что берете **слово**, иставляете все биты для получения значения:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    unsigned int val=~0; // замените на "unsigned char" чтобы узнать максзначение. для ↵
    ↵ беззнакового битного8- байта
    // 0-1 также сработает, или просто -1
    printf ("%u\n", val); // %u для беззнакового
};
```

Для 32-битного целочисленного это 4294967295.

Получение минимального числа для некоторого знакового слова

Минимальное знаковое число кодируется как `0x80....00`, т.е., самый старший бит выставлен, остальные сброшены. Максимальное знаковое число кодируется также, только все биты инвертированы: `0x7F....FF`.

Будем сдвигать один бит влево, пока он не исчезнет:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    signed int val=1; // замените на "signed char" чтобы найти значения для знакового байта
    while (val!=0)
    {
```

¹⁶[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/d2s81xt0\(v=vs.80\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/d2s81xt0(v=vs.80).aspx)

¹⁷<https://msdn.microsoft.com/library/3dayytw9%28v=vs.100%29.aspx>

¹⁸Например: <http://stackoverflow.com/a/13187798>

¹⁹[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/aa383718\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/aa383718(v=vs.85).aspx)

2.3. ЦЕЛОЧИСЛЕННОЕ ПЕРЕПОЛНЕНИЕ (INTEGER OVERFLOW)

```
        printf ("%d %d\n", val, ~val);
        val=val<<1;
    };
};
```

Результат:

```
...
536870912 -536870913
1073741824 -1073741825
-2147483648 2147483647
```

Два последних числа это соответственно минимум и максимум для знакового 32-битного *int*.

2.3. Целочисленное переполнение (integer overflow)

Я сознательно расположил эту секцию после секции о представлении знаковых чисел.

В начале, взгляните на эту реализацию ф-ции *itoa()* из [Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)]:

```
void itoa(int n, char s[])
{
    int i, sign;
    if ((sign = n) < 0) /* record sign */
        n = -n; /* make n positive */
    i = 0;
    do { /* generate digits in reverse order */
        s[i++] = n % 10 + '0'; /* get next digit */
    } while ((n /= 10) > 0); /* delete it */
    if (sign < 0)
        s[i++] = '-';
    s[i] = '\0';
    strrev(s);
}
```

(Полный текст: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/fundamentals/itoa_KR.c)

Здесь есть малозаметная ошибка. Попробуйте её найти. Можете скачать исходный код, скомпилировать его, итд. Ответ на следующей странице.

2.4. AND

Из [Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)]:

Упражнение 3-4. В представлении чисел с помощью дополнения до двойки наша версия функции *itoa* не умеет обрабатывать самое большое по модулю отрицательное число, т.е., значение n , равное $-(2^{\text{wordsize}-1})$. Объясните, почему это так. Доработайте функцию так, чтобы она выводила это число правильно независимо от системы, в которой она работает.

Ответ: ф-ция не может корректно обработать самое большое отрицательное число (INT_MIN или 0x80000000 или -2147483648).

Как изменить знак? Инвертируйте все биты и прибавьте 1. Если инвертировать все биты в значении INT_MIN (0x80000000), это 0x7fffffff. Прибавьте 1 и это снова 0x80000000. Так что смена знака не дает никакого эффекта. Это важный артефакт two's complement-системы.

Еще об этом:

- blexim – Basic Integer Overflows²⁰
- Yannick Moy, Nikolaj Bjørner, and David Sielaff – Modular Bug-finding for Integer Overflows in the Large: Sound, Efficient, Bit-precise Static Analysis²¹

2.4. AND

2.4.1. Проверка того, находится ли значение на границе 2^n

Если нужно проверить, делится ли ваше значение на число вида 2^n (как 1024, 4096, итд.) без остатка, вы можете использовать оператор % в Си/Си++, но есть способ проще. 4096 это 0x1000, так что в нем всегда есть $4 * 3 = 12$ нулевых младших бит.

Что вам нужно, это просто:

```
if (value & 0xFFF)
{
    printf ("значение не делится на 0x1000 (или 4096)\n");
    printf ("кстати, остаток=%d\n", value & 0xFFF);
}
else
    printf ("значение делится на 0x1000 (или 4096)\n");
```

Другими словами, это код проверяет, если здесь любой выставленный бит среди младших 12-и бит. В качестве побочного эффекта, младшие 12 бит это всегда остаток от деления значения на 4096 (потому что деление на 2^n это лишь сдвиг вправо, и сдвинутые (или выброшенные) биты это биты остатка).

Та же история, если вам нужно проверить, является ли число четным или нет:

```
if (value & 1)
    // нечетное
else
    // четное
```

Это то же самое, как и деление на 2 и вычисление 1-битного остатка.

2.4.2. Кирилличная кодировка KOI-8R

Было время, когда 8-битная таблица [ASCII](#) не поддерживалась некоторыми сервисами в Интернете, включая электронную почту. Некоторые поддерживали, некоторые другие — нет.

И это также было время, когда не-латинские системы письменности использовали вторую половину 8-битной таблицы ASCII для размещения не-латинских символов. Было несколько популярных

²⁰<http://phrack.org/issues/60/10.html>

²¹<https://yurichev.com/mirrors/SMT/z3prefix.pdf>

2.5. И И ИЛИ КАК ВЫЧИТАНИЕ И СЛОЖЕНИЕ

кириллических кодировок, но KOI-8R (придуманная Андреем “ache” Черновым) в каком-то смысле уникальная, если сравнивать с другими.



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	|															
1	|															
2	|	!	"	#	\$	%	&	'	(	)	*	+	,	-	.	/
3	|	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>
4	|	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
5	|	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^
6	|	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n
7	|	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{	|	}	~
8	|	-	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
9	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
A	|	=	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
B	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|	|
C	|	ю	а	б	ц	г	е	ф	г	х	у	й	к	л	м	н
D	|	п	я	р	с	т	у	ж	в	ь	ы	з	ш	э	щ	ч
E	|	ю	а	б	ц	д	е	ф	г	х	и	й	к	л	м	н
F	|	п	я	р	с	т	ч	ж	в	ь	ы	з	ш	э	щ	ч

Рис. 2.1: KOI8-R table

Кое-кто может заметить, что кириллические символы расположены почти в том же порядке, в котором и латинские. Это приводит к важному свойству: если в кириллическом тексте закодированном в KOI-8R сбросить 8-й бит, текст трансформируется в транслитерированный текст с латинскими символами на месте кириллических. Например, фраза на русском:

Мой дядя самых честных правил, Когда не в шутку занемог, Он уважать себя за-
ставил, И лучше выдумать не мог.

...если закодирована в KOI-8R, и затем со сброшенным 8-м битом, трансформируется в:

mOJ DQDQ SAMYH ^ESTNYH PRAWIL, kOGDA NE W [UTKU ZANEMOG, oN UWAVATX SEBQ
ZASTAWIL, i LU^[E WYDUMATX NE MOG.

...конечно, выглядит это не очень эстетично, но этот текст читаем для тех, кто знает русский язык.

Следовательно, кириллический текст закодированный в KOI-8R, пропущенный чере сервис поддер-
живающий только 7 бит, выживет в виде транслитерированного, но читаемого текста.

Очистка 8-го бита автоматически транспонирует любой символ из второй половины (любой) 8-
битной ASCII-таблицы в первую половину, в то же место (посмотрите на красную стрелку справа
от таблицы). Если символ уже расположен в первой половине (т.е., он находился в стандартной
7-битной ASCII-таблице), он не будет транспонироваться.

Вероятно, транслитерированный текст все еще можно восстановить, если вы прибавите 8-й бит к
символам, которые выглядят как транслитерированные.

Недостаток виден сразу: кириллические символы расположенные в таблице KOI-8R расположены не
в том порядке, в каком они расположены в русском/болгарском/украинском/итд алфавите, и это
не удобно для сортировки, например.

2.5. И и ИЛИ как вычитание и сложение

2.5.1. Текстовые строки в ПЗУ ZX Spectrum

Те, кто пытался исследовать внутренности ПЗУ ZX Spectrum-а, вероятно, замечали, что последний
символ каждой текстовой строки как будто бы отсутствует.

```

~(.....6.....i ..0.NEXT
without FO.Variable not
foun.Subscript wron.Out
of memor.Out of scree.N
umber too bi.RETURN with
out GOSU.End of fil.STOP
statemen.Invalid argue
n.Integer out of rang.No
nsense in BASI.BREAK - C
ONT repeat.Out of DAT.In
valid file nam.No room f
or lin.STOP in INPU.FOR
without NEX.Invalid I/O
devic.Invalid colou.BREA
K into progra.RAMTOP no
goo.Statement los.Invali
d strea.FN without DE.Pa
rameter erro.Tape loadin
g erro,... 1982 Sinclair
Research Lt.>.....CI

```

Рис. 2.2: Часть ПЗУ ZX Spectrum

На самом деле, они присутствуют.

Вот фрагмент из дизассемблированного ПЗУ ZX Spectrum 128K:

```

L048C:  DEFM "MERGE erro"          ; Report 'a'.
        DEFB 'r'+$80
L0497:  DEFM "Wrong file typ"      ; Report 'b'.
        DEFB 'e'+$80
L04A6:  DEFM "CODE erro"          ; Report 'c'.
        DEFB 'r'+$80
L04B0:  DEFM "Too many bracket"    ; Report 'd'.
        DEFB 's'+$80
L04C1:  DEFM "File already exist"  ; Report 'e'.
        DEFB 's'+$80

```

(http://www.matthew-wilson.net/spectrum/rom/128_ROM0.html)

Последний символ имеет выставленный старший бит, который означает конец строки. Вероятно, так было сделано, чтобы сэкономить место? В старых 8-битных компьютерах был сильный дефицит памяти.

Символы всех сообщений всегда находятся в стандартной 7-битной ASCII-таблице, так что это гарантия, что 8-й бит никогда не используется для символов.

Чтобы вывести такую строку, мы должны проверять MSB каждого байта, и если он выставлен, мы должны его сбросить, затем вывести символ, затем остановиться. Вот пример на Си:

```

unsigned char hw[]=
{
    'H',
    'e',
    'l',
    'l',
    'o'|0x80
};

void print_string()
{
    for (int i=0; ;i++)
    {
        if (hw[i]&0x80) // проверить MSB
        {
            // сбросить MSB
            // (иными словами, сбросить всё, но оставить нетронутыми младшие 7 бит)
            printf ("%c", hw[i] & 0x7F);

```

2.5. И ИЛИ КАК ВЫЧИТАНИЕ И СЛОЖЕНИЕ

```
                // остановиться
                break;
            };
            printf ("%c", hw[i]);
        };
};
```

И вот что интересно, так как 8-й бит это самый старший бит (в байте), мы можем проверить его, выставить и сбросить используя арифметические операции вместо логических.

Я могу переписать свой пример на Си:

```
unsigned char hw[]=
{
    'H',
    'e',
    'l',
    'l',
    'o'+0x80
};

void print()
{
    for (int i=0; ;i++)
    {
        // hw[] должен иметь тип 'unsigned char'
        if (hw[i] >= 0x80) // проверить MSB
        {
            printf ("%c", hw[i]-0x80); // сбросить MSB
            // останов
            break;
        };
        printf ("%c", hw[i]);
    };
};
```

char по умолчанию это знаковый тип в Си/Си++, так что, чтобы сравнивать его с переменной вроде 0x80 (которая отрицательная (-128), если считается за знаковую), мы должны считать каждый символ сообщения как беззнаковый.

Теперь, если 8-й бит выставлен, число всегда больше или равно 0x80. Если 8-й бит сброшен, число всегда меньше 0x80.

И даже более того: если 8-й бит выставлен, его можно сбросить вычитанием 0x80, и ничего больше. Если он уже сброшен, впрочем, операция вычитания уничтожит другие биты.

Точно также, если 8-й бит сброшен, можно его выставить прибавлением 0x80. Но если он уже выставлен, операция сложения уничтожит остальные биты.

На самом деле, это справедливо для любого бита. Если 4-й бит сброшен, вы можете выставить его просто прибавлением 0x10: 0x100+0x10 = 0x110. Если 4-й бит выставлен, вы можете его сбросить вычитанием 0x10: 0x1234-0x10 = 0x1224.

Это работает, потому что перенос не случается во время сложения/вычитания. Хотя, он случится если бит уже выставлен перед сложением или сброшен перед вычитанием.

Точно также, сложение/вычитание можно заменить на операции *ИЛИ*/*И* если справедливы два условия: 1) вы хотите прибавить/вычесть число вида 2^n ; 2) бит в исходном значении сброшен/выставлен.

Например, прибавление 0x20 это то же что и применение *ИЛИ* со значением 0x20 с условием что этот бит был сброшен перед этим: 0x1204|0x20 = 0x1204+0x20 = 0x1224.

Вычитание 0x20 это то же что и применение *И* со значением 0x20 (0x...FFDF), но если этот бит был выставлен до этого: 0x1234&(~0x20) = 0x1234&0xFFDF = 0x1234-0x20 = 0x1214.

Опять же, это работает потому что перенос не случается если вы прибавляете число вида 2^n и этот бит до этого сброшен.

Это важное свойство булевой алгебры, его стоит понимать и помнить о нем.

Еще один пример в этой книге: [3.16.3](#) (стр. 529).

2.6. XOR (исключающее ИЛИ)

XOR (исключающее ИЛИ) часто используется для того чтобы поменять какой-то бит(ы) на противоположный. Действительно, операция XOR с 1 на самом деле просто инвертирует бит:

вход А	вход Б	выход
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

И наоборот, операция XOR с 0 ничего не делает, т.е. это холостая операция. Это очень важное свойство операции XOR и очень важно помнить его.

2.6.1. Бытовая речь

Оперция XOR присутствует в обычной бытовой речи. Когда кто-то просит “пожалуйста, купи яблок или бананов”, это обычно означает “купи первый объект, или второй, но не оба” — это и есть исключающее ИЛИ, потому что логическое ИЛИ означало бы “оба объекта тоже сгодятся”.

Некоторые люди предлагают использовать в речи “и/или”, чтобы подчеркнуть тот факт, что используется именно логическое ИЛИ вместо исключающего ИЛИ: <https://en.wikipedia.org/wiki/And/or>.

2.6.2. Шифрование

Исключающее ИЛИ много используется как в любительской криптографии (9.1), так и в настоящей (как минимум в сети Фестеля).

Эта операция очень удобна потому что: $\text{шифрованный_текст} = \text{исходный_текст} \oplus \text{ключ}$ и затем: $(\text{исходный_текст} \oplus \text{ключ}) \oplus \text{ключ} = \text{исходный_текст}$.

2.6.3. RAID4

RAID4 предлагает очень простой метод защиты жестких дисков. Например, есть несколько дисков (D_1, D_2, D_3 , итд.) и один диск чётности (*parity disk*) (P). Каждый бит/байт записываемый на диск чётности вычисляется на лету:

$$P = D_1 \oplus D_2 \oplus D_3 \quad (2.1)$$

Если один из дисков испортился, например, D_2 , он восстанавливается точно также:

$$D_2 = D_1 \oplus P \oplus D_3 \quad (2.2)$$

Если диск чётности испортился, он восстанавливается так же: 2.1. Если два любых диска испортились, тогда уже не получится восстановить оба.

RAID5 развился далее, но эта особенность исключающего ИЛИ используется и там.

Вот почему в контроллерах RAID были “XOR-акселераторы”, они помогали XOR-ить большие объемы данных на лету, перед записью на диски. Когда компьютеры стали быстрее, стало возможным делать это же программно, используя SIMD.

2.6.4. Алгоритм обмена значений при помощи исключающего ИЛИ

Трудно поверить, но этот код меняет значения в EAX и EBX без помощи вспомогательного регистра или ячейки памяти:

```
xor eax, ebx
xor ebx, eax
xor eax, ebx
```

2.6. XOR (ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ)

Посмотрим, как это работает. Для начала, мы перепишем этот код, чтобы отойти от ассемблера x86:

```
X = X XOR Y
Y = Y XOR X
X = X XOR Y
```

Что содержат X и Y на каждом шаге? Просто держите в памяти простое правило: $(X \oplus Y) \oplus Y = X$ для любых значений X и Y .

Посмотрим, X после первого шага это $X \oplus Y$; Y после второго шага это $Y \oplus (X \oplus Y) = X$; X после третьего шага это $(X \oplus Y) \oplus X = Y$.

Трудно сказать, стоит ли использовать этот трюк, но он служит неплохой демонстрацией свойств исключающего ИЛИ.

В статье Wikipedia (https://en.wikipedia.org/wiki/XOR_swap_algorithm) есть еще такое объяснение: можно использовать сложение и вычитание вместо исключающего ИЛИ:

```
X = X + Y
Y = X - Y
X = X - Y
```

Посмотрим: X после первого шага это $X + Y$; Y после второго шага это $X + Y - Y = X$; X после третьего шага это $X + Y - X = Y$.

2.6.5. Список связанный при помощи XOR

Двусвязный список это список, в котором каждый элемент имеет ссылку на предыдущий элемент и на следующий. Следовательно, легко перечислять элементы и вперед и назад. `std::list` в Си++ реализует двусвязный список, и он рассматривается в этой книге: 3.18.4.

Так что каждый элемент имеет два указателя. Возможно ли, вероятно, в среде где нужно экономить RAM, сохранить всю функциональность используя один указатель вместо двух? Да, если будем хранить значение \oplus в ячейке, которую обычно называют "link".

Можно быть, мы можем сказать, что адрес предыдущего элемента "зашифрован" используя адрес следующего элемента и наоборот: адрес следующего элемента "зашифрован" используя адрес предыдущего элемента.

Когда мы проходим по списку вперед, мы всегда знаем адрес предыдущего элемента, так что мы можем "расшифровать" это поле и получить адрес следующего элемента. Точно также, мы можем пройти по списку назад, "дешифруя" это поле используя адрес следующего элемента.

Но невозможно найти адрес предыдущего или следующего элемента определенного элемента без знания адреса первого элемента.

Еще кое-что: первый элемент будем иметь адрес следующего элемента без ничего, последний элемент будет иметь адрес предыдущего элемента без ничего.

Подведем итоги. Это пример двусвязного списка из 5-и элементов. A_x это адрес элемента.

адрес	содержимое поля <i>link</i>
A_0	A_1
A_1	$A_0 \oplus A_2$
A_2	$A_1 \oplus A_3$
A_3	$A_2 \oplus A_4$
A_4	A_3

И снова, трудно сказать, нужно ли использовать эти хаки, но это также хорошая демонстрация особенностей исключающего ИЛИ. Как и с алгоритмом обмена значений при помощи исключающего ИЛИ, в статье Wikipedia есть также предложение использовать сложение или вычитание вместо исключающего ИЛИ: https://en.wikipedia.org/wiki/XOR_linked_list.

2.6.6. Хэширование Zobrista / табуляционное хэширование

Если вы работаете над шахматным движком, вы проходите по дереву вариантов много раз в секунду, и часто, вы встречаете ту же позицию, которая уже была обработана.

2.7. ПОДСЧЕТ БИТ

Так что вам нужно использовать какой-нибудь метод для хранения где-то уже просчитанных позиций. Но шахматная позиция требует много памяти, и лучше бы использовать хэш-функцию.

Вот способ сжать шахматную позицию в 64-битное значение, называемый хэширование Zobrista:

```
// у нас доска 8*8 и 12 фигур (6 для белых и 6 для черных)

uint64_t table[12][8][8]; // заполнено случайными значениями

int position[8][8]; // для каждой клетки на доске. 0 – нет фигуры, 1..12 – фигура

uint64_t hash;

for (int row=0; row<8; row++)
    for (int col=0; col<8; col++)
    {
        int piece=position[row][col];

        if (piece!=0)
            hash=hash^table[piece][row][col];
    };

return hash;
```

Теперь самая интересная часть: если следующая (модифицированная) шахматная позиция отличается только одной (перемещенной) фигурой, вам не нужно пересчитывать хэш для всей позиции, все что вам нужно, это:

```
hash=...; // уже( посчитано)

// вычесть информацию о старой фигуре:
hash=hash^table[old_piece][old_row][old_col];

// добавить информацию о новой фигуре:
hash=hash^table[new_piece][new_row][new_col];
```

2.6.7. Кстати

Обычное *ИЛИ* иногда называют *включающее ИЛИ* (*inclusive OR*, или даже *IOR*), чтобы противопоставить его *исключающему ИЛИ*. Одно такое место это Питоновская библиотека *operator*: там это называется *operator.ior*.

2.6.8. AND/OR/XOR как MOV

Инструкция `OR reg, 0xFFFFFFFF` выставляет все биты в 1, следовательно, не важно что было в регистре перед этим, его значение будет выставлено в –1. Инструкция `OR reg, -1` короче, чем `MOV reg, -1`, так что MSVC использует `OR` вместо последней, например: [3.15.1](#) (стр. [518](#)).

Точно также, `AND reg, 0` всегда сбрасывает все биты, следовательно, работает как `MOV reg, 0`.

`XOR reg, reg`, не важно что было в регистре перед этим, сбрасывает все биты, и также работает как `MOV reg, 0`.

2.7. Подсчет бит

Инструкция `POPCNT` (*population count*) служит для подсчета бит во входном значении ([АКА](#) расстояние Хэмминга).

В качестве побочного эффекта, инструкция `POPCNT` (или операция) может использоваться, чтобы узнать, имеет ли значение вид 2^n . Так как числа 2^n всегда имеют только один выставленный бит, результат `POPCNT` всегда будет просто 1.

2.8. ENDIANNESS (ПОРЯДОК БАЙТ)

Например, я однажды написал сканер для поиска base64-строк в бинарных файлах²². И есть много мусора и ложных срабатываний, так что я добавил опцию для фильтрования блоков данных, размер которых 2^n байт (т.е., 256 байт, 512, 1024, итд.). Размер блока проверяется так:

```
if (popcnt(size)==1)
    // OK
...
```

Инструкция также известна как «инструкция АНБ²³» из-за слухов:

This branch of cryptography is fast-paced and very politically charged. Most designs are secret; a majority of military encryptions systems in use today are based on LFSRs. In fact, most Cray computers (Cray 1, Cray X-MP, Cray Y-MP) have a rather curious instruction generally known as “population count.” It counts the 1 bits in a register and can be used both to efficiently calculate the Hamming distance between two binary words and to implement a vectorized version of a LFSR. I’ve heard this called the canonical NSA instruction, demanded by almost all computer contracts.

[Bruce Schneier, *Applied Cryptography*, (John Wiley & Sons, 1994)]

2.8. Endianness (порядок байт)

Endianness (порядок байт) это способ представления чисел в памяти.

2.8.1. Big-endian (от старшего к младшему)

Число 0x12345678 представляется в памяти так:

адрес в памяти	значение байта
+0	0x12
+1	0x34
+2	0x56
+3	0x78

CPU с таким порядком включают в себя Motorola 68k, IBM POWER.

2.8.2. Little-endian (от младшего к старшему)

Число 0x12345678 представляется в памяти так:

адрес в памяти	значение байта
+0	0x78
+1	0x56
+2	0x34
+3	0x12

CPU с таким порядком байт включают в себя Intel x86.

2.8.3. Пример

Возьмем big-endian Linux для MIPS заинсталлированный в QEMU²⁴.

И скомпилируем этот простой пример:

²²<https://github.com/DennisYurichev/base64scanner>

²³Агентство национальной безопасности

²⁴Доступен для скачивания здесь: <http://go.yurichev.com/17008>


```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int v;

    v=123;

    printf ("%02X %02X %02X %02X\n",
            *(char*)&v,
            (((char*)&v)+1),
            (((char*)&v)+2),
            (((char*)&v)+3));
};
```

И запустим его:

```
root@debian-mips:~# ./a.out
00 00 00 7B
```

Это оно и есть. 0x7B это 123 в десятичном виде. В little-endian-архитектуре, 7B это первый байт (вы можете это проверить в x86 или x86-64), но здесь он последний, потому что старший байт идет первым.

Вот почему имеются разные дистрибутивы Linux для MIPS («mips» (big-endian) и «mipsel» (little-endian)). Программа скомпилированная для одного соглашения об endiannes, не сможет работать в OS использующей другое соглашение.

Еще один пример связанный с big-endian в MIPS в этой книге: [1.24.4](#) (стр. 356).

2.8.4. Bi-endian (переключаемый порядок)

CPU поддерживающие оба порядка, и его можно переключать, включают в себя ARM, PowerPC, SPARC, MIPS, [IA64²⁵](#), итд.

2.8.5. Конвертирование

Инструкция BSWAP может использоваться для конвертирования.

Сетевые пакеты TCP/IP используют соглашение big-endian, вот почему программа, работающая на little-endian архитектуре должна конвертировать значения.

Обычно, используются функции `htonl()` и `htons()`.

Порядок байт big-endian в среде TCP/IP также называется, «network byte order», а порядок байт на компьютере «host byte order». На архитектуре Intel x86, и других little-endian архитектурах, «host byte order» это little-endian, а вот на IBM POWER это может быть big-endian, так что на последней, `htonl()` и `htons()` не меняют порядок байт.

2.9. Память

Есть три основных типа памяти:

- Глобальная память [АКА](#) «static memory allocation». Нет нужды явно выделять, выделение происходит просто при объявлении переменных/массивов глобально. Это глобальные переменные расположенные в сегменте данных или констант. Доступны глобально (поэтому считаются [анти-паттерном](#)). Не удобны для буферов/массивов, потому что должны иметь фиксированный размер. Переполнения буфера, случающиеся здесь, обычно перезаписывают переменные или буферы расположенные рядом в памяти. Пример в этой книге: [1.9.2](#) (стр. 75).

²⁵Intel Architecture 64 (Itanium)

- Стек АКА «allocate on stack», «выделить память в/на стеке». Выделение происходит просто при объявлении переменных/массивов локально в функции. Обычно это локальные для функции переменные. Иногда эти локальные переменные также доступны и для нисходящих функций (callee-функциям, если функция-caller передает указатель на переменную в функцию-callee). Выделение и освобождение очень быстрое, достаточно просто сдвига SP.

Но также не удобно для буферов/массивов, потому что размер буфера фиксирован, если только не используется `alloca()` (1.7.2 (стр. 35)) (или массив с переменной длиной).

Переполнение буфера обычно перезаписывает важные структуры стека: 1.20.2 (стр. 265).

- Куча (heap) АКА «dynamic memory allocation», «выделить память в куче». Выделение происходит при помощи вызова `malloc()/free()` или `new/delete` в Си++.

Самый удобный метод: размер блока может быть задан во время исполнения. Изменение размера возможно (при помощи `realloc()`), но может быть медленным.

Это самый медленный метод выделения памяти: аллокатор памяти должен поддерживать и обновлять все управляющие структуры во время выделения и освобождения. Переполнение буфера обычно перезаписывает все эти структуры. Выделения в куче также ведут к проблеме утечек памяти: каждый выделенный блок должен быть явно освобожден, но кто-то может забыть об этом, или делать это неправильно. Еще одна проблема — это «использовать после освобождения» — использовать блок памяти после того как `free()` был вызван на нем, это тоже очень опасно. Пример в этой книге: 1.24.2 (стр. 339).

2.10. CPU

2.10.1. Предсказатели переходов

Некоторые современные компиляторы пытаются избавиться от инструкций условных переходов. Примеры в этой книге: 1.14.1 (стр. 125), 1.14.3 (стр. 133), 1.22.5 (стр. 321).

Это потому что предсказатель переходов далеко не всегда работает идеально, поэтому, компиляторы и стараются реже использовать переходы, если возможно.

Одна из возможностей — это условные инструкции в ARM (как `ADRcc`), а еще инструкция `CMOVcc` в x86.

2.10.2. Зависимости между данными

Современные процессоры способны исполнять инструкции одновременно (OOE²⁶), но для этого, внутри такой группы, результат одних не должен влиять на работу других. Следовательно, компилятор старается использовать инструкции с наименьшим влиянием на состояние процессора.

Вот почему инструкция `LEA` в x86 такая популярная — потому что она не модифицирует флаги процессора, а прочие арифметические инструкции — модифицируют.

2.11. Хеш-функции

Простейший пример это CRC32, алгоритм «более мощный» чем простая контрольная сумма, для проверки целостности данных. Невозможно восстановить оригинальный текст из хеша, там просто меньше информации: ведь текст может быть очень длинным, но результат CRC32 всегда ограничен 32 битами. Но CRC32 не надежна в криптографическом смысле: известны методы как изменить текст таким образом, чтобы получить нужный результат. Криптографические хеш-функции защищены от этого.

Такие функции как MD5, SHA1, итд, широко используются для хеширования паролей для хранения их в базе. Действительно: БД форума в интернете может и не хранить пароли (иначе злоумышленник получивший доступ к БД сможет узнать все пароли), а только хеши. К тому же, скрипту интернет-форума вовсе не обязательно знать ваш пароль, он только должен сверить его хеш с

²⁶Out-of-Order Execution

2.11. ХЕШ-ФУНКЦИИ

тем что лежит в БД, и дать вам доступ если сверка проходит. Один из самых простых способов взлома — это просто перебирать все пароли и ждать пока результат будет такой же как тот что нам нужен. Другие методы намного сложнее.

2.11.1. Как работает односторонняя функция?

Односторонняя функция, это функция, которая способна превратить из одного значения другое, при этом невозможно (или трудно) проделать обратную операцию. Некоторые люди имеют трудности с пониманием, как это возможно. Рассмотрим очень простой пример.

У нас есть ряд из 10-и чисел в пределах 0..9, каждое встречается один раз, например:

4 6 0 1 3 5 7 8 9 2

Алгоритм простейшей односторонней функции выглядит так:

- возьми число на нулевой позиции (у нас это 4);
- возьми число на первой позиции (у нас это 6);
- обменяй местами числа на позициях 4 и 6.

Отметим числа на позициях 4 и 6:

4 6 0 1 3 5 7 8 9 2
[^] [^]

Меняем их местами и получаем результат:

4 6 0 1 7 5 3 8 9 2

Глядя на результат, и даже зная алгоритм функции, мы не можем однозначно восстановить изначальное положение чисел. Ведь первые два числа могли быть 0 и/или 1, и тогда именно они могли бы участвовать в обмене.

Это крайне упрощенный пример для демонстрации, настоящие односторонние функции могут быть значительно сложнее.

Глава 3

Более сложные примеры

3.1. Двойное отрицание

Популярный способ¹ сконвертировать ненулевое значение в 1 (или булево *true*) и 0 в 0 (или булево *false*) это `!!statement`:

```
int convert_to_bool(int a)
{
    return !!a;
};
```

Оптимизирующий GCC 5.4 x86:

```
convert_to_bool:
    mov     edx, DWORD PTR [esp+4]
    xor     eax, eax
    test    edx, edx
    setne   al
    ret
```

XOR всегда очищает возвращаемое значение в EAX, даже если SETNE не работает. Т.е., XOR устанавливает возвращаемое значение (по умолчанию) в 0.

Если входное значение не равно нулю (суффикс -NE в инструкции SET), тогда 1 заносится в AL, иначе AL не модифицируется.

Почему SETNE работает с младшей 8-битной частью регистра EAX? Потому что значение имеет только последний бит (0 или 1), а остальные биты были уже сброшены при помощи XOR.

Следовательно, этот код на Си/Си++ может быть переписан так:

```
int convert_to_bool(int a)
{
    if (a!=0)
        return 1;
    else
        return 0;
};
```

...или даже:

```
int convert_to_bool(int a)
{
    if (a)
        return 1;
    else
        return 0;
};
```

Компиляторы, компилирующие для [CPU](#) у которых нет инструкции близкой к SET, в этом случае, генерируют инструкции условного перехода, итд.

¹Хотя и спорный, потому что приводит к трудночитаемому коду

3.2. Пример `strstr()`

Вернемся к тому факту, что GCC иногда использует только часть строки: 1.5.3 (стр. 18).

Ф-ция `strstr()` (из стандартной библиотеки Си/Си++) используется для поиска вхождений в строке. Вот что мы сделаем:

```
#include <string.h>
#include <stdio.h>

int main()
{
    char *s="Hello, world!";
    char *w=strstr(s, "world");

    printf ("%p, [%s]\n", s, s);
    printf ("%p, [%s]\n", w, w);
};
```

Вывод:

```
0x8048530, [Hello, world!]
0x8048537, [world!]
```

Разница между адресом оригинальной строки и адресом подстроки, который вернула `strstr()`, это 7. Действительно, строка «Hello, » имеет длину в 7 символов.

Ф-ция `printf()` во время второго вызова не знает о том, что перед переданной строкой имеются еще какие-то символы, и печатает символы с середины оригинальной строки, до конца (который обозначен нулевым байтом).

3.3. Конвертирование температуры

Еще один крайне популярный пример из книг по программированию для начинающих, это простейшая программа для конвертирования температуры по Фаренгейту в температуру по Цельсию.

$$C = \frac{5 \cdot (F - 32)}{9}$$

Мы также добавим простейшую обработку ошибок: 1) мы должны проверять правильность ввода пользователем; 2) мы должны проверять результат, не ниже ли он -273 по Цельсию (что, как мы можем помнить из школьных уроков физики, ниже абсолютного нуля).

Функция `exit()` заканчивает программу тут же, без возврата в вызывающую функцию.

3.3.1. Целочисленные значения

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    int celsius, fahr;
    printf ("Enter temperature in Fahrenheit:\n");
    if (scanf ("%d", &fahr)!=1)
    {
        printf ("Error while parsing your input\n");
        exit(0);
    };

    celsius = 5 * (fahr-32) / 9;

    if (celsius<-273)
    {
```

3.3. КОНВЕРТИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

```
        printf ("Error: incorrect temperature!\n");
        exit(0);
    };
    printf ("Celsius: %d\n", celsius);
};
```

Оптимизирующий MSVC 2012 x86

Листинг 3.1: Оптимизирующий MSVC 2012 x86

```
$SG4228 DB    'Enter temperature in Fahrenheit:', 0aH, 00H
$SG4230 DB    '%d', 00H
$SG4231 DB    'Error while parsing your input', 0aH, 00H
$SG4233 DB    'Error: incorrect temperature!', 0aH, 00H
$SG4234 DB    'Celsius: %d', 0aH, 00H

_fahr$ = -4    ; size = 4
_main PROC
    push    ecx
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR __imp__printf
    push    OFFSET $SG4228    ; 'Enter temperature in Fahrenheit:'
    call    esi                ; вызвать printf()
    lea     eax, DWORD PTR _fahr$[esp+12]
    push    eax
    push    OFFSET $SG4230    ; '%d'
    call    DWORD PTR __imp__scanf
    add     esp, 12
    cmp     eax, 1
    je      SHORT $LN2@main
    push    OFFSET $SG4231    ; 'Error while parsing your input'
    call    esi                ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN9@main:
$LN2@main:
    mov     eax, DWORD PTR _fahr$[esp+8]
    add     eax, -32          ; ffffffff0H
    lea     ecx, DWORD PTR [eax+eax*4]
    mov     eax, 954437177    ; 38e38e39H
    imul    ecx
    sar     edx, 1
    mov     eax, edx
    shr     eax, 31          ; 0000001fH
    add     eax, edx
    cmp     eax, -273        ; ffffffeefH
    jge     SHORT $LN10@main
    push    OFFSET $SG4233    ; 'Error: incorrect temperature!'
    call    esi                ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN10@main:
$LN1@main:
    push    eax
    push    OFFSET $SG4234    ; 'Celsius: %d'
    call    esi                ; вызвать printf()
    add     esp, 8
    ; возврат 0 – по стандарту C99
    xor     eax, eax
    pop     esi
    pop     ecx
    ret     0
$LN8@main:
_main ENDP
```

Что мы можем сказать об этом:

3.3. КОНВЕРТИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

- Адрес функции `printf()` в начале загружается в регистр `ESI` так что последующие вызовы `printf()` происходят просто при помощи инструкции `CALL ESI`. Это очень популярная техника компиляторов, может присутствовать, если имеются несколько вызовов одной и той же функции в одном месте, и/или имеется свободный регистр для этого.
- Мы видим инструкцию `ADD EAX, -32` в том месте где от значения должно отняться 32. $EAX = EAX + (-32)$ эквивалентно $EAX = EAX - 32$ и как-то компилятор решил использовать `ADD` вместо `SUB`. Может быть оно того стоит, но сказать трудно.
- Инструкция `LEA` используются там, где нужно умножить значение на 5: `lea ecx, DWORD PTR [eax+eax*4]`. Да, $i + i * 4$ эквивалентно $i * 5$ и `LEA` работает быстрее чем `IMUL`. Кстати, пара инструкций `SHL EAX, 2 / ADD EAX, EAX` может быть использована здесь вместо `LEA`— некоторые компиляторы так и делают.
- Деление через умножение (3.9 (стр. 487)) также используется здесь.
- Функция `main()` возвращает 0 хотя `return 0` в конце функции отсутствует. В стандарте C99 [ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard), (2007)5.1.2.2.3] указано что `main()` будет возвращать 0 в случае отсутствия выражения `return`. Это правило работает только для функции `main()`. И хотя, `MSVC` официально не поддерживает C99, может быть частично и поддерживает?

Оптимизирующий MSVC 2012 x64

Код почти такой же, хотя мы заметим инструкцию `INT 3` после каждого вызова `exit()`.

```
xor    ecx, ecx
call   QWORD PTR __imp_exit
int     3
```

`INT 3` это точка останова для отладчика.

Известно что функция `exit()` из тех, что никогда не возвращают управление², так что если управление все же возвращается, значит происходит что-то крайне странное, и пришло время запускать отладчик.

3.3.2. Числа с плавающей запятой

```
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int main()
{
    double celsius, fahr;
    printf ("Enter temperature in Fahrenheit:\n");
    if (scanf ("%lf", &fahr)!=1)
    {
        printf ("Error while parsing your input\n");
        exit(0);
    };

    celsius = 5 * (fahr-32) / 9;

    if (celsius<-273)
    {
        printf ("Error: incorrect temperature!\n");
        exit(0);
    };
    printf ("Celsius: %lf\n", celsius);
};
```

`MSVC 2010 x86` использует инструкции `FPU`...

Листинг 3.2: Оптимизирующий MSVC 2010 x86

```
$SG4038 DB    'Enter temperature in Fahrenheit:', 0aH, 00H
$SG4040 DB    '%lf', 00H
```

²еще одна популярная из того же ряда это `longjmp()`

3.3. КОНВЕРТИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

```

$SG4041 DB      'Error while parsing your input', 0aH, 00H
$SG4043 DB      'Error: incorrect temperature!', 0aH, 00H
$SG4044 DB      'Celsius: %lf', 0aH, 00H

__real@0c0711000000000000 DQ 0c0711000000000000r    ; -273
__real@402200000000000000 DQ 040220000000000000r    ; 9
__real@401400000000000000 DQ 040140000000000000r    ; 5
__real@404000000000000000 DQ 040400000000000000r    ; 32

_fahr$ = -8      ; size = 8
_main PROC
    sub     esp, 8
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR __imp__printf
    push    OFFSET $SG4038      ; 'Enter temperature in Fahrenheit:'
    call    esi                ; вызвать printf()
    lea     eax, DWORD PTR _fahr$[esp+16]
    push    eax
    push    OFFSET $SG4040      ; '%lf'
    call    DWORD PTR __imp__scanf
    add     esp, 12
    cmp     eax, 1
    je      SHORT $LN2@main
    push    OFFSET $SG4041      ; 'Error while parsing your input'
    call    esi                ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN2@main:
    fld     QWORD PTR _fahr$[esp+12]
    fsub    QWORD PTR __real@404000000000000000 ; 32
    fmul    QWORD PTR __real@401400000000000000 ; 5
    fdiv    QWORD PTR __real@402200000000000000 ; 9
    fld     QWORD PTR __real@0c0711000000000000 ; -273
    fcomp   ST(1)
    fnstsw  ax
    test    ah, 65              ; 00000041H
    jne     SHORT $LN1@main
    push    OFFSET $SG4043      ; 'Error: incorrect temperature!'
    fstp    ST(0)
    call    esi                ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN1@main:
    sub     esp, 8
    fstp    QWORD PTR [esp]
    push    OFFSET $SG4044      ; 'Celsius: %lf'
    call    esi
    add     esp, 12
    ; возврат 0 – по стандарту C99
    xor     eax, eax
    pop     esi
    add     esp, 8
    ret     0
$LN10@main:
_main ENDP

```

...но MSVC от года 2012 использует инструкции **SIMD** вместо этого:

Листинг 3.3: Оптимизирующий MSVC 2010 x86

```

$SG4228 DB      'Enter temperature in Fahrenheit:', 0aH, 00H
$SG4230 DB      '%lf', 00H
$SG4231 DB      'Error while parsing your input', 0aH, 00H
$SG4233 DB      'Error: incorrect temperature!', 0aH, 00H
$SG4234 DB      'Celsius: %lf', 0aH, 00H

__real@0c0711000000000000 DQ 0c0711000000000000r    ; -273
__real@404000000000000000 DQ 040400000000000000r    ; 32
__real@402200000000000000 DQ 040220000000000000r    ; 9
__real@401400000000000000 DQ 040140000000000000r    ; 5

```


3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

```
_fahr$ = -8      ; size = 8
_main PROC
    sub     esp, 8
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR __imp__printf
    push    OFFSET $SG4228      ; 'Enter temperature in Fahrenheit:'
    call    esi                 ; вызвать printf()
    lea     eax, DWORD PTR _fahr$[esp+16]
    push    eax
    push    OFFSET $SG4230      ; '%lf'
    call    DWORD PTR __imp__scanf
    add     esp, 12
    cmp     eax, 1
    je      SHORT $LN2@main
    push    OFFSET $SG4231      ; 'Error while parsing your input'
    call    esi                 ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN9@main:
$LN2@main:
    movsd   xmm1, QWORD PTR _fahr$[esp+12]
    subsd   xmm1, QWORD PTR __real@4040000000000000 ; 32
    movsd   xmm0, QWORD PTR __real@C071100000000000 ; -273
    mulsd   xmm1, QWORD PTR __real@4014000000000000 ; 5
    divsd   xmm1, QWORD PTR __real@4022000000000000 ; 9
    comisd  xmm0, xmm1
    jbe     SHORT $LN1@main
    push    OFFSET $SG4233      ; 'Error: incorrect temperature!'
    call    esi                 ; вызвать printf()
    add     esp, 4
    push    0
    call    DWORD PTR __imp__exit
$LN10@main:
$LN1@main:
    sub     esp, 8
    movsd   QWORD PTR [esp], xmm1
    push    OFFSET $SG4234      ; 'Celsius: %lf'
    call    esi                 ; вызвать printf()
    add     esp, 12
    ; возврат 0 – по стандарту C99
    xor     eax, eax
    pop     esi
    add     esp, 8
    ret     0
$LN8@main:
_main ENDP
```

Конечно, SIMD-инструкции доступны и в x86-режиме, включая те что работают с числами с плавающей запятой. Их использовать в каком-то смысле проще, так что новый компилятор от Microsoft теперь применяет их.

Мы можем также заметить, что значение `-273` загружается в регистр `XMM0` слишком рано. И это нормально, потому что компилятор может генерировать инструкции далеко не в том порядке, в котором они появляются в исходном коде.

3.4. Числа Фибоначчи

Еще один часто используемый пример в учебниках по программированию это рекурсивная функция, генерирующая числа Фибоначчи ³. Последовательность очень простая: каждое следующее число — это сумма двух предыдущих. Первые два числа — это 0 и 1, или 1 и 1.

Начало последовательности:

0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377, 610, 987, 1597, 2584, 4181...

³<http://go.yurichev.com/17332>

3.4.1. Пример #1

Реализация проста. Эта программа генерирует последовательность вплоть до 21.

```
#include <stdio.h>

void fib (int a, int b, int limit)
{
    printf ("%d\n", a+b);
    if (a+b > limit)
        return;
    fib (b, a+b, limit);
};

int main()
{
    printf ("0\n1\n1\n1\n");
    fib (1, 1, 20);
};
```

Листинг 3.4: MSVC 2010 x86

```
_a$ = 8                ; size = 4
_b$ = 12               ; size = 4
_limit$ = 16           ; size = 4
_fib PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    add     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    push    eax
    push    OFFSET $SG2643
    call    DWORD PTR __imp__printf
    add     esp, 8
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
    add     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    cmp     ecx, DWORD PTR _limit$[ebp]
    jle     SHORT $LN1@fib
    jmp     SHORT $LN2@fib
$LN1@fib:
    mov     edx, DWORD PTR _limit$[ebp]
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    add     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    push    eax
    mov     ecx, DWORD PTR _b$[ebp]
    push    ecx
    call    _fib
    add     esp, 12
$LN2@fib:
    pop     ebp
    ret     0
_fib ENDP

_main PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    OFFSET $SG2647 ; "0\n1\n1\n1\n"
    call    DWORD PTR __imp__printf
    add     esp, 4
    push    20
    push    1
    push    1
    call    _fib
    add     esp, 12
    xor     eax, eax
    pop     ebp
    ret     0
_main ENDP
```

3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Этим мы проиллюстрируем стековые фреймы.

3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Загрузим пример в OllyDbg и дотрассируем до самого последнего вызова функции `f()`:

The screenshot displays the OllyDbg interface with the following components:

- CPU - main thread, module fib:** Shows assembly code. The instruction `CALL fib.00FD1030` is highlighted, with a comment `CALL DWORD PTR DS:[&MSUCR100.printf]`.
- Registers (FPU):** Shows the state of registers. The EIP register is set to `00FD1030 fib.00FD1030`.
- Disassembly:** Shows the return sequence from `00FD1039` to `00FD1030`, with comments like `RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1030`.

Рис. 3.1: OllyDbg: последний вызов `f()`

3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Исследуем стек более пристально. Комментарии автора книги ⁴:

```
0035F940 00FD1039 RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1000
0035F944 00000008 первый аргумент: a
0035F948 0000000D второй аргумент: b
0035F94C 00000014 третий аргумент: limit
0035F950 /0035F964 сохраненный регистр EBP
0035F954 |00FD1039 RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1000
0035F958 |00000005 первый аргумент: a
0035F95C |00000008 второй аргумент: b
0035F960 |00000014 третий аргумент: limit
0035F964 |0035F978 сохраненный регистр EBP
0035F968 |00FD1039 RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1000
0035F96C |00000003 первый аргумент: a
0035F970 |00000005 второй аргумент: b
0035F974 |00000014 третий аргумент: limit
0035F978 |0035F98C сохраненный регистр EBP
0035F97C |00FD1039 RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1000
0035F980 |00000002 первый аргумент: a
0035F984 |00000003 второй аргумент: b
0035F988 |00000014 третий аргумент: limit
0035F98C |0035F9A0 сохраненный регистр EBP
0035F990 |00FD1039 RETURN to fib.00FD1039 from fib.00FD1000
0035F994 |00000001 первый аргумент: a
0035F998 |00000002 второй аргумент: b
0035F99C |00000014 третий аргумент: limit
0035F9A0 |0035F9B4 сохраненный регистр EBP
0035F9A4 |00FD105C RETURN to fib.00FD105C from fib.00FD1000
0035F9A8 |00000001 первый аргумент: a \
0035F9AC |00000001 второй аргумент: b | подготовлено в main() для f1()
0035F9B0 |00000014 третий аргумент: limit /
0035F9B4 |0035F9F8 сохраненный регистр EBP
0035F9B8 |00FD11D0 RETURN to fib.00FD11D0 from fib.00FD1040
0035F9BC |00000001 main() первый аргумент: argc \
0035F9C0 |006812C8 main() второй аргумент: argv | подготовлено в CRT для main()
0035F9C4 |00682940 main() третий аргумент: envp /
```

Функция рекурсивная ⁵, поэтому стек выглядит как «бутерброд».

Мы видим, что аргумент *limit* всегда один и тот же (0x14 или 20), но аргументы *a* и *b* разные при каждом вызове.

Здесь также адреса [RA](#) и сохраненные значения EBP. OllyDbg способна определять EBP-фреймы, так что она тут нарисовала скобки. Значения внутри каждой скобки это [stack frame](#), иными словами, место, которое каждая инкарнация функции может использовать для любых своих нужд. Можно сказать, каждая инкарнация функции не должна обращаться к элементам стека за пределами фрейма (не учитывая аргументов функции), хотя это и возможно технически. Обычно это так и есть, если только функция не содержит каких-то ошибок. Каждое сохраненное значение EBP это адрес предыдущего [stack frame](#): это причина, почему некоторые отладчики могут легко делить стек на фреймы и выводить аргументы каждой функции.

Как видно, каждая инкарнация функции готовит аргументы для следующего вызова функции.

В самом конце мы видим 3 аргумента функции `main()`. `argc` равен 1 (да, действительно, ведь мы запустили эту программу без аргументов в командной строке).

Очень легко привести к переполнению стека: просто удалите (или закомментируйте) проверку предела и процесс упадет с исключением 0xC00000FD (переполнение стека.)

3.4.2. Пример #2

В моей функции есть некая избыточность, так что добавим переменную *next* и заменим на нее все «a+b»:

```
#include <stdio.h>
```

⁴Кстати, в OllyDbg можно отметить несколько элементов и скопировать их в клипбоард (Ctrl-C). Это было сделано для этого примера

⁵т.е. вызывающая сама себя

3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

```
void fib (int a, int b, int limit)
{
    int next=a+b;
    printf ("%d\n", next);
    if (next > limit)
        return;
    fib (b, next, limit);
};

int main()
{
    printf ("0\n1\n1\n1\n");
    fib (1, 1, 20);
};
```

Это результат работы неоптимизирующего MSVC, поэтому переменная *next* действительно находится в локальном стеке:

Листинг 3.5: MSVC 2010 x86

```
_next$ = -4      ; size = 4
_a$ = 8         ; size = 4
_b$ = 12        ; size = 4
_limit$ = 16    ; size = 4
_fib PROC
    push        ebp
    mov         ebp, esp
    push        ecx
    mov         eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    add         eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    mov         DWORD PTR _next$[ebp], eax
    mov         ecx, DWORD PTR _next$[ebp]
    push        ecx
    push        OFFSET $SG2751 ; '%d'
    call        DWORD PTR __imp__printf
    add         esp, 8
    mov         edx, DWORD PTR _next$[ebp]
    cmp         edx, DWORD PTR _limit$[ebp]
    jle         SHORT $LN1@fib
    jmp         SHORT $LN2@fib
$LN1@fib:
    mov         eax, DWORD PTR _limit$[ebp]
    push        eax
    mov         ecx, DWORD PTR _next$[ebp]
    push        ecx
    mov         edx, DWORD PTR _b$[ebp]
    push        edx
    call        _fib
    add         esp, 12
$LN2@fib:
    mov         esp, ebp
    pop         ebp
    ret         0
_fib ENDP

_main PROC
    push        ebp
    mov         ebp, esp
    push        OFFSET $SG2753 ; "0\n1\n1\n1\n"
    call        DWORD PTR __imp__printf
    add         esp, 4
    push        20
    push        1
    push        1
    call        _fib
    add         esp, 12
    xor         eax, eax
    pop         ebp
    ret         0
_main ENDP
```


3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Загрузим OllyDbg снова:

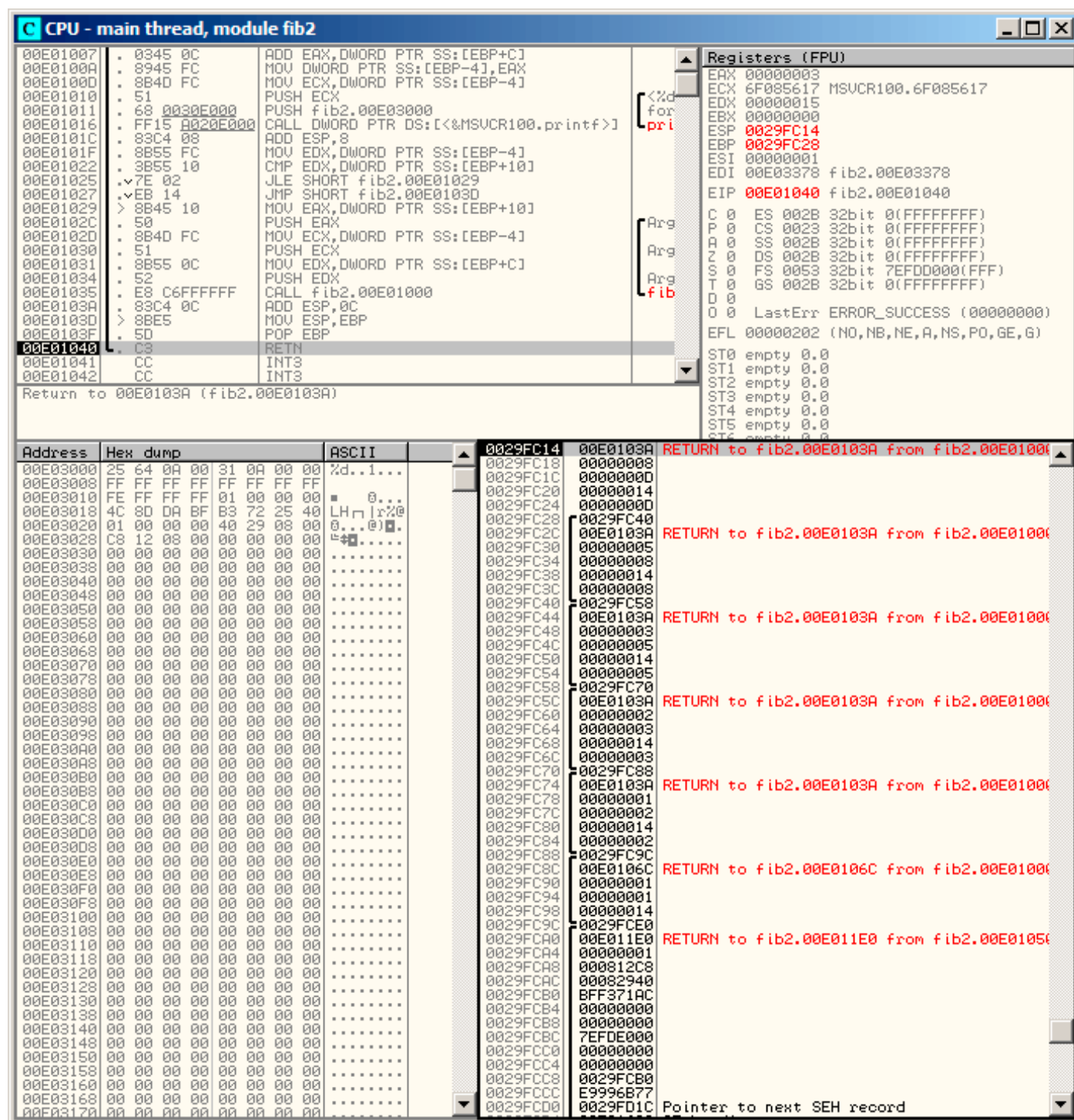


Рис. 3.2: OllyDbg: последний вызов f()

Теперь переменная *next* присутствует в каждом фрейме.

3.4. ЧИСЛА ФИБОНАЧЧИ

Рассмотрим стек более пристально. Автор и здесь добавил туда своих комментариев:

0029FC14	00E0103A	RETURN to fib2.00E0103A from fib2.00E01000	
0029FC18	00000008	первый аргумент: a	
0029FC1C	0000000D	второй аргумент: b	
0029FC20	00000014	третий аргумент: limit	
0029FC24	0000000D	переменная "next"	
0029FC28	/0029FC40	сохраненный регистр EBP	
0029FC2C	|00E0103A	RETURN to fib2.00E0103A from fib2.00E01000	
0029FC30	|00000005	первый аргумент: a	
0029FC34	|00000008	второй аргумент: b	
0029FC38	|00000014	третий аргумент: limit	
0029FC3C	|00000008	переменная "next"	
0029FC40	]0029FC58	сохраненный регистр EBP	
0029FC44	|00E0103A	RETURN to fib2.00E0103A from fib2.00E01000	
0029FC48	|00000003	первый аргумент: a	
0029FC4C	|00000005	второй аргумент: b	
0029FC50	|00000014	третий аргумент: limit	
0029FC54	|00000005	переменная "next"	
0029FC58	]0029FC70	сохраненный регистр EBP	
0029FC5C	|00E0103A	RETURN to fib2.00E0103A from fib2.00E01000	
0029FC60	|00000002	первый аргумент: a	
0029FC64	|00000003	второй аргумент: b	
0029FC68	|00000014	третий аргумент: limit	
0029FC6C	|00000003	переменная "next"	
0029FC70	]0029FC88	сохраненный регистр EBP	
0029FC74	|00E0103A	RETURN to fib2.00E0103A from fib2.00E01000	
0029FC78	|00000001	первый аргумент: a	\
0029FC7C	|00000002	второй аргумент: b	| подготовлено в f1() для следующего вызова ↗
↙ f1()			
0029FC80	|00000014	третий аргумент: limit	/
0029FC84	|00000002	переменная "next"	
0029FC88	]0029FC9C	сохраненный регистр EBP	
0029FC8C	|00E0106C	RETURN to fib2.00E0106C from fib2.00E01000	
0029FC90	|00000001	первый аргумент: a	\
0029FC94	|00000001	второй аргумент: b	| подготовлено в main() для f1()
0029FC98	|00000014	третий аргумент: limit	/
0029FC9C	]0029FCE0	сохраненный регистр EBP	
0029FCA0	|00E011E0	RETURN to fib2.00E011E0 from fib2.00E01050	
0029FCA4	|00000001	main() первый аргумент: argc	\
0029FCA8	|000812C8	main() второй аргумент: argv	| подготовлено в CRT для main()
0029FCAC	|00082940	main() третий аргумент: envp	/

Значение переменной *next* вычисляется в каждой инкарнации функции, затем передается аргумент *b* в следующую инкарнацию.

3.4.3. Итог

Рекурсивные функции эстетически красивы, но технически могут ухудшать производительность из-за активного использования стека. Тот, кто пишет критические к времени исполнения участки кода, наверное, должен избегать применения там рекурсии.

Например, однажды автор этих строк написал функцию для поиска нужного узла в двоичном дереве. Рекурсивно она выглядела очень красиво, но из-за того, что при каждом вызове тратилось время на эпилог и пролог, все это работало в несколько раз медленнее чем та же функция, но без рекурсии.

Кстати, поэтому некоторые компиляторы функциональных ЯП⁶ (где рекурсия активно применяется) используют **хвостовую рекурсию**. Хвостовая рекурсия, это когда ф-ция имеет только один вызов самой себя, в самом конце, например:

Листинг 3.6: Scheme, пример взят из Wikipedia

```
;; factorial : number -> number
;; to calculate the product of all positive
;; integers less than or equal to n.
(define (factorial n)
```

⁶LISP, Python, Lua, etc.

3.5. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ CRC32

```
(if (= n 1)
  1
  (* n (factorial (- n 1)))))
```

Хвостовая рекурсия важна, потому что компилятор может легко переработать такой код в итеративный, чтобы избавиться от рекурсии.

3.5. Пример вычисления CRC32

Это распространенный табличный способ вычисления хеша алгоритмом CRC32⁷.

```
/* By Bob Jenkins, (c) 2006, Public Domain */

#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <string.h>

typedef unsigned long ub4;
typedef unsigned char ub1;

static const ub4 crctab[256] = {
    0x00000000, 0x77073096, 0xee0e612c, 0x990951ba, 0x076dc419,
    0x706af48f, 0xe963a535, 0x9e6495a3, 0x0edb8832, 0x79dcb8a4,
    0xe0d5e91e, 0x97d2d988, 0x09b64c2b, 0x7eb17cbd, 0xe7b82d07,
    0x90bf1d91, 0x1db71064, 0x6ab020f2, 0xf3b97148, 0x84be41de,
    0x1dad47d, 0x6ddde4eb, 0xf4d4b551, 0x83d385c7, 0x136c9856,
    0x646ba8c0, 0xfd62f97a, 0x8a65c9ec, 0x14015c4f, 0x63066cd9,
    0xfa0f3d63, 0x8d080df5, 0x3b6e20c8, 0x4c69105e, 0xd56041e4,
    0xa2677172, 0x3c03e4d1, 0x4b04d447, 0xd20d85fd, 0xa50ab56b,
    0x35b5a8fa, 0x42b2986c, 0xdbbbc9d6, 0xacbcf940, 0x32d86ce3,
    0x45df5c75, 0xdcd60dcf, 0xabd13d59, 0x26d930ac, 0x51de003a,
    0xc8d75180, 0xbfdb06116, 0x21b4f4b5, 0x56b3c423, 0xcfba9599,
    0xb8bda50f, 0x2802b89e, 0x5f058808, 0xc60cd9b2, 0xb10be924,
    0x2f6f7c87, 0x58684c11, 0xc1611dab, 0xb6662d3d, 0x76dc4190,
    0x01db7106, 0x98d220bc, 0xefd5102a, 0x71b18589, 0x06b6b51f,
    0x9fbfe4a5, 0xe8b8d433, 0x7807c9a2, 0xf00f934, 0x9609a88e,
    0xe10e9818, 0xf7f6a0dbb, 0x086d3d2d, 0x91646c97, 0xe6635c01,
    0x6b6b51f4, 0x1c6c6162, 0x856530d8, 0xf262004e, 0x6c0695ed,
    0x1b01a57b, 0x8208f4c1, 0xf50fc457, 0x65b0d9c6, 0x12b7e950,
    0x8bbeb8ea, 0xfcb9887c, 0x62dd1ddf, 0x15da2d49, 0x8cd37cf3,
    0xfbd44c65, 0x4db26158, 0x3ab551ce, 0xa3bc0074, 0xd4bb30e2,
    0x4adfa541, 0x3dd895d7, 0xa4d1c46d, 0xd3d6f4fb, 0x4369e96a,
    0x346ed9fc, 0xad678846, 0xda60b8d0, 0x44042d73, 0x33031de5,
    0xaa0a4c5f, 0xdd0d7cc9, 0x5005713c, 0x270241aa, 0xbe0b1010,
    0xc90c2086, 0x5668b525, 0x206f85b3, 0xb966d409, 0xce61e49f,
    0x5edef90e, 0x29d9c998, 0xb0d09822, 0xc7d7a8b4, 0x59b33d17,
    0x2eb40d81, 0xb7bd5c3b, 0xc0ba6cad, 0xedb88320, 0x9abfb3b6,
    0x03b6e20c, 0x74b1d29a, 0xead54739, 0x9dd277af, 0x04db2615,
    0x73dc1683, 0xe3630b12, 0x94643b84, 0x0d6d6a3e, 0x7a6a5aa8,
    0xe40ecf0b, 0x9309ff9d, 0x0a00ae27, 0x7d079eb1, 0xf00f9344,
    0x8708a3d2, 0x1e01f268, 0x6906c2fe, 0xf762575d, 0x806567cb,
    0x196c3671, 0x6e6b06e7, 0xfed41b76, 0x89d32be0, 0x10da7a5a,
    0x67dd4acc, 0xf9b9df6f, 0x8ebeeff9, 0x17b7be43, 0x60b08ed5,
    0xd6d6a3e8, 0xa1d1937e, 0x38d8c2c4, 0x4fdff252, 0xd1bb67f1,
    0xa6bc5767, 0x3fb506dd, 0x48b2364b, 0xd80d2bda, 0xaf0a1b4c,
    0x36034af6, 0x41047a60, 0xdf60efc3, 0xa867df55, 0x316e8eef,
    0x4669be79, 0xcb61b38c, 0xbc66831a, 0x256fd2a0, 0x5268e236,
    0xcc0c7795, 0xbb0b4703, 0x220216b9, 0x5505262f, 0xc5ba3bbe,
    0xb2bd0b28, 0x2bb45a92, 0x5cb36a04, 0xc2d7ffa7, 0xb5d0cf31,
    0x2cd99e8b, 0x5bdeae1d, 0x9b64c2b0, 0xec63f226, 0x756aa39c,
    0x026d930a, 0x9c0906a9, 0xeb0e363f, 0x72076785, 0x05005713,
    0x95bf4a82, 0xe2b87a14, 0x7bb12bae, 0x0cb61b38, 0x92d28e9b,
    0xe5d5be0d, 0x7cdcefb7, 0x0bdbdf21, 0x86d3d2d4, 0xf1d4e242,
    0x68ddb3f8, 0x1fda833e, 0x81be16cd, 0xf6b9265b, 0x6fb077e1,
    0x18b74777, 0x88085ae6, 0xff0f6a70, 0x66063bca, 0x11010b5c,
```

⁷Исходник взят тут: <http://go.yurichev.com/17327>

3.5. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ CRC32

```
0x8f659eff, 0xf862ae69, 0x616bffd3, 0x166ccf45, 0xa00ae278,
0xd70dd2ee, 0x4e048354, 0x3903b3c2, 0xa7672661, 0xd06016f7,
0x4969474d, 0x3e6e77db, 0xaed16a4a, 0xd9d65adc, 0x40df0b66,
0x37d83bf0, 0xa9bcae53, 0xdeb9ec5, 0x47b2cf7f, 0x30b5ffe9,
0xbdbdf21c, 0xcabac28a, 0x53b39330, 0x24b4a3a6, 0xbad03605,
0xcdd70693, 0x54de5729, 0x23d967bf, 0xb3667a2e, 0xc4614ab8,
0x5d681b02, 0x2a6f2b94, 0xb40bbe37, 0xc30c8ea1, 0x5a05df1b,
0x2d02ef8d
};

/* how to derive the values in crctab[] from polynomial 0xedb88320 */
void build_table()
{
    ub4 i, j;
    for (i=0; i<256; ++i) {
        j = i;
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        j = (j>>1) ^ ((j&1) ? 0xedb88320 : 0);
        printf("0x%.8lx, ", j);
        if (i%6 == 5) printf("\n");
    }
}

/* the hash function */
ub4 crc(const void *key, ub4 len, ub4 hash)
{
    ub4 i;
    const ub1 *k = key;
    for (hash=len, i=0; i<len; ++i)
        hash = (hash >> 8) ^ crctab[(hash & 0xff) ^ k[i]];
    return hash;
}

/* To use, try "gcc -O crc.c -o crc; crc < crc.c" */
int main()
{
    char s[1000];
    while (gets(s)) printf("%.8lx\n", crc(s, strlen(s), 0));
    return 0;
}
```

Нас интересует функция `crc()`. Кстати, обратите внимание на два инициализатора в выражении `for()`: `hash=len`, `i=0`. Стандарт Си/Си++, конечно, допускает это. А в итоговом коде, вместо одной операции инициализации цикла, будет две.

Компилируем в MSVC с оптимизацией (`/Ox`). Для краткости, я приведу только функцию `crc()`, с некоторыми комментариями.

```
_key$ = 8          ; size = 4
_len$ = 12         ; size = 4
_hash$ = 16        ; size = 4
_crc PROC
    mov     edx, DWORD PTR _len$[esp-4]
    xor     ecx, ecx ; i будет лежать в регистре ECX
    mov     eax, edx
    test    edx, edx
    jbe     SHORT $LN1@crc
    push    ebx
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _key$[esp+4] ; ESI = key
    push    edi
$LL3@crc:
```

3.5. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ CRC32

```
; работаем с байтами используя 32-битные регистры. в EDI положим байт с адреса key+i

movzx  edi, BYTE PTR [ecx+esi]
mov     ebx, eax ; EBX = (hash = len)
and     ebx, 255 ; EBX = hash & 0xff

; XOR EDI, EBX (EDI=EDI^EBX) – эта операция задействует все 32 бита каждого регистра
; но остальные биты (8–31) будут обнулены всегда, так что все ОК
; они обнулены потому что для EDI это было сделано инструкцией MOVZX выше
; а старшие биты EBX были сброшены инструкцией AND EBX, 255 (255 = 0xff)

xor     edi, ebx

; EAX=EAX>>8; образовавшиеся из ниоткуда биты в результате биты( 24–31) будут заполнены нулями
shr     eax, 8

; EAX=EAX^crctab[EDI*4] – выбираем элемент из таблицы crctab[] под номером EDI
xor     eax, DWORD PTR _crctab[edi*4]
inc     ecx          ; i++
cmp     ecx, edx      ; i<len ?
jb      SHORT $LL3@crc ; да
pop     edi
pop     esi
pop     ebx
$LN1@crc:
ret     0
_crc    ENDP
```

Попробуем то же самое в GCC 4.4.1 с опцией -O3:

```
public crc
proc near
crc
key      = dword ptr 8
hash     = dword ptr 0Ch

    push    ebp
    xor     edx, edx
    mov     ebp, esp
    push    esi
    mov     esi, [ebp+key]
    push    ebx
    mov     ebx, [ebp+hash]
    test    ebx, ebx
    mov     eax, ebx
    jz      short loc_80484D3
    nop
    lea     esi, [esi+0] ; выравнивание; работает как NOP (ESI не меняется ↙
    ↘ здесь)

loc_80484B8:
    mov     ecx, eax      ; сохранить предыдущее состояние хеша в ECX
    xor     al, [esi+edx]  ; AL=*(key+i)
    add     edx, 1        ; i++
    shr     ecx, 8        ; ECX=hash>>8
    movzx   eax, al       ; EAX=*(key+i)
    mov     eax, dword ptr ds:crctab[eax*4] ; EAX=crctab[EAX]
    xor     eax, ecx      ; hash=EAX^ECX
    cmp     ebx, edx
    ja      short loc_80484B8

loc_80484D3:
    pop     ebx
    pop     esi
    pop     ebp
    retn
crc        endp
```

GCC немного выровнял начало тела цикла по 8-байтной границе, для этого добавил NOP и `lea esi, [esi+0]` (что тоже *холостая операция*). Подробнее об этом смотрите в разделе о

3.6. Пример вычисления адреса сети

Как мы знаем, TCP/IP-адрес (IPv4) состоит из четырех чисел в пределах 0...255, т.е. 4 байта.

4 байта легко помещаются в 32-битную переменную, так что адрес хоста в IPv4, сетевая маска или адрес сети могут быть 32-битными числами.

С точки зрения пользователя, маска сети определяется четырьмя числами в формате вроде 255.255.255.0, но сетевые инженеры (сисадмины) используют более компактную нотацию ([CIDR⁸](#)), вроде «/8», «/16», итд.

Эта нотация просто определяет количество бит в сетевой маске, начиная с [MSB](#).

Маска	Хосты	Свободно	Сетевая маска	В шест.виде	
/30	4	2	255.255.255.252	0xffffffffc	
/29	8	6	255.255.255.248	0xffffffff8	
/28	16	14	255.255.255.240	0xffffffff0	
/27	32	30	255.255.255.224	0xffffffe0	
/26	64	62	255.255.255.192	0xffffffc0	
/24	256	254	255.255.255.0	0xfffffff0	сеть класса C
/23	512	510	255.255.254.0	0xffffffe0	
/22	1024	1022	255.255.252.0	0xfffffc00	
/21	2048	2046	255.255.248.0	0xffff800	
/20	4096	4094	255.255.240.0	0xffff000	
/19	8192	8190	255.255.224.0	0xffffe000	
/18	16384	16382	255.255.192.0	0xffffc000	
/17	32768	32766	255.255.128.0	0xffff8000	
/16	65536	65534	255.255.0.0	0xffff0000	сеть класса B
/8	16777216	16777214	255.0.0.0	0xff000000	сеть класса A

Вот простой пример, вычисляющий адрес сети используя сетевую маску и адрес хоста.

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint32_t form_IP (uint8_t ip1, uint8_t ip2, uint8_t ip3, uint8_t ip4)
{
    return (ip1<<24) | (ip2<<16) | (ip3<<8) | ip4;
};

void print_as_IP (uint32_t a)
{
    printf ("%d.%d.%d.%d\n",
            (a>>24)&0xFF,
            (a>>16)&0xFF,
            (a>>8)&0xFF,
            (a)&0xFF);
};

// bit=31..0
uint32_t set_bit (uint32_t input, int bit)
{
    return input=input|(1<<bit);
};

uint32_t form_netmask (uint8_t netmask_bits)
{
    uint32_t netmask=0;
    uint8_t i;

    for (i=0; i<netmask_bits; i++)
        netmask=set_bit(netmask, 31-i);

    return netmask;
};
```

⁸Classless Inter-Domain Routing

3.6. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ АДРЕСА СЕТИ

```
void calc_network_address (uint8_t ip1, uint8_t ip2, uint8_t ip3, uint8_t ip4, uint8_t netmask_bits)
{
    uint32_t netmask=form_netmask(netmask_bits);
    uint32_t ip=form_IP(ip1, ip2, ip3, ip4);
    uint32_t netw_adr;

    printf ("netmask=");
    print_as_IP (netmask);

    netw_adr=ip&netmask;

    printf ("network address=");
    print_as_IP (netw_adr);
};

int main()
{
    calc_network_address (10, 1, 2, 4, 24);    // 10.1.2.4, /24
    calc_network_address (10, 1, 2, 4, 8);     // 10.1.2.4, /8
    calc_network_address (10, 1, 2, 4, 25);    // 10.1.2.4, /25
    calc_network_address (10, 1, 2, 64, 26);   // 10.1.2.4, /26
};
```

3.6.1. calc_network_address()

Функция calc_network_address() самая простая:

она просто умножает (логически, используя AND) адрес хоста на сетевую маску, в итоге давая адрес сети.

Листинг 3.7: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob0

```
1  _ip1$ = 8           ; size = 1
2  _ip2$ = 12          ; size = 1
3  _ip3$ = 16          ; size = 1
4  _ip4$ = 20          ; size = 1
5  _netmask_bits$ = 24 ; size = 1
6  _calc_network_address PROC
7      push        edi
8      push        DWORD PTR _netmask_bits$[esp]
9      call        _form_netmask
10     push        OFFSET $SG3045 ; 'netmask='
11     mov         edi, eax
12     call        DWORD PTR __imp__printf
13     push        edi
14     call        _print_as_IP
15     push        OFFSET $SG3046 ; 'network address='
16     call        DWORD PTR __imp__printf
17     push        DWORD PTR _ip4$[esp+16]
18     push        DWORD PTR _ip3$[esp+20]
19     push        DWORD PTR _ip2$[esp+24]
20     push        DWORD PTR _ip1$[esp+28]
21     call        _form_IP
22     and         eax, edi          ; network address = host address & netmask
23     push        eax
24     call        _print_as_IP
25     add         esp, 36
26     pop         edi
27     ret         0
28 _calc_network_address ENDP
```

На строке 22 мы видим самую важную инструкцию AND— так вычисляется адрес сети.

3.6.2. form_IP()

Функция form_IP() просто собирает все 4 байта в одно 32-битное значение.

Вот как это обычно происходит:

- Выделите переменную для возвращаемого значения. Обнулите её.
- Возьмите четвертый (самый младший) байт, сложите его (логически, инструкцией OR) с возвращаемым значением. Оно содержит теперь 4-й байт.
- Возьмите третий байт, сдвиньте его на 8 бит влево. Получится значение в виде 0x0000bb00, где bb это третий байт. Сложите итоговое значение (логически, инструкцией OR) с возвращаемым значением. Возвращаемое значение пока что содержит 0x000000aa, так что логическое сложение в итоге выдаст значение вида 0x0000bbaa.
- Возьмите второй байт, сдвиньте его на 16 бит влево. Вы получите значение вида 0x00cc0000, где cc это второй байт. Сложите (логически) результат и возвращаемое значение. Выходное значение содержит пока что 0x0000bbaa, так что логическое сложение в итоге выдаст значение вида 0x00ccbbaa.
- Возьмите первый байт, сдвиньте его на 24 бита влево. Вы получите значение вида 0xdd000000, где dd это первый байт. Сложите (логически) результат и выходное значение. Выходное значение содержит пока что 0x00ccbbaa, так что сложение выдаст в итоге значение вида 0xddccbbaa.

И вот как работает неоптимизирующий MSVC 2012:

Листинг 3.8: Неоптимизирующий MSVC 2012

```
; определим ip1 как "dd", ip2 как "cc", ip3 как "bb", ip4 как "aa".
_ip1$ = 8      ; size = 1
_ip2$ = 12     ; size = 1
_ip3$ = 16     ; size = 1
_ip4$ = 20     ; size = 1
_form_IP PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    movzx   eax, BYTE PTR _ip1$[ebp]
    ; EAX=000000dd
    shl     eax, 24
    ; EAX=dd000000
    movzx   ecx, BYTE PTR _ip2$[ebp]
    ; ECX=000000cc
    shl     ecx, 16
    ; ECX=00cc0000
    or      eax, ecx
    ; EAX=ddcc0000
    movzx   edx, BYTE PTR _ip3$[ebp]
    ; EDX=000000bb
    shl     edx, 8
    ; EDX=0000bb00
    or      eax, edx
    ; EAX=ddccb000
    movzx   ecx, BYTE PTR _ip4$[ebp]
    ; ECX=000000aa
    or      eax, ecx
    ; EAX=ddccbbaa
    pop     ebp
    ret     0
_form_IP ENDP
```

Хотя, порядок операций другой, но, конечно, порядок роли не играет.

Оптимизирующий MSVC 2012 делает то же самое, но немного иначе:

Листинг 3.9: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob0

```
; определим ip1 как "dd", ip2 как "cc", ip3 как "bb", ip4 как "aa".
_ip1$ = 8      ; size = 1
_ip2$ = 12     ; size = 1
_ip3$ = 16     ; size = 1
_ip4$ = 20     ; size = 1
_form_IP PROC
```

3.6. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ АДРЕСА СЕТИ

```
movzx  eax, BYTE PTR _ip1$[esp-4]
; EAX=000000dd
movzx  ecx, BYTE PTR _ip2$[esp-4]
; ECX=000000cc
shl    eax, 8
; EAX=0000dd00
or     eax, ecx
; EAX=0000ddcc
movzx  ecx, BYTE PTR _ip3$[esp-4]
; ECX=000000bb
shl    eax, 8
; EAX=00ddcc00
or     eax, ecx
; EAX=00ddccbb
movzx  ecx, BYTE PTR _ip4$[esp-4]
; ECX=000000aa
shl    eax, 8
; EAX=ddccbb00
or     eax, ecx
; EAX=ddccbbaa
ret    0
_form_IP ENDP
```

Можно сказать, что каждый байт записывается в младшие 8 бит возвращаемого значения, и затем возвращаемое значение сдвигается на один байт влево на каждом шаге.

Повторять 4 раза, для каждого байта.

Вот и всё! К сожалению, наверное, нет способа делать это иначе. Не существует более-менее популярных [CPU](#) или [ISA](#), где имеется инструкция для сборки значения из бит или байт. Обычно всё это делает сдвигами бит и логическим сложением (OR).

3.6.3. print_as_IP()

print_as_IP() делает наоборот: расщепляет 32-битное значение на 4 байта.

Расщепление работает немного проще: просто сдвигайте входное значение на 24, 16, 8 или 0 бит, берите биты с нулевого по седьмой (младший байт), вот и всё:

Листинг 3.10: Неоптимизирующий MSVC 2012

```
_a$ = 8 ; size = 4
_print_as_IP PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    ; EAX=ddccbbaa
    and     eax, 255
    ; EAX=000000aa
    push    eax
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
    ; ECX=ddccbbaa
    shr     ecx, 8
    ; ECX=00ddccbb
    and     ecx, 255
    ; ECX=000000bb
    push    ecx
    mov     edx, DWORD PTR _a$[ebp]
    ; EDX=ddccbbaa
    shr     edx, 16
    ; EDX=0000ddcc
    and     edx, 255
    ; EDX=000000cc
    push    edx
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    ; EAX=ddccbbaa
    shr     eax, 24
    ; EAX=000000dd
    and     eax, 255 ; возможно, избыточная инструкция
```

3.6. ПРИМЕР ВЫЧИСЛЕНИЯ АДРЕСА СЕТИ

```
; EAX=000000dd
push    eax
push    OFFSET $SG2973 ; '%d.%d.%d.%d'
call    DWORD PTR __imp__printf
add     esp, 20
pop     ebp
ret     0
_print_as_IP ENDP
```

Оптимизирующий MSVC 2012 делает почти всё то же самое, только без ненужных перезагрузок входного значения:

Листинг 3.11: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob0

```
_a$ = 8 ; size = 4
_print_as_IP PROC
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]
    ; ECX=ddccbbaa
    movzx   eax, cl
    ; EAX=000000aa
    push    eax
    mov     eax, ecx
    ; EAX=ddccbbaa
    shr     eax, 8
    ; EAX=00ddccbb
    and     eax, 255
    ; EAX=000000bb
    push    eax
    mov     eax, ecx
    ; EAX=ddccbbaa
    shr     eax, 16
    ; EAX=0000ddcc
    and     eax, 255
    ; EAX=000000cc
    push    eax
    ; ECX=ddccbbaa
    shr     ecx, 24
    ; ECX=000000dd
    push    ecx
    push    OFFSET $SG3020 ; '%d.%d.%d.%d'
    call    DWORD PTR __imp__printf
    add     esp, 20
    ret     0
_print_as_IP ENDP
```

3.6.4. form_netmask() и set_bit()

form_netmask() делает сетевую маску из [CIDR](#)-нотации.

Конечно, было бы куда эффективнее использовать здесь какую-то уже готовую таблицу, но мы рассматриваем это именно так, сознательно, для демонстрации битовых сдвигов. Мы также сделаем отдельную функцию set_bit().

Не очень хорошая идея выделять отдельную функцию для такой примитивной операции, но так будет проще понять, как это всё работает.

Листинг 3.12: Оптимизирующий MSVC 2012 /Ob0

```
_input$ = 8 ; size = 4
_bit$ = 12 ; size = 4
_set_bit PROC
    mov     ecx, DWORD PTR _bit$[esp-4]
    mov     eax, 1
    shl     eax, cl
    or      eax, DWORD PTR _input$[esp-4]
    ret     0
_set_bit ENDP

_netmask_bits$ = 8 ; size = 1
```


3.7. ЦИКЛЫ: НЕСКОЛЬКО ИТЕРАТОРОВ

```
_form_netmask PROC
    push    ebx
    push    esi
    movzx   esi, BYTE PTR _netmask_bits$[esp+4]
    xor     ecx, ecx
    xor     bl, bl
    test    esi, esi
    jle     SHORT $LN9@form_netma
    xor     edx, edx
$LL3@form_netma:
    mov     eax, 31
    sub     eax, edx
    push    eax
    push    ecx
    call    _set_bit
    inc     bl
    movzx   edx, bl
    add     esp, 8
    mov     ecx, eax
    cmp     edx, esi
    jl      SHORT $LL3@form_netma
$LN9@form_netma:
    pop     esi
    mov     eax, ecx
    pop     ebx
    ret     0
_form_netmask ENDP
```

set_bit() примитивна: просто сдвигает единицу на нужное количество бит, затем складывает (логически) с входным значением «input». form_netmask() имеет цикл: он выставит столько бит (начиная с MSB), сколько передано в аргументе netmask_bits.

3.6.5. Итог

Вот и всё! Мы запускаем и видим:

```
netmask=255.255.255.0
network address=10.1.2.0
netmask=255.0.0.0
network address=10.0.0.0
netmask=255.255.255.128
network address=10.1.2.0
netmask=255.255.255.192
network address=10.1.2.64
```

3.7. Циклы: несколько итераторов

Часто, у цикла только один итератор, но в итоговом коде их может быть несколько.

Вот очень простой пример:

```
#include <stdio.h>

void f(int *a1, int *a2, size_t cnt)
{
    size_t i;

    // копировать из одного массива в другой по какой-то странной схеме
    for (i=0; i<cnt; i++)
        a1[i*3]=a2[i*7];
};
```

Здесь два умножения на каждой итерации, а это дорогая операция.

Сможем ли мы оптимизировать это как-то? Да, если мы заметим, что индексы обоих массивов перескакивают на места, рассчитать которые мы можем легко и без умножения.

3.7.1. Три итератора

Листинг 3.13: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
f      PROC
; RCX=a1
; RDX=a2
; R8=cnt
      test    r8, r8      ; cnt==0? тогда выйти
      je      SHORT $LN1@f
      npad    11
$LL3@f:
      mov     eax, DWORD PTR [rdx]
      lea     rcx, QWORD PTR [rcx+12]
      lea     rdx, QWORD PTR [rdx+28]
      mov     DWORD PTR [rcx-12], eax
      dec     r8
      jne     SHORT $LL3@f
$LN1@f:
      ret     0
f      ENDP
```

Теперь здесь три итератора: переменная *cnt* и два индекса, они увеличиваются на 12 и 28 на каждой итерации, указывая на новые элементы массивов.

Мы можем переписать этот код на Си/Си++:

```
#include <stdio.h>

void f(int *a1, int *a2, size_t cnt)
{
    size_t i;
    size_t idx1=0; idx2=0;

    // копировать из одного массива в другой по какой-то странной схеме
    for (i=0; i<cnt; i++)
    {
        a1[idx1]=a2[idx2];
        idx1+=3;
        idx2+=7;
    };
};
```

Так что, ценой модификации трех итераторов на каждой итерации вместо одного, мы избавлены от двух операций умножения.

3.7.2. Два итератора

GCC 4.9 сделал еще больше, оставив только 2 итератора:

Листинг 3.14: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
; RDI=a1
; RSI=a2
; RDX=cnt
f:
      test    rdx, rdx    ; cnt==0? тогда выйти
      je      .L1
; вычислить адрес последнего элемента в "a2" и оставить его в RDX
      lea     rax, [0+rdx*4]
; RAX=RDX*4=cnt*4
      sal     rdx, 5
; RDX=RDX<<5=cnt*32
      sub     rdx, rax
; RDX=RDX-RAX=cnt*32-cnt*4=cnt*28
      add     rdx, rsi
; RDX=RDX+RSI=a2+cnt*28
.L3:
      mov     eax, DWORD PTR [rsi]
```

3.7. ЦИКЛЫ: НЕСКОЛЬКО ИТЕРАТОРОВ

```
add    rsi, 28
add    rdi, 12
mov     DWORD PTR [rdi-12], eax
cmp     rsi, rdx
jne     .L3
.L1:
rep ret
```

Здесь больше нет переменной-счетчика: GCC рассудил, что она не нужна.

Последний элемент массива *a2* вычисляется перед началом цикла (а это просто: $cnt * 7$), и при помощи этого цикл останавливается: просто исполняйте его пока второй индекс не сравняется с предварительно вычисленным значением.

Об умножении используя сдвиги/сложения/вычитания, читайте здесь:

[1.18.1](#) (стр. 203).

Этот код можно переписать на Си/Си++ вот так:

```
#include <stdio.h>

void f(int *a1, int *a2, size_t cnt)
{
    size_t idx1=0; idx2=0;
    size_t last_idx2=cnt*7;

    // копировать из одного массива в другой по какой-то странной схеме
    for (;;)
    {
        a1[idx1]=a2[idx2];
        idx1+=3;
        idx2+=7;
        if (idx2==last_idx2)
            break;
    };
};
```

GCC (Linaro) 4.9 для ARM64 делает тоже самое, только предварительно вычисляет последний индекс массива *a1* вместо *a2*, а это, конечно, имеет тот же эффект:

Листинг 3.15: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9 ARM64

```
; X0=a1
; X1=a2
; X2=cnt
f:
    cbz     x2, .L1      ; cnt==0? тогда выйти
; вычислить последний элемент массива "a1"
    add     x2, x2, x2, lsl 1
; X2=X2+X2<<1=X2+X2*2=X2*3
    mov     x3, 0
    lsl     x2, x2, 2
; X2=X2<<2=X2*4=X2*3*4=X2*12
.L3:
    ldr     w4, [x1],28  ; загружать по адресу в X1, прибавить 28 к X1 (пост-инкремент)
    str     w4, [x0,x3]  ; записать по адресу в X0+X3=a1+X3
    add     x3, x3, 12   ; сдвинуть X3
    cmp     x3, x2       ; конец?
    bne     .L3
.L1:
    ret
```

GCC 4.4.5 для MIPS делает то же самое:

Листинг 3.16: Оптимизирующий GCC 4.4.5 для MIPS (IDA)

```
; $a0=a1
; $a1=a2
; $a2=cnt
f:
; переход на код проверки в цикле:
```

3.7. ЦИКЛЫ: НЕСКОЛЬКО ИТЕРАТОРОВ

```
        beqz    $a2, locret_24
; инициализировать счетчик (i) в 0:
        move    $v0, $zero ; branch delay slot, NOP

loc_8:
; загрузить 32-битное слово в $a1
        lw      $a3, 0($a1)
; инкремент счетчика (i):
        addiu   $v0, 1
; проверка на конец (сравнить "i" в $v0 и "cnt" в $a2):
        sltu    $v1, $v0, $a2
; сохранить 32-битное слово в $a0:
        sw      $a3, 0($a0)
; прибавить 0x1C (28) к $a1 на каждой итерации:
        addiu   $a1, 0x1C
; перейти на тело цикла, если i<cnt:
        bnez    $v1, loc_8
; прибавить 0xC (12) к $a0 на каждой итерации:
        addiu   $a0, 0xC ; branch delay slot

locret_24:
        jr      $ra
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

3.7.3. Случай Intel C++ 2011

Оптимизации компилятора могут быть очень странными, но, тем не менее, корректными.

Вот что делает Intel C++ 2011:

Листинг 3.17: Оптимизирующий Intel C++ 2011 x64

```
f      PROC
; parameter 1: rcx = a1
; parameter 2: rdx = a2
; parameter 3: r8 = cnt
.B1.1::
        test    r8, r8
        jbe     exit

.B1.2::
        cmp     r8, 6
        jbe     just_copy

.B1.3::
        cmp     rcx, rdx
        jbe     .B1.5

.B1.4::
        mov     r10, r8
        mov     r9, rcx
        shl     r10, 5
        lea     rax, QWORD PTR [r8*4]
        sub     r9, rdx
        sub     r10, rax
        cmp     r9, r10
        jge     just_copy2

.B1.5::
        cmp     rdx, rcx
        jbe     just_copy

.B1.6::
        mov     r9, rdx
        lea     rax, QWORD PTR [r8*8]
        sub     r9, rcx
        lea     r10, QWORD PTR [rax+r8*4]
        cmp     r9, r10
        jl      just_copy
```

3.8. DUFF'S DEVICE

```
just_copy2::
; R8 = cnt
; RDX = a2
; RCX = a1
    xor     r10d, r10d
    xor     r9d, r9d
    xor     eax, eax

.B1.8::
    mov     r11d, DWORD PTR [rax+rdx]
    inc     r10
    mov     DWORD PTR [r9+rcx], r11d
    add     r9, 12
    add     rax, 28
    cmp     r10, r8
    jb      .B1.8
    jmp     exit

just_copy::
; R8 = cnt
; RDX = a2
; RCX = a1
    xor     r10d, r10d
    xor     r9d, r9d
    xor     eax, eax

.B1.11::
    mov     r11d, DWORD PTR [rax+rdx]
    inc     r10
    mov     DWORD PTR [r9+rcx], r11d
    add     r9, 12
    add     rax, 28
    cmp     r10, r8
    jb      .B1.11

exit::
    ret
```

В начале, принимаются какие-то решения, затем исполняется одна из процедур.

Видимо, это проверка, не пересекаются ли массивы.

Это хорошо известный способ оптимизации процедур копирования блоков в памяти.

Но копирующие процедуры одинаковые! Видимо, это ошибка оптимизатора Intel C++, который, тем не менее, генерирует работоспособный код.

Мы намеренно изучаем примеры такого кода в этой книге чтобы читатель мог понимать, что результаты работы компилятором иногда бывают крайне странными, но корректными, потому что когда компилятор тестировали, тесты прошли нормально.

3.8. Duff's device

Duff's device ⁹ это развернутый цикл с возможностью перехода в середину цикла. Развернутый цикл реализован используя fallthrough-выражение `switch()`. Мы будем использовать здесь упрощенную версию кода Тома Даффа. Скажем, нам нужно написать функцию, очищающую регион в памяти. Кто-то может подумать о простом цикле, очищающем байт за байтом. Это, очевидно, медленно, так как все современные компьютеры имеют намного более широкую шину памяти. Так что более правильный способ — это очищать регион в памяти блоками по 4 или 8 байт. Так как мы будем работать с 64-битным примером, мы будем очищать память блоками по 8 байт.

Пока всё хорошо. Но что насчет хвоста? Функция очистки памяти будет также вызываться и для блоков с длиной не кратной 8.

Вот алгоритм:

⁹[wikipedia](#)

3.8. DUFF'S DEVICE

- вычислить количество 8-байтных блоков, очистить их используя 8-байтный (64-битный) доступ к памяти;
- вычислить размер хвоста, очистить его используя 1-байтный доступ к памяти.

Второй шаг можно реализовать, используя простой цикл. Но давайте реализуем его используя развернутый цикл:

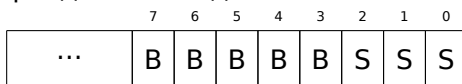
```
#include <stdint.h>
#include <stdio.h>

void bzero(uint8_t* dst, size_t count)
{
    int i;

    if (count & (~7))
        // обработать 8-байтные блоки
        for (i=0; i<count>>3; i++)
        {
            *(uint64_t*)dst=0;
            dst=dst+8;
        };

    // обработать хвост
    switch(count & 7)
    {
    case 7: *dst++ = 0;
    case 6: *dst++ = 0;
    case 5: *dst++ = 0;
    case 4: *dst++ = 0;
    case 3: *dst++ = 0;
    case 2: *dst++ = 0;
    case 1: *dst++ = 0;
    case 0: // ничего не делать
        break;
    }
}
```

В начале разберемся, как происходят вычисления. Размер региона в памяти приходит в 64-битном значении. И это значение можно разделить на две части:



(«В» это количество 8-байтных блоков и «S» это длина хвоста в байтах).

Если разделить размер входного блока в памяти на 8, то значение просто сдвигается на 3 бита вправо. Но для вычисления остатка, нам нужно просто изолировать младшие 3 бита! Так что количество 8-байтных блоков вычисляется как $count \gg 3$, а остаток как $count \& 7$. В начале, нужно определить, будем ли мы вообще исполнять 8-байтную процедуру, так что нам нужно узнать, не больше ли $count$ чем 7. Мы делаем это очищая младшие 3 бита и сравнивая результат с нулем, потому что, всё что нам нужно узнать, это ответ на вопрос, содержит ли старшая часть значения $count$ ненулевые биты. Конечно, это работает потому что 8 это 2^3 , так что деление на числа вида 2^n это легко. Это невозможно с другими числами.

А на самом деле, трудно сказать, стоит ли пользоваться такими хакерскими трюками, потому что они приводят к коду, который затем тяжело читать.

С другой стороны, эти трюки очень популярны и практикующий программист, хотя может и не использовать их, всё же должен их понимать.

Так что первая часть простая: получить количество 8-байтных блоков и записать 64-битные нулевые значения в память.

Вторая часть — это развернутый цикл реализованный как fallthrough-выражение switch().

В начале, выразим на понятном русском языке, что мы хотим сделать.

Мы должны «записать столько нулевых байт в память, сколько указано в значении $count \& 7$ ».

Если это 0, перейти на конец, больше ничего делать не нужно.

3.8. DUFF'S DEVICE

Если это 1, перейти на место внутри выражения switch(), где произойдет только одна операция записи.

Если это 2, перейти на другое место, где две операции записи будут исполнены, итд. 7 во входном значении приведет к тому что исполнятся все 7 операций.

8 здесь нет, потому что регион памяти размером в 8 байт будет обработан первой частью нашей функции.

Так что мы сделали развернутый цикл. Это однозначно работало быстрее обычных циклов на старых компьютерах (и наоборот, на современных процессорах короткие циклы работают быстрее развернутых).

Может быть, это всё еще может иметь смысл на современных маломощных дешевых MCU¹⁰.

Посмотрим, что сделает оптимизирующий MSVC 2012:

```
dst$ = 8
count$ = 16
bzero PROC
    test     rdx, -8
    je      SHORT $LN11@bzero
; обработать 8-байтные блоки
    xor     r10d, r10d
    mov     r9, rdx
    shr     r9, 3
    mov     r8d, r10d
    test    r9, r9
    je      SHORT $LN11@bzero
    npad    5
$LL19@bzero:
    inc     r8d
    mov     QWORD PTR [rcx], r10
    add     rcx, 8
    movsxd  rax, r8d
    cmp     rax, r9
    jb      SHORT $LL19@bzero
$LN11@bzero:
; обработать хвост
    and     edx, 7
    dec     rdx
    cmp     rdx, 6
    ja      SHORT $LN9@bzero
    lea     r8, OFFSET FLAT:__ImageBase
    mov     eax, DWORD PTR $LN22@bzero[r8+rdx*4]
    add     rax, r8
    jmp     rax
$LN8@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN7@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN6@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN5@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN4@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN3@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
    inc     rcx
$LN2@bzero:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
$LN9@bzero:
    fatret  0
    npad    1
```

¹⁰Microcontroller Unit

3.9. ДЕЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗУЯ УМНОЖЕНИЕ

```
$LN22@bzero:
    DD    $LN2@bzero
    DD    $LN3@bzero
    DD    $LN4@bzero
    DD    $LN5@bzero
    DD    $LN6@bzero
    DD    $LN7@bzero
    DD    $LN8@bzero
bzero    ENDP
```

Первая часть функции выглядит для нас предсказуемо.

Вторая часть — это просто развернутый цикл и переход передает управление на нужную инструкцию внутри него.

Между парами инструкций MOV/INC никакого другого кода нет, так что исполнение продолжается до самого конца, исполняются столько пар, сколько нужно.

Кстати, мы можем заметить, что пара MOV/INC занимает какое-то фиксированное количество байт (3+3).

Так что пара занимает 6 байт. Зная это, мы можем избавиться от таблицы переходов в switch(), мы можем просто умножить входное значение на 6 и перейти на текущий_RIP + входное_значение * 6.

Это будет также быстрее, потому что не нужно будет загружать элемент из таблицы переходов (jumptable).

Может быть, 6 не самая подходящая константа для быстрого умножения, и может быть оно того и не стоит, но вы поняли идею¹¹.

Так в прошлом делали с развернутыми циклами олд-скульные демомейкеры.

3.8.1. Нужно ли использовать развернутые циклы?

Развернутые циклы могут иметь преимущества если между RAM и CPU нет быстрой кэш-памяти и CPU, чтобы прочитать код очередной инструкции, должен загружать её каждый раз из RAM. Это случай современных маломощных MCU и старых CPU.

Развернутые циклы будут работать медленнее коротких циклов, если есть быстрый кэш между RAM и CPU и тело цикла может поместиться в кэш и CPU будет загружать код оттуда не трогая RAM. Быстрые циклы это циклы у которых тело помещается в L1-кэш, но еще более быстрые циклы это достаточно маленькие, чтобы поместиться в кэш микроопераций.

3.9. Деление используя умножение

Простая функция:

```
int f(int a)
{
    return a/9;
};
```

3.9.1. x86

...компилируется вполне предсказуемо:

Листинг 3.18: MSVC

```
_a$ = 8          ; size = 4
_f    PROC
    push    ebp
```

¹¹В качестве упражнения, вы можете попробовать переработать этот код и избавиться от таблицы переходов. Пару инструкций тоже можно переписать так что они будут занимать 4 байта или 8. 1 байт тоже возможен (используя инструкцию STOSB).

3.9. ДЕЛЕНИЕ ИСПОЛЬЗУЯ УМНОЖЕНИЕ

```
mov     ebp, esp
mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
cdq     ; знаковое расширение EAX до EDX:EAX
mov     ecx, 9
idiv    ecx
pop     ebp
ret     0
_f     ENDP
```

IDIV делит 64-битное число хранящееся в паре регистров EDX:EAX на значение в ECX. В результате, EAX будет содержать **частное**, а EDX— остаток от деления. Результат возвращается из функции через EAX, так что после операции деления, это значение не перекладывается больше никуда, оно уже там, где надо.

Из-за того, что IDIV требует пару регистров EDX:EAX, то перед этим инструкция CDQ расширяет EAX до 64-битного значения учитывая знак, так же, как это делает MOVSX.

Со включенной оптимизацией (/Ox) получается:

Листинг 3.19: Оптимизирующий MSVC

```
_a$ = 8 ; size = 4
_f     PROC

    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]
    mov     eax, 954437177 ; 38e38e39H
    imul    ecx
    sar     edx, 1
    mov     eax, edx
    shr     eax, 31 ; 0000001fH
    add     eax, edx
    ret     0
_f     ENDP
```

Это — деление через умножение. Умножение конечно быстрее работает. Поэтому можно используя этот трюк ¹² создать код эквивалентный тому что мы хотим и работающий быстрее.

В оптимизации компиляторов, это также называется «strength reduction».

GCC 4.4.1 даже без включенной оптимизации генерирует примерно такой же код, как и MSVC с оптимизацией:

Листинг 3.20: Неоптимизирующий GCC 4.4.1

```
public f
f     proc near
arg_0 = dword ptr 8

    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     ecx, [ebp+arg_0]
    mov     edx, 954437177 ; 38E38E39h
    mov     eax, ecx
    imul    edx
    sar     edx, 1
    mov     eax, ecx
    sar     eax, 1Fh
    mov     ecx, edx
    sub     ecx, eax
    mov     eax, ecx
    pop     ebp
    retn
f     endp
```

¹²Читайте подробнее о делении через умножение в [Henry S. Warren, *Hacker's Delight*, (2002)10-3]

3.9.2. Как это работает

Из школьной математики, мы можем вспомнить, что деление на 9 может быть заменено на умножение на $\frac{1}{9}$. На самом деле, для чисел с плавающей точкой, иногда компиляторы так и делают, например, инструкция FDIV в x86-коде может быть заменена на FMUL. По крайней мере MSVC 6.0 заменяет деление на 9 на умножение на 0.111111... и иногда нельзя быть уверенным в том, какая операция была в оригинальном исходном коде.

Но когда мы работаем с целочисленными значениями и целочисленными регистрами CPU, мы не можем использовать дроби. Но мы можем переписать дробь так:

$$result = \frac{x}{9} = x \cdot \frac{1}{9} = x \cdot \frac{1 \cdot MagicNumber}{9 \cdot MagicNumber}$$

Учитывая тот факт, что деление на 2^n очень быстро (при помощи сдвигов), теперь нам нужно найти такой *MagicNumber*, для которого следующее уравнение будет справедливо: $2^n = 9 \cdot MagicNumber$.

Деление на 2^{32} в каком-то смысле скрыто: младшие 32 бита произведения в EAX не используются (выкидываются), только старшие 32 бита произведения (в EDX) используются и затем сдвигаются еще на 1 бит.

Другими словами, только что увиденный код на ассемблере умножает на $\frac{954437177}{2^{32+1}}$, или делит на $\frac{2^{32+1}}{954437177}$. Чтобы найти делитель, нужно просто разделить числитель на знаменатель. Используя Wolfram Alpha, мы получаем результат 8.99999999.... (что близко к 9).

Читайте больше об этом в [Henry S. Warren, *Hacker's Delight*, (2002)10-3].

Еще кое что для лучшего понимания. Многие люди не замечают “скрытое” деление на 2^{32} или 2^{64} , когда младшая 32-битная часть произведения (или 64-битная) не используется. Также, имеется недоразумение, что здесь используется обратное число по модулю. Это близко, но не то же самое. Для поиска *магического коэффициента*, часто используется расширенный алгоритм Эвклида, но на самом деле, этот алгоритм используется для решения уравнения. Вы можете решать его любым другим методом. Так или иначе, расширенный алгоритм Эвклида наверное самый эффективный метод решения. Также, нужно упомянуть, что уравнение не решается для некоторых делителей, потому что это диофантово уравнение (т.е., уравнение в котором результат может быть только целым числом), так как, все же, мы работаем с целочисленными регистрами CPU.

3.9.3. ARM

В процессоре ARM, как и во многих других «чистых» (pure) RISC-процессорах нет инструкции деления. Нет также возможности умножения на 32-битную константу одной инструкцией (вспомните что 32-битная константа просто не поместится в 32-битных опкод).

При помощи этого любопытного трюка (или *хака*)¹³, можно обойтись только тремя действиями: сложением, вычитанием и битовыми сдвигами (1.22 (стр. 295)).

Пример деления 32-битного числа на 10 из [Advanced RISC Machines Ltd, *The ARM Cookbook*, (1994)3.3 Division by a Constant]. На выходе и частное и остаток.

```
; takes argument in a1
; returns quotient in a1, remainder in a2
; cycles could be saved if only divide or remainder is required
SUB    a2, a1, #10           ; keep (x-10) for later
SUB    a1, a1, a1, lsr #2
ADD    a1, a1, a1, lsr #4
ADD    a1, a1, a1, lsr #8
ADD    a1, a1, a1, lsr #16
MOV    a1, a1, lsr #3
ADD    a3, a1, a1, asl #2
SUBS   a2, a2, a3, asl #1     ; calc (x-10) - (x/10)*10
ADDPL  a1, a1, #1           ; fix-up quotient
ADDMI  a2, a2, #10          ; fix-up remainder
MOV    pc, lr
```

¹³hack

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим ARM)

```

__text:00002C58 39 1E 08 E3 E3 18 43 E3  MOV    R1, 0x38E38E39
__text:00002C60 10 F1 50 E7                SMMUL  R0, R0, R1
__text:00002C64 C0 10 A0 E1                MOV    R1, R0, ASR#1
__text:00002C68 A0 0F 81 E0                ADD    R0, R1, R0, LSR#31
__text:00002C6C 1E FF 2F E1                BX     LR

```

Этот код почти тот же, что сгенерирован MSVC и GCC в режиме оптимизации.

Должно быть, LLVM использует тот же алгоритм для поиска констант.

Наблюдательный читатель может спросить, как MOV записала в регистр сразу 32-битное число, ведь это невозможно в режиме ARM.

Действительно невозможно, но как мы видим, здесь на инструкцию 8 байт вместо стандартных 4-х, на самом деле, здесь 2 инструкции.

Первая инструкция загружает в младшие 16 бит регистра значение 0x8E39, а вторая инструкция, на самом деле MOVN, загружающая в старшие 16 бит регистра значение 0x383E.

IDA легко распознала эту последовательность и для краткости, сократила всё это до одной «псевдо-инструкции».

Инструкция SMMUL (*Signed Most Significant Word Multiply*) умножает числа считая их знаковыми (signed) и оставляет в R0 старшие 32 бита результата, не сохраняя младшие 32 бита.

Инструкция «MOV R1, R0, ASR#1» это арифметический сдвиг право на один бит.

«ADD R0, R1, R0, LSR#31» это $R0 = R1 + R0 \gg 31$

Дело в том, что в режиме ARM нет отдельных инструкций для битовых сдвигов.

Вместо этого, некоторые инструкции (MOV, ADD, SUB, RSB)¹⁴ могут быть дополнены суффиксом, сдвигать ли второй операнд и если да, то на сколько и как.

ASR означает *Arithmetic Shift Right*, LSR — *Logical Shift Right*.

Оптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) (Режим Thumb-2)

```

MOV      R1, 0x38E38E39
SMMUL.W  R0, R0, R1
ASRS     R1, R0, #1
ADD.W    R0, R1, R0, LSR#31
BX       LR

```

В режиме Thumb отдельные инструкции для битовых сдвигов есть, и здесь применяется одна из них — ASRS (арифметический сдвиг вправо).

Неоптимизирующий Xcode 4.6.3 (LLVM) и Keil 6/2013

Неоптимизирующий LLVM не занимается генерацией подобного кода, а вместо этого просто вставляет вызов библиотечной функции `__divsi3`.

А Keil во всех случаях вставляет вызов функции `__aeabi_idivmod`.

3.9.4. MIPS

По какой-то причине, оптимизирующий GCC 4.4.5 сгенерировал просто инструкцию деления:

Листинг 3.21: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```

f:
    li      $v0, 9
    bnez    $v0, loc_10
    div     $a0, $v0 ; branch delay slot

```

¹⁴Эти инструкции также называются «data processing instructions»

3.10. КОНВЕРСИЯ СТРОКИ В ЧИСЛО (atoi())

```
break    0x1C00    ; "break 7" в ассемблерном выводе и в objdump

loc_10:
        mflo      $v0
        jr        $ra
        or        $at, $zero ; branch delay slot, NOP
```

И кстати, мы видим новую инструкцию: BREAK. Она просто генерирует исключение.

В этом случае, исключение генерируется если делитель 0 (потому что в обычной математике нельзя делить на ноль).

Но компилятор GCC наверное не очень хорошо оптимизировал код, и не заметил, что \$V0 не бывает нулем. Так что проверка осталась здесь.

Так что если \$V0 будет каким-то образом 0, будет исполнена BREAK, сигнализирующая в ОС об исключении.

В противном случае, исполняется MFLO, берущая результат деления из регистра LO и копирующая его в \$V0.

Кстати, как мы уже можем знать, инструкция MUL оставляет старшую 32-битную часть результата в регистре HI и младшую 32-битную часть в LO.

DIV оставляет результат в регистре LO и остаток в HI.

Если изменить выражение на «a % 9», вместо инструкции MFLO будет использована MFHI.

3.9.5. Упражнение

- <http://challenges.re/27>

3.10. Конверсия строки в число (atoi())

Попробуем реализовать стандарту функцию Си atoi().

3.10.1. Простой пример

Это самый простой способ прочесть число, представленное в кодировке ASCII.

Он не защищен от ошибок: символ отличный от цифры приведет к неверному результату.

```
#include <stdio.h>

int my_atoi (char *s)
{
    int rt=0;

    while (*s)
    {
        rt=rt*10 + (*s-'0');
        s++;
    };

    return rt;
};

int main()
{
    printf ("%d\n", my_atoi ("1234"));
    printf ("%d\n", my_atoi ("1234567890"));
};
```

То, что делает алгоритм это просто считывает цифры слева направо.

Символ нуля в ASCII вычитается из каждой цифры.

3.10. КОНВЕРСИЯ СТРОКИ В ЧИСЛО (atoi())

Цифры от «0» до «9» расположены по порядку в таблице [ASCII](#), так что мы даже можем и не знать точного значения символа «0».

Всё что нам нужно знать это то что «0» минус «0» — это 0, а «9» минус «0» это 9, итд.

Вычитание «0» от каждого символа в итоге дает число от 0 до 9 включительно.

Любой другой символ, конечно, приведет к неверному результату!

Каждая цифра добавляется к итоговому результату (в переменной «rt»), но итоговый результат также умножается на 10 на каждой цифре.

Другими словами, на каждой итерации, результат сдвигается влево на одну позицию в десятичном виде.

Самая последняя цифра прибавляется, но не сдвигается.

Оптимизирующий MSVC 2013 x64

Листинг 3.22: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
s$ = 8
my_atoi PROC
; загрузить первый символ
    movzx    r8d, BYTE PTR [rcx]
; EAX выделен для переменной "rt"
; в начале там 0
    xor      eax, eax
; первый символ – это нулевой байт, т.е., конец строки?
; тогда выходим.
    test     r8b, r8b
    je       SHORT $LN9@my_atoi
$LL2@my_atoi:
    lea      edx, DWORD PTR [rax+rax*4]
; EDX=RAX+RAX*4=rt+rt*4=rt*5
    movsx    eax, r8b
; EAX=входной символ
; загрузить следующий символ в R8D
    movzx    r8d, BYTE PTR [rcx+1]
; передвинуть указатель в RCX на следующий символ:
    lea      rcx, QWORD PTR [rcx+1]
    lea      eax, DWORD PTR [rax+rdx*2]
; EAX=RAX+RDX*2=входной символ + rt*5*2=входной символ + rt*10
; скорректировать цифру вычитая 48 (0x30 или '0')
    add      eax, -48                                ; ffffffff00000000H
; последний символ был нулем?
    test     r8b, r8b
; перейти на начало цикла, если нет
    jne      SHORT $LL2@my_atoi
$LN9@my_atoi:
    ret      0
my_atoi ENDP
```

Символы загружаются в двух местах: первый символ и все последующие символы.

Это сделано для перегруппировки цикла. Здесь нет инструкции для умножения на 10, вместо этого две LEA делают это же.

MSVC иногда использует инструкцию ADD с отрицательной константой вместо SUB.

Это тот случай. Честно говоря, трудно сказать, чем это лучше, чем SUB.

Но MSVC делает так часто.

Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

Оптимизирующий GCC 4.9.1 более краток, но здесь есть одна лишняя инструкция RET в конце.

Одной было бы достаточно.

3.10. КОНВЕРСИЯ СТРОКИ В ЧИСЛО (atoi())

Листинг 3.23: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
my_atoi:
; загрузить входной символ в EDX
movsx  edx, BYTE PTR [rdi]
; EAX выделен для переменной "rt"
xor     eax, eax
; выйти, если загруженный символ – это нулевой байт
test    dl, dl
je      .L4
.L3:
    lea     eax, [rax+rax*4]
; EAX=RAX*5=rt*5
; передвинуть указатель на следующий символ:
    add     rdi, 1
    lea     eax, [rdi-48+rax*2]
; EAX=входной символ – 48 + RAX*2 = входной символ – '0' + rt*10
; загрузить следующий символ:
movsx  edx, BYTE PTR [rdi]
; перейти на начало цикла, если загруженный символ – это не нулевой байт
test    dl, dl
jne     .L3
rep ret
.L4:
    rep ret
```

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

Листинг 3.24: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
my_atoi PROC
; R1 будет содержать указатель на символ
MOV     r1,r0
; R0 будет содержать переменную "rt"
MOV     r0,#0
B       |L0.28|
|L0.12|
    ADD     r0,r0,r0,LSL #2
; R0=R0+R0<<2=rt*5
    ADD     r0,r2,r0,LSL #1
; R0=входной символ + rt*5<<1 = входной символ + rt*10
; скорректировать, вычитая '0' из rt:
SUB     r0,r0,#0x30
; сдвинуть указатель на следующий символ:
ADD     r1,r1,#1
|L0.28|
; загрузить входной символ в R2
LDRB    r2,[r1,#0]
; это нулевой байт? если нет, перейти на начало цикла.
CMP     r2,#0
BNE     |L0.12|
; выйти, если это нулевой байт.
; переменная "rt" всё еще в регистре R0, готовая для использования в вызывающей ф-ции
BX      lr
ENDP
```

Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

Листинг 3.25: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
my_atoi PROC
; R1 будет указателем на входной символ
MOVS    r1,r0
; R0 выделен для переменной "rt"
MOVS    r0,#0
B       |L0.16|
|L0.6|
```

3.10. КОНВЕРСИЯ СТРОКИ В ЧИСЛО (atoi())

```
        MOVS      r3,#0xa
; R3=10
        MULS      r0,r3,r0
; R0=R3*R0=rt*10
; передвинуть указатель на следующий символ:
        ADDS      r1,r1,#1
; скорректировать, вычитая символ нуля:
        SUBS      r0,r0,#0x30
        ADDS      r0,r2,r0
; rt=R2+R0=входной символ + (rt*10 - '0')
|L0.16|
; загрузить входной символ в R2
        LDRB      r2,[r1,#0]
; это ноль?
        CMP      r2,#0
; перейти на тело цикла, если нет
        BNE      |L0.6|
; переменная rt сейчас в R0, готовая для использования в вызывающей ф-ции
        BX      lr
        ENDP
```

Интересно, из школьного курса математики мы можем помнить, что порядок операций сложения и вычитания не играет роли.

Это наш случай: в начале вычисляется выражение $rt * 10 - '0'$, затем к нему прибавляется значение входного символа.

Действительно, результат тот же, но компилятор немного всё перегруппировал.

Оптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

Компилятор для ARM64 может использовать суффикс инструкции, задающий пре-инкремент:

Листинг 3.26: Оптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
my_atoi:
; загрузить входной символ в W1
        ldrb      w1, [x0]
        mov      x2, x0
; X2=адрес входной строки
; загруженный символ – 0?
; перейти на выход, если это так
; W1 будет содержать 0 в этом случае.
; он будет перезагружен в W0 на L4.
        cbz      w1, .L4
; W0 будет содержать переменную "rt"
; инициализировать её нулем:
        mov      w0, 0
.L3:
; вычесть 48 или '0' из входной переменной и оставить результат в W3:
        sub      w3, w1, #48
; загрузить следующий символ по адресу X2+1 в W1
; с пре-инкрементом:
        ldrb      w1, [x2,1]!
        add      w0, w0, w0, lsl 2
; W0=W0+W0<<2=W0+W0*4=rt*5
        add      w0, w3, w0, lsl 1
; W0=входная цифра + W0<<1 = входная цифра + rt*5*2 = входная цифра + rt*10
; если только что загруженный символ – это не нулевой байт, перейти на начало цикла
        cbnz     w1, .L3
; значение для возврата (rt) в W0, готовое для использования в вызывающей ф-ции
        ret
.L4:
        mov      w0, w1
        ret
```

3.10.2. Немного расширенный пример

Новый пример более расширенный, теперь здесь есть проверка знака «минус» в самом начале, и еще он может сообщать об ошибке если не-цифра была найдена во входной строке:

```
#include <stdio.h>

int my_atoi (char *s)
{
    int negative=0;
    int rt=0;

    if (*s=='-')
    {
        negative=1;
        s++;
    };

    while (*s)
    {
        if (*s<'0' || *s>'9')
        {
            printf ("Error! Unexpected char: '%c'\n", *s);
            exit(0);
        };
        rt=rt*10 + (*s-'0');
        s++;
    };

    if (negative)
        return -rt;
    return rt;
};

int main()
{
    printf ("%d\n", my_atoi ("1234"));
    printf ("%d\n", my_atoi ("1234567890"));
    printf ("%d\n", my_atoi ("-1234"));
    printf ("%d\n", my_atoi ("-1234567890"));
    printf ("%d\n", my_atoi ("-a1234567890")); // error
};
```

Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

Листинг 3.27: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
.LC0:
    .string "Error! Unexpected char: '%c'\n"

my_atoi:
    sub     rsp, 8
    movsx   edx, BYTE PTR [rdi]
; проверка на знак минуса
    cmp     dl, 45 ; '-'
    je      .L22
    xor     esi, esi
    test    dl, dl
    je      .L20
.L10:
; ESI=0 здесь, если знака минуса не было, или 1 в противном случае
    lea     eax, [rdx-48]
; любой символ, отличающийся от цифры в результате даст беззнаковое число больше 9 после ↴
;   ↵ вычитания
; так что если это не число, перейти на L4, где будет просигнализовано об ошибке:
    cmp     al, 9
    ja      .L4
    xor     eax, eax
```


3.10. КОНВЕРСИЯ СТРОКИ В ЧИСЛО (atoi())

```
    jmp     .L6
.L7:    lea     ecx, [rdx-48]
        cmp     cl, 9
        ja     .L4
.L6:    lea     eax, [rax+rax*4]
        add     rdi, 1
        lea     eax, [rdx-48+rax*2]
        movsx   edx, BYTE PTR [rdi]
        test    dl, dl
        jne     .L7
; если знака минуса не было, пропустить инструкцию NEG
; а если был, то исполнить её.
        test    esi, esi
        je     .L18
        neg     eax
.L18:    add     rsp, 8
        ret
.L22:    movsx   edx, BYTE PTR [rdi+1]
        lea     rax, [rdi+1]
        test    dl, dl
        je     .L20
        mov     rdi, rax
        mov     esi, 1
        jmp     .L10
.L20:    xor     eax, eax
        jmp     .L18
.L4:    ; сообщить об ошибке. символ в EDX
        mov     edi, 1
        mov     esi, OFFSET FLAT:.LC0 ; "Error! Unexpected char: '%c'\n"
        xor     eax, eax
        call    __printf_chk
        xor     edi, edi
        call    exit
```

Если знак «минус» был найден в начале строки, инструкция NEG будет исполнена в конце.

Она просто меняет знак числа.

Еще кое-что надо отметить. Как среднестатистический программист будет проверять, является ли символ цифрой?

Так же, как и у нас в исходном коде:

```
if (*s<'0' || *s>'9')
    ...
```

Здесь две операции сравнения. Но что интересно, так это то что мы можем заменить обе операции на одну:

просто вычитайте «0» из значения символа, считается результат за беззнаковое значение (это важно) и проверьте, не больше ли он чем 9.

Например, скажем, строка на входе имеет символ точки («.»), которая имеет код 46 в таблице [ASCII](#).

$46 - 48 = -2$ если считать результат за знаковое число. Действительно, символ точки расположен на два места раньше, чем символ «0» в таблице [ASCII](#).

Но это $0xFFFFFFE$ (4294967294) если считать результат за беззнаковое значение, и это точно больше чем 9!

Компиляторы часто так делают, важно распознавать эти трюки.

Еще один пример подобного в этой книге: [3.16.1](#) (стр. [527](#)).

Оптимизирующий MSVC 2013 x64 применяет те же трюки.

Листинг 3.28: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```

1 my_atoi PROC
2     PUSH    {r4-r6,lr}
3     MOV     r4,r0
4     LDRB    r0,[r0,#0]
5     MOV     r6,#0
6     MOV     r5,r6
7     CMP     r0,#0x2d '-'
8 ; R6 будет содержать 1 если минус был встречен, или 0 в противном случае
9     MOVEQ   r6,#1
10    ADDEQ   r4,r4,#1
11    B       |L0.80|
12 |L0.36|
13    SUB     r0,r1,#0x30
14    CMP     r0,#0xa
15    BCC     |L0.64|
16    ADR     r0,|L0.220|
17    BL      __2printf
18    MOV     r0,#0
19    BL      exit
20 |L0.64|
21    LDRB    r0,[r4],#1
22    ADD     r1,r5,r5,LSL #2
23    ADD     r0,r0,r1,LSL #1
24    SUB     r5,r0,#0x30
25 |L0.80|
26    LDRB    r1,[r4,#0]
27    CMP     r1,#0
28    BNE     |L0.36|
29    CMP     r6,#0
30 ; поменять знак в переменной результата
31    RSBNE   r0,r5,#0
32    MOVEQ   r0,r5
33    POP     {r4-r6,pc}
34    ENDP
35
36 |L0.220|
37    DCB     "Error! Unexpected char: '%c'\n",0

```

В 32-битном ARM нет инструкции NEG, так что вместо этого используется операция «Reverse Subtraction» (строка 31).

Она сработает если результат инструкции CMP (на строке 29) был «Not Equal» (не равно, отсюда суффикс -NE suffix).

Что делает RSBNE это просто вычитает результирующее значение из нуля.

Она работает, как и обычное вычитание, но меняет местами операнды.

Вычитание любого числа из нуля это смена знака: $0 - x = -x$.

Код для режима Thumb почти такой же.

GCC 4.9 для ARM64 может использовать инструкцию NEG, доступную в ARM64.

3.10.3. Упражнение

Кстати, security research-еры часто имеют дело с непредсказуемым поведением программ во время обработки некорректных данных. Например, во время fuzzing-a.

В качестве упражнения, вы можете попробовать ввести символы не относящиеся к числам и посмотреть, что случится.

Попробуйте объяснить, что произошло, и почему.

3.11. Inline-функции

Inline-код это когда компилятор, вместо того чтобы генерировать инструкцию вызова небольшой функции, просто вставляет её тело прямо в это место.

Листинг 3.29: Простой пример

```
#include <stdio.h>

int celsius_to_fahrenheit (int celsius)
{
    return celsius * 9 / 5 + 32;
};

int main(int argc, char *argv[])
{
    int celsius=atol(argv[1]);
    printf ("%d\n", celsius_to_fahrenheit (celsius));
};
```

...это компилируется вполне предсказуемо, хотя, если включить оптимизации GCC (-O3), мы увидим:

Листинг 3.30: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
_main:
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    and     esp, -16
    sub     esp, 16
    call    __main
    mov     eax, DWORD PTR [ebp+12]
    mov     eax, DWORD PTR [eax+4]
    mov     DWORD PTR [esp], eax
    call    _atol
    mov     edx, 1717986919
    mov     DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:LC2 ; "%d\12\0"
    lea     ecx, [eax+eax*8]
    mov     eax, ecx
    imul    edx
    sar     ecx, 31
    sar     edx
    sub     edx, ecx
    add     edx, 32
    mov     DWORD PTR [esp+4], edx
    call    _printf
    leave
    ret
```

(Здесь деление заменено умножением(3.9 (стр. 487)).)

Да, наша маленькая функция `celsius_to_fahrenheit()` была помещена прямо перед вызовом `printf()`.

Почему? Это может быть быстрее чем исполнять код самой функции плюс затраты на вызов и возврат.

Современные оптимизирующие компиляторы самостоятельно выбирают функции для вставки. Но компилятор можно дополнительно принудить развернуть некоторую функцию, если маркировать её ключевым словом «inline» в её определении.

3.11.1. Функции работы со строками и памятью

Другая очень частая оптимизация это вставка кода строковых функций таких как `strcpy()`, `strcmp()`, `strlen()`, `memset()`, `memcpy()`, `memcpy()`, итд.

Иногда это быстрее, чем вызывать отдельную функцию.

Это очень часто встречающиеся шаблонные вставки, которые желательно распознавать reverse engineer-ам «на глаз».

strcmp()

Листинг 3.31: пример с strcmp()

```
bool is_bool (char *s)
{
    if (strcmp (s, "true")==0)
        return true;
    if (strcmp (s, "false")==0)
        return false;

    assert(0);
};
```

Листинг 3.32: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
.LC0:
    .string "true"
.LC1:
    .string "false"
is_bool:
.LFB0:
    push    edi
    mov     ecx, 5
    push    esi
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC0
    sub     esp, 20
    mov     esi, DWORD PTR [esp+32]
    repz    cmpsb
    je      .L3
    mov     esi, DWORD PTR [esp+32]
    mov     ecx, 6
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC1
    repz    cmpsb
    seta    cl
    setb    dl
    xor     eax, eax
    cmp     cl, dl
    jne     .L8
    add     esp, 20
    pop     esi
    pop     edi
    ret

.L8:
    mov     DWORD PTR [esp], 0
    call    assert
    add     esp, 20
    pop     esi
    pop     edi
    ret

.L3:
    add     esp, 20
    mov     eax, 1
    pop     esi
    pop     edi
    ret
```

Листинг 3.33: Оптимизирующий MSVC 2010

```
$SG3454 DB    'true', 00H
$SG3456 DB    'false', 00H

_s$ = 8      ; size = 4
?is_bool@@YA_NPAD@Z PROC ; is_bool
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _s$[esp]
    mov     ecx, OFFSET $SG3454 ; 'true'
    mov     eax, esi
    npad    4 ; выровнять следующую метку
$LL6@is_bool:
```

3.11. INLINE-ФУНКЦИИ

```
    mov     dl, BYTE PTR [eax]
    cmp     dl, BYTE PTR [ecx]
    jne     SHORT $LN7@is_bool
    test    dl, dl
    je      SHORT $LN8@is_bool
    mov     dl, BYTE PTR [eax+1]
    cmp     dl, BYTE PTR [ecx+1]
    jne     SHORT $LN7@is_bool
    add     eax, 2
    add     ecx, 2
    test    dl, dl
    jne     SHORT $LL6@is_bool
$LN8@is_bool:
    xor     eax, eax
    jmp     SHORT $LN9@is_bool
$LN7@is_bool:
    sbb     eax, eax
    sbb     eax, -1
$LN9@is_bool:
    test    eax, eax
    jne     SHORT $LN2@is_bool

    mov     al, 1
    pop     esi

    ret     0
$LN2@is_bool:

    mov     ecx, OFFSET $SG3456 ; 'false'
    mov     eax, esi
$LL10@is_bool:
    mov     dl, BYTE PTR [eax]
    cmp     dl, BYTE PTR [ecx]
    jne     SHORT $LN11@is_bool
    test    dl, dl
    je      SHORT $LN12@is_bool
    mov     dl, BYTE PTR [eax+1]
    cmp     dl, BYTE PTR [ecx+1]
    jne     SHORT $LN11@is_bool
    add     eax, 2
    add     ecx, 2
    test    dl, dl
    jne     SHORT $LL10@is_bool
$LN12@is_bool:
    xor     eax, eax
    jmp     SHORT $LN13@is_bool
$LN11@is_bool:
    sbb     eax, eax
    sbb     eax, -1
$LN13@is_bool:
    test    eax, eax
    jne     SHORT $LN1@is_bool

    xor     al, al
    pop     esi

    ret     0
$LN1@is_bool:

    push    11
    push    OFFSET $SG3458
    push    OFFSET $SG3459
    call    DWORD PTR __imp__wassert
    add     esp, 12
    pop     esi

    ret     0
?is_bool@@YA_NPAD@Z ENDP ; is_bool
```

strlen()

Листинг 3.34: пример с strlen()

```
int strlen_test(char *s1)
{
    return strlen(s1);
};
```

Листинг 3.35: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_s1$ = 8 ; size = 4
_strlen_test PROC
    mov     eax, DWORD PTR _s1$[esp-4]
    lea     edx, DWORD PTR [eax+1]
$LL3@strlen_tes:
    mov     cl, BYTE PTR [eax]
    inc     eax
    test    cl, cl
    jne     SHORT $LL3@strlen_tes
    sub     eax, edx
    ret     0
_strlen_test ENDP
```

strcpy()

Листинг 3.36: пример с strcpy()

```
void strcpy_test(char *s1, char *outbuf)
{
    strcpy(outbuf, s1);
};
```

Листинг 3.37: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_s1$ = 8 ; size = 4
_outbuf$ = 12 ; size = 4
_strcpy_test PROC
    mov     eax, DWORD PTR _s1$[esp-4]
    mov     edx, DWORD PTR _outbuf$[esp-4]
    sub     edx, eax
    nrad    6 ; выровнять следующую метку
$LL3@strcpy_tes:
    mov     cl, BYTE PTR [eax]
    mov     BYTE PTR [edx+eax], cl
    inc     eax
    test    cl, cl
    jne     SHORT $LL3@strcpy_tes
    ret     0
_strcpy_test ENDP
```

memset()**Пример#1**

Листинг 3.38: 32 байта

```
#include <stdio.h>

void f(char *out)
{
    memset(out, 0, 32);
};
```

3.11. INLINE-ФУНКЦИИ

Многие компиляторы не генерируют вызов `memset()` для коротких блоков, а просто вставляют набор MOV-ов:

Листинг 3.39: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
f:
    mov     QWORD PTR [rdi], 0
    mov     QWORD PTR [rdi+8], 0
    mov     QWORD PTR [rdi+16], 0
    mov     QWORD PTR [rdi+24], 0
    ret
```

Кстати, это напоминает развернутые циклы: [1.16.1](#) (стр. 182).

Пример#2

Листинг 3.40: 67 байт

```
#include <stdio.h>

void f(char *out)
{
    memset(out, 0, 67);
};
```

Когда размер блока не кратен 4 или 8, разные компиляторы могут вести себя по-разному. Например, MSVC 2012 продолжает вставлять MOV:

Листинг 3.41: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
out$ = 8
f      PROC
    xor     eax, eax
    mov     QWORD PTR [rcx], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+8], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+16], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+24], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+32], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+40], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+48], rax
    mov     QWORD PTR [rcx+56], rax
    mov     WORD PTR [rcx+64], ax
    mov     BYTE PTR [rcx+66], al
    ret     0
f      ENDP
```

...а GCC использует `REP STOSQ`, полагая, что так будет короче, чем пачка MOV's:

Листинг 3.42: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
f:
    mov     QWORD PTR [rdi], 0
    mov     QWORD PTR [rdi+59], 0
    mov     rcx, rdi
    lea     rdi, [rdi+8]
    xor     eax, eax
    and     rdi, -8
    sub     rcx, rdi
    add     ecx, 67
    shr     ecx, 3
    rep stosq
    ret
```

memset()

Короткие блоки

3.11. *INLINE-ФУНКЦИИ*

Если нужно скопировать немного байт, то, нередко, `memcpy()` заменяется на несколько инструкций `MOV`.

Листинг 3.43: пример с `memcpy()`

```
void memcpy_7(char *inbuf, char *outbuf)
{
    memcpy(outbuf+10, inbuf, 7);
};
```

Листинг 3.44: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_inbuf$ = 8      ; size = 4
_outbuf$ = 12    ; size = 4
_memcpy_7 PROC
    mov     ecx, DWORD PTR _inbuf$[esp-4]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR _outbuf$[esp-4]
    mov     DWORD PTR [eax+10], edx
    mov     dx, WORD PTR [ecx+4]
    mov     WORD PTR [eax+14], dx
    mov     cl, BYTE PTR [ecx+6]
    mov     BYTE PTR [eax+16], cl
    ret     0
_memcpy_7 ENDP
```

Листинг 3.45: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
memcpy_7:
    push    ebx
    mov     eax, DWORD PTR [esp+8]
    mov     ecx, DWORD PTR [esp+12]
    mov     ebx, DWORD PTR [eax]
    lea     edx, [ecx+10]
    mov     DWORD PTR [ecx+10], ebx
    movzx   ecx, WORD PTR [eax+4]
    mov     WORD PTR [edx+4], cx
    movzx   eax, BYTE PTR [eax+6]
    mov     BYTE PTR [edx+6], al
    pop     ebx
    ret
```

Обычно это происходит так: в начале копируются 4-байтные блоки, затем 16-битное слово (если нужно), затем последний байт (если нужно).

Точно так же при помощи `MOV` копируются структуры: [1.24.4](#) (стр. [352](#)).

Длинные блоки

Здесь компиляторы ведут себя по-разному.

Листинг 3.46: пример с `memcpy()`

```
void memcpy_128(char *inbuf, char *outbuf)
{
    memcpy(outbuf+10, inbuf, 128);
};

void memcpy_123(char *inbuf, char *outbuf)
{
    memcpy(outbuf+10, inbuf, 123);
};
```

При копировании 128 байт, MSVC может обойтись одной инструкцией `MOVSD` (ведь 128 кратно 4):

Листинг 3.47: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_inbuf$ = 8      ; size = 4
_outbuf$ = 12    ; size = 4
```


3.11. *INLINE-ФУНКЦИИ*

```
_memcpy_128 PROC
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _inbuf$[esp]
    push    edi
    mov     edi, DWORD PTR _outbuf$[esp+4]
    add     edi, 10
    mov     ecx, 32
    rep movsd
    pop     edi
    pop     esi
    ret     0
_memcpy_128 ENDP
```

При копировании 123-х байт, в начале копируется 30 32-битных слов при помощи MOVSD (это 120 байт), затем копируется 2 байта при помощи MOVSW, затем еще один байт при помощи MOVSB.

Листинг 3.48: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_inbuf$ = 8          ; size = 4
_outbuf$ = 12        ; size = 4
_memcpy_123 PROC
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _inbuf$[esp]
    push    edi
    mov     edi, DWORD PTR _outbuf$[esp+4]
    add     edi, 10
    mov     ecx, 30
    rep movsd
    movsw
    movsb
    pop     edi
    pop     esi
    ret     0
_memcpy_123 ENDP
```

GCC во всех случаях вставляет большую универсальную функцию, работающую для всех размеров блоков:

Листинг 3.49: Оптимизирующий GCC 4.8.1

```
memcpy_123:
.LFB3:
    push    edi
    mov     eax, 123
    push    esi
    mov     edx, DWORD PTR [esp+16]
    mov     esi, DWORD PTR [esp+12]
    lea     edi, [edx+10]
    test    edi, 1
    jne     .L24
    test    edi, 2
    jne     .L25
.L7:
    mov     ecx, eax
    xor     edx, edx
    shr     ecx, 2
    test    al, 2
    rep movsd
    je      .L8
    movzx   edx, WORD PTR [esi]
    mov     WORD PTR [edi], dx
    mov     edx, 2
.L8:
    test    al, 1
    je      .L5
    movzx   eax, BYTE PTR [esi+edx]
    mov     BYTE PTR [edi+edx], al
.L5:
    pop     esi
    pop     edi
    ret
```

3.11. *INLINE-ФУНКЦИИ*

```
.L24:
    movzx    eax, BYTE PTR [esi]
    lea      edi, [edx+11]
    add      esi, 1
    test     edi, 2
    mov      BYTE PTR [edx+10], al
    mov      eax, 122
    je       .L7

.L25:
    movzx    edx, WORD PTR [esi]
    add      edi, 2
    add      esi, 2
    sub      eax, 2
    mov      WORD PTR [edi-2], dx
    jmp      .L7

.LFE3:
```

Универсальные функции копирования блоков обычно работают по следующей схеме: вычислить, сколько 32-битных слов можно скопировать, затем сделать это при помощи MOVSD, затем скопировать остатки.

Более сложные функции копирования используют [SIMD](#) и учитывают выравнивание в памяти.

Как пример функции strlen() использующую SIMD : [1.28.2](#) (стр. [407](#)).

memcmp()

Листинг 3.50: пример с memcmp()

```
int memcmp_1235(char *buf1, char *buf2)
{
    return memcmp(buf1, buf2, 1235);
};
```

Для блоков разной длины, MSVC 2013 вставляет одну и ту же универсальную функцию:

Листинг 3.51: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_buf1$ = 8      ; size = 4
_buf2$ = 12     ; size = 4
_memcmp_1235 PROC
    mov      ecx, DWORD PTR _buf1$[esp-4]
    mov      edx, DWORD PTR _buf2$[esp-4]
    push     esi
    mov      esi, 1231
    npad     2
$LL5@memcmp_123:
    mov      eax, DWORD PTR [ecx]
    cmp      eax, DWORD PTR [edx]
    jne      SHORT $LN4@memcmp_123
    add      ecx, 4
    add      edx, 4
    sub      esi, 4
    jae      SHORT $LL5@memcmp_123
$LN4@memcmp_123:
    mov      al, BYTE PTR [ecx]
    cmp      al, BYTE PTR [edx]
    jne      SHORT $LN6@memcmp_123
    mov      al, BYTE PTR [ecx+1]
    cmp      al, BYTE PTR [edx+1]
    jne      SHORT $LN6@memcmp_123
    mov      al, BYTE PTR [ecx+2]
    cmp      al, BYTE PTR [edx+2]
    jne      SHORT $LN6@memcmp_123
    cmp      esi, -1
    je       SHORT $LN3@memcmp_123
    mov      al, BYTE PTR [ecx+3]
    cmp      al, BYTE PTR [edx+3]
    jne      SHORT $LN6@memcmp_123
```

3.12. C99 RESTRICT

```
$LN3@memcmp_123:
    xor     eax, eax
    pop     esi
    ret     0
$LN6@memcmp_123:
    sbb     eax, eax
    or      eax, 1
    pop     esi
    ret     0
_memcmp_1235 ENDP
```

strcat()

Это функция strcat() в том виде, в котором её сгенерировала MSVC 6.0. Здесь видны 3 части: 1) измерение длины исходной строки (первый scasb); 2) измерение длины целевой строки (второй scasb); 3) копирование исходной строки в конец целевой (пара movsd/movsb).

Листинг 3.52: strcat()

```
    lea     edi, [src]
    or      ecx, 0FFFFFFFFh
    repne scasb
    not     ecx
    sub     edi, ecx
    mov     esi, edi
    mov     edi, [dst]
    mov     edx, ecx
    or      ecx, 0FFFFFFFFh
    repne scasb
    mov     ecx, edx
    dec     edi
    shr     ecx, 2
    rep movsd
    mov     ecx, edx
    and     ecx, 3
    rep movsb
```

Скрипт для IDA

Есть также небольшой скрипт для [IDA](#) для поиска и сворачивания таких очень часто попадающихся inline-функций:

[GitHub](#).

3.12. C99 restrict

А вот причина, из-за которой программы на Фортран, в некоторых случаях, работают быстрее чем на Си.

```
void f1 (int* x, int* y, int* sum, int* product, int* sum_product, int* update_me, size_t s)
{
    for (int i=0; i<s; i++)
    {
        sum[i]=x[i]+y[i];
        product[i]=x[i]*y[i];
        update_me[i]=i*123; // some dummy value
        sum_product[i]=sum[i]+product[i];
    };
};
```

Это очень простой пример, в котором есть одна особенность: указатель на массив update_me может быть указателем на массив sum, product, или даже sum_product—ведь нет ничего криминального в том чтобы аргументам функции быть такими, верно?

3.12. C99 RESTRICT

Компилятор знает об этом, поэтому генерирует код, где в теле цикла будет 4 основных стадии:

- вычислить следующий `sum[i]`
- вычислить следующий `product[i]`
- вычислить следующий `update_me[i]`
- вычислить следующий `sum_product[i]`—на этой стадии придется снова загружать из памяти подсчитанные `sum[i]` и `product[i]`

Возможно ли оптимизировать последнюю стадию? Ведь подсчитанные `sum[i]` и `product[i]` не обязательно снова загружать из памяти, ведь мы их только что подсчитали.

Можно, но компилятор не уверен, что на третьей стадии ничего не затерлось!

Это называется «pointer aliasing», ситуация, когда компилятор не может быть уверен, что память на которую указывает какой-то указатель, не изменилась.

restrict в стандарте Си C99 [ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard), (2007) 6.7.3/1] это обещание, данное компилятору программистом, что аргументы функции, отмеченные этим ключевым словом, всегда будут указывать на разные места в памяти и пересекаться не будут.

Если быть более точным, и описывать это формально, *restrict* показывает, что только данный указатель будет использоваться для доступа к этому объекту, больше никакой указатель для этого использоваться не будет.

Можно даже сказать, что к всякому объекту, доступ будет осуществляться только через один единственный указатель, если он отмечен как *restrict*.

Добавим это ключевое слово к каждому аргументу-указателю:

```
void f2 (int* restrict x, int* restrict y, int* restrict sum, int* restrict product, int* restrict sum_product,
        int* restrict update_me, size_t s)
{
    for (int i=0; i<s; i++)
    {
        sum[i]=x[i]+y[i];
        product[i]=x[i]*y[i];
        update_me[i]=i*123; // some dummy value
        sum_product[i]=sum[i]+product[i];
    };
};
```

Посмотрим результаты:

Листинг 3.53: GCC x64: f1()

```
f1:
    push    r15 r14 r13 r12 rbp rdi rsi rbx
    mov     r13, QWORD PTR 120[rsp]
    mov     rbp, QWORD PTR 104[rsp]
    mov     r12, QWORD PTR 112[rsp]
    test    r13, r13
    je      .L1
    add     r13, 1
    xor     ebx, ebx
    mov     edi, 1
    xor     r11d, r11d
    jmp     .L4
.L6:
    mov     r11, rdi
    mov     rdi, rax
.L4:
    lea     rax, 0[0+r11*4]
    lea     r10, [rcx+rax]
    lea     r14, [rdx+rax]
    lea     rsi, [r8+rax]
    add     rax, r9
    mov     r15d, DWORD PTR [r10]
    add     r15d, DWORD PTR [r14]
    mov     DWORD PTR [rsi], r15d      ; сохранить в sum[]
    mov     r10d, DWORD PTR [r10]
```

3.12. C99 RESTRICT

```
    imul    r10d, DWORD PTR [r14]
    mov     DWORD PTR [rax], r10d      ; сохранить в product[]
    mov     DWORD PTR [r12+r11*4], ebx ; сохранить в update_me[]
    add     ebx, 123
    mov     r10d, DWORD PTR [rsi]      ; перезагрузить sum[i]
    add     r10d, DWORD PTR [rax]      ; перезагрузить product[i]
    lea     rax, 1[rdi]
    cmp     rax, r13
    mov     DWORD PTR 0[rbp+r11*4], r10d ; сохранить в sum_product[]
    jne     .L6
.L1:
    pop     rbx rsi rdi rbp r12 r13 r14 r15
    ret
```

Листинг 3.54: GCC x64: f2()

```
f2:
    push    r13 r12 rbp rdi rsi rbx
    mov     r13, QWORD PTR 104[rsp]
    mov     rbp, QWORD PTR 88[rsp]
    mov     r12, QWORD PTR 96[rsp]
    test    r13, r13
    je      .L7
    add     r13, 1
    xor     r10d, r10d
    mov     edi, 1
    xor     eax, eax
    jmp     .L10
.L11:
    mov     rax, rdi
    mov     rdi, r11
.L10:
    mov     esi, DWORD PTR [rcx+rax*4]
    mov     r11d, DWORD PTR [rdx+rax*4]
    mov     DWORD PTR [r12+rax*4], r10d ; сохранить в update_me[]
    add     r10d, 123
    lea     ebx, [rsi+r11]
    imul    r11d, esi
    mov     DWORD PTR [r8+rax*4], ebx   ; сохранить в sum[]
    mov     DWORD PTR [r9+rax*4], r11d  ; сохранить в product[]
    add     r11d, ebx
    mov     DWORD PTR 0[rbp+rax*4], r11d ; сохранить в sum_product[]
    lea     r11, 1[rdi]
    cmp     r11, r13
    jne     .L11
.L7:
    pop     rbx rsi rdi rbp r12 r13
    ret
```

Разница между скомпилированной функцией `f1()` и `f2()` такая: в `f1()`, `sum[i]` и `product[i]` загружаются снова посреди тела цикла, а в `f2()` этого нет, используются уже подсчитанные значения, ведь мы «пообещали» компилятору, что никто и ничто не изменит значения в `sum[i]` и `product[i]` во время исполнения тела цикла, поэтому он «уверен», что значения из памяти можно не загружать снова. Очевидно, второй вариант работает быстрее.

Но что будет если указатели в аргументах функций все же будут пересекаться?

Это на совести программиста, а результаты вычислений будут неверными.

Вернемся к Фортрану. Компиляторы с этого ЯП, по умолчанию, все указатели считают таковыми, поэтому, когда не было возможности указать *restrict* в Си, то компилятор с Фортрана в этих случаях мог генерировать более быстрый код.

Насколько это практично? Там, где функция работает с несколькими большими блоками в памяти. Такого очень много в линейной алгебре, например.

Очень много линейной алгебры используется на суперкомпьютерах/[HPC¹⁵](#), возможно, поэтому, традиционно, там часто используется Фортран, до сих пор [Eugene Loh, *The Ideal HPC Programming*

¹⁵High-Performance Computing

3.13. ФУНКЦИЯ ABS() БЕЗ ПЕРЕХОДОВ

Language, (2010)]. Ну а когда итераций цикла не очень много, конечно, тогда прирост скорости может и не быть ощутимым.

3.13. Функция *abs()* без переходов

Снова вернемся к уже рассмотренному ранее примеру 1.14.2 (стр. 131) и спросим себя, возможно ли сделать версию этого кода под x86 без переходов?

```
int my_abs (int i)
{
    if (i<0)
        return -i;
    else
        return i;
};
```

И ответ положительный.

3.13.1. Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

Мы можем это увидеть если скомпилируем оптимизирующим GCC 4.9:

Листинг 3.55: Оптимизирующий GCC 4.9 x64

```
my_abs:
    mov     edx, edi
    mov     eax, edi
    sar     edx, 31
; EDX здесь 0xFFFFFFFF если знак входного значения -- минус
; EDX ноль если знак входного значения -- плюс (включая ноль)
; следующие две инструкции имеют эффект только если EDX равен 0xFFFFFFFF
; либо не работают, если EDX -- ноль
    xor     eax, edx
    sub     eax, edx
    ret
```

И вот как он работает:

Арифметически сдвигаем входное значение вправо на 31.

Арифметический сдвиг означает знаковое расширение, так что если MSB это 1, то все 32 бита будут заполнены единицами, либо нулями в противном случае.

Другими словами, инструкция SAR REG, 31 делает 0xFFFFFFFF если знак был отрицательным либо 0 если положительным.

После исполнения SAR, это значение у нас в EDX.

Затем, если значение 0xFFFFFFFF (т.е. знак отрицательный) входное значение инвертируется (потому что XOR REG, 0xFFFFFFFF работает как операция инвертирования всех бит).

Затем, снова, если значение 0xFFFFFFFF (т.е. знак отрицательный), 1 прибавляется к итоговому результату (потому что вычитание -1 из значения это то же что и инкремент).

Инвертирование всех бит и инкремент, это то, как меняется знак у значения в формате two's complement: 2.2 (стр. 444).

Мы можем заметить, что последние две инструкции делают что-то если знак входного значения отрицательный.

В противном случае (если знак положительный) они не делают ничего, оставляя входное значение нетронутым.

Алгоритм разъяснен в [Henry S. Warren, *Hacker's Delight*, (2002)2-4]. Трудно сказать, как именно GCC сгенерировал его, оптимизировал сам или просто нашел подходящий шаблон среди известных?

3.13.2. Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64

GCC 4.9 для ARM64 делает почти то же, только использует полные 64-битные регистры.

Здесь меньше инструкций, потому что входное значение может быть сдвинуто используя суффикс инструкции («asr») вместо отдельной инструкции.

Листинг 3.56: Оптимизирующий GCC 4.9 ARM64

```
my_abs:
; расширить входное 32-битное значение до 64-битного в регистре X0, учитывая знак:
    sxtw    x0, w0
    eor     x1, x0, x0, asr 63
; X1=X0^(X0>>63) (арифметический сдвиг)
    sub     x0, x1, x0, asr 63
; X0=X1-(X0>>63)=X0^(X0>>63)-(X0>>63) (все сдвиги -- арифметические)
    ret
```

3.14. Функции с переменным количеством аргументов

Функции вроде printf() и scanf() могут иметь переменное количество аргументов (*variadic*).

Как обращаться к аргументам?

3.14.1. Вычисление среднего арифметического

Представим, что нам нужно вычислить [среднее арифметическое](#), и по какой-то странной причине, нам нужно задать все числа в аргументах функции.

Но в Си/Си++ функции с переменным кол-вом аргументов невозможно определить кол-во аргументов, так что обозначим значение -1 как конец списка.

Используя макрос va_arg

Имеется стандартный заголовочный файл stdarg.h, который определяет макросы для работы с такими аргументами.

Их так же используют функции printf() и scanf().

```
#include <stdio.h>
#include <stdarg.h>

int arith_mean(int v, ...)
{
    va_list args;
    int sum=v, count=1, i;
    va_start(args, v);

    while(1)
    {
        i=va_arg(args, int);
        if (i==-1) // терминатор
            break;
        sum=sum+i;
        count++;
    }

    va_end(args);
    return sum/count;
};

int main()
{
    printf ("%d\n", arith_mean (1, 2, 7, 10, 15, -1 /* терминатор */));
};
```

3.14. ФУНКЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ АРГУМЕНТОВ

Самый первый аргумент должен трактоваться как обычный аргумент.

Остальные аргументы загружаются используя макрос `va_arg`, и затем суммируются.

Так что внутри?

Соглашение о вызовах *cdecl*

Листинг 3.57: Оптимизирующий MSVC 6.0

```
_v$ = 8
_arith_mean PROC NEAR
    mov     eax, DWORD PTR _v$[esp-4] ; загрузить первый аргумент в sum
    push    esi
    mov     esi, 1                     ; count=1
    lea     edx, DWORD PTR _v$[esp]   ; адрес первого аргумента
$L838:
    mov     ecx, DWORD PTR [edx+4]    ; загрузить следующий аргумент
    add     edx, 4                    ; сдвинуть указатель на следующий аргумент
    cmp     ecx, -1                   ; это -1?
    je      SHORT $L856               ; выйти, если это так
    add     eax, ecx                   ; sum = sum + загруженный аргумент
    inc     esi                       ; count++
    jmp     SHORT $L838
$L856:
; вычислить результат деления

    cdq
    idiv    esi
    pop     esi
    ret     0
_arith_mean ENDP

$SG851 DB      '%d', 0aH, 00H

_main PROC NEAR
    push    -1
    push    15
    push    10
    push    7
    push    2
    push    1
    call    _arith_mean
    push    eax
    push    OFFSET FLAT:$SG851 ; '%d'
    call    _printf
    add     esp, 32
    ret     0
_main ENDP
```

Аргументы, как мы видим, передаются в `main()` один за одним.

Первый аргумент заталкивается в локальный стек первым.

Терминатор (оконечивающее значение `-1`) заталкивается последним.

Функция `arith_mean()` берет первый аргумент и сохраняет его значение в переменной *sum*.

Затем, она записывает адрес второго аргумента в регистр EDX, берет значение оттуда, прибавляет к *sum*, и делает это в бесконечном цикле, до тех пор, пока не встретится `-1`.

Когда встретится, сумма делится на число всех значений (исключая `-1`) и **частное** возвращается.

Так что, другими словами, я бы сказал, функция обходится с фрагментом стека как с массивом целочисленных значений, бесконечной длины.

Теперь нам легче понять почему в соглашениях о вызовах *cdecl* первый аргумент заталкивается в стек последним.

Потому что иначе будет невозможно найти первый аргумент, или, для функции вроде `printf()`, невозможно будет найти строку формата.

Соглашения о вызовах на основе регистров

Наблюдательный читатель может спросить, что насчет тех соглашений о вызовах, где первые аргументы передаются в регистрах?

Посмотрим:

Листинг 3.58: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
$SG3013 DB      '%d', 0aH, 00H

v$ = 8
arith_mean PROC
    mov     DWORD PTR [rsp+8], ecx      ; первый аргумент
    mov     QWORD PTR [rsp+16], rdx    ; второй аргумент
    mov     QWORD PTR [rsp+24], r8     ; третий аргумент
    mov     eax, ecx                   ; sum = первый аргумент
    lea     rcx, QWORD PTR v$[rsp+8]  ; указатель на второй аргумент
    mov     QWORD PTR [rsp+32], r9     ; 4-й аргумент
    mov     edx, DWORD PTR [rcx]       ; загрузить второй аргумент
    mov     r8d, 1                     ; count=1
    cmp     edx, -1                    ; второй аргумент равен -1?
    je      SHORT $LN8@arith_mean     ; если так, то выход
$LL3@arith_mean:
    add     eax, edx                   ; sum = sum + загруженный аргумент
    mov     edx, DWORD PTR [rcx+8]    ; загрузить следующий аргумент
    lea     rcx, QWORD PTR [rcx+8]    ; сдвинуть указатель, чтобы он указывал на аргумент ↗
    ↙ за следующим
    inc     r8d                        ; count++
    cmp     edx, -1                    ; загруженный аргумент равен -1?
    jne     SHORT $LL3@arith_mean     ; перейти на начал цикла, если нет
$LN8@arith_mean:
; вычислить результат деления
    cdq
    idiv    r8d
    ret     0
arith_mean ENDP

main PROC
    sub     rsp, 56
    mov     edx, 2
    mov     DWORD PTR [rsp+40], -1
    mov     DWORD PTR [rsp+32], 15
    lea     r9d, QWORD PTR [rdx+8]
    lea     r8d, QWORD PTR [rdx+5]
    lea     ecx, QWORD PTR [rdx-1]
    call    arith_mean
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG3013
    mov     edx, eax
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 56
    ret     0
main ENDP
```

Мы видим, что первые 4 аргумента передаются в регистрах и еще два — в стеке.

Функция `arith_mean()` в начале сохраняет эти 4 аргумента в *Shadow Space* и затем обходится с *Shadow Space* и стеком за ним как с единым непрерывным массивом!

Что насчет GCC? Тут немного неуклюже всё, потому что функция делится на две части: первая часть сохраняет регистры в «red zone», обрабатывает это пространство, а вторая часть функции обрабатывает стек:

Листинг 3.59: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
arith_mean:
    lea     rax, [rsp+8]
    ; сохранить 6 входных регистров в
    ; red zone в локальном стеке
    mov     QWORD PTR [rsp-40], rsi
```

3.14. ФУНКЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ АРГУМЕНТОВ

```
mov     QWORD PTR [rsp-32], rdx
mov     QWORD PTR [rsp-16], r8
mov     QWORD PTR [rsp-24], rcx
mov     esi, 8
mov     QWORD PTR [rsp-64], rax
lea     rax, [rsp-48]
mov     QWORD PTR [rsp-8], r9
mov     DWORD PTR [rsp-72], 8
lea     rdx, [rsp+8]
mov     r8d, 1
mov     QWORD PTR [rsp-56], rax
jmp     .L5

.L7:
; обработать сохраненные аргументы
lea     rax, [rsp-48]
mov     ecx, esi
add     esi, 8
add     rcx, rax
mov     ecx, DWORD PTR [rcx]
cmp     ecx, -1
je      .L4

.L8:
add     edi, ecx
add     r8d, 1

.L5:
; решить, какую часть мы сейчас будем обрабатывать
; текущий номер аргумента меньше или равен 6?
cmp     esi, 47
jbe     .L7 ; нет, тогда обрабатываем сохраненные аргументы
; обрабатываем аргументы из стека
mov     rcx, rdx
add     rdx, 8
mov     ecx, DWORD PTR [rcx]
cmp     ecx, -1
jne     .L8

.L4:
mov     eax, edi
cdq
idiv    r8d
ret

.LC1:
.string "%d\n"
main:
sub     rsp, 8
mov     edx, 7
mov     esi, 2
mov     edi, 1
mov     r9d, -1
mov     r8d, 15
mov     ecx, 10
xor     eax, eax
call    arith_mean
mov     esi, OFFSET FLAT:.LC1
mov     edx, eax
mov     edi, 1
xor     eax, eax
add     rsp, 8
jmp     __printf_chk
```

Кстати, похожее использование *Shadow Space* разбирается здесь: [6.1.8](#) (стр. [720](#)).

Используя указатель на первый аргумент ф-ции

Пример можно переписать без использования макроса `va_arg`:

```
#include <stdio.h>
```

3.14. ФУНКЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ АРГУМЕНТОВ

```
int arith_mean(int v, ...)\n{\n    int *i=&v;\n    int sum=*i, count=1;\n    i++;\n\n    while(1)\n    {\n        if ((*i)==-1) // terminator\n            break;\n        sum=sum+(*i);\n        count++;\n        i++;\n    }\n\n    return sum/count;\n};\n\nint main()\n{\n    printf ("%d\\n", arith_mean (1, 2, 7, 10, 15, -1 /* terminator */));\n    // test: https://www.wolframalpha.com/input/?i=mean(1,2,7,10,15)\n};
```

Иными словами, если набор аргументов – это массив слов (32-битных или 64-битных), то мы просто перебираем элементы этого массива, начиная с первого.

3.14.2. Случай с функцией *vprintf()*

Многие программисты определяют свою собственную функцию для записи в лог, которая берет строку формата вида `printf()` + переменное количество аргументов.

Еще один популярный пример это функция `die()`, которая выводит некоторое сообщение и заканчивает работу.

Нам нужен какой-то способ запаковать входные аргументы неизвестного количества и передать их в функцию `printf()`.

Но как? Вот зачем нужны функции с «v» в названии.

Одна из них это *vprintf()*: она берет строку формата и указатель на переменную типа `va_list`:

```
#include <stdlib.h>\n#include <stdarg.h>\n\nvoid die (const char * fmt, ...)\n{\n    va_list va;\n    va_start (va, fmt);\n\n    vprintf (fmt, va);\n    exit(0);\n};
```

При ближайшем рассмотрении, мы можем увидеть, что `va_list` это указатель на массив.

Скомпилируем:

Листинг 3.60: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_fmt$ = 8\n_die PROC\n    ; загрузить первый аргумент (строка формата)\n    mov     ecx, DWORD PTR _fmt$[esp-4]\n    ; установить указатель на второй аргумент\n    lea     eax, DWORD PTR _fmt$[esp]\n    push    eax                ; передать указатель\n    push    ecx\n    call    _vprintf\n    add     esp, 8
```

3.14. ФУНКЦИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЛИЧЕСТВОМ АРГУМЕНТОВ

```
    push    0
    call    _exit
$LN3@die:
    int     3
_die      ENDP
```

Мы видим, что всё что наша функция делает это просто берет указатель на аргументы, передает его в `vprintf()`, и эта функция работает с ним, как с бесконечным массивом аргументов!

Листинг 3.61: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
fmt$ = 48
die    PROC
    ; сохранить первые 4 аргумента в Shadow Space
    mov     QWORD PTR [rsp+8], rcx
    mov     QWORD PTR [rsp+16], rdx
    mov     QWORD PTR [rsp+24], r8
    mov     QWORD PTR [rsp+32], r9
    sub     rsp, 40
    lea     rdx, QWORD PTR fmt$[rsp+8] ; передать указатель на первый аргумент
    ; RCX здесь всё еще указывает на первый аргумент (строку формата) ф-ции die()
    ; так что vprintf() возьмет его прямо из RCX
    call    vprintf
    xor     ecx, ecx
    call    exit
    int     3
die     ENDP
```

3.14.3. Случай с Pin

Интересно посмотреть, как некоторые ф-ции из DBI¹⁶ Pin берут на вход несколько аргументов:

```
INS_InsertPredicatedCall(
    ins, IPOINT_BEFORE, (AFUNPTR)RecordMemRead,
    IARG_INST_PTR,
    IARG_MEMORYOP_EA, memOp,
    IARG_END);
```

(pinatrace.cpp)

И вот как объявлена ф-ция `INS_InsertPredicatedCall()`:

```
extern VOID INS_InsertPredicatedCall(INS ins, IPOINT ipoint, AFUNPTR funptr, ...);
```

(pin_client.PH)

Следовательно, константы с именами начинающимися с `IARG_` это что-то вроде аргументов для ф-ции, которая обрабатывается внутри `INS_InsertPredicatedCall()`. Вы можете передавать столько аргументов, сколько нужно. Некоторые команды имеют дополнительные аргументы, некоторые другие — нет. Полный список аргументов: https://software.intel.com/sites/landingpage/pintool/docs/58423/Pin/html/group__INST__ARGS.html. И должен быть какой-то способ узнать, закончился ли список аргументов, так что список должен быть оконечен при помощи константы `IARG_END`, без которой ф-ция будет (пытаться) обрабатывать случайный шум из локального стека, принимая его за дополнительные аргументы.

Также, в [Brian W. Kernighan, Rob Pike, *Practice of Programming*, (1999)] можно найти прекрасный пример ф-ций на Си/Си++, очень похожих на `pack/unpack`¹⁷ в Python.

3.14.4. Эксплуатация строки формата

Есть популярная ошибка, писать `printf(string)` вместо `puts(string)` или `printf("%s", string)`. Если тот, кто пытается взломать систему удаленно, может указать свою `string`, он/она может свалить процесс, или даже получить доступ к переменным в локальном стеке.

Посмотрите на это:

¹⁶Dynamic Binary Instrumentation

¹⁷<https://docs.python.org/3/library/struct.html>

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    char *s1="hello";
    char *s2="world";
    char buf[128];

    // do something mundane here
    strcpy (buf, s1);
    strcpy (buf, " ");
    strcpy (buf, s2);

    printf ("%s");
};
```

Нужно отметить, что у вызова `printf()` нет дополнительных аргументов кроме строки формата.

Теперь представим что это взломщик просунул строку `%s` как единственный аргумент последнего вызова `printf()`. Я компилирую это в GCC 5.4.0 на x86 Ubuntu, и итоговый исполняемый файл печатает строку «world» при запуске!

Если я включаю оптимизацию, `printf()` выдает какой-то мусор, хотя, вероятно, вызовы `strcpy()` были оптимизированы, и/или локальные переменные также. Также, результат будет другой для x64-кода, другого компилятора, ОС, итд.

Теперь, скажем, взломщик может передать эту строку в вызов `printf(): %x %x %x %x %x`. В моем случае, вывод это: «80485c6 b7751b48 1 0 80485c0» (это просто значения из локального стека). Как видите, есть значение 1 и 0, и еще некоторые указатели (первый, наверное, указатель на строку «world»). Так что если взломщик передаст строку `%s %s %s %s %s`, процесс упадет, потому что `printf()` считает 1 и/или 0 за указатель на строку, пытается читать символы оттуда, и терпит неудачу.

И даже хуже, в коде может быть `sprintf (buf, string)`, где `buf` это буфер в локальном стеке с размером в 1024 байт или около того, взломщик может создать строку `string` таким образом, что `buf` будет переполнен, может быть даже в таком виде, что это приведет к исполнению кода.

Многое популярное ПО было (или даже до сих пор) уязвимо:

QuakeWorld went up, got to around 4000 users, then the master server exploded.
 Disrupter and cohorts are working on more robust code now.
 If anyone did it on purpose, how about letting us know... (It wasn't all the people that
 tried %s as a name)

(.plan-файл Джона Кармака, 17-декабрь-1996¹⁸)

В наше время, почти все современные компиляторы предупреждают об этом.

Еще одна проблема это менее известный аргумент `printf()` `%n`: когда `printf()` доходит до него в строке формата, он пишет число выведенных символов в соответствующий аргумент: <http://stackoverflow.com/questions/3401156/what-is-the-use-of-the-n-format-specifier-in-c>. Так, взломщик может затереть локальные переменные передавая в строке формата множество команд `%n`.

3.15. Обрезка строк

Весьма востребованная операция со строками — это удаление некоторых символов в начале и/или конце строки.

В этом примере, мы будем работать с функцией, удаляющей все символы перевода строки (CR¹⁹/LF²⁰) в конце входной строки:

¹⁸https://github.com/ESWAT/john-carmack-plan-archive/blob/33ae52fdb46aa0d1abfed6fc7598233748541c0/by_day/johnc_plan_19961217.txt

¹⁹Carriage return (возврат каретки) (13 или '\r' в Си/Си++)

²⁰Line feed (подача строки) (10 или '\n' в Си/Си++)

```

#include <stdio.h>
#include <string.h>

char* str_trim (char *s)
{
    char c;
    size_t str_len;

    // работать до тех пор, пока \r или \n находятся в конце строки
    // остановиться, если там какой-то другой символ, или если строка пустая
    // (на старте, или в результате наших действий)
    for (str_len=strlen(s); str_len>0 && (c=s[str_len-1]); str_len--)
    {
        if (c=='\r' || c=='\n')
            s[str_len-1]=0;
        else
            break;
    };
    return s;
};

int main()
{
    // тест

    // здесь применяется strdup() для копирования строк в сегмент данных,
    // потому что иначе процесс упадет в Linux,
    // где текстовые строки располагаются в константном сегменте данных,
    // и не могут модифицироваться.

    printf ("%s\n", str_trim (strdup("")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("\n")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("\r")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("\n\r")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("\r\n")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test1\r\n")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test2\n\r")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test3\n\r\n\r")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test4\n")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test5\r")));
    printf ("%s\n", str_trim (strdup("test6\r\r\r")));
};

```

Входной аргумент всегда возвращается на выходе, это удобно, когда вам нужно объединять функции обработки строк в цепочки, как это сделано здесь в функции `main()`.

Вторая часть `for()` (`str_len>0 && (c=s[str_len-1])`) называется в Си/Си++ «short-circuit» (короткое замыкание) и это очень удобно: [Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++ 1.3.8*].

Компиляторы Си/Си++ гарантируют последовательное вычисление слева направо.

Так что если первое условие не истинно после вычисления, второе никогда не будет вычисляться.

3.15.1. x64: Оптимизирующий MSVC 2013

Листинг 3.62: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```

s$ = 8
str_trim PROC

; RCX это первый аргумент функции, и он всегда будет указывать на строку
mov     rdx, rcx
; это функция strlen() встроенная в код прямо здесь:
; установить RAX в 0xFFFFFFFFFFFFFFFF (-1)
or      rax, -1
$LL14@str_trim:
inc     rax
cmp     BYTE PTR [rcx+rax], 0

```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

```
    jne     SHORT $LL14@str_trim
; длина входной строки 0? тогда на выход:
    test    rax, rax
    je      SHORT $LN15@str_trim
; RAX содержит длину строки
    dec     rcx
; RCX = s-1
    mov     r8d, 1
    add     rcx, rax
; RCX = s-1+strlen(s), т.е., это адрес последнего символа в строке
    sub     r8, rdx
; R8 = 1-s
$LL6@str_trim:
; загрузить последний символ строки:
; перейти, если его код 13 или 10:
    movzx   eax, BYTE PTR [rcx]
    cmp     al, 13
    je      SHORT $LN2@str_trim
    cmp     al, 10
    jne     SHORT $LN15@str_trim
$LN2@str_trim:
; последний символ имеет код 13 или 10
; записываем ноль в этом месте:
    mov     BYTE PTR [rcx], 0
; декремент адреса последнего символа,
; так что он будет указывать на символ перед только что стертым:
    dec     rcx
    lea     rax, QWORD PTR [r8+rcx]
; RAX = 1 - s + адрес текущего последнего символа
; так мы определяем, достигли ли мы первого символа, и раз так, то нам нужно остановиться
    test    rax, rax
    jne     SHORT $LL6@str_trim
$LN15@str_trim:
    mov     rax, rdx
    ret     0
str_trim ENDP
```

В начале, MSVC вставил тело функции `strlen()` прямо в код, потому что решил, что так будет быстрее чем обычная работа `strlen()` + время на вызов её и возврат из нее.

Это также называется *inlining*: [3.11](#) (стр. 498).

Первая инструкция функции `strlen()` вставленная здесь, это `OR RAX, 0xFFFFFFFFFFFFFFFF`. MSVC часто использует `OR` вместо `MOV RAX, 0xFFFFFFFFFFFFFFFF`, потому что опкод получается короче.

И конечно, это эквивалентно друг другу: все биты просто выставляются, а все выставленные биты это -1 в дополнительном коде (two's complement): [2.2](#) (стр. 444).

Кто-то мог бы спросить, зачем вообще нужно использовать число -1 в функции `strlen()`?

Вследствие оптимизации, конечно. Вот что сделал MSVC:

Листинг 3.63: Вставленная `strlen()` сгенерированная MSVC 2013 x64

```
; RCX = указатель на входную строку
; RAX = текущая длина строки
    or      rax, -1
label:
    inc     rax
    cmp     BYTE PTR [rcx+rax], 0
    jne     SHORT label
; RAX = длина строки
```

Попробуйте написать короче, если хотите инициализировать счетчик нулем!

Ну, например:

Листинг 3.64: Наша версия `strlen()`

```
; RCX = указатель на входную строку
; RAX = текущая длина строки
```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

```
xor    rax, rax
label:
    cmp    byte ptr [rcx+rax], 0
    jz     exit
    inc    rax
    jmp    label
exit:
; RAX = длина строки
```

Не получилось. Нам придется вводить дополнительную инструкцию JMP!

Что сделал MSVC 2013, так это передвинул инструкцию INC в место перед загрузкой символа.

Если самый первый символ — нулевой, всё нормально, RAX содержит 0 в этот момент, так что итоговая длина строки будет 0.

Остальную часть функции проще понять.

3.15.2. x64: Неоптимизирующий GCC 4.9.1

```
str_trim:
    push    rbp
    mov     rbp, rsp
    sub     rsp, 32
    mov     QWORD PTR [rbp-24], rdi
; здесь начинается первая часть for()
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-24]
    mov     rdi, rax
    call    strlen
    mov     QWORD PTR [rbp-8], rax    ; str_len
; здесь заканчивается первая часть for()
    jmp     .L2
; здесь начинается тело for()
.L5:
    cmp     BYTE PTR [rbp-9], 13      ; c=='\r'?
    je      .L3
    cmp     BYTE PTR [rbp-9], 10      ; c=='\n'?
    jne     .L4
.L3:
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-8]    ; str_len
    lea     rdx, [rax-1]              ; EDX=str_len-1
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-24]   ; s
    add     rax, rdx                  ; RAX=s+str_len-1
    mov     BYTE PTR [rax], 0         ; s[str_len-1]=0
; тело for() заканчивается здесь
; здесь начинается третья часть for()
    sub     QWORD PTR [rbp-8], 1      ; str_len--
; здесь заканчивается третья часть for()
.L2:
; здесь начинается вторая часть for()
    cmp     QWORD PTR [rbp-8], 0      ; str_len==0?
    je      .L4                      ; тогда на выход
; проверить второе условие, и загрузить "с"
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-8]    ; RAX=str_len
    lea     rdx, [rax-1]              ; RDX=str_len-1
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-24]   ; RAX=s
    add     rax, rdx                  ; RAX=s+str_len-1
    movzx   eax, BYTE PTR [rax]       ; AL=s[str_len-1]
    mov     BYTE PTR [rbp-9], al      ; записать загруженный символ в "с"
    cmp     BYTE PTR [rbp-9], 0       ; это ноль?
    jne     .L5                      ; да? тогда на выход
; здесь заканчивается вторая часть for()
.L4:
; возврат "s"
    mov     rax, QWORD PTR [rbp-24]
    leave
    ret
```


3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

Комментарии автора. После исполнения `strlen()`, управление передается на метку `L2`, и там проверяются два выражения, одно после другого.

Второе никогда не будет проверяться, если первое выражение не истинно (`str_len==0`) (это «short-circuit»).

Теперь посмотрим на эту функцию в коротком виде:

- Первая часть `for()` (вызов `strlen()`)
- `goto L2`
- `L5`: Тело `for()`. переход на выход, если нужно
- Третья часть `for()` (декремент `str_len`)
- `L2`: Вторая часть `for()`: проверить первое выражение, затем второе. переход на начало тела цикла, или выход.
- `L4`: `// выход`
- `return s`

3.15.3. x64: Оптимизирующий GCC 4.9.1

```
str_trim:
    push    rbx
    mov     rbx, rdi
; RBX всегда будет "s"
    call   strlen
; проверить на str_len==0 и выйти, если это так
    test   rax, rax
    je     .L9
    lea     rdx, [rax-1]
; RDX всегда будет содержать значение str_len-1, но не str_len
; так что RDX будет скорее индексом буфера
    lea     rsi, [rbx+rdx] ; RSI=s+str_len-1
    movzx   ecx, BYTE PTR [rsi] ; загрузить символ
    test    cl, cl
    je     .L9 ; выйти, если это ноль
    cmp     cl, 10
    je     .L4
    cmp     cl, 13 ; выйти, если это не '\n' и не '\r'
    jne     .L9
.L4:
; это странная инструкция. нам здесь нужно RSI=s-1
; это можно сделать, используя MOV RSI, EBX / DEC RSI
; но это две инструкции между одной
    sub     rsi, rax
; RSI = s+str_len-1-str_len = s-1
; начало главного цикла
.L12:
    test    rdx, rdx
; записать ноль по адресу s-1+str_len-1+1 = s-1+str_len = s+str_len-1
    mov     BYTE PTR [rsi+1+rdx], 0
; проверка на str_len-1==0. выход, если да.
    je     .L9
    sub     rdx, 1 ; эквивалент str_len--
; загрузить следующий символ по адресу s+str_len-1
    movzx   ecx, BYTE PTR [rbx+rdx]
    test    cl, cl ; это ноль? тогда выход
    je     .L9
    cmp     cl, 10 ; это '\n'?
    je     .L12
    cmp     cl, 13 ; это '\r'?
    je     .L12
.L9:
; возврат "s"
    mov     rax, rbx
    pop     rbx
    ret
```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

Тут более сложный результат. Код перед циклом выполняется только один раз, но также содержит проверку символов [CR/LF](#)!

Зачем нужна это дублирование кода?

Обычная реализация главного цикла это, наверное, такая:

- (начало цикла) проверить символы [CR/LF](#), принять решения
- записать нулевой символ

Но GCC решил поменять местами эти два шага. Конечно, шаг *записать нулевой символ* не может быть первым, так что нужна еще одна проверка:

- обработать первый символ. сравнить его с [CR/LF](#), выйти если символ не равен [CR/LF](#)
- (начало цикла) записать нулевой символ
- проверить символы [CR/LF](#), принять решения

Теперь основной цикл очень короткий, а это очень хорошо для современных процессоров.

Код не использует переменную `str_len`, но `str_len-1`.

Так что это больше похоже на индекс в буфере. Должно быть, GCC заметил, что выражение `str_len-1` используется дважды.

Так что будет лучше выделить переменную, которая всегда содержит значение равное текущей длине строки минус 1, и уменьшать его на 1 (это тот же эффект, что и уменьшать переменную `str_len`).

3.15.4. ARM64: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Реализация простая и прямолинейная:

Листинг 3.65: Неоптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
str_trim:
    stp    x29, x30, [sp, -48]!
    add    x29, sp, 0
    str    x0, [x29,24] ; скопировать входной аргумент в локальный стек
    ldr    x0, [x29,24] ; s
    bl     strlen
    str    x0, [x29,40] ; переменная str_len в локальном стеке
    b      .L2
; начало главного цикла
.L5:
    ldrb   w0, [x29,39]
; W0=c
    cmp    w0, 13      ; это '\r'?
    beq    .L3
    ldrb   w0, [x29,39]
; W0=c
    cmp    w0, 10      ; это '\n'?
    bne    .L4          ; перейти в конец, если нет
.L3:
    ldr    x0, [x29,40]
; X0=str_len
    sub    x0, x0, #1
; X0=str_len-1
    ldr    x1, [x29,24]
; X1=s
    add    x0, x1, x0
; X0=s+str_len-1
    strb   wzr, [x0]    ; записать байт на s+str_len-1
; декремент str_len:
    ldr    x0, [x29,40]
; X0=str_len
    sub    x0, x0, #1
; X0=str_len-1
    str    x0, [x29,40]
; сохранить X0 (или str_len-1) в локальном стеке
.L2:
```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

```
    ldr    x0, [x29,40]
; str_len==0?
    cmp    x0, xzr
; перейти на выход, если да
    beq    .L4
    ldr    x0, [x29,40]
; X0=str_len
    sub    x0, x0, #1
; X0=str_len-1
    ldr    x1, [x29,24]
; X1=s
    add    x0, x1, x0
; X0=s+str_len-1
; загрузить байт по адресу s+str_len-1 в W0
    ldrb   w0, [x0]
    strb   w0, [x29,39] ; сохранить загруженный байт в "с"
    ldrb   w0, [x29,39] ; перезагрузить его
; это нулевой байт?
    cmp    w0, wzr
; перейти на конец, если это ноль, или на L5, если нет
    bne    .L5
.L4:
; возврат s
    ldr    x0, [x29,24]
    ldp    x29, x30, [sp], 48
    ret
```

3.15.5. ARM64: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

Это более продвинутая оптимизация. Первый символ загружается в самом начале и сравнивается с 10 (символ [LF](#)).

Символы также загружаются и в главном цикле, для символов после первого.

Это в каком смысле похоже на этот пример: [3.15.3](#) (стр. [520](#)).

Листинг 3.66: Оптимизирующий GCC (Linaro) 4.9

```
str_trim:
    stp    x29, x30, [sp, -32]!
    add    x29, sp, 0
    str    x19, [sp,16]
    mov    x19, x0
; X19 всегда будет содержать значение "s"
    bl     strlen
; X0=str_len
    cbz    x0, .L9          ; перейти на L9 (выход), если str_len==0
    sub    x1, x0, #1
; X1=X0-1=str_len-1
    add    x3, x19, x1
; X3=X19+X1=s+str_len-1
    ldrb   w2, [x19,x1]     ; загрузить байт по адресу X19+X1=s+str_len-1
; W2=загруженный символ
    cbz    w2, .L9          ; это ноль? тогда перейти на выход
    cmp    w2, 10           ; это '\n'?
    bne    .L15
.L12:
; тело главного цикла. загруженный символ в этот момент всегда 10 или 13!
    sub    x2, x1, x0
; X2=X1-X0=str_len-1-str_len=-1
    add    x2, x3, x2
; X2=X3+X2=s+str_len-1+(-1)=s+str_len-2
    strb   wzr, [x2,1]      ; записать нулевой байт по адресу s+str_len-2+1=s+str_len-1
    cbz    x1, .L9          ; str_len-1==0? перейти на выход, если это так
    sub    x1, x1, #1       ; str_len--
    ldrb   w2, [x19,x1]     ; загрузить следующий символ по адресу X19+X1=s+str_len-1
    cmp    w2, 10           ; это '\n'?
    cbz    w2, .L9          ; перейти на выход, если это ноль
    beq    .L12             ; перейти на начало цикла, если это '\n'
```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

```
.L15:
    cmp     w2, 13          ; это '\r'?
    beq     .L12            ; да, перейти на начало тела цикла
.L9:
; возврат "s"
    mov     x0, x19
    ldr     x19, [sp,16]
    ldp     x29, x30, [sp], 32
    ret
```

3.15.6. ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

И снова, компилятор пользуется условными инструкциями в режиме ARM, поэтому код более компактный.

Листинг 3.67: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
str_trim PROC
    PUSH    {r4,lr}
; R0=s
    MOV     r4,r0
; R4=s
    BL      strlen          ; strlen() берет значение "s" из R0
; R0=str_len
    MOV     r3,#0
; R3 всегда будет содержать 0
|L0.16|
    CMP     r0,#0           ; str_len==0?
    ADDNE   r2,r4,r0        ; (если str_len!=0) R2=R4+R0=s+str_len
    LDRBNE  r1,[r2,#-1]     ; (если str_len!=0) R1=загрузить байт по адресу R2-1=s+str_len-1
    CMPNE   r1,#0           ; (если str_len!=0) сравнить загруженный байт с 0
    BEQ     |L0.56|         ; перейти на выход, если str_len==0 или если загруженный байт - \
    ; это 0
    CMP     r1,#0xd         ; загруженный байт - это '\r'?
    CMPNE   r1,#0xa         ; (если загруженный байт - это не '\r') загруженный байт - это '\
    ; r'?
    SUBEQ   r0,r0,#1        ; (если загруженный байт - это '\r' или '\n') R0-- или str_len--
    STRBEQ  r3,[r2,#-1]     ; (если загруженный байт - это '\r' или '\n') записать R3 ноль() \
    ; по адресу R2-1=s+str_len-1
    BEQ     |L0.16|         ; перейти на начало цикла, если загруженный байт был '\r' или '\n\
    ; '
|L0.56|
; возврат "s"
    MOV     r0,r4
    POP     {r4,pc}
    ENDP
```

3.15.7. ARM: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

В режиме Thumb куда меньше условных инструкций, так что код более простой.

Но здесь есть одна странность со сдвигами на 0x20 и 0x1F (строки 22 и 23).

Почему компилятор Keil сделал так? Честно говоря, трудно сказать. Возможно, это выверт процесса оптимизации компилятора.

Тем не менее, код будет работать корректно.

Листинг 3.68: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
1 str_trim PROC
2     PUSH    {r4,lr}
3     MOVVS   r4,r0
4 ; R4=s
5     BL      strlen          ; strlen() берет значение "s" из R0
6 ; R0=str_len
7     MOVVS   r3,#0
```

3.15. ОБРЕЗКА СТРОК

```
8 ; R3 всегда будет содержать 0
9 B |L0.24|
10 |L0.12|
11 CMP r1,#0xd ; загруженный байт - это '\r'?
12 BEQ |L0.20|
13 CMP r1,#0xa ; загруженный байт - это '\n'?
14 BNE |L0.38| ; перейти на выход, если нет
15 |L0.20|
16 SUBS r0,r0,#1 ; R0-- или str_len--
17 STRB r3,[r2,#0x1f] ; записать 0 по адресу R2+0x1F=s+str_len-0x20+0x1F=s+str_len-1
18 |L0.24|
19 CMP r0,#0 ; str_len==0?
20 BEQ |L0.38| ; да? тогда перейти на выход
21 ADDS r2,r4,r0 ; R2=R4+R0=s+str_len
22 SUBS r2,r2,#0x20 ; R2=R2-0x20=s+str_len-0x20
23 LDRB r1,[r2,#0x1f] ; загрузить байт по адресу R2+0x1F=s+str_len-0x20+0x1F=s+str_len-1
24 ↪ -1 в R1
25 CMP r1,#0 ; загруженный байт - это 0?
26 BNE |L0.12| ; перейти на начало цикла, если это не 0
27 |L0.38|
28 ; возврат "s"
29 MOVS r0,r4
30 POP {r4,pc}
ENDP
```

3.15.8. MIPS

Листинг 3.69: Оптимизирующий GCC 4.4.5 (IDA)

```
str_trim:
; IDA не в курсе об именах переменных, мы присвоили их сами:
saved_GP      = -0x10
saved_S0      = -8
saved_RA      = -4

        lui     $gp, (__gnu_local_gp >> 16)
        addiu   $sp, -0x20
        la      $gp, (__gnu_local_gp & 0xFFFF)
        sw      $ra, 0x20+saved_RA($sp)
        sw      $s0, 0x20+saved_S0($sp)
        sw      $gp, 0x20+saved_GP($sp)
; вызов strlen(). адрес входной строки всё еще в $a0, strlen() возьмет его оттуда:
        lw      $t9, (strlen & 0xFFFF)($gp)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
        jalr    $t9
; адрес входной строки всё еще в $a0, переложить его в $s0:
        move    $s0, $a0 ; branch delay slot
; результат strlen() (т.е., длина строки) теперь в $v0
; перейти на выход, если $v0==0 (т.е., если длина строки это 0):
        beqz    $v0, exit
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
        addiu   $a1, $v0, -1
; $a1 = $v0-1 = str_len-1
        addu    $a1, $s0, $a1
; $a1 = адрес входной строки + $a1 = s+strlen-1
; загрузить байт по адресу $a1:
        lb      $a0, 0($a1)
        or      $at, $zero ; load delay slot, NOP
; загруженный байт - это ноль? перейти на выход, если это так:
        beqz    $a0, exit
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
        addiu   $v1, $v0, -2
; $v1 = str_len-2
        addu    $v1, $s0, $v1
; $v1 = $s0+$v1 = s+str_len-2
        li      $a2, 0xD
; пропустить тело цикла:
        b       loc_6C
```

3.16. ФУНКЦИЯ TOUPPER()

```
        li      $a3, 0xA    ; branch delay slot
loc_5C:
; загрузить следующий байт из памяти в $a0:
        lb      $a0, 0($v1)
        move    $a1, $v1
; $a1=s+str_len-2
; перейти на выход, если загруженный байт – это ноль:
        beqz    $a0, exit
; декремент str_len:
        addiu   $v1, -1     ; branch delay slot
loc_6C:
; в этот момент, $a0=загруженный байт, $a2=0xD (символ CR) и $a3=0xA (символ LF)
; загруженный байт – это CR? тогда перейти на loc_7C:
        beq     $a0, $a2, loc_7C
        addiu   $v0, -1     ; branch delay slot
; загруженный байт – это LF? перейти на выход, если это не LF:
        bne     $a0, $a3, exit
        or      $at, $zero ; branch delay slot, NOP
loc_7C:
; загруженный байт в этот момент это CR
; перейти на loc_5c (начало тела цикла) если str_len (в $v0) не ноль:
        bnez    $v0, loc_5C
; одновременно с этим, записать ноль в этом месте памяти:
        sb      $zero, 0($a1) ; branch delay slot
; метка "exit" была так названа мною:
exit:
        lw      $ra, 0x20+saved_RA($sp)
        move    $v0, $s0
        lw      $s0, 0x20+saved_S0($sp)
        jr      $ra
        addiu   $sp, 0x20    ; branch delay slot
```

Регистры с префиксом S- называются «saved temporaries», так что, значение \$S0 сохраняется в локальном стеке и восстанавливается во время выхода.

3.16. Функция toupper()

Еще одна очень востребованная функция конвертирует символ из строчного в заглавный, если нужно:

```
char toupper (char c)
{
    if(c>='a' && c<='z')
        return c-'a'+'A';
    else
        return c;
}
```

Выражение 'a'+'A' оставлено в исходном коде для удобства чтения, конечно, оно оптимизируется

²¹.

ASCII-код символа «a» это 97 (или 0x61), и 65 (или 0x41) для символа «A».

Разница (или расстояние) между ними в ASCII-таблица это 32 (или 0x20).

Для лучшего понимания, читатель может посмотреть на стандартную 7-битную таблицу ASCII:

²¹Впрочем, если быть дотошным, вполне могут до сих пор существовать компиляторы, которые не оптимизируют подобное и оставляют в коде.

3.16. ФУНКЦИЯ TOUPPER()

Characters in the coded character set ascii.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0x	C-@	C-a	C-b	C-c	C-d	C-e	C-f	C-g	C-h	TAB	C-j	C-k	C-l	RET	C-n	C-o
1x	C-p	C-q	C-r	C-s	C-t	C-u	C-v	C-w	C-x	C-y	C-z	ESC	C-\	C-]	C-^	C-_
2x	!	"	#	\$	%	&	'	()	*	+	,	-	.	/	
3x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4x	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5x	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^	
6x	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7x	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{	|	}	~	DEL

Рис. 3.3: 7-битная таблица ASCII в Emacs

3.16.1. x64

Две операции сравнения

Неоптимизирующий MSVC прямолинеен: код проверяет, находится ли входной символ в интервале [97..122] (или в интервале ['a'..'z']) и вычитает 32 в таком случае.

Имеется также небольшой артефакт компилятора:

Листинг 3.70: Неоптимизирующий MSVC 2013 (x64)

```
1  c$ = 8
2  toupper PROC
3      mov     BYTE PTR [rsp+8], cl
4      movsx   eax, BYTE PTR c$[rsp]
5      cmp     eax, 97
6      jl      SHORT $LN2@toupper
7      movsx   eax, BYTE PTR c$[rsp]
8      cmp     eax, 122
9      jg      SHORT $LN2@toupper
10     movsx   eax, BYTE PTR c$[rsp]
11     sub     eax, 32
12     jmp     SHORT $LN3@toupper
13     jmp     SHORT $LN1@toupper      ; артефакт компилятора
14 $LN2@toupper:
15     movzx   eax, BYTE PTR c$[rsp]  ; необязательное приведение типов
16 $LN1@toupper:
17 $LN3@toupper:
18     ret     0
19 toupper ENDP
```

Важно отметить что (на строке 3) входной байт загружается в 64-битный слот локального стека.

Все остальные биты ([8..63]) не трогаются, т.е. содержат случайный шум (вы можете увидеть его в отладчике).

Все инструкции работают только с байтами, так что всё нормально.

Последняя инструкция MOVZX на строке 15 берет байт из локального стека и расширяет его до 32-битного *int*, дополняя нулями.

Неоптимизирующий GCC делает почти то же самое:

Листинг 3.71: Неоптимизирующий GCC 4.9 (x64)

```
toupper:
    push     rbp
    mov     rbp, rsp
    mov     eax, edi
    mov     BYTE PTR [rbp-4], al
    cmp     BYTE PTR [rbp-4], 96
    jle     .L2
    cmp     BYTE PTR [rbp-4], 122
    jg      .L2
    movzx   eax, BYTE PTR [rbp-4]
    sub     eax, 32
```

3.16. ФУНКЦИЯ TOUPPER()

```
.L2:    jmp      .L3
movzx  eax, BYTE PTR [rbp-4]
.L3:    pop     rbp
ret
```

Одна операция сравнения

Оптимизирующий MSVC работает лучше, он генерирует только одну операцию сравнения:

Листинг 3.72: Оптимизирующий MSVC 2013 (x64)

```
toupper PROC
    lea     eax, DWORD PTR [rcx-97]
    cmp     al, 25
    ja      SHORT $LN2@toupper
    movsx   eax, cl
    sub     eax, 32
    ret     0
$LN2@toupper:
    movzx   eax, cl
    ret     0
toupper ENDP
```

Уже было описано, как можно заменить две операции сравнения на одну: [3.10.2](#) (стр. [496](#)).

Мы бы переписал это на Си/Си++ так:

```
int tmp=c-97;

if (tmp>25)
    return c;
else
    return c-32;
```

Переменная *tmp* должна быть знаковая.

При помощи этого, имеем две операции вычитания в случае конверсии плюс одну операцию сравнения.

В то время как оригинальный алгоритм использует две операции сравнения плюс одну операцию вычитания.

Оптимизирующий GCC даже лучше, он избавился от переходов (а это хорошо: [2.10.1](#) (стр. [457](#))) используя инструкцию CMOVcc:

Листинг 3.73: Оптимизирующий GCC 4.9 (x64)

```
1 toupper:
2     lea     edx, [rdi-97] ; 0x61
3     lea     eax, [rdi-32] ; 0x20
4     cmp     dl, 25
5     cmova   eax, edi
6     ret
```

На строке 3 код готовит уже сконвертированное значение заранее, как если бы конверсия всегда происходила.

На строке 5 это значение в EAX заменяется нетронутым входным значением, если конверсия не нужна. И тогда это значение (конечно, неверное), просто выбрасывается.

Вычитание с упреждением это цена, которую компилятор платит за отсутствие условных переходов.

3.16.2. ARM

Оптимизирующий Keil для режима ARM также генерирует только одну операцию сравнения:

3.16. ФУНКЦИЯ TOUPPER()

Листинг 3.74: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим ARM)

```
toupper PROC
    SUB     r1,r0,#0x61
    CMP     r1,#0x19
    SUBLS   r0,r0,#0x20
    ANDLS   r0,r0,#0xff
    BX      lr
ENDP
```

SUBLS и ANDLS исполняются только если значение R1 меньше чем 0x19 (или равно). Они и делают конверсию.

Оптимизирующий Keil для режима Thumb также генерирует только одну операцию сравнения:

Листинг 3.75: Оптимизирующий Keil 6/2013 (Режим Thumb)

```
toupper PROC
    MOVS    r1,r0
    SUBS    r1,r1,#0x61
    CMP     r1,#0x19
    BHI     |L0.14|
    SUBS    r0,r0,#0x20
    LSLS    r0,r0,#24
    LSRS    r0,r0,#24
|L0.14|
    BX      lr
ENDP
```

Последние две инструкции LSLS и LSRS работают как `AND reg, 0xFF`: это аналог Си/Си++-выражения $(i \ll 24) \gg 24$.

Очевидно, Keil для режима Thumb решил, что две 2-байтных инструкции это короче чем код, загружающий константу 0xFF плюс инструкция AND.

GCC для ARM64

Листинг 3.76: Неоптимизирующий GCC 4.9 (ARM64)

```
toupper:
    sub     sp, sp, #16
    strb    w0, [sp,15]
    ldrb    w0, [sp,15]
    cmp     w0, 96
    bls     .L2
    ldrb    w0, [sp,15]
    cmp     w0, 122
    bhi     .L2
    ldrb    w0, [sp,15]
    sub     w0, w0, #32
    uxtb    w0, w0
    b       .L3
.L2:
    ldrb    w0, [sp,15]
.L3:
    add     sp, sp, 16
    ret
```

Листинг 3.77: Оптимизирующий GCC 4.9 (ARM64)

```
toupper:
    uxtb    w0, w0
    sub     w1, w0, #97
    uxtb    w1, w1
    cmp     w1, 25
    bhi     .L2
    sub     w0, w0, #32
    uxtb    w0, w0
.L2:
    ret
```

3.16.3. Используя битовые операции

Учитывая тот факт, что 5-й бит (считая с 0-ого) всегда присутствует после проверки, вычитание его это просто сброс этого единственного бита, но точно такого же эффекта можно достичь при помощи обычного применения операции “И” (2.5 (стр. 449)).

И даже проще, с исключающим ИЛИ:

```
char toupper (char c)
{
    if(c>='a' && c<='z')
        return c^0x20;
    else
        return c;
}
```

Код близок к тому, что сгенерировал оптимизирующий GCC для предыдущего примера (3.73 (стр. 527)):

Листинг 3.78: Оптимизирующий GCC 5.4 (x86)

```
toupper:
    mov     edx, DWORD PTR [esp+4]
    lea     ecx, [edx-97]
    mov     eax, edx
    xor     eax, 32
    cmp     cl, 25
    cmova   eax, edx
    ret
```

...но используется XOR вместо SUB.

Переворачивание 5-го бита это просто перемещение *курсора* в таблице ASCII вверх/вниз на 2 ряда.

Некоторые люди говорят, что буквы нижнего/верхнего регистра были расставлены в ASCII-таблице таким манером намеренно, потому что:

Very old keyboards used to do Shift just by toggling the 32 or 16 bit, depending on the key; this is why the relationship between small and capital letters in ASCII is so regular, and the relationship between numbers and symbols, and some pairs of symbols, is sort of regular if you squint at it.

(Eric S. Raymond, <http://www.catb.org/esr/faqs/things-every-hacker-once-knew/>)

Следовательно, мы можем написать такой фрагмент кода, который просто меняет регистр букв:

```
#include <stdio.h>

char flip (char c)
{
    if((c>='a' && c<='z') || (c>='A' && c<='Z'))
        return c^0x20;
    else
        return c;
}

int main()
{
    // will produce "hELLO, WORLD!"
    for (char *s="Hello, world!"; *s; s++)
        printf ("%c", flip(*s));
};
```

3.16.4. Итог

Все эти оптимизации компиляторов очень популярны в наше время и практикующий reverse engineer обычно часто видит такие варианты кода.

3.17. Обфускация

Обфускация это попытка спрятать код (или его значение) от reverse engineer-a.

3.17.1. Текстовые строки

Как мы увидели в (5.4 (стр. 682)) текстовые строки могут быть крайне полезны. Знающие об этом программисты могут попытаться их спрятать так, чтобы их не было видно в IDA или любом шестнадцатеричном редакторе.

Вот простейший метод.

Вот как строка может быть сконструирована:

```
mov     byte ptr [ebx], 'h'
mov     byte ptr [ebx+1], 'e'
mov     byte ptr [ebx+2], 'l'
mov     byte ptr [ebx+3], 'l'
mov     byte ptr [ebx+4], 'o'
mov     byte ptr [ebx+5], ' '
mov     byte ptr [ebx+6], 'w'
mov     byte ptr [ebx+7], 'o'
mov     byte ptr [ebx+8], 'r'
mov     byte ptr [ebx+9], 'l'
mov     byte ptr [ebx+10], 'd'
```

Строка также может сравниваться с другой:

```
mov     ebx, offset username
cmp     byte ptr [ebx], 'j'
jnz     fail
cmp     byte ptr [ebx+1], 'o'
jnz     fail
cmp     byte ptr [ebx+2], 'h'
jnz     fail
cmp     byte ptr [ebx+3], 'n'
jnz     fail
jz      it_is_john
```

В обоих случаях, эти строки нельзя так просто найти в шестнадцатеричном редакторе.

Кстати, точно также со строками можно работать в тех случаях, когда строку нельзя разместить в сегменте данных, например, в PIC²², или в шелл-коде.

Еще метод с использованием функции `sprintf()` для конструирования:

```
sprintf(buf, "%s%c%s%c%s", "hel", 'l', 'o w', 'o', "rld");
```

Код выглядит ужасно, но как простейшая мера для анти-реверсинга, это может помочь.

Текстовые строки могут также присутствовать в зашифрованном виде, в таком случае, их использование будет предвещать вызов функции для дешифровки.

Например: 8.5.2 (стр. 800).

3.17.2. Исполняемый код

Вставка мусора

Обфускация исполняемого кода — это вставка случайного мусора (между настоящим кодом), который выполняется, но не делает ничего полезного.

Просто пример:

²²Position Independent Code

Листинг 3.79: оригинальный код

```
add    eax, ebx
mul    ecx
```

Листинг 3.80: obfuscated code

```
xor     esi, 011223344h ; мусор
add     esi, eax         ; мусор
add     eax, ebx
mov     edx, eax         ; мусор
shl     edx, 4           ; мусор
mul     ecx
xor     esi, ecx         ; мусор
```

Здесь код-мусор использует регистры, которые не используются в настоящем коде (ESI и EDX). Впрочем, промежуточные результаты полученные при исполнении настоящего кода вполне могут использоваться кодом-мусором для бóльшей путаницы — почему нет?

Замена инструкций на раздутые эквиваленты

- MOV op1, op2 может быть заменена на пару PUSH op2 / POP op1.
- JMP label может быть заменена на пару PUSH label / RET. IDA не покажет ссылок на эту метку.
- CALL label может быть заменена на следующую тройку инструкций:
PUSH label_after_CALL_instruction / PUSH label / RET.
- PUSH op также можно заменить на пару инструкций: SUB ESP, 4 (или 8) / MOV [ESP], op.

Всегда исполняющийся/никогда не исполняющийся код

Если разработчик уверен, что в ESI всегда будет 0 в этом месте:

```
mov     esi, 1
...     ; какой-то не трогающий ESI код
dec     esi
...     ; какой-то не трогающий ESI код
cmp     esi, 0
jz      real_code
; фальшивый багаж
real_code:
```

Reverse engineer-у понадобится какое-то время чтобы с этим разобраться.

Это также называется *opaque predicate*.

Еще один пример (и снова разработчик уверен, что ESI — всегда ноль):

```
add     eax, ebx          ; реальный код
mul     ecx               ; реальный код
add     eax, esi          ; opaque predicate. вместо ADD тут может быть XOR, AND или SHL, и т.д.
```

Сделать побольше путаницы

```
instruction 1
instruction 2
instruction 3
```

Можно заменить на:

```
begin:      jmp     ins1_label

ins2_label: instruction 2
            jmp     ins3_label
```

3.17. ОБФУСКАЦИЯ

```
ins3_label:    instruction 3
               jmp      exit:

ins1_label:    instruction 1
               jmp      ins2_label

exit:
```

Использование косвенных указателей

```
dummy_data1    db      100h dup (0)
message1       db      'hello world',0

dummy_data2    db      200h dup (0)
message2       db      'another message',0

func           proc
...
mov     eax, offset dummy_data1 ; PE or ELF reloc here
add     eax, 100h
push    eax
call    dump_string
...
mov     eax, offset dummy_data2 ; PE or ELF reloc here
add     eax, 200h
push    eax
call    dump_string
...
func           endp
```

IDA покажет ссылки на `dummy_data1` и `dummy_data2`, но не на сами текстовые строки.

К глобальным переменным и даже функциям можно обращаться так же.

3.17.3. Виртуальная машина / псевдо-код

Программист может также создать свой собственный ЯП или ISA и интерпретатор для него.

(Как версии Visual Basic перед 5.0, .NET or Java machines).

Reverse engineer-у придется потратить какое-то время для понимания деталей всех инструкций в ISA. Ему также возможно придется писать что-то вроде дизассемблера/декомпилятора.

3.17.4. Еще кое-что

Моя попытка (хотя и слабая) пропатчить компилятор Tiny C чтобы он выдавал обфусцированный код: <http://go.yurichev.com/17220>.

Использование инструкции MOV для действительно сложных вещей: [Stephen Dolan, *mov is Turing-complete*, (2013)]²³.

3.17.5. Упражнение

- <http://challenges.re/29>

²³Также доступно здесь: <http://www.cl.cam.ac.uk/~sd601/papers/mov.pdf>

3.18. Си++

3.18.1. Классы

Простой пример

Внутреннее представление классов в Си++ почти такое же, как и представление структур.

Давайте попробуем простой пример с двумя переменными, двумя конструкторами и одним методом:

```
#include <stdio.h>

class c
{
private:
    int v1;
    int v2;
public:
    c() // конструктор по умолчанию
    {
        v1=667;
        v2=999;
    };

    c(int a, int b) // конструктор
    {
        v1=a;
        v2=b;
    };

    void dump()
    {
        printf ("%d; %d\n", v1, v2);
    };
};

int main()
{
    class c c1;
    class c c2(5,6);

    c1.dump();
    c2.dump();

    return 0;
};
```

MSVC: x86

Вот как выглядит main() на ассемблере:

Листинг 3.81: MSVC

```
_c2$ = -16 ; size = 8
_c1$ = -8  ; size = 8
_main PROC
    push ebp
    mov  ebp, esp
    sub  esp, 16
    lea  ecx, DWORD PTR _c1$[ebp]
    call ??0c@@QAE@XZ ; c::c
    push 6
    push 5
    lea  ecx, DWORD PTR _c2$[ebp]
    call ??0c@@QAE@HH@Z ; c::c
    lea  ecx, DWORD PTR _c1$[ebp]
```

3.18. Си++

```
call ?dump@@@QAEXXZ ; c::dump
lea ecx, DWORD PTR _c2$[ebp]
call ?dump@@@QAEXXZ ; c::dump
xor eax, eax
mov esp, ebp
pop ebp
ret 0
_main ENDP
```

Вот что происходит. Под каждый экземпляр класса *c* выделяется по 8 байт, столько же, сколько нужно для хранения двух переменных.

Для *c1* вызывается конструктор по умолчанию без аргументов `??0c@@@QAE@XZ`.

Для *c2* вызывается другой конструктор `??0c@@@QAE@HH@Z` и передаются два числа в качестве аргументов.

А указатель на объект (*this* в терминологии Си++) передается в регистре ECX. Это называется `thiscall` (3.18.1 (стр. 534)) — метод передачи указателя на объект.

В данном случае, MSVC делает это через ECX. Необходимо помнить, что это не стандартизированный метод, и другие компиляторы могут делать это иначе, например, через первый аргумент функции (как GCC).

Почему у имен функций такие странные имена? Это [name mangling](#).

В Си++, у класса, может иметься несколько методов с одинаковыми именами, но аргументами разных типов — это полиморфизм. Ну и конечно, у разных классов могут быть методы с одинаковыми именами.

Name mangling позволяет закодировать имя класса + имя метода + типы всех аргументов метода в одной ASCII-строке, которая затем используется как внутреннее имя функции. Это все потому что ни компоновщик²⁴, ни загрузчик DLL ОС (мангленные имена могут быть среди экспортов/импортов в DLL), ничего не знают о Си++ или ООП²⁵.

Далее вызывается два раза `dump()`.

Теперь смотрим на код в конструкторах:

Листинг 3.82: MSVC

```
_this$ = -4 ; size = 4
??0c@@@QAE@XZ PROC ; c::c, COMDAT
; _this$ = ecx
push ebp
mov ebp, esp
push ecx
mov DWORD PTR _this$[ebp], ecx
mov eax, DWORD PTR _this$[ebp]
mov DWORD PTR [eax], 667
mov ecx, DWORD PTR _this$[ebp]
mov DWORD PTR [ecx+4], 999
mov eax, DWORD PTR _this$[ebp]
mov esp, ebp
pop ebp
ret 0
??0c@@@QAE@XZ ENDP ; c::c

_this$ = -4 ; size = 4
_a$ = 8 ; size = 4
_b$ = 12 ; size = 4
??0c@@@QAE@HH@Z PROC ; c::c, COMDAT
; _this$ = ecx
push ebp
mov ebp, esp
push ecx
mov DWORD PTR _this$[ebp], ecx
mov eax, DWORD PTR _this$[ebp]
mov ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
mov DWORD PTR [eax], ecx
mov edx, DWORD PTR _this$[ebp]
```

²⁴linker

²⁵Объектно-Ориентированное Программирование

3.18. Си++

```
mov    eax, DWORD PTR _b$[ebp]
mov    DWORD PTR [edx+4], eax
mov    eax, DWORD PTR _this$[ebp]
mov    esp, ebp
pop    ebp
ret    8
??0c@@@QAE@HH@Z ENDP ; c::c
```

Конструкторы — это просто функции, они используют указатель на структуру в ECX, копируют его себе в локальную переменную, хотя это и не обязательно.

Из стандарта Си++ мы знаем (C++11 12.1) что конструкторы не должны возвращать значение. В реальности, внутри, конструкторы возвращают указатель на созданный объект, т.е., *this*.

И еще метод `dump()`:

Листинг 3.83: MSVC

```
_this$ = -4 ; size = 4
?dump@c@@@QAEXXZ PROC ; c::dump, COMDAT
; _this$ = ecx
push    ebp
mov     ebp, esp
push    ecx
mov     DWORD PTR _this$[ebp], ecx
mov     eax, DWORD PTR _this$[ebp]
mov     ecx, DWORD PTR [eax+4]
push    ecx
mov     edx, DWORD PTR _this$[ebp]
mov     eax, DWORD PTR [edx]
push    eax
push    OFFSET ??_C@_07NJBDCIEC@?$CFd?$DL?5?$CFd?6?$AA@
call    _printf
add     esp, 12
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
?dump@c@@@QAEXXZ ENDP ; c::dump
```

Все очень просто, `dump()` берет указатель на структуру состоящую из двух *int* через ECX, выдергивает оттуда две переменные и передает их в `printf()`.

А если скомпилировать с оптимизацией (/Ox), то кода будет намного меньше:

Листинг 3.84: MSVC

```
??0c@@@QAE@XZ PROC ; c::c, COMDAT
; _this$ = ecx
mov     eax, ecx
mov     DWORD PTR [eax], 667
mov     DWORD PTR [eax+4], 999
ret     0
??0c@@@QAE@XZ ENDP ; c::c

_a$ = 8 ; size = 4
_b$ = 12 ; size = 4
??0c@@@QAE@HH@Z PROC ; c::c, COMDAT
; _this$ = ecx
mov     edx, DWORD PTR _b$[esp-4]
mov     eax, ecx
mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]
mov     DWORD PTR [eax], ecx
mov     DWORD PTR [eax+4], edx
ret     8
??0c@@@QAE@HH@Z ENDP ; c::c

?dump@c@@@QAEXXZ PROC ; c::dump, COMDAT
; _this$ = ecx
mov     eax, DWORD PTR [ecx+4]
mov     ecx, DWORD PTR [ecx]
push    eax
```


3.18. Си++

```
push ecx
push OFFSET ??_C@_07NJBDCIEC@?$CFd?$DL?5?$CFd?6?$AA@
call _printf
add esp, 12
ret 0
?dump@@@QAEEXXZ ENDP ; c::dump
```

Вот и все. Единственное о чем еще нужно сказать, это о том, что в функции `main()`, когда вызывался второй конструктор с двумя аргументами, за ним не корректировался стек при помощи `add esp, X`. В то же время, в конце конструктора вместо `RET` имеется `RET 8`.

Это потому что здесь используется `thiscall` (3.18.1 (стр. 534)), который, вместе с `stdcall` (6.1.2 (стр. 713)) (все это — методы передачи аргументов через стек), предлагает вызываемой функции корректировать стек. Инструкция `ret X` сначала прибавляет `X` к `ESP`, затем передает управление вызывающей функции.

См. также в соответствующем разделе о способах передачи аргументов через стек (6.1 (стр. 713)).

Еще, кстати, нужно отметить, что именно компилятор решает, когда вызывать конструктор и деструктор — но это и так известно из основ языка Си++.

MSVC: x86-64

Как мы уже знаем, в x86-64 первые 4 аргумента функции передаются через регистры `RCX`, `RDX`, `R8`, `R9`, а остальные — через стек. Тем не менее, указатель на объект `this` передается через `RCX`, а первый аргумент метода — в `RDX`, итд. Здесь это видно во внутренностях метода `c(int a, int b)`:

Листинг 3.85: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
; void dump()

?dump@@@QEAAXXZ PROC ; c::dump
    mov     r8d, DWORD PTR [rcx+4]
    mov     edx, DWORD PTR [rcx]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:??_C@_07NJBDCIEC@?$CFd?$DL?5?$CFd?6?$AA@ ; '%d; %d'
    jmp     printf
?dump@@@QEAAXXZ ENDP ; c::dump

; c(int a, int b)

??0c@@QEAA@HH@Z PROC ; c::c
    mov     DWORD PTR [rcx], edx ; первый аргумент: a
    mov     DWORD PTR [rcx+4], r8d ; второй аргумент: b
    mov     rax, rcx
    ret     0
??0c@@QEAA@HH@Z ENDP ; c::c

; конструктор по умолчанию

??0c@@QEAA@XZ PROC ; c::c
    mov     DWORD PTR [rcx], 667
    mov     DWORD PTR [rcx+4], 999
    mov     rax, rcx
    ret     0
??0c@@QEAA@XZ ENDP ; c::c
```

Тип `int` в x64 остается 32-битным ²⁶, поэтому здесь используются 32-битные части регистров.

В методе `dump()` вместо `RET` мы видим `JMP printf`, этот хак мы рассматривали ранее: 1.15.1 (стр. 144).

GCC: x86

В GCC 4.4.1 всё почти так же, за исключением некоторых различий.

²⁶Видимо, так решили для упрощения портирования Си/Си++-кода на x64

```

    public main
main proc near

var_20 = dword ptr -20h
var_1C = dword ptr -1Ch
var_18 = dword ptr -18h
var_10 = dword ptr -10h
var_8  = dword ptr -8

    push ebp
    mov  ebp, esp
    and  esp, 0FFFFFFF0h
    sub  esp, 20h
    lea  eax, [esp+20h+var_8]
    mov  [esp+20h+var_20], eax
    call _ZN1cC1Ev
    mov  [esp+20h+var_18], 6
    mov  [esp+20h+var_1C], 5
    lea  eax, [esp+20h+var_10]
    mov  [esp+20h+var_20], eax
    call _ZN1cC1Eii
    lea  eax, [esp+20h+var_8]
    mov  [esp+20h+var_20], eax
    call _ZN1c4dumpEv
    lea  eax, [esp+20h+var_10]
    mov  [esp+20h+var_20], eax
    call _ZN1c4dumpEv
    mov  eax, 0
    leave
    retn
main endp

```

Здесь мы видим, что применяется иной *name mangling* характерный для стандартов GNU ²⁷ Во-вторых, указатель на экземпляр передается как первый аргумент функции — конечно же, скрыто от программиста.

Это первый конструктор:

```

_ZN1cC1Ev      public _ZN1cC1Ev ; weak
               proc near                ; CODE XREF: main+10

arg_0          = dword ptr  8

               push    ebp
               mov     ebp, esp
               mov     eax, [ebp+arg_0]
               mov     dword ptr [eax], 667
               mov     eax, [ebp+arg_0]
               mov     dword ptr [eax+4], 999
               pop     ebp
               retn
_ZN1cC1Ev      endp

```

Он просто записывает два числа по указателю, переданному в первом (и единственном) аргументе.

Второй конструктор:

```

_ZN1cC1Eii     public _ZN1cC1Eii
               proc near

arg_0          = dword ptr  8
arg_4          = dword ptr  0Ch
arg_8          = dword ptr  10h

               push    ebp
               mov     ebp, esp

```

²⁷Еще о *name mangling* разных компиляторов: [Agner Fog, *Calling conventions* (2015)].

3.18. Си++

```
mov     eax, [ebp+arg_0]
mov     edx, [ebp+arg_4]
mov     [eax], edx
mov     eax, [ebp+arg_0]
mov     edx, [ebp+arg_8]
mov     [eax+4], edx
pop     ebp
retn
_ZN1cC1Eii    endp
```

Это функция, аналог которой мог бы выглядеть так:

```
void ZN1cC1Eii (int *obj, int a, int b)
{
    *obj=a;
    *(obj+1)=b;
};
```

...что, в общем, предсказуемо.

И функция dump():

```
_ZN1c4dumpEv    public _ZN1c4dumpEv
_ZN1c4dumpEv    proc near

var_18          = dword ptr -18h
var_14          = dword ptr -14h
var_10          = dword ptr -10h
arg_0           = dword ptr  8

                push    ebp
                mov     ebp, esp
                sub     esp, 18h
                mov     eax, [ebp+arg_0]
                mov     edx, [eax+4]
                mov     eax, [ebp+arg_0]
                mov     eax, [eax]
                mov     [esp+18h+var_10], edx
                mov     [esp+18h+var_14], eax
                mov     [esp+18h+var_18], offset aDD ; "%d; %d\n"
                call    _printf
                leave
                retn
_ZN1c4dumpEv    endp
```

Эта функция *во внутреннем представлении* имеет один аргумент, через который передается указатель на объект²⁸ (*this*).

Это можно переписать на Си:

```
void ZN1c4dumpEv (int *obj)
{
    printf ("%d; %d\n", *obj, *(obj+1));
};
```

Таким образом, если брать в учет только эти простые примеры, разница между MSVC и GCC в способе кодирования имен функций (*name mangling*) и передаче указателя на экземпляр класса (через ECX или через первый аргумент).

GCC: x86-64

Первые 6 аргументов, как мы уже знаем, передаются через 6 регистров RDI, RSI, RDX, RCX, R8 и R9 ([Michael Matz, Jan Hubicka, Andreas Jaeger, Mark Mitchell, *System V Application Binary Interface. AMD64 Architecture Processor Supplement*, (2013)]²⁹), а указатель на *this* через первый (RDI) что мы здесь и видим. Тип *int* 32-битный и здесь. Хак с JMP вместо RET используется и здесь.

²⁸Экземпляр класса

²⁹Также доступно здесь: <https://software.intel.com/sites/default/files/article/402129/mpx-linux64-abi.pdf>

```

; конструктор по умолчанию

_ZN1cC2Ev:
    mov     DWORD PTR [rdi], 667
    mov     DWORD PTR [rdi+4], 999
    ret

; c(int a, int b)

_ZN1cC2Eii:
    mov     DWORD PTR [rdi], esi
    mov     DWORD PTR [rdi+4], edx
    ret

; dump()

_ZN1c4dumpEv:
    mov     edx, DWORD PTR [rdi+4]
    mov     esi, DWORD PTR [rdi]
    xor     eax, eax
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC0 ; "%d; %d\n"
    jmp     printf

```

Наследование классов

О наследованных классах можно сказать, что это та же простая структура, которую мы уже рассмотрели, только расширяемая в наследуемых классах.

Возьмем очень простой пример:

```

#include <stdio.h>

class object
{
    public:
        int color;
        object() { };
        object (int color) { this->color=color; };
        void print_color() { printf ("color=%d\n", color); };
};

class box : public object
{
    private:
        int width, height, depth;
    public:
        box(int color, int width, int height, int depth)
        {
            this->color=color;
            this->width=width;
            this->height=height;
            this->depth=depth;
        };
        void dump()
        {
            printf ("this is box. color=%d, width=%d, height=%d, depth=%d\n", color, width, ↵
            ↵ height, depth);
        };
};

class sphere : public object
{
    private:
        int radius;
    public:
        sphere(int color, int radius)
        {

```

3.18. CИ++

```
        this->color=color;
        this->radius=radius;
    };
    void dump()
    {
        printf ("this is sphere. color=%d, radius=%d\n", color, radius);
    };
};

int main()
{
    box b(1, 10, 20, 30);
    sphere s(2, 40);

    b.print_color();
    s.print_color();

    b.dump();
    s.dump();

    return 0;
};
```

Исследуя сгенерированный код для функций/методов `dump()`, а также `object::print_color()`, посмотрим, какая будет разметка памяти для структур-объектов (для 32-битного кода).

Итак, методы `dump()` разных классов сгенерированные MSVC 2008 с опциями `/Ox` и `/Ob0`

30

Листинг 3.88: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
??_C@_09GCED0LPA@color?$DN?$CFd?6?$AA@ DB 'color=%d', 0aH, 00H ; `string'
?print_color@object@@QAEXXZ PROC ; object::print_color, COMDAT
; _this$ = ecx
    mov     eax, DWORD PTR [ecx]
    push    eax

; 'color=%d', 0aH, 00H
    push    OFFSET ??_C@_09GCED0LPA@color?$DN?$CFd?6?$AA@
    call    _printf
    add     esp, 8
    ret     0
?print_color@object@@QAEXXZ ENDP ; object::print_color
```

Листинг 3.89: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?dump@box@@QAEXXZ PROC ; box::dump, COMDAT
; _this$ = ecx
    mov     eax, DWORD PTR [ecx+12]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx+8]
    push    eax
    mov     eax, DWORD PTR [ecx+4]
    mov     ecx, DWORD PTR [ecx]
    push    edx
    push    eax
    push    ecx

; 'this is box. color=%d, width=%d, height=%d, depth=%d', 0aH, 00H ; `string'
    push    OFFSET ??_C@_0DG@NCNGAADL@this?5is?5box?4?5color?$DN?$CFd?0?5width?$DN?$CFd?0@
    call    _printf
    add     esp, 20
    ret     0
?dump@box@@QAEXXZ ENDP ; box::dump
```

Листинг 3.90: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?dump@sphere@@QAEXXZ PROC ; sphere::dump, COMDAT
```

³⁰опция `/Ob0` означает отмену `inline expansion`, ведь вставка компилятором тела функции/метода прямо в код где он вызывается, может затруднить наши эксперименты

3.18. CИ++

```
; _this$ = ecx
mov  eax, DWORD PTR [ecx+4]
mov  ecx, DWORD PTR [ecx]
push eax
push ecx

; 'this is sphere. color=%d, radius=%d', 0aH, 00H
push OFFSET ??_C@_0CF@EFEDJLDC@this?5is?5sphere?4?5color?$DN?$CFd?0?5radius@
call _printf
add  esp, 12
ret  0
?dump@sphere@@QAEXXZ ENDP ; sphere::dump
```

Итак, разметка полей получается следующая:

(базовый класс *object*)

смещение	описание
+0x0	int color

(унаследованные классы)

box:

смещение	описание
+0x0	int color
+0x4	int width
+0x8	int height
+0xC	int depth

sphere:

смещение	описание
+0x0	int color
+0x4	int radius

Посмотрим тело `main()`:

Листинг 3.91: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
PUBLIC _main
_TEXT SEGMENT
_s$ = -24 ; size = 8
_b$ = -16 ; size = 16
_main PROC
    sub  esp, 24
    push 30
    push 20
    push 10
    push 1
    lea  ecx, DWORD PTR _b$[esp+40]
    call ??0box@@QAE@HHHH@Z ; box::box
    push 40
    push 2
    lea  ecx, DWORD PTR _s$[esp+32]
    call ??0sphere@@QAE@HH@Z ; sphere::sphere
    lea  ecx, DWORD PTR _b$[esp+24]
    call ?print_color@object@@QAEXXZ ; object::print_color
    lea  ecx, DWORD PTR _s$[esp+24]
    call ?print_color@object@@QAEXXZ ; object::print_color
    lea  ecx, DWORD PTR _b$[esp+24]
    call ?dump@box@@QAEXXZ ; box::dump
    lea  ecx, DWORD PTR _s$[esp+24]
    call ?dump@sphere@@QAEXXZ ; sphere::dump
    xor  eax, eax
    add  esp, 24
    ret  0
_main ENDP
```

Наследованные классы всегда должны добавлять свои поля после полей базового класса для того, чтобы методы базового класса могли продолжать работать со своими собственными полями.

3.18. СИ++

Когда метод `object::print_color()` вызывается, ему в качестве `this` передается указатель и на объект типа *box* и на объект типа *sphere*, так как он может легко работать с классами *box* и *sphere*, потому что поле *color* в этих классах всегда стоит по тому же адресу (по смещению `0x0`).

Можно также сказать, что методу `object::print_color()` даже не нужно знать, с каким классом он работает, до тех пор, пока будет соблюдаться условие закрепления полей по тем же адресам, а это условие соблюдается всегда.

А если вы создадите класс-наследник класса *box*, например, то компилятор будет добавлять новые поля уже за полем *depth*, оставляя уже имеющиеся поля класса *box* по тем же адресам.

Так, метод `box::dump()` будет нормально работать обращаясь к полям *color*, *width*, *height* и *depth*, всегда находящимся по известным адресам.

Код на GCC практически точно такой же, за исключением способа передачи `this` (он, как уже было указано, передается в первом аргументе, вместо регистра `ECX`).

Инкапсуляция

Инкапсуляция — это сокрытие данных в *private* секциях класса, например, чтобы разрешить доступ к ним только для методов этого класса, но не более.

Однако, маркируется ли как-нибудь в коде тот сам факт, что некоторое поле — приватное, а некоторое другое — нет?

Нет, никак не маркируется.

Попробуем простой пример:

```
#include <stdio.h>

class box
{
    private:
        int color, width, height, depth;
    public:
        box(int color, int width, int height, int depth)
        {
            this->color=color;
            this->width=width;
            this->height=height;
            this->depth=depth;
        };
        void dump()
        {
            printf ("this is box. color=%d, width=%d, height=%d, depth=%d\n", color, width, ↵
            ↵ height, depth);
        };
};
```

Снова скомпилируем в MSVC 2008 с опциями `/Ox` и `/Ob0` и посмотрим код метода `box::dump()`:

```
?dump@box@@QAEXXZ PROC ; box::dump, COMDAT
; _this$ = ecx
    mov     eax, DWORD PTR [ecx+12]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx+8]
    push    eax
    mov     eax, DWORD PTR [ecx+4]
    mov     ecx, DWORD PTR [ecx]
    push    edx
    push    eax
    push    ecx
; 'this is box. color=%d, width=%d, height=%d, depth=%d', 0aH, 00H
    push    OFFSET ??_C@_0DG@NCNGAADL@this?5is?5box?4?5color?$DN?$CFd?0?5width?$DN?$CFd?0@
    call    _printf
    add     esp, 20
    ret     0
?dump@box@@QAEXXZ ENDP ; box::dump
```

Разметка полей в классе выходит такой:

смещение	описание
+0x0	int color
+0x4	int width
+0x8	int height
+0xC	int depth

Все поля приватные и недоступные для модификации из других функций, но, зная эту разметку, сможем ли мы создать код модифицирующий эти поля?

Для этого добавим функцию `hack_oop_encapsulation()`, которая если обладает приведенным ниже телом, то просто не скомпилируется:

```
void hack_oop_encapsulation(class box * o)
{
    o->width=1; // этот код не может быть скомпилирован:
                // "error C2248: 'box::width' : cannot access private member declared in class
    ↪ 'box'"
};
```

Тем не менее, если преобразовать тип *box* к типу *указатель на массив int*, и если модифицировать полученный массив *int*-ов, тогда всё получится.

```
void hack_oop_encapsulation(class box * o)
{
    unsigned int *ptr_to_object=reinterpret_cast<unsigned int*>(o);
    ptr_to_object[1]=123;
};
```

Код этой функции довольно прост — можно сказать, функция берет на вход указатель на массив *int*-ов и записывает 123 во второй *int*:

```
?hack_oop_encapsulation@@YAXPAVbox@@@Z PROC ; hack_oop_encapsulation
    mov eax, DWORD PTR _o$[esp-4]
    mov DWORD PTR [eax+4], 123
    ret 0
?hack_oop_encapsulation@@YAXPAVbox@@@Z ENDP ; hack_oop_encapsulation
```

Проверим, как это работает:

```
int main()
{
    box b(1, 10, 20, 30);

    b.dump();

    hack_oop_encapsulation(&b);

    b.dump();

    return 0;
};
```

Запускаем:

```
this is box. color=1, width=10, height=20, depth=30
this is box. color=1, width=123, height=20, depth=30
```

Выходит, инкапсуляция — это защита полей класса только на стадии компиляции.

Компилятор ЯП Си++ не позволяет сгенерировать код прямо модифицирующий защищенные поля, тем не менее, используя *грязные трюки* — это вполне возможно.

Множественное наследование

Множественное наследование — это создание класса наследующего поля и методы от двух или более классов.

Снова напишем простой пример:


```

#include <stdio.h>

class box
{
public:
    int width, height, depth;
    box() { };
    box(int width, int height, int depth)
    {
        this->width=width;
        this->height=height;
        this->depth=depth;
    };
    void dump()
    {
        printf ("this is box. width=%d, height=%d, depth=%d\n", width, height, depth);
    };
    int get_volume()
    {
        return width * height * depth;
    };
};

class solid_object
{
public:
    int density;
    solid_object() { };
    solid_object(int density)
    {
        this->density=density;
    };
    int get_density()
    {
        return density;
    };
    void dump()
    {
        printf ("this is solid_object. density=%d\n", density);
    };
};

class solid_box: box, solid_object
{
public:
    solid_box (int width, int height, int depth, int density)
    {
        this->width=width;
        this->height=height;
        this->depth=depth;
        this->density=density;
    };
    void dump()
    {
        printf ("this is solid_box. width=%d, height=%d, depth=%d, density=%d\n", width, ↵
        ↵ height, depth, density);
    };
    int get_weight() { return get_volume() * get_density(); };
};

int main()
{
    box b(10, 20, 30);
    solid_object so(100);
    solid_box sb(10, 20, 30, 3);

    b.dump();
    so.dump();
    sb.dump();
}

```

3.18. CИ++

```
printf ("%d\n", sb.get_weight());  
  
return 0;  
};
```

Снова скомпилируем в MSVC 2008 с опциями /Ox и /Ob0 и посмотрим код методов `box::dump()`, `solid_object::dump()` и `solid_box::dump()`:

Листинг 3.92: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?dump@box@@QAEXXZ PROC ; box::dump, COMDAT  
; _this$ = ecx  
mov eax, DWORD PTR [ecx+8]  
mov edx, DWORD PTR [ecx+4]  
push eax  
mov eax, DWORD PTR [ecx]  
push edx  
push eax  
; 'this is box. width=%d, height=%d, depth=%d', 0aH, 00H  
push OFFSET ??_C@_0CM@DIKPHDFI@this?5is?5box?4?5width?$DN?$CFd?0?5height?$DN?$CFd@  
call _printf  
add esp, 16  
ret 0  
?dump@box@@QAEXXZ ENDP ; box::dump
```

Листинг 3.93: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?dump@solid_object@@QAEXXZ PROC ; solid_object::dump, COMDAT  
; _this$ = ecx  
mov eax, DWORD PTR [ecx]  
push eax  
; 'this is solid_object. density=%d', 0aH  
push OFFSET ??_C@_0CC@KICFJINL@this?5is?5solid_object?4?5density?$DN?$CFd@  
call _printf  
add esp, 8  
ret 0  
?dump@solid_object@@QAEXXZ ENDP ; solid_object::dump
```

Листинг 3.94: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?dump@solid_box@@QAEXXZ PROC ; solid_box::dump, COMDAT  
; _this$ = ecx  
mov eax, DWORD PTR [ecx+12]  
mov edx, DWORD PTR [ecx+8]  
push eax  
mov eax, DWORD PTR [ecx+4]  
mov ecx, DWORD PTR [ecx]  
push edx  
push eax  
push ecx  
; 'this is solid_box. width=%d, height=%d, depth=%d, density=%d', 0aH  
push OFFSET ??_C@_0D0@HNCNIHNN@this?5is?5solid_box?4?5width?$DN?$CFd?0?5hei@  
call _printf  
add esp, 20  
ret 0  
?dump@solid_box@@QAEXXZ ENDP ; solid_box::dump
```

Выходит, имеем такую разметку в памяти для всех трех классов:

класс *box*:

смещение	описание
+0x0	width
+0x4	height
+0x8	depth

класс *solid_object*:

смещение	описание
+0x0	density

3.18. СИ++

Можно сказать, что разметка класса *solid_box* объединённая:

Класс *solid_box*:

смещение	описание
+0x0	width
+0x4	height
+0x8	depth
+0xC	density

Код методов *box::get_volume()* и *solid_object::get_density()* тривиален:

Листинг 3.95: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?get_volume@box@@QAEHXZ PROC ; box::get_volume, COMDAT
; _this$ = ecx
    mov     eax, DWORD PTR [ecx+8]
    imul    eax, DWORD PTR [ecx+4]
    imul    eax, DWORD PTR [ecx]
    ret     0
?get_volume@box@@QAEHXZ ENDP ; box::get_volume
```

Листинг 3.96: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?get_density@solid_object@@QAEHXZ PROC ; solid_object::get_density, COMDAT
; _this$ = ecx
    mov     eax, DWORD PTR [ecx]
    ret     0
?get_density@solid_object@@QAEHXZ ENDP ; solid_object::get_density
```

А вот код метода *solid_box::get_weight()* куда интереснее:

Листинг 3.97: Оптимизирующий MSVC 2008 /Ob0

```
?get_weight@solid_box@@QAEHXZ PROC ; solid_box::get_weight, COMDAT
; _this$ = ecx
    push    esi
    mov     esi, ecx
    push    edi
    lea     ecx, DWORD PTR [esi+12]
    call    ?get_density@solid_object@@QAEHXZ ; solid_object::get_density
    mov     ecx, esi
    mov     edi, eax
    call    ?get_volume@box@@QAEHXZ ; box::get_volume
    imul    eax, edi
    pop     edi
    pop     esi
    ret     0
?get_weight@solid_box@@QAEHXZ ENDP ; solid_box::get_weight
```

get_weight() просто вызывает два метода, но для *get_volume()* он передает просто указатель на *this*, а для *get_density()*, он передает указатель на *this* сдвинутый на 12 байт (либо 0xC байт), а там, в разметке класса *solid_box*, как раз начинаются поля класса *solid_object*.

Так, метод *solid_object::get_density()* будет полагать что работает с обычным классом *solid_object*, а метод *box::get_volume()* будет работать только со своими тремя полями, полагая, что работает с обычным экземпляром класса *box*.

Таким образом, можно сказать, что экземпляр класса-наследника нескольких классов представляет в памяти просто *объединённый* класс, содержащий все унаследованные поля. А каждый унаследованный метод вызывается с передачей ему указателя на соответствующую часть структуры.

Виртуальные методы

И снова простой пример:

```
#include <stdio.h>

class object
{
```

3.18. CИ++

```
public:
    int color;
    object() { };
    object (int color) { this->color=color; };
    virtual void dump()
    {
        printf ("color=%d\n", color);
    };
};

class box : public object
{
    private:
        int width, height, depth;
    public:
        box(int color, int width, int height, int depth)
        {
            this->color=color;
            this->width=width;
            this->height=height;
            this->depth=depth;
        };
        void dump()
        {
            printf ("this is box. color=%d, width=%d, height=%d, depth=%d\n", color, width, ↵
            ↵ height, depth);
        };
};

class sphere : public object
{
    private:
        int radius;
    public:
        sphere(int color, int radius)
        {
            this->color=color;
            this->radius=radius;
        };
        void dump()
        {
            printf ("this is sphere. color=%d, radius=%d\n", color, radius);
        };
};

int main()
{
    box b(1, 10, 20, 30);
    sphere s(2, 40);

    object *o1=&b;
    object *o2=&s;

    o1->dump();
    o2->dump();
    return 0;
};
```

У класса *object* есть виртуальный метод `dump()`, впоследствии заменяемый в классах-наследниках *box* и *sphere*.

Если в какой-то среде, где неизвестно, какого типа является экземпляр класса, как в функции `main()` в примере, вызывается виртуальный метод `dump()`, где-то должна сохраняться информация о том, какой же метод в итоге вызвать.

Скомпилируем в MSVC 2008 с опциями `/Ox` и `/Ob0` и посмотрим код функции `main()`:

```
_s$ = -32 ; size = 12
_b$ = -20 ; size = 20
_main PROC
```

3.18. CИ++

```
sub esp, 32
push 30
push 20
push 10
push 1
lea ecx, DWORD PTR _b$[esp+48]
call ??0box@@QAE@HHHH@Z ; box::box
push 40
push 2
lea ecx, DWORD PTR _s$[esp+40]
call ??0sphere@@QAE@HH@Z ; sphere::sphere
mov eax, DWORD PTR _b$[esp+32]
mov edx, DWORD PTR [eax]
lea ecx, DWORD PTR _b$[esp+32]
call edx
mov eax, DWORD PTR _s$[esp+32]
mov edx, DWORD PTR [eax]
lea ecx, DWORD PTR _s$[esp+32]
call edx
xor eax, eax
add esp, 32
ret 0
_main ENDP
```

Указатель на функцию `dump()` берется откуда-то из экземпляра класса (объекта). Где мог записаться туда адрес нового метода-функции? Только в конструкторах, больше нигде: ведь в функции `main()` ничего более не вызывается.

31

Посмотрим код конструктора класса `box`:

```
??_R0?AVbox@@@8 DD FLAT:??_7type_info@@6B@ ; box `RTTI Type Descriptor'
DD 00H
DB '.?AVbox@@', 00H

??_R1A?0A@EA@box@@@8 DD FLAT:??_R0?AVbox@@@8 ; box::`RTTI Base Class Descriptor at (0,-1,0,64)'
DD 01H
DD 00H
DD 0fffffffH
DD 00H
DD 040H
DD FLAT:??_R3box@@@8

??_R2box@@@8 DD FLAT:??_R1A?0A@EA@box@@@8 ; box::`RTTI Base Class Array'
DD FLAT:??_R1A?0A@EA@object@@@8

??_R3box@@@8 DD 00H ; box::`RTTI Class Hierarchy Descriptor'
DD 00H
DD 02H
DD FLAT:??_R2box@@@8

??_R4box@@6B@ DD 00H ; box::`RTTI Complete Object Locator'
DD 00H
DD 00H
DD FLAT:??_R0?AVbox@@@8
DD FLAT:??_R3box@@@8

??_7box@@6B@ DD FLAT:??_R4box@@6B@ ; box::`vtable'
DD FLAT:?dump@box@@@UAEXXZ

_color$ = 8 ; size = 4
_width$ = 12 ; size = 4
_height$ = 16 ; size = 4
_depth$ = 20 ; size = 4
??0box@@QAE@HHHH@Z PROC ; box::box, COMDAT
; _this$ = ecx
push esi
mov esi, ecx
```

³¹Об указателях на функции читайте больше в соответствующем разделе:([1.26](#) (стр. [374](#)))

3.18. Си++

```
call ??0object@@QAE@XZ ; object::object
mov  eax, DWORD PTR _color$[esp]
mov  ecx, DWORD PTR _width$[esp]
mov  edx, DWORD PTR _height$[esp]
mov  DWORD PTR [esi+4], eax
mov  eax, DWORD PTR _depth$[esp]
mov  DWORD PTR [esi+16], eax
mov  DWORD PTR [esi], OFFSET ??_7box@@6B@
mov  DWORD PTR [esi+8], ecx
mov  DWORD PTR [esi+12], edx
mov  eax, esi
pop  esi
ret  16
??0box@@QAE@HHHH@Z ENDP ; box::box
```

Здесь мы видим, что разметка класса немного другая: в качестве первого поля имеется указатель на некую таблицу `box::`vftable'` (название оставлено компилятором MSVC).

В этой таблице есть ссылка на таблицу с названием `box::`RTTI Complete Object Locator'` и еще ссылка на метод `box::dump()`.

Итак, это называется таблица виртуальных методов и [RTTI](#)³². Таблица виртуальных методов хранит в себе адреса методов, а [RTTI](#) хранит информацию о типах вообще.

Кстати, [RTTI](#)-таблицы — это именно те таблицы, информация из которых используются при вызове `dynamic_cast` и `typeid` в Си++. Вы можете увидеть, что здесь хранится даже имя класса в виде обычной строки.

Так, какой-нибудь метод базового класса `object` может вызвать виртуальный метод `object::dump()` что в итоге вызовет нужный метод унаследованного класса, потому что информация о нем присутствует прямо в этой структуре класса.

Работа с этими таблицами и поиск адреса нужного метода, занимает какое-то время процессора, возможно, поэтому считается что работа с виртуальными методами медленна.

В сгенерированном коде от GCC [RTTI](#)-таблицы устроены чуть-чуть иначе.

3.18.2. ostream

Начнем снова с примера типа «hello world», на этот раз используя `ostream`:

```
#include <iostream>

int main()
{
    std::cout << "Hello, world!\n";
}
```

Из практически любого учебника Си++, известно, что операцию `<<` можно определить (или перегрузить — *overload*) для других типов.

Что и делается в `ostream`. Видно, что в реальности вызывается `operator<<` для `ostream`:

Листинг 3.98: MSVC 2012 (reduced listing)

```
$SG37112 DB 'Hello, world!', 0aH, 00H

_main PROC
    push OFFSET $SG37112
    push OFFSET ?cout@std@@3V?$basic_ostream@DU?$char_traits@D@std@@@1@A ; std::cout
    call ??$?6U?$char_traits@D@std@@@std@@YAAAV?$basic_ostream@DU?
    ↪ $char_traits@D@std@@@0@AAV10@PBD@Z ; std::operator<<<std::char_traits<char> >
    add esp, 8
    xor eax, eax
    ret 0
_main ENDP
```

Немного переделаем пример:

³²Run-Time Type Information

3.18. Си++

```
#include <iostream>

int main()
{
    std::cout << "Hello, " << "world!\n";
}
```

И снова, из многих учебников по Си++, известно, что результат каждого `operator<<` в ostream передается в следующий.

Действительно:

Листинг 3.99: MSVC 2012

```
$SG37112 DB 'world!', 0aH, 00H
$SG37113 DB 'Hello, ', 00H

_main PROC
    push OFFSET $SG37113 ; 'Hello, '
    push OFFSET ?cout@std@@3V?$basic_ostream@DU?$char_traits@D@std@@@1@A ; std::cout
    call ??f6U?$char_traits@D@std@@@std@@YAAAV?$basic_ostream@DU?
    ↪ $char_traits@D@std@@@0@AAV10@PBD@Z ; std::operator<<<std::char_traits<char> >
    add esp, 8

    push OFFSET $SG37112 ; 'world!'
    push eax ; результат работы предыдущей ф-ции
    call ??f6U?$char_traits@D@std@@@std@@YAAAV?$basic_ostream@DU?
    ↪ $char_traits@D@std@@@0@AAV10@PBD@Z ; std::operator<<<std::char_traits<char> >
    add esp, 8

    xor eax, eax
    ret 0
_main ENDP
```

Если переименовать название метода `operator<<` в `f()`, то этот код выглядел бы так:

```
f(f(std::cout, "Hello, "), "world!");
```

GCC генерирует практически такой же код как и MSVC.

3.18.3. References

References в Си++ это тоже указатели (3.20 (стр. 588)), но их называют *безопасными* (safe), потому что работая с ними, труднее сделать ошибку (C++11 8.3.2). Например, reference всегда должен указывать объект того же типа и не может быть NULL [Marshall Cline, C++ FAQ8.6].

Более того, reference нельзя менять, нельзя его заставить указывать на другой объект (reseat) [Marshall Cline, C++ FAQ8.5].

Если мы попробуем изменить пример с указателями (3.20 (стр. 588)) чтобы он использовал reference вместо указателей ...

```
void f2 (int x, int y, int & sum, int & product)
{
    sum=x+y;
    product=x*y;
};
```

...то выяснится, что скомпилированный код абсолютно такой же как и в примере с указателями (3.20 (стр. 588)):

Листинг 3.100: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_x$ = 8 ; size = 4
_y$ = 12 ; size = 4
_sum$ = 16 ; size = 4
_product$ = 20 ; size = 4
?f2@YAXHHAH0@Z PROC ; f2
```

3.18. Си++

```
mov     ecx, DWORD PTR _y$[esp-4]
mov     eax, DWORD PTR _x$[esp-4]
lea     edx, DWORD PTR [eax+ecx]
imul    eax, ecx
mov     ecx, DWORD PTR _product$[esp-4]
push    esi
mov     esi, DWORD PTR _sum$[esp]
mov     DWORD PTR [esi], edx
mov     DWORD PTR [ecx], eax
pop     esi
ret     0
?f2@@YAXHHAH0@Z ENDP    ; f2
```

(Почему у функций в Си++ такие странные имена, описано здесь: [3.18.1](#) (стр. 534).)

Следовательно, references в С++ эффективны настолько, насколько и обычные указатели.

3.18.4. STL

N.B.: все примеры здесь были проверены только в 32-битной среде. x64-версии не были проверены.

std::string

Как устроена структура

Многие строковые библиотеки [Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++2.2*] обеспечивают структуру содержащую ссылку на буфер собственно со строкой, переменная всегда содержащую длину строки (что очень удобно для массы функций [Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++2.2.1*]) и переменную содержащую текущий размер буфера.

Строка в буфере обыкновенно оканчивается нулем: это для того чтобы указатель на буфер можно было передавать в функции требующие на вход обычную сишную ASCIIZ-строку.

Стандарт Си++ не описывает, как именно нужно реализовывать std::string, но, как правило, они реализованы как описано выше, с небольшими дополнениями.

Строки в Си++ это не класс (как, например, QString в Qt), а темплейт (basic_string), это сделано для того чтобы поддерживать строки содержащие разного типа символы: как минимум char и wchar_t.

Так что, std::string это класс с базовым типом char.

А std::wstring это класс с базовым типом wchar_t.

MSVC

В реализации MSVC, вместо ссылки на буфер может содержаться сам буфер (если строка короче 16-и символов).

Это означает, что каждая короткая строка будет занимать в памяти по крайней мере $16 + 4 + 4 = 24$ байт для 32-битной среды либо $16 + 8 + 8 = 32$ байта в 64-битной, а если строка длиннее 16-и символов, то прибавьте еще длину самой строки.

Листинг 3.101: пример для MSVC

```
#include <string>
#include <stdio.h>

struct std_string
{
    union
    {
        char buf[16];
        char* ptr;
    } u;
    size_t size;    // AKA 'Mysize' в MSVC
    size_t capacity; // AKA 'Myres' в MSVC
}
```


3.18. CИ++

```
};

void dump_std_string(std::string s)
{
    struct std_string *p=(struct std_string*)&s;
    printf ("[%s] size:%d capacity:%d\n", p->size>16 ? p->u.ptr : p->u.buf, p->size, p->↵
    ↵ capacity);
};

int main()
{
    std::string s1="short string";
    std::string s2="string longer than 16 bytes";

    dump_std_string(s1);
    dump_std_string(s2);

    // это работает без использования c_str()
    printf ("%s\n", &s1);
    printf ("%s\n", s2);
};
```

Собственно, из этого исходника почти всё ясно.

Несколько замечаний:

Если строка короче 16-и символов, то отдельный буфер для строки в [куче](#) выделяться не будет.

Это удобно потому что на практике, основная часть строк действительно короткие. Вероятно, разработчики в Microsoft выбрали размер в 16 символов как разумный баланс.

Теперь очень важный момент в конце функции main(): мы не пользуемся методом c_str(), тем не менее, если это скомпилировать и запустить, то обе строки появятся в консоли!

Работает это вот почему.

В первом случае строка короче 16-и символов и в начале объекта std::string (его можно рассматривать просто как структуру) расположен буфер с этой строкой. printf() трактует указатель как указатель на массив символов оканчивающийся нулем и поэтому всё работает.

Вывод второй строки (длиннее 16-и символов) даже еще опаснее: это вообще типичная программистская ошибка (или опечатка), забыть дописать c_str(). Это работает потому что в это время в начале структуры расположен указатель на буфер. Это может надолго остаться незамеченным: до тех пока там не появится строка короче 16-и символов, тогда процесс упадет.

GCC

В реализации GCC в структуре есть еще одна переменная — reference count.

Интересно, что указатель на экземпляр класса std::string в GCC указывает не на начало самой структуры, а на указатель на буфера. В libstdc++-v3/include/bits/basic_string.h мы можем прочитать что это сделано для удобства отладки:

```
* The reason you want _M_data pointing to the character %array and
* not the _Rep is so that the debugger can see the string
* contents. (Probably we should add a non-inline member to get
* the _Rep for the debugger to use, so users can check the actual
* string length.)
```

[исходный код basic_string.h](#)

В нашем примере мы учитываем это:

Листинг 3.102: пример для GCC

```
#include <string>
#include <stdio.h>

struct std_string
{
    size_t length;
```

3.18. CИ++

```
    size_t capacity;
    size_t refcount;
};

void dump_std_string(std::string s)
{
    char *p1=(char*)&s; // обход проверки типов GCC
    struct std_string *p2=(struct std_string*)(p1-sizeof(struct std_string));
    printf ("%s] size:%d capacity:%d\n", p1, p2->length, p2->capacity);
};

int main()
{
    std::string s1="short string";
    std::string s2="string longer than 16 bytes";

    dump_std_string(s1);
    dump_std_string(s2);

    // обход проверки типов GCC:
    printf ("%s\n", *(char*)&s1);
    printf ("%s\n", *(char*)&s2);
};
```

Нужны еще небольшие хаки чтобы симитировать типичную ошибку, которую мы уже видели выше, из-за более ужесточенной проверки типов в GCC, тем не менее, printf() работает и здесь без c_str().

Чуть более сложный пример

```
#include <string>
#include <stdio.h>

int main()
{
    std::string s1="Hello, ";
    std::string s2="world!\n";
    std::string s3=s1+s2;

    printf ("%s\n", s3.c_str());
}
```

Листинг 3.103: MSVC 2012

```
$SG39512 DB 'Hello, ', 00H
$SG39514 DB 'world!', 0aH, 00H
$SG39581 DB '%s', 0aH, 00H

_s2$ = -72 ; size = 24
_s3$ = -48 ; size = 24
_s1$ = -24 ; size = 24
_main PROC
    sub     esp, 72

    push    7
    push    OFFSET $SG39512
    lea     ecx, DWORD PTR _s1$[esp+80]
    mov     DWORD PTR _s1$[esp+100], 15
    mov     DWORD PTR _s1$[esp+96], 0
    mov     BYTE PTR _s1$[esp+80], 0
    call    ?assign@?$_basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@@std@@@QAEAAV12@PBDI@Z ; ↵
    ↵ std::basic_string<char,std::char_traits<char>,std::allocator<char> >::assign

    push    7
    push    OFFSET $SG39514
    lea     ecx, DWORD PTR _s2$[esp+80]
    mov     DWORD PTR _s2$[esp+100], 15
    mov     DWORD PTR _s2$[esp+96], 0
    mov     BYTE PTR _s2$[esp+80], 0
```

3.18. CИ++

```
call ?assign@$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@QAEAAV12@PBDI@Z ; ↵
↳ std::basic_string<char,std::char_traits<char>,std::allocator<char> >::assign

lea  eax, DWORD PTR _s2$[esp+72]
push eax
lea  eax, DWORD PTR _s1$[esp+76]
push eax
lea  eax, DWORD PTR _s3$[esp+80]
push eax
call ???$HDU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@1@@std@@YA?AV?$basic_string@DU?
↳ $char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@@ABV10@@@Z ; std::operator+<char,std::char_traits<
↳ char>,std::allocator<char> >

; вставленный код метода (inlined) c_str():
cmp  DWORD PTR _s3$[esp+104], 16
lea  eax, DWORD PTR _s3$[esp+84]
cmovae eax, DWORD PTR _s3$[esp+84]

push eax
push OFFSET $SG39581
call _printf
add  esp, 20

cmp  DWORD PTR _s3$[esp+92], 16
jb   SHORT $LN119@main
push DWORD PTR _s3$[esp+72]
call ???@YAXPAX@Z ; operator delete
add  esp, 4
$LN119@main:
cmp  DWORD PTR _s2$[esp+92], 16
mov  DWORD PTR _s3$[esp+92], 15
mov  DWORD PTR _s3$[esp+88], 0
mov  BYTE PTR _s3$[esp+72], 0
jb   SHORT $LN151@main
push DWORD PTR _s2$[esp+72]
call ???@YAXPAX@Z ; operator delete
add  esp, 4
$LN151@main:
cmp  DWORD PTR _s1$[esp+92], 16
mov  DWORD PTR _s2$[esp+92], 15
mov  DWORD PTR _s2$[esp+88], 0
mov  BYTE PTR _s2$[esp+72], 0
jb   SHORT $LN195@main
push DWORD PTR _s1$[esp+72]
call ???@YAXPAX@Z ; operator delete
add  esp, 4
$LN195@main:
xor  eax, eax
add  esp, 72
ret  0
_main ENDP
```

Собственно, компилятор не конструирует строки статически: да в общем-то и как это возможно, если буфер с ней нужно хранить в [куче](#)?

Вместо этого в сегменте данных хранятся обычные [ASCIIZ](#)-строки, а позже, во время выполнения, при помощи метода «assign», конструируются строки s1 и s2 . При помощи operator+, создается строка s3.

Обратите внимание на то что вызов метода c_str() отсутствует, потому что его код достаточно короткий и компилятор вставил его прямо здесь: если строка короче 16-и байт, то в регистре EAX остается указатель на буфер, а если длиннее, то из этого же места достается адрес на буфер расположенный в [куче](#).

Далее следуют вызовы трех деструкторов, причем, они вызываются только если строка длиннее 16-и байт: тогда нужно освободить буфера в [куче](#). В противном случае, так как все три объекта std::string хранятся в стеке, они освобождаются автоматически после выхода из функции.

Следовательно, работа с короткими строками более быстрая из-за мёньшего обращения к [куче](#).

Код на GCC даже проще (из-за того, что в GCC, как мы уже видели, не реализована возможность

```

.LC0:
.string "Hello, "
.LC1:
.string "world!\n"
main:
    push ebp
    mov  ebp, esp
    push edi
    push esi
    push ebx
    and  esp, -16
    sub  esp, 32
    lea  ebx, [esp+28]
    lea  edi, [esp+20]
    mov  DWORD PTR [esp+8], ebx
    lea  esi, [esp+24]
    mov  DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC0
    mov  DWORD PTR [esp], edi

    call _ZNSsC1EPKcRKSaIcE

    mov  DWORD PTR [esp+8], ebx
    mov  DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC1
    mov  DWORD PTR [esp], esi

    call _ZNSsC1EPKcRKSaIcE

    mov  DWORD PTR [esp+4], edi
    mov  DWORD PTR [esp], ebx

    call _ZNSsC1ERKSs

    mov  DWORD PTR [esp+4], esi
    mov  DWORD PTR [esp], ebx

    call _ZNSs6appendERKSs

    ; вставленный код метода (inlined) c_str():
    mov  eax, DWORD PTR [esp+28]
    mov  DWORD PTR [esp], eax

    call puts

    mov  eax, DWORD PTR [esp+28]
    lea  ebx, [esp+19]
    mov  DWORD PTR [esp+4], ebx
    sub  eax, 12
    mov  DWORD PTR [esp], eax
    call _ZNSs4_Rep10_M_disposeERKSaIcE
    mov  eax, DWORD PTR [esp+24]
    mov  DWORD PTR [esp+4], ebx
    sub  eax, 12
    mov  DWORD PTR [esp], eax
    call _ZNSs4_Rep10_M_disposeERKSaIcE
    mov  eax, DWORD PTR [esp+20]
    mov  DWORD PTR [esp+4], ebx
    sub  eax, 12
    mov  DWORD PTR [esp], eax
    call _ZNSs4_Rep10_M_disposeERKSaIcE
    lea  esp, [ebp-12]
    xor  eax, eax
    pop  ebx
    pop  esi
    pop  edi
    pop  ebp
    ret

```

3.18. Си++

Можно заметить, что в деструкторы передается не указатель на объект, а указатель на место за 12 байт (или 3 слова) перед ним, то есть, на настоящее начало структуры.

std::string как глобальная переменная

Опытные программисты на Си++ знают, что глобальные переменные STL³³-типов вполне можно объявлять.

Да, действительно:

```
#include <stdio.h>
#include <string>

std::string s="a string";

int main()
{
    printf ("%s\n", s.c_str());
};
```

Но как и где будет вызываться конструктор std::string?

На самом деле, эта переменная будет инициализирована даже перед началом main().

Листинг 3.105: MSVC 2012: здесь конструируется глобальная переменная, а также регистрируется её деструктор

```
??_Es@@YAXXZ PROC
    push 8
    push OFFSET $SG39512 ; 'a string'
    mov ecx, OFFSET ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A ; s
    call ?assign@?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@QAEAAV12@PBDI@Z ; ↵
    ↵ std::basic_string<char,std::char_traits<char>,std::allocator<char> >::assign
    push OFFSET ??_Fs@@YAXXZ ; `dynamic atexit destructor for 's'`
    call _atexit
    pop ecx
    ret 0
??_Es@@YAXXZ ENDP
```

Листинг 3.106: MSVC 2012: здесь глобальная переменная используется в main()

```
$SG39512 DB 'a string', 00H
$SG39519 DB '%s', 0aH, 00H

_main PROC
    cmp DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A+20, 16
    mov eax, OFFSET ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A ; s
    cmovae eax, DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A
    push eax
    push OFFSET $SG39519 ; '%s'
    call _printf
    add esp, 8
    xor eax, eax
    ret 0
_main ENDP
```

Листинг 3.107: MSVC 2012: эта функция-деструктор вызывается перед выходом

```
??_Fs@@YAXXZ PROC
    push ecx
    cmp DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A+20, 16
    jb SHORT $LN23@dynamic
    push esi
    mov esi, DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A
    lea ecx, DWORD PTR $T2[esp+8]
    call ??0?$Wrap_alloc@V?$allocator@D@std@@@std@@QAE@XZ
    push OFFSET ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A ; s
```

³³(Си++) Standard Template Library

3.18. CИ++

```
    lea ecx, DWORD PTR $T2[esp+12]
    call ??$destroy@PAD@?$_Wrap_alloc@V?$allocator@D@std@@@std@@QAEXPAPAD@Z
    lea ecx, DWORD PTR $T1[esp+8]
    call ??0?$_Wrap_alloc@V?$allocator@D@std@@@std@@QAEX@Z
    push esi
    call ??3@YAXPAX@Z ; operator delete
    add esp, 4
    pop esi
$LN23@dynamic:
    mov DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A+20, 15
    mov DWORD PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A+16, 0
    mov BYTE PTR ?s@@3V?$basic_string@DU?$char_traits@D@std@@V?$allocator@D@2@@std@@A, 0
    pop ecx
    ret 0
??_Fs@@YAXXZ ENDP
```

В реальности, из [CRT](#), еще до вызова `main()`, вызывается специальная функция, в которой перечислены все конструкторы подобных переменных. Более того: при помощи `atexit()` регистрируется функция, которая будет вызвана в конце работы программы: в этой функции компилятор собирает вызовы деструкторов всех подобных глобальных переменных.

GCC работает похожим образом:

Листинг 3.108: GCC 4.8.1

```
main:
    push ebp
    mov ebp, esp
    and esp, -16
    sub esp, 16
    mov eax, DWORD PTR s
    mov DWORD PTR [esp], eax
    call puts
    xor eax, eax
    leave
    ret
.LC0:
    .string "a string"
_GLOBAL__sub_I_s:
    sub esp, 44
    lea eax, [esp+31]
    mov DWORD PTR [esp+8], eax
    mov DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:.LC0
    mov DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:s
    call _ZN5sC1EPKcRK5aIcE
    mov DWORD PTR [esp+8], OFFSET FLAT:__dso_handle
    mov DWORD PTR [esp+4], OFFSET FLAT:s
    mov DWORD PTR [esp], OFFSET FLAT:_ZN5sD1Ev
    call __cxa_atexit
    add esp, 44
    ret
.LFE645:
    .size _GLOBAL__sub_I_s, .-_GLOBAL__sub_I_s
    .section .init_array,"aw"
    .align 4
    .long _GLOBAL__sub_I_s
    .globl s
    .bss
    .align 4
    .type s, @object
    .size s, 4
s:
    .zero 4
    .hidden __dso_handle
```

Но он не выделяет отдельной функции в которой будут собраны деструкторы: каждый деструктор передается в `atexit()` по одному.

std::list

Хорошо известный всем двусвязный список: каждый элемент имеет два указателя, на следующий и на предыдущий элементы.

Это означает, что расход памяти увеличивается на 2 **слова** на каждый элемент (8 байт в 32-битной среде или 16 байт в 64-битной).

STL в Си++ просто добавляет указатели «next» и «previous» к той вашей структуре, которую вы желаете объединить в список.

Попробуем разобраться с примером в котором простая структура из двух переменных, мы объединим её в список.

Хотя и стандарт Си++ не указывает, как он должен быть реализован, реализации MSVC и GCC простые и похожи друг на друга, так что этот исходный код для обоих:

```
#include <stdio.h>
#include <list>
#include <iostream>

struct a
{
    int x;
    int y;
};

struct List_node
{
    struct List_node* _Next;
    struct List_node* _Prev;
    int x;
    int y;
};

void dump_List_node (struct List_node *n)
{
    printf ("ptr=0x%p _Next=0x%p _Prev=0x%p x=%d y=%d\n",
           n, n->_Next, n->_Prev, n->x, n->y);
};

void dump_List_vals (struct List_node* n)
{
    struct List_node* current=n;

    for (;;)
    {
        dump_List_node (current);
        current=current->_Next;
        if (current==n) // end
            break;
    };
};

void dump_List_val (unsigned int *a)
{
#ifdef _MSC_VER
    // в реализации GCC нет поля "size"
    printf ("_Myhead=0x%p, _Mysize=%d\n", a[0], a[1]);
#endif
    dump_List_vals ((struct List_node*)a[0]);
};

int main()
{
    std::list<struct a> l;

    printf ("* empty list:\n");
    dump_List_val((unsigned int*)(void*)&l);

    struct a t1;
```

3.18. C++

```
t1.x=1;
t1.y=2;
l.push_front (t1);
t1.x=3;
t1.y=4;
l.push_front (t1);
t1.x=5;
t1.y=6;
l.push_back (t1);

printf ("* 3-elements list:\n");
dump_List_val((unsigned int*)(void*)&l);

std::list<struct a>::iterator tmp;
printf ("node at .begin:\n");
tmp=l.begin();
dump_List_node ((struct List_node *)*(void**)&tmp);
printf ("node at .end:\n");
tmp=l.end();
dump_List_node ((struct List_node *)*(void**)&tmp);

printf ("* let's count from the beginning:\n");
std::list<struct a>::iterator it=l.begin();
printf ("1st element: %d %d\n", (*it).x, (*it).y);
it++;
printf ("2nd element: %d %d\n", (*it).x, (*it).y);
it++;
printf ("3rd element: %d %d\n", (*it).x, (*it).y);
it++;
printf ("element at .end(): %d %d\n", (*it).x, (*it).y);

printf ("* let's count from the end:\n");
std::list<struct a>::iterator it2=l.end();
printf ("element at .end(): %d %d\n", (*it2).x, (*it2).y);
it2--;
printf ("3rd element: %d %d\n", (*it2).x, (*it2).y);
it2--;
printf ("2nd element: %d %d\n", (*it2).x, (*it2).y);
it2--;
printf ("1st element: %d %d\n", (*it2).x, (*it2).y);

printf ("removing last element...\n");
l.pop_back();
dump_List_val((unsigned int*)(void*)&l);
};
```

GCC

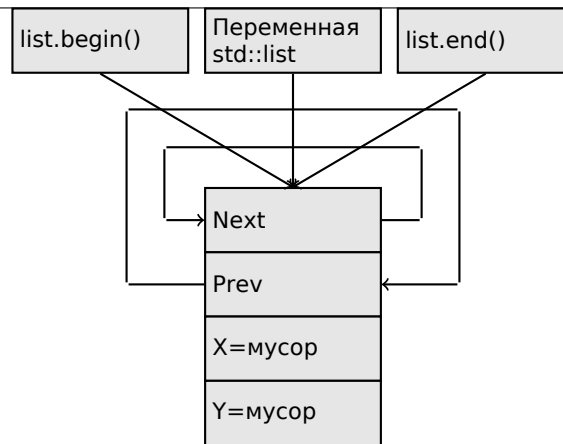
Начнем с GCC.

При запуске увидим длинный вывод, будем разбирать его по частям.

```
* empty list:
ptr=0x0028fe90 _Next=0x0028fe90 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=0
```

Видим пустой список. Не смотря на то что он пуст, имеется один элемент с мусором ([АКА](#) узел-пустышка (*dummy node*)) в переменных *x* и *y*.

Оба указателя «next» и «prev» указывают на себя:



Это тот момент, когда итераторы `.begin` и `.end` равны друг другу.

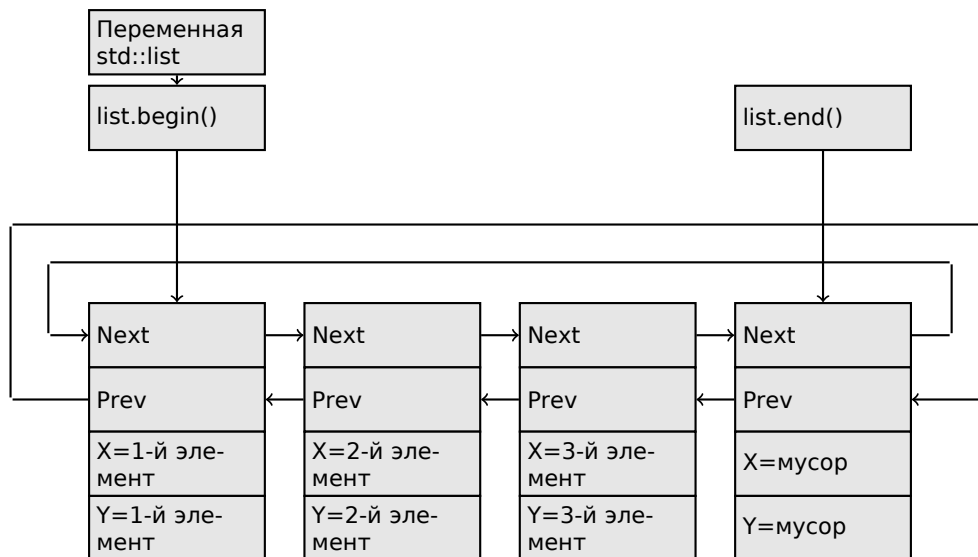
Вставим 3 элемента и список в памяти будет представлен так:

```
* 3-elements list:
ptr=0x000349a0 _Next=0x00034988 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=4
ptr=0x00034988 _Next=0x00034b40 _Prev=0x000349a0 x=1 y=2
ptr=0x00034b40 _Next=0x0028fe90 _Prev=0x00034988 x=5 y=6
ptr=0x0028fe90 _Next=0x000349a0 _Prev=0x00034b40 x=5 y=6
```

Последний элемент всё еще на `0x0028fe90`, он не будет передвинут куда-либо до самого уничтожения списка.

Он все еще содержит случайный мусор в полях *x* и *y* (5 и 6). Случайно совпало так, что эти значения точно такие же, как и в последнем элементе, но это не значит, что они имеют какое-то значение.

Вот как эти 3 элемента хранятся в памяти:



Переменная *l* всегда указывает на первый элемент.

Итераторы `.begin()` и `.end()` это не переменные, а функции, возвращающие указатели на соответствующие узлы.

Иметь элемент-пустышку (*dummy node* или *sentinel node*) это очень популярная практика в реализации двусвязных списков.

Без него, многие операции были бы сложнее, и, следовательно, медленнее.

Итератор на самом деле это просто указатель на элемент. `list.begin()` и `list.end()` просто возвращают указатели.

```
node at .begin:
ptr=0x000349a0 _Next=0x00034988 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=4
node at .end:
ptr=0x0028fe90 _Next=0x000349a0 _Prev=0x00034b40 x=5 y=6
```

3.18. СИ++

Тот факт, что последний элемент имеет указатель на первый и первый имеет указатель на последний, напоминает нам циркулярный список.

Это очень помогает: если иметь указатель только на первый элемент, т.е. тот что в переменной *l*, очень легко получить указатель на последний элемент, без необходимости обходить все элементы списка. Вставка элемента в конец списка также быстра благодаря этой особенности.

`operator--` и `operator++` просто выставляют текущее значение итератора на `current_node->prev` или `current_node->next`.

Обратные итераторы (`.rbegin`, `.rend`) работают точно так же, только наоборот.

`operator*` на итераторе просто возвращает указатель на место в структуре, где начинается пользовательская структура, т.е. указатель на самый первый элемент структуры (*x*).

Вставка в список и удаление очень просты: просто выделите новый элемент (или освободите) и исправьте все указатели так, чтобы они были верны.

Вот почему итератор может стать недействительным после удаления элемента: он может всё еще указывать на уже освобожденный элемент.

Это также называется *dangling pointer*. И конечно же, информация из освобожденного элемента, на который указывает итератор, не может использоваться более.

В реализации GCC (по крайней мере 4.8.1) не сохраняется текущая длина списка: это выливается в медленный метод `.size()`: он должен пройти по всему списку считая элементы, просто потому что нет другого способа получить эту информацию. Это означает, что эта операция $O(n)$, т.е. она работает тем медленнее, чем больше элементов в списке.

Листинг 3.109: Оптимизирующий GCC 4.8.1 -fno-inline-small-functions

```
main proc near
    push ebp
    mov  ebp, esp
    push esi
    push ebx
    and  esp, 0FFFFFF0h
    sub  esp, 20h
    lea  ebx, [esp+10h]
    mov  dword ptr [esp], offset s ; "* empty list:"
    mov  [esp+10h], ebx
    mov  [esp+14h], ebx
    call puts
    mov  [esp], ebx
    call _Z13dump_List_valPj ; dump_List_val(uint *)
    lea  esi, [esp+18h]
    mov  [esp+4], esi
    mov  [esp], ebx
    mov  dword ptr [esp+18h], 1 ; X нового элемента
    mov  dword ptr [esp+1Ch], 2 ; Y нового элемента
    call _ZNSt4listI1aSaIS0_EE10push_frontERKS0_ ; std::list<a,std::allocator<a>>::push_front(a&
    ↪ const&)
    mov  [esp+4], esi
    mov  [esp], ebx
    mov  dword ptr [esp+18h], 3 ; X нового элемента
    mov  dword ptr [esp+1Ch], 4 ; Y нового элемента
    call _ZNSt4listI1aSaIS0_EE10push_frontERKS0_ ; std::list<a,std::allocator<a>>::push_front(a&
    ↪ const&)
    mov  dword ptr [esp], 10h
    mov  dword ptr [esp+18h], 5 ; X нового элемента
    mov  dword ptr [esp+1Ch], 6 ; Y нового элемента
    call _Znwj ; operator new(uint)
    cmp  eax, 0FFFFFFFh
    jz   short loc_80002A6
    mov  ecx, [esp+1Ch]
    mov  edx, [esp+18h]
    mov  [eax+0Ch], ecx
    mov  [eax+8], edx

loc_80002A6: ; CODE XREF: main+86
    mov  [esp+4], ebx
    mov  [esp], eax
```

3.18. C++

```

call _ZNSt8__detail15_List_node_base7_M_hookEPS0_ ; std::__detail::_List_node_base::_M_hook
↳ (std::__detail::_List_node_base*)
mov dword ptr [esp], offset a3ElementsList ; "* 3-elements list:"
call puts
mov [esp], ebx
call _Z13dump_List_valPj ; dump_List_val(uint *)
mov dword ptr [esp], offset aNodeAt_begin ; "node at .begin:"
call puts
mov eax, [esp+10h]
mov [esp], eax
call _Z14dump_List_nodeP9List_node ; dump_List_node(List_node *)
mov dword ptr [esp], offset aNodeAt_end ; "node at .end:"
call puts
mov [esp], ebx
call _Z14dump_List_nodeP9List_node ; dump_List_node(List_node *)
mov dword ptr [esp], offset aLetSCountFromT ; "* let's count from the beginning:"
call puts
mov esi, [esp+10h]
mov eax, [esi+0Ch]
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esi+8]
mov dword ptr [esp+4], offset a1stElementDD ; "1st element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov esi, [esi] ; operator++: get ->next pointer
mov eax, [esi+0Ch]
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esi+8]
mov dword ptr [esp+4], offset a2ndElementDD ; "2nd element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov esi, [esi] ; operator++: get ->next pointer
mov eax, [esi+0Ch]
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esi+8]
mov dword ptr [esp+4], offset a3rdElementDD ; "3rd element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov eax, [esi] ; operator++: get ->next pointer
mov edx, [eax+0Ch]
mov [esp+0Ch], edx
mov eax, [eax+8]
mov dword ptr [esp+4], offset aElementAt_endD ; "element at .end(): %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov dword ptr [esp], offset aLetSCountFro_0 ; "* let's count from the end:"
call puts
mov eax, [esp+1Ch]
mov dword ptr [esp+4], offset aElementAt_endD ; "element at .end(): %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esp+18h]
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov esi, [esp+14h]
mov eax, [esi+0Ch]
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esi+8]
mov dword ptr [esp+4], offset a3rdElementDD ; "3rd element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov esi, [esi+4] ; operator--: get ->prev pointer
mov eax, [esi+0Ch]
mov [esp+0Ch], eax
mov eax, [esi+8]

```

3.18. C/C++

```
mov dword ptr [esp+4], offset a2ndElementDD ; "2nd element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov eax, [esi+4] ; operator--: get ->prev pointer
mov edx, [eax+0Ch]
mov [esp+0Ch], edx
mov eax, [eax+8]
mov dword ptr [esp+4], offset a1stElementDD ; "1st element: %d %d\n"
mov dword ptr [esp], 1
mov [esp+8], eax
call __printf_chk
mov dword ptr [esp], offset aRemovingLastEl ; "removing last element..."
call puts
mov esi, [esp+14h]
mov [esp], esi
call _ZNSt8__detail15_List_node_base9_M_unhookEv ; std::__detail::_List_node_base::~
↳ _M_unhook(void)
mov [esp], esi ; void *
call _ZdlPv ; operator delete(void *)
mov [esp], ebx
call _Z13dump_List_valPj ; dump_List_val(uint *)
mov [esp], ebx
call _ZNSt10_List_baseI1aSaIS0_EE8_M_clearEv ; std::_List_base<a,std::allocator<a>>::~
↳ _M_clear(void)
lea esp, [ebp-8]
xor eax, eax
pop ebx
pop esi
pop ebp
retn
main endp
```

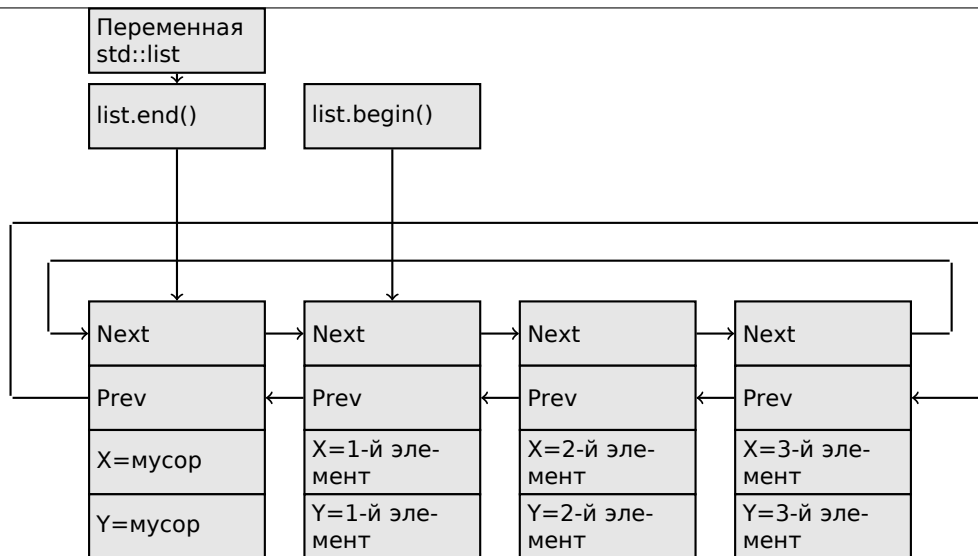
Листинг 3.110: Весь вывод

```
* empty list:
ptr=0x0028fe90 _Next=0x0028fe90 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=0
* 3-elements list:
ptr=0x000349a0 _Next=0x00034988 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=4
ptr=0x00034988 _Next=0x00034b40 _Prev=0x000349a0 x=1 y=2
ptr=0x00034b40 _Next=0x0028fe90 _Prev=0x00034988 x=5 y=6
ptr=0x0028fe90 _Next=0x000349a0 _Prev=0x00034b40 x=5 y=6
node at .begin:
ptr=0x000349a0 _Next=0x00034988 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=4
node at .end:
ptr=0x0028fe90 _Next=0x000349a0 _Prev=0x00034b40 x=5 y=6
* let's count from the beginning:
1st element: 3 4
2nd element: 1 2
3rd element: 5 6
element at .end(): 5 6
* let's count from the end:
element at .end(): 5 6
3rd element: 5 6
2nd element: 1 2
1st element: 3 4
removing last element...
ptr=0x000349a0 _Next=0x00034988 _Prev=0x0028fe90 x=3 y=4
ptr=0x00034988 _Next=0x0028fe90 _Prev=0x000349a0 x=1 y=2
ptr=0x0028fe90 _Next=0x000349a0 _Prev=0x00034988 x=5 y=6
```

MSVC

Реализация MSVC (2012) точно такая же, только еще и сохраняет текущий размер списка. Это означает, что метод `.size()` очень быстр ($O(1)$): просто прочитать одно значение из памяти. С другой стороны, переменная хранящая размер должна корректироваться при каждой вставке/удалении.

Реализация MSVC также немного отлична в смысле расстановки элементов:



У GCC его элемент-пустышка в самом конце списка, а у MSVC в самом начале.

Листинг 3.111: Оптимизирующий MSVC 2012 /Fa2.asm /GS- /Ob1

```

_l$ = -16 ; size = 8
_t1$ = -8 ; size = 8
_main PROC
    sub esp, 16
    push ebx
    push esi
    push edi
    push 0
    push 0
    lea ecx, DWORD PTR _l$[esp+36]
    mov DWORD PTR _l$[esp+40], 0
    ; выделить первый мусорный элемент
    call ?_Buynode0@?$_List_alloc@$0A@U?$_List_base_types@Ua@@V?
    ↪ $allocator@Ua@@@std@@std@@std@@QAEPAU?$_List_node@Ua@@PAX@2@PAU32@0@Z ; std::
    ↪ _List_alloc<0,std::_List_base_types<a,std::allocator<a> >::_Buynode0
    mov edi, DWORD PTR __imp__printf
    mov ebx, eax
    push OFFSET $SG40685 ; '* empty list:'
    mov DWORD PTR _l$[esp+32], ebx
    call edi ; printf
    lea eax, DWORD PTR _l$[esp+32]
    push eax
    call ?dump_List_val@@YAXPAI@Z ; dump_List_val
    mov esi, DWORD PTR [ebx]
    add esp, 8
    lea eax, DWORD PTR _t1$[esp+28]
    push eax
    push DWORD PTR [esi+4]
    lea ecx, DWORD PTR _l$[esp+36]
    push esi
    mov DWORD PTR _t1$[esp+40], 1 ; данные для нового узла
    mov DWORD PTR _t1$[esp+44], 2 ; данные для нового узла
    ; allocate new node
    call ??$_Buynode@ABUa@@@?$_List_buy@Ua@@V?$allocator@Ua@@@std@@std@@QAEPAU?
    ↪ $_List_node@Ua@@PAX@1@PAU21@0ABUa@@@Z ; std::_List_buy<a,std::allocator<a> >::_Buynode<a
    ↪ const &>
    mov DWORD PTR [esi+4], eax
    mov ecx, DWORD PTR [eax+4]
    mov DWORD PTR _t1$[esp+28], 3 ; данные для нового узла
    mov DWORD PTR [ecx], eax
    mov esi, DWORD PTR [ebx]
    lea eax, DWORD PTR _t1$[esp+28]
    push eax
    push DWORD PTR [esi+4]
    lea ecx, DWORD PTR _l$[esp+36]
    push esi
    mov DWORD PTR _t1$[esp+44], 4 ; данные для нового узла

```

```

; allocate new node
call ??$_Buynode@ABUa@@@?$_List_buy@Ua@@V?$allocator@Ua@@@std@@@std@@QAEPAU?↵
↳ $_List_node@Ua@@PAX@1@PAU21@0ABUa@@@Z ; std::_List_buy<a,std::allocator<a> >::_Buynode<a ↵
↳ const &>
mov     DWORD PTR [esi+4], eax
mov     ecx, DWORD PTR [eax+4]
mov     DWORD PTR _t1$[esp+28], 5 ; данные для нового узла
mov     DWORD PTR [ecx], eax
lea     eax, DWORD PTR _t1$[esp+28]
push    eax
push    DWORD PTR [ebx+4]
lea     ecx, DWORD PTR _l$[esp+36]
push    ebx
mov     DWORD PTR _t1$[esp+44], 6 ; данные для нового узла
; allocate new node
call ??$_Buynode@ABUa@@@?$_List_buy@Ua@@V?$allocator@Ua@@@std@@@std@@QAEPAU?↵
↳ $_List_node@Ua@@PAX@1@PAU21@0ABUa@@@Z ; std::_List_buy<a,std::allocator<a> >::_Buynode<a ↵
↳ const &>
mov     DWORD PTR [ebx+4], eax
mov     ecx, DWORD PTR [eax+4]
push    OFFSET $SG40689 ; '* 3-elements list:'
mov     DWORD PTR _l$[esp+36], 3
mov     DWORD PTR [ecx], eax
call    edi ; printf
lea     eax, DWORD PTR _l$[esp+32]
push    eax
call    ?dump_List_val@@YAXPAI@Z ; dump_List_val
push    OFFSET $SG40831 ; 'node at .begin:'
call    edi ; printf
push    DWORD PTR [ebx] ; взять поле следующего узла, на который указывает $l$
call    ?dump_List_node@@YAXPAUList_node@@@Z ; dump_List_node
push    OFFSET $SG40835 ; 'node at .end:'
call    edi ; printf
push    ebx ; pointer to the node $l$ variable points to!
call    ?dump_List_node@@YAXPAUList_node@@@Z ; dump_List_node
push    OFFSET $SG40839 ; '* let's count from the begin:'
call    edi ; printf
mov     esi, DWORD PTR [ebx] ; operator++: get ->next pointer
push    DWORD PTR [esi+12]
push    DWORD PTR [esi+8]
push    OFFSET $SG40846 ; '1st element: %d %d'
call    edi ; printf
mov     esi, DWORD PTR [esi] ; operator++: get ->next pointer
push    DWORD PTR [esi+12]
push    DWORD PTR [esi+8]
push    OFFSET $SG40848 ; '2nd element: %d %d'
call    edi ; printf
mov     esi, DWORD PTR [esi] ; operator++: get ->next pointer
push    DWORD PTR [esi+12]
push    DWORD PTR [esi+8]
push    OFFSET $SG40850 ; '3rd element: %d %d'
call    edi ; printf
mov     eax, DWORD PTR [esi] ; operator++: get ->next pointer
add     esp, 64
push    DWORD PTR [eax+12]
push    DWORD PTR [eax+8]
push    OFFSET $SG40852 ; 'element at .end(): %d %d'
call    edi ; printf
push    OFFSET $SG40853 ; '* let's count from the end:'
call    edi ; printf
push    DWORD PTR [ebx+12] ; использовать поля x и y того узла, на который указывает ↵
↳ переменная $l$
push    DWORD PTR [ebx+8]
push    OFFSET $SG40860 ; 'element at .end(): %d %d'
call    edi ; printf
mov     esi, DWORD PTR [ebx+4] ; operator--: get ->prev pointer
push    DWORD PTR [esi+12]
push    DWORD PTR [esi+8]
push    OFFSET $SG40862 ; '3rd element: %d %d'
call    edi ; printf

```

3.18. CИ++

```

mov esi, DWORD PTR [esi+4] ; operator--: get ->prev pointer
push DWORD PTR [esi+12]
push DWORD PTR [esi+8]
push OFFSET $SG40864 ; '2nd element: %d %d'
call edi ; printf
mov eax, DWORD PTR [esi+4] ; operator--: get ->prev pointer
push DWORD PTR [eax+12]
push DWORD PTR [eax+8]
push OFFSET $SG40866 ; '1st element: %d %d'
call edi ; printf
add esp, 64
push OFFSET $SG40867 ; 'removing last element...'
call edi ; printf
mov edx, DWORD PTR [ebx+4]
add esp, 4

; prev=next?
; это единственный элемент, мусор?
; если да, не удаляем его!
cmp edx, ebx
je SHORT $LN349@main
mov ecx, DWORD PTR [edx+4]
mov eax, DWORD PTR [edx]
mov DWORD PTR [ecx], eax
mov ecx, DWORD PTR [edx]
mov eax, DWORD PTR [edx+4]
push edx
mov DWORD PTR [ecx+4], eax
call ??3@YAXPAX@Z ; operator delete
add esp, 4
mov DWORD PTR _l$[esp+32], 2
$LN349@main:
lea eax, DWORD PTR _l$[esp+28]
push eax
call ?dump_List_val@@YAXPAI@Z ; dump_List_val
mov eax, DWORD PTR [ebx]
add esp, 4
mov DWORD PTR [ebx], ebx
mov DWORD PTR [ebx+4], ebx
cmp eax, ebx
je SHORT $LN412@main
$LL414@main:
mov esi, DWORD PTR [eax]
push eax
call ??3@YAXPAX@Z ; operator delete
add esp, 4
mov eax, esi
cmp esi, ebx
jne SHORT $LL414@main
$LN412@main:
push ebx
call ??3@YAXPAX@Z ; operator delete
add esp, 4
xor eax, eax
pop edi
pop esi
pop ebx
add esp, 16
ret 0
_main ENDP

```

В отличие от GCC, код MSVC выделяет элемент-пустышку в самом начале функции при помощи функции «Buynode», она также используется и во время выделения остальных элементов (код GCC выделяет самый первый элемент в локальном стеке).

Листинг 3.112: Весь вывод

```

* empty list:
_Myhead=0x003CC258, _Mysize=0
ptr=0x003CC258 _Next=0x003CC258 _Prev=0x003CC258 x=6226002 y=4522072

```

3.18. Си++

```
* 3-elements list:
_Myhead=0x003CC258, _Mysize=3
ptr=0x003CC258 _Next=0x003CC288 _Prev=0x003CC2A0 x=6226002 y=4522072
ptr=0x003CC288 _Next=0x003CC270 _Prev=0x003CC258 x=3 y=4
ptr=0x003CC270 _Next=0x003CC2A0 _Prev=0x003CC288 x=1 y=2
ptr=0x003CC2A0 _Next=0x003CC258 _Prev=0x003CC270 x=5 y=6
node at .begin:
ptr=0x003CC288 _Next=0x003CC270 _Prev=0x003CC258 x=3 y=4
node at .end:
ptr=0x003CC258 _Next=0x003CC288 _Prev=0x003CC2A0 x=6226002 y=4522072
* let's count from the beginning:
1st element: 3 4
2nd element: 1 2
3rd element: 5 6
element at .end(): 6226002 4522072
* let's count from the end:
element at .end(): 6226002 4522072
3rd element: 5 6
2nd element: 1 2
1st element: 3 4
removing last element...
_Myhead=0x003CC258, _Mysize=2
ptr=0x003CC258 _Next=0x003CC288 _Prev=0x003CC270 x=6226002 y=4522072
ptr=0x003CC288 _Next=0x003CC270 _Prev=0x003CC258 x=3 y=4
ptr=0x003CC270 _Next=0x003CC258 _Prev=0x003CC288 x=1 y=2
```

C++11 std::forward_list

Это то же самое что и std::list, но только односвязный список, т.е. имеющий только поле «next» в каждом элементе. Таким образом расход памяти меньше, но возможности идти по списку назад здесь нет.

std::vector

Мы бы назвали std::vector «безопасной оболочкой» (wrapper) PODT³⁴ массива в Си.

Изнутри он очень похож на std::string (3.18.4 (стр. 551)): он имеет указатель на выделенный буфер, указатель на конец массива и указатель на конец выделенного буфера.

Элементы массива просто лежат в памяти впритык друг к другу, так же, как и в обычном массиве (1.20 (стр. 258)). В C++11 появился метод .data() возвращающий указатель на этот буфер, это похоже на .c_str() в std::string.

Выделенный буфер в куче может быть больше чем сам массив.

Реализации MSVC и GCC почти одинаковые, отличаются только имена полей в структуре³⁵, так что здесь один исходник работающий для обоих компиляторов. И снова здесь Си-подобный код для вывода структуры std::vector:

```
#include <stdio.h>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <functional>

struct vector_of_ints
{
    // MSVC names:
    int *Myfirst;
    int *Mylast;
    int *Myend;

    // структура в GCC такая же, а имена там: _M_start, _M_finish, _M_end_of_storage
};
```

³⁴(Си++) Plain Old Data Type

³⁵внутренности GCC: <http://go.yurichev.com/17086>

3.18. CИ++

```
void dump(struct vector_of_ints *in)
{
    printf ("_Myfirst=%p, _Mylast=%p, _Myend=%p\n", in->Myfirst, in->Mylast, in->Myend);
    size_t size=(in->Mylast-in->Myfirst);
    size_t capacity=(in->Myend-in->Myfirst);
    printf ("size=%d, capacity=%d\n", size, capacity);
    for (size_t i=0; i<size; i++)
        printf ("element %d: %d\n", i, in->Myfirst[i]);
};

int main()
{
    std::vector<int> c;
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(1);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(2);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(3);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(4);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.reserve (6);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(5);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    c.push_back(6);
    dump ((struct vector_of_ints*)(void*)&c);
    printf ("%d\n", c.at(5)); // с проверкой границ
    printf ("%d\n", c[8]); // operator[], без проверки границ
};
```

Примерный вывод программы скомпилированной в MSVC:

```
_Myfirst=00000000, _Mylast=00000000, _Myend=00000000
size=0, capacity=0
_Myfirst=0051CF48, _Mylast=0051CF4C, _Myend=0051CF4C
size=1, capacity=1
element 0: 1
_Myfirst=0051CF58, _Mylast=0051CF60, _Myend=0051CF60
size=2, capacity=2
element 0: 1
element 1: 2
_Myfirst=0051C278, _Mylast=0051C284, _Myend=0051C284
size=3, capacity=3
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
_Myfirst=0051C290, _Mylast=0051C2A0, _Myend=0051C2A0
size=4, capacity=4
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
_Myfirst=0051B180, _Mylast=0051B190, _Myend=0051B198
size=4, capacity=6
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
_Myfirst=0051B180, _Mylast=0051B194, _Myend=0051B198
size=5, capacity=6
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
element 4: 5
_Myfirst=0051B180, _Mylast=0051B198, _Myend=0051B198
size=6, capacity=6
element 0: 1
```

3.18. CИ++

```
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
element 4: 5
element 5: 6
6
6619158
```

Как можно заметить, выделенного буфера в самом начале функции `main()` пока нет. После первого вызова `push_back()` буфер выделяется. И далее, после каждого вызова `push_back()` и длина массива и вместимость буфера (*capacity*) увеличиваются. Но адрес буфера также меняется, потому что вызов функции `push_back()` перевыделяет буфер в *куче* каждый раз. Это дорогая операция, вот почему очень важно предсказать размер будущего массива и зарезервировать место для него при помощи метода `.reserve()`. Самое последнее число — это мусор: там нет элементов массива в этом месте, вот откуда это случайное число. Это иллюстрация того факта что метод `operator[]` в `std::vector` не проверяет индекс на правильность. Более медленный метод `.at()` с другой стороны, проверяет, и подкидывает исключение `std::out_of_range` в случае ошибки.

Давайте посмотрим код:

Листинг 3.113: MSVC 2012 /GS- /Ob1

```
$SG52650 DB '%d', 0aH, 00H
$SG52651 DB '%d', 0aH, 00H

_this$ = -4 ; size = 4
__Pos$ = 8 ; size = 4
?at?$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEAAHI@Z PROC ; std::vector<int,std::allocator<int> >
    >::at, COMDAT
; _this$ = ecx
    push ebp
    mov ebp, esp
    push ecx
    mov DWORD PTR _this$[ebp], ecx
    mov eax, DWORD PTR _this$[ebp]
    mov ecx, DWORD PTR _this$[ebp]
    mov edx, DWORD PTR [eax+4]
    sub edx, DWORD PTR [ecx]
    sar edx, 2
    cmp edx, DWORD PTR __Pos$[ebp]
    ja SHORT $LN1@at
    push OFFSET ??_C@_0BM@NMJKDPP0@invalid?5vector?$DMT?$D0?5subscript?$AA@
    call DWORD PTR __imp_?_Xout_of_range@std@@YAXPBD@Z
$LN1@at:
    mov eax, DWORD PTR _this$[ebp]
    mov ecx, DWORD PTR [eax]
    mov edx, DWORD PTR __Pos$[ebp]
    lea eax, DWORD PTR [ecx+edx*4]
$LN3@at:
    mov esp, ebp
    pop ebp
    ret 4
?at?$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEAAHI@Z ENDP ; std::vector<int,std::allocator<int> >
    >::at

_c$ = -36 ; size = 12
$T1 = -24 ; size = 4
$T2 = -20 ; size = 4
$T3 = -16 ; size = 4
$T4 = -12 ; size = 4
$T5 = -8 ; size = 4
$T6 = -4 ; size = 4
_main PROC
    push ebp
    mov ebp, esp
    sub esp, 36
    mov DWORD PTR _c$[ebp], 0 ; Myfirst
    mov DWORD PTR _c$[ebp+4], 0 ; Mylast
    mov DWORD PTR _c$[ebp+8], 0 ; Myend
    lea eax, DWORD PTR _c$[ebp]
```

3.18. Cn++

```

push eax
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T6[ebp], 1
lea ecx, DWORD PTR $T6[ebp]
push ecx
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea edx, DWORD PTR _c$[ebp]
push edx
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T5[ebp], 2
lea eax, DWORD PTR $T5[ebp]
push eax
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
push ecx
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T4[ebp], 3
lea edx, DWORD PTR $T4[ebp]
push edx
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea eax, DWORD PTR _c$[ebp]
push eax
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T3[ebp], 4
lea ecx, DWORD PTR $T3[ebp]
push ecx
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea edx, DWORD PTR _c$[ebp]
push edx
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
push 6
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?reserve@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEXI@Z ; std::vector<int,std::allocator<
↳ int> >::reserve
lea eax, DWORD PTR _c$[ebp]
push eax
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T2[ebp], 5
lea ecx, DWORD PTR $T2[ebp]
push ecx
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea edx, DWORD PTR _c$[ebp]
push edx
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump
add esp, 4
mov DWORD PTR $T1[ebp], 6
lea eax, DWORD PTR $T1[ebp]
push eax
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?push_back@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEX$$QAH@Z ; std::vector<int,std::
↳ allocator<int> >::push_back
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
push ecx
call ?dump@@YAXPAUvector_of_ints@@@Z ; dump

```

3.18. CИ++

```
add esp, 4
push 5
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?at?$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@QAEAAHI@Z ; std::vector<int,std::allocator<int>
↳ > >::at
mov edx, DWORD PTR [eax]
push edx
push OFFSET $SG52650 ; '%d'
call DWORD PTR __imp__printf
add esp, 8
mov eax, 8
shl eax, 2
mov ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
mov edx, DWORD PTR [ecx+eax]
push edx
push OFFSET $SG52651 ; '%d'
call DWORD PTR __imp__printf
add esp, 8
lea ecx, DWORD PTR _c$[ebp]
call ?_Tidy@$vector@HV?$allocator@H@std@@@std@@IAEXXZ ; std::vector<int,std::allocator<int>
↳ > >::_Tidy
xor eax, eax
mov esp, ebp
pop ebp
ret 0
_main ENDP
```

Мы видим, как метод `.at()` проверяет границы и подкидывает исключение в случае ошибки. Число, которое выводит последний вызов `printf()` берется из памяти, без всяких проверок.

Читатель может спросить, почему бы не использовать переменные «size» и «capacity», как это сделано в `std::string`. Должно быть, это для более быстрой проверки границ.

Код генерируемый GCC почти такой же, в целом, но метод `.at()` вставлен прямо в код:

Листинг 3.114: GCC 4.8.1 -fno-inline-small-functions -O1

```
main proc near
push ebp
mov ebp, esp
push edi
push esi
push ebx
and esp, 0FFFFFFF0h
sub esp, 20h
mov dword ptr [esp+14h], 0
mov dword ptr [esp+18h], 0
mov dword ptr [esp+1Ch], 0
lea eax, [esp+14h]
mov [esp], eax
call _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov dword ptr [esp+10h], 1
lea eax, [esp+10h]
mov [esp+4], eax
lea eax, [esp+14h]
mov [esp], eax
call _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↳ int const&)
lea eax, [esp+14h]
mov [esp], eax
call _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov dword ptr [esp+10h], 2
lea eax, [esp+10h]
mov [esp+4], eax
lea eax, [esp+14h]
mov [esp], eax
call _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↳ int const&)
lea eax, [esp+14h]
mov [esp], eax
call _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
```

3.18. C/C++

```

mov     dword ptr [esp+10h], 3
lea     eax, [esp+10h]
mov     [esp+4], eax
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↳ int const&)
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov     dword ptr [esp+10h], 4
lea     eax, [esp+10h]
mov     [esp+4], eax
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↳ int const&)
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov     ebx, [esp+14h]
mov     eax, [esp+1Ch]
sub     eax, ebx
cmp     eax, 17h
ja      short loc_80001CF
mov     edi, [esp+18h]
sub     edi, ebx
sar     edi, 2
mov     dword ptr [esp], 18h
call    _Znwj ; operator new(uint)
mov     esi, eax
test    edi, edi
jz      short loc_80001AD
lea     eax, ds:0[edi*4]
mov     [esp+8], eax ; n
mov     [esp+4], ebx ; src
mov     [esp], esi ; dest
call    memmove

```

loc_80001AD: ; CODE XREF: main+F8

```

mov     eax, [esp+14h]
test    eax, eax
jz      short loc_80001BD
mov     [esp], eax ; void *
call    _ZdlPv ; operator delete(void *)

```

loc_80001BD: ; CODE XREF: main+117

```

mov     [esp+14h], esi
lea     eax, [esi+edi*4]
mov     [esp+18h], eax
add     esi, 18h
mov     [esp+1Ch], esi

```

loc_80001CF: ; CODE XREF: main+DD

```

lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov     dword ptr [esp+10h], 5
lea     eax, [esp+10h]
mov     [esp+4], eax
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↳ int const&)
lea     eax, [esp+14h]
mov     [esp], eax
call    _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
mov     dword ptr [esp+10h], 6
lea     eax, [esp+10h]
mov     [esp+4], eax

```

3.18. C/C++

```
    lea    eax, [esp+14h]
    mov    [esp], eax
    call   _ZNSt6vectorIiSaIiEE9push_backERKi ; std::vector<int,std::allocator<int>>::push_back(
↵ int const&)
    lea    eax, [esp+14h]
    mov    [esp], eax
    call   _Z4dumpP14vector_of_ints ; dump(vector_of_ints *)
    mov    eax, [esp+14h]
    mov    edx, [esp+18h]
    sub    edx, eax
    cmp    edx, 17h
    ja     short loc_8000246
    mov    dword ptr [esp], offset aVector_m_range ; "vector::_M_range_check"
    call   _ZSt20__throw_out_of_rangePKc ; std::__throw_out_of_range(char const*)

loc_8000246:                                ; CODE XREF: main+19C
    mov    eax, [eax+14h]
    mov    [esp+8], eax
    mov    dword ptr [esp+4], offset aD ; "%d\n"
    mov    dword ptr [esp], 1
    call   __printf_chk
    mov    eax, [esp+14h]
    mov    eax, [eax+20h]
    mov    [esp+8], eax
    mov    dword ptr [esp+4], offset aD ; "%d\n"
    mov    dword ptr [esp], 1
    call   __printf_chk
    mov    eax, [esp+14h]
    test   eax, eax
    jz     short loc_80002AC
    mov    [esp], eax          ; void *
    call   _ZdlPv             ; operator delete(void *)
    jmp    short loc_80002AC

    mov    ebx, eax
    mov    edx, [esp+14h]
    test   edx, edx
    jz     short loc_80002A4
    mov    [esp], edx          ; void *
    call   _ZdlPv             ; operator delete(void *)

loc_80002A4: ; CODE XREF: main+1FE
    mov    [esp], ebx
    call   _Unwind_Resume

loc_80002AC: ; CODE XREF: main+1EA
                ; main+1F4
    mov    eax, 0
    lea    esp, [ebp-0Ch]
    pop    ebx
    pop    esi
    pop    edi
    pop    ebp

locret_80002B8: ; DATA XREF: .eh_frame:08000510
                ; .eh_frame:080005BC
    retn
main endp
```

Метод `.reserve()` точно так же вставлен прямо в код `main()`. Он вызывает `new()` если буфер слишком мал для нового массива, вызывает `memmove()` для копирования содержимого буфера, и вызывает `delete()` для освобождения старого буфера.

Посмотрим, что выводит программа будучи скомпилированная GCC:

```
_Myfirst=0x(nil), _Mylast=0x(nil), _Myend=0x(nil)
size=0, capacity=0
_Myfirst=0x8257008, _Mylast=0x825700c, _Myend=0x825700c
size=1, capacity=1
```

3.18. CИ++

```
element 0: 1
_Myfirst=0x8257018, _Mylast=0x8257020, _Myend=0x8257020
size=2, capacity=2
element 0: 1
element 1: 2
_Myfirst=0x8257028, _Mylast=0x8257034, _Myend=0x8257038
size=3, capacity=4
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
_Myfirst=0x8257028, _Mylast=0x8257038, _Myend=0x8257038
size=4, capacity=4
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
_Myfirst=0x8257040, _Mylast=0x8257050, _Myend=0x8257058
size=4, capacity=6
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
_Myfirst=0x8257040, _Mylast=0x8257054, _Myend=0x8257058
size=5, capacity=6
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
element 4: 5
_Myfirst=0x8257040, _Mylast=0x8257058, _Myend=0x8257058
size=6, capacity=6
element 0: 1
element 1: 2
element 2: 3
element 3: 4
element 4: 5
element 5: 6
6
0
```

Мы можем заметить, что буфер растёт иначе чем в MSVC.

При помощи простых экспериментов становится ясно, что в реализации MSVC буфер увеличивается на ~50% каждый раз, когда он должен был увеличен, а у GCC он увеличивается на 100% каждый раз, т.е. удваивается.

std::map и std::set

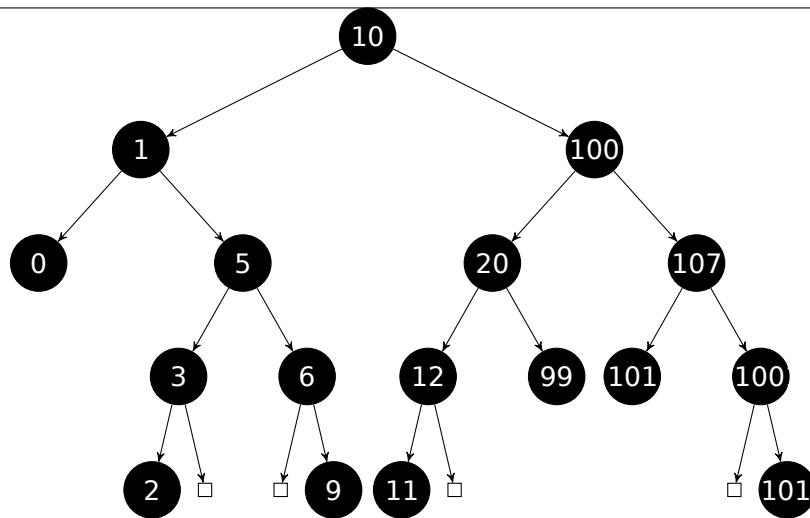
Двоичное дерево—это ещё одна фундаментальная структура данных. Как следует из названия, это дерево, но у каждого узла максимум 2 связи с другими узлами. Каждый узел имеет ключ и/или значение: в `std::set` у каждого узла есть ключ, в `std::map` у каждого узла есть и ключ и значение.

Обычно, именно при помощи двоичных деревьев реализуются «словари» пар ключ-значения ([АКА](#) «ассоциативные массивы»).

Двоичные деревья имеют по крайней мере три важных свойства:

- Все ключи всегда хранятся в отсортированном виде.
- Могут храниться ключи любых типов. Алгоритмы для работы с двоичными деревьями не зависят от типа ключа, для работы им нужна только функция для сравнения ключей.
- Поиск заданного ключа относительно быстрый по сравнению со списками или массивами.

Очень простой пример: давайте сохраним вот эти числа в двоичном дереве: 0, 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 20, 99, 100, 101, 107, 1001, 1010.



Все ключи меньше чем значение ключа узла, сохраняются по левой стороне. Все ключи больше чем значение ключа узла, сохраняются по правой стороне.

Таким образом, алгоритм для поиска нужного ключа прост: если искомое значение меньше чем значение текущего узла: двигаемся влево, если больше: двигаемся вправо, останавливаемся если они равны. Таким образом, алгоритм может искать числа, текстовые строки, итд, пользуясь только функцией сравнения ключей.

Все ключи имеют уникальные значения.

Учитывая это, нужно $\approx \log_2 n$ шагов для поиска ключа в сбалансированном дереве, содержащем n ключей. Это ≈ 10 шагов для ≈ 1000 ключей, или ≈ 13 шагов для ≈ 10000 ключей. Неплохо, но для этого дерево всегда должно быть сбалансировано: т.е. ключи должны быть равномерно распределены на всех ярусах. Операции вставки и удаления проводят дополнительную работу по обслуживанию дерева и сохранения его в сбалансированном состоянии.

Известно несколько популярных алгоритмов балансировки, включая AVL-деревья и красно-черные деревья. Последний дополняет узел значением «цвета» для упрощения балансировки, таким образом каждый узел может быть «красным» или «черным».

Реализации `std::map` и `std::set` обеих GCC и MSVC используют красно-черные деревья.

`std::set` содержит только ключи. `std::map` это «расширенная» версия `set`: здесь имеется еще и значение (value) на каждом узле.

MSVC

```

#include <map>
#include <set>
#include <string>
#include <iostream>

// Структура не запакована! Каждое поле занимает 4 байта.
struct tree_node
{
    struct tree_node *Left;
    struct tree_node *Parent;
    struct tree_node *Right;
    char Color; // 0 - Red, 1 - Black
    char Isnll;
    //std::pair Myval;
    unsigned int first; // называется Myval в std::set
    const char *second; // отсутствует в std::set
};

struct tree_struct
{
    struct tree_node *Myhead;
    size_t Mysize;
};
  
```


3.18. CИ++

```
void dump_tree_node(struct tree_node *n, bool is_set, bool traverse)
{
    printf ("ptr=0x%p Left=0x%p Parent=0x%p Right=0x%p Color=%d Isnil=%d\n",
            n, n->Left, n->Parent, n->Right, n->Color, n->Isnil);
    if (n->Isnil==0)
    {
        if (is_set)
            printf ("first=%d\n", n->first);
        else
            printf ("first=%d second=[%s]\n", n->first, n->second);
    }

    if (traverse)
    {
        if (n->Isnil==1)
            dump_tree_node (n->Parent, is_set, true);
        else
        {
            if (n->Left->Isnil==0)
                dump_tree_node (n->Left, is_set, true);
            if (n->Right->Isnil==0)
                dump_tree_node (n->Right, is_set, true);
        };
    };
};

const char* ALOT_OF_TABS="\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t";

void dump_as_tree (int tabs, struct tree_node *n, bool is_set)
{
    if (is_set)
        printf ("%d\n", n->first);
    else
        printf ("%d [%s]\n", n->first, n->second);
    if (n->Left->Isnil==0)
    {
        printf (".*sL-----", tabs, ALOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->Left, is_set);
    };
    if (n->Right->Isnil==0)
    {
        printf (".*sR-----", tabs, ALOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->Right, is_set);
    };
};

void dump_map_and_set(struct tree_struct *m, bool is_set)
{
    printf ("ptr=0x%p, Myhead=0x%p, Mysize=%d\n", m, m->Myhead, m->Mysize);
    dump_tree_node (m->Myhead, is_set, true);
    printf ("As a tree:\n");
    printf ("root----");
    dump_as_tree (1, m->Myhead->Parent, is_set);
};

int main()
{
    // map

    std::map<int, const char*> m;

    m[10]="ten";
    m[20]="twenty";
    m[3]="three";
    m[101]="one hundred one";
    m[100]="one hundred";
    m[12]="twelve";
    m[107]="one hundred seven";
    m[0]="zero";
    m[1]="one";
```

3.18. C++

```
m[6]="six";
m[99]="ninety-nine";
m[5]="five";
m[11]="eleven";
m[1001]="one thousand one";
m[1010]="one thousand ten";
m[2]="two";
m[9]="nine";
printf ("dumping m as map:\n");
dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void *)&m, false);

std::map<int, const char*>::iterator it1=m.begin();
printf ("m.begin():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *) (void **)&it1, false, false);
it1=m.end();
printf ("m.end():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *) (void **)&it1, false, false);

// set

std::set<int> s;
s.insert(123);
s.insert(456);
s.insert(11);
s.insert(12);
s.insert(100);
s.insert(1001);
printf ("dumping s as set:\n");
dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void *)&s, true);
std::set<int>::iterator it2=s.begin();
printf ("s.begin():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *) (void **)&it2, true, false);
it2=s.end();
printf ("s.end():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *) (void **)&it2, true, false);
};
```

Листинг 3.115: MSVC 2012

```
dumping m as map:
ptr=0x0020FE04, Myhead=0x005BB3A0, Mysize=17
ptr=0x005BB3A0 Left=0x005BB4A0 Parent=0x005BB3C0 Right=0x005BB580 Color=1 Isn1l=1
ptr=0x005BB3C0 Left=0x005BB4C0 Parent=0x005BB3A0 Right=0x005BB440 Color=1 Isn1l=0
first=10 second=[ten]
ptr=0x005BB4C0 Left=0x005BB4A0 Parent=0x005BB3C0 Right=0x005BB520 Color=1 Isn1l=0
first=1 second=[one]
ptr=0x005BB4A0 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB4C0 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=0 second=[zero]
ptr=0x005BB520 Left=0x005BB400 Parent=0x005BB4C0 Right=0x005BB4E0 Color=0 Isn1l=0
first=5 second=[five]
ptr=0x005BB400 Left=0x005BB5A0 Parent=0x005BB520 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=3 second=[three]
ptr=0x005BB5A0 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB400 Right=0x005BB3A0 Color=0 Isn1l=0
first=2 second=[two]
ptr=0x005BB4E0 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB520 Right=0x005BB5C0 Color=1 Isn1l=0
first=6 second=[six]
ptr=0x005BB5C0 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB4E0 Right=0x005BB3A0 Color=0 Isn1l=0
first=9 second=[nine]
ptr=0x005BB440 Left=0x005BB3E0 Parent=0x005BB3C0 Right=0x005BB480 Color=1 Isn1l=0
first=100 second=[one hundred]
ptr=0x005BB3E0 Left=0x005BB460 Parent=0x005BB440 Right=0x005BB500 Color=0 Isn1l=0
first=20 second=[twenty]
ptr=0x005BB460 Left=0x005BB540 Parent=0x005BB3E0 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=12 second=[twelve]
ptr=0x005BB540 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB460 Right=0x005BB3A0 Color=0 Isn1l=0
first=11 second=[eleven]
ptr=0x005BB500 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB3E0 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=99 second=[ninety-nine]
ptr=0x005BB480 Left=0x005BB420 Parent=0x005BB440 Right=0x005BB560 Color=0 Isn1l=0
first=107 second=[one hundred seven]
```

3.18. C++

```
ptr=0x005BB420 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB480 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=101 second=[one hundred one]
ptr=0x005BB560 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB480 Right=0x005BB580 Color=1 Isn1l=0
first=1001 second=[one thousand one]
ptr=0x005BB580 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB560 Right=0x005BB3A0 Color=0 Isn1l=0
first=1010 second=[one thousand ten]
As a tree:
root----10 [ten]
    L-----1 [one]
        L-----0 [zero]
        R-----5 [five]
            L-----3 [three]
                L-----2 [two]
                R-----6 [six]
                    R-----9 [nine]
R-----100 [one hundred]
    L-----20 [twenty]
        L-----12 [twelve]
            L-----11 [eleven]
            R-----99 [ninety-nine]
R-----107 [one hundred seven]
    L-----101 [one hundred one]
    R-----1001 [one thousand one]
        R-----1010 [one thousand ten]

m.begin():
ptr=0x005BB4A0 Left=0x005BB3A0 Parent=0x005BB4C0 Right=0x005BB3A0 Color=1 Isn1l=0
first=0 second=[zero]
m.end():
ptr=0x005BB3A0 Left=0x005BB4A0 Parent=0x005BB3C0 Right=0x005BB580 Color=1 Isn1l=1

dumping s as set:
ptr=0x0020FDFC, Myhead=0x005BB5E0, Mysize=6
ptr=0x005BB5E0 Left=0x005BB640 Parent=0x005BB600 Right=0x005BB6A0 Color=1 Isn1l=1
ptr=0x005BB600 Left=0x005BB660 Parent=0x005BB5E0 Right=0x005BB620 Color=1 Isn1l=0
first=123
ptr=0x005BB660 Left=0x005BB640 Parent=0x005BB600 Right=0x005BB680 Color=1 Isn1l=0
first=12
ptr=0x005BB640 Left=0x005BB5E0 Parent=0x005BB660 Right=0x005BB5E0 Color=0 Isn1l=0
first=11
ptr=0x005BB680 Left=0x005BB5E0 Parent=0x005BB660 Right=0x005BB5E0 Color=0 Isn1l=0
first=100
ptr=0x005BB620 Left=0x005BB5E0 Parent=0x005BB600 Right=0x005BB6A0 Color=1 Isn1l=0
first=456
ptr=0x005BB6A0 Left=0x005BB5E0 Parent=0x005BB620 Right=0x005BB5E0 Color=0 Isn1l=0
first=1001
As a tree:
root----123
    L-----12
        L-----11
        R-----100
R-----456
    R-----1001

s.begin():
ptr=0x005BB640 Left=0x005BB5E0 Parent=0x005BB660 Right=0x005BB5E0 Color=0 Isn1l=0
first=11
s.end():
ptr=0x005BB5E0 Left=0x005BB640 Parent=0x005BB600 Right=0x005BB6A0 Color=1 Isn1l=1
```

Структура не запакована, так что оба значения типа *char* занимают по 4 байта.

В `std::map`, `first` и `second` могут быть представлены как одно значение типа `std::pair`. `std::set` имеет только одно значение в этом месте структуры.

Текущий размер дерева всегда присутствует, как и в случае реализации `std::list` в MSVC (3.18.4 (стр. 563)).

Как и в случае с `std::list`, итераторы это просто указатели на узлы. Итератор `.begin()` указывает на минимальный ключ. Этот указатель нигде не сохранен (как в списках), минимальный ключ дерева нужно находить каждый раз. `operator--` и `operator++` перемещают указатель не текущий узел на узел-предшественник или узел-преемник, т.е. узлы содержащие предыдущий и следую-

3.18. CИ++

щий ключ. Алгоритмы для всех этих операций описаны в [Cormen, Thomas H. and Leiserson, Charles E. and Rivest, Ronald L. and Stein, Clifford, *Introduction to Algorithms, Third Edition*, (2009)].

Итератор `.end()` указывает на узел-пустышку, он имеет 1 в `Isn1l`, что означает, что у узла нет ключа и/или значения.

Так что его можно рассматривать как «landing zone» в HDD³⁶. Этот узел часто называется *sentinel* [см. N. Wirth, *Algorithms and Data Structures*, 1985] ³⁷.

Поле «parent» узла-пустышки указывает на корневой узел, который служит как вершина дерева, и уже содержит информацию.

GCC

```
#include <stdio.h>
#include <map>
#include <set>
#include <string>
#include <iostream>

struct map_pair
{
    int key;
    const char *value;
};

struct tree_node
{
    int M_color; // 0 - Red, 1 - Black
    struct tree_node *M_parent;
    struct tree_node *M_left;
    struct tree_node *M_right;
};

struct tree_struct
{
    int M_key_compare;
    struct tree_node M_header;
    size_t M_node_count;
};

void dump_tree_node (struct tree_node *n, bool is_set, bool traverse, bool dump_keys_and_values)
{
    printf ("ptr=0x%p M_left=0x%p M_parent=0x%p M_right=0x%p M_color=%d\n",
           n, n->M_left, n->M_parent, n->M_right, n->M_color);

    void *point_after_struct=((char*)n)+sizeof(struct tree_node);

    if (dump_keys_and_values)
    {
        if (is_set)
            printf ("key=%d\n", *(int*)point_after_struct);
        else
        {
            struct map_pair *p=(struct map_pair *)point_after_struct;
            printf ("key=%d value=[%s]\n", p->key, p->value);
        }
    };

    if (traverse==false)
        return;

    if (n->M_left)
        dump_tree_node (n->M_left, is_set, traverse, dump_keys_and_values);
    if (n->M_right)
```

³⁶Hard Disk Drive

³⁷<http://www.ethoberon.ethz.ch/WirthPubl/AD.pdf>

3.18. CИ++

```

        dump_tree_node (n->M_right, is_set, traverse, dump_keys_and_values);
};

const char* ALOT_OF_TABS="\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t";

void dump_as_tree (int tabs, struct tree_node *n, bool is_set)
{
    void *point_after_struct=((char*)n)+sizeof(struct tree_node);

    if (is_set)
        printf ("%d\n", *(int*)point_after_struct);
    else
    {
        struct map_pair *p=(struct map_pair *)point_after_struct;
        printf ("%d [%s]\n", p->key, p->value);
    }

    if (n->M_left)
    {
        printf ("%.sL-----", tabs, ALOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->M_left, is_set);
    };
    if (n->M_right)
    {
        printf ("%.sR-----", tabs, ALOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->M_right, is_set);
    };
};

void dump_map_and_set(struct tree_struct *m, bool is_set)
{
    printf ("ptr=0x%p, M_key_compare=0x%x, M_header=0x%p, M_node_count=%d\n",
           m, m->M_key_compare, &m->M_header, m->M_node_count);
    dump_tree_node (m->M_header.M_parent, is_set, true, true);
    printf ("As a tree:\n");
    printf ("root----");
    dump_as_tree (1, m->M_header.M_parent, is_set);
};

int main()
{
    // map

    std::map<int, const char*> m;

    m[10]="ten";
    m[20]="twenty";
    m[3]="three";
    m[101]="one hundred one";
    m[100]="one hundred";
    m[12]="twelve";
    m[107]="one hundred seven";
    m[0]="zero";
    m[1]="one";
    m[6]="six";
    m[99]="ninety-nine";
    m[5]="five";
    m[11]="eleven";
    m[1001]="one thousand one";
    m[1010]="one thousand ten";
    m[2]="two";
    m[9]="nine";

    printf ("dumping m as map:\n");
    dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void*)&m, false);

    std::map<int, const char*>::iterator itl=m.begin();
    printf ("m.begin():\n");
    dump_tree_node ((struct tree_node *) (void**)&itl, false, false, true);
    itl=m.end();
}

```

3.18. C++

```

printf ("m.end():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *)*(void*)&it1, false, false, false);

// set

std::set<int> s;
s.insert(123);
s.insert(456);
s.insert(11);
s.insert(12);
s.insert(100);
s.insert(1001);
printf ("dumping s as set:\n");
dump_map_and_set ((struct tree_struct *)*(void*)&s, true);
std::set<int>::iterator it2=s.begin();
printf ("s.begin():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *)*(void*)&it2, true, false, true);
it2=s.end();
printf ("s.end():\n");
dump_tree_node ((struct tree_node *)*(void*)&it2, true, false, false);
};

```

Листинг 3.116: GCC 4.8.1

```

dumping m as map:
ptr=0x0028FE3C, M_key_compare=0x402b70, M_header=0x0028FE40, M_node_count=17
ptr=0x007A4988 M_left=0x007A4C00 M_parent=0x0028FE40 M_right=0x007A4B80 M_color=1
key=10 value=[ten]
ptr=0x007A4C00 M_left=0x007A4BE0 M_parent=0x007A4988 M_right=0x007A4C60 M_color=1
key=1 value=[one]
ptr=0x007A4BE0 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4C00 M_right=0x00000000 M_color=1
key=0 value=[zero]
ptr=0x007A4C60 M_left=0x007A4B40 M_parent=0x007A4C00 M_right=0x007A4C20 M_color=0
key=5 value=[five]
ptr=0x007A4B40 M_left=0x007A4CE0 M_parent=0x007A4C60 M_right=0x00000000 M_color=1
key=3 value=[three]
ptr=0x007A4CE0 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4B40 M_right=0x00000000 M_color=0
key=2 value=[two]
ptr=0x007A4C20 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4C60 M_right=0x007A4D00 M_color=1
key=6 value=[six]
ptr=0x007A4D00 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4C20 M_right=0x00000000 M_color=0
key=9 value=[nine]
ptr=0x007A4B80 M_left=0x007A49A8 M_parent=0x007A4988 M_right=0x007A4BC0 M_color=1
key=100 value=[one hundred]
ptr=0x007A49A8 M_left=0x007A4BA0 M_parent=0x007A4B80 M_right=0x007A4C40 M_color=0
key=20 value=[twenty]
ptr=0x007A4BA0 M_left=0x007A4C80 M_parent=0x007A49A8 M_right=0x00000000 M_color=1
key=12 value=[twelve]
ptr=0x007A4C80 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4BA0 M_right=0x00000000 M_color=0
key=11 value=[eleven]
ptr=0x007A4C40 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A49A8 M_right=0x00000000 M_color=1
key=99 value=[ninety-nine]
ptr=0x007A4BC0 M_left=0x007A4B60 M_parent=0x007A4B80 M_right=0x007A4CA0 M_color=0
key=107 value=[one hundred seven]
ptr=0x007A4B60 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4BC0 M_right=0x00000000 M_color=1
key=101 value=[one hundred one]
ptr=0x007A4CA0 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4BC0 M_right=0x007A4CC0 M_color=1
key=1001 value=[one thousand one]
ptr=0x007A4CC0 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4CA0 M_right=0x00000000 M_color=0
key=1010 value=[one thousand ten]
As a tree:
root----10 [ten]
    L-----1 [one]
        L-----0 [zero]
        R-----5 [five]
            L-----3 [three]
                L-----2 [two]
                R-----6 [six]
                    R-----9 [nine]
R-----100 [one hundred]

```

3.18. CИ++

```

    L-----20 [twenty]
        L-----12 [twelve]
            L-----11 [eleven]
                R-----99 [ninety-nine]
R-----107 [one hundred seven]
    L-----101 [one hundred one]
        R-----1001 [one thousand one]
            R-----1010 [one thousand ten]

m.begin():
ptr=0x007A4BE0 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A4C00 M_right=0x00000000 M_color=1
key=0 value=[zero]
m.end():
ptr=0x0028FE40 M_left=0x007A4BE0 M_parent=0x007A4988 M_right=0x007A4CC0 M_color=0

dumping s as set:
ptr=0x0028FE20, M_key_compare=0x8, M_header=0x0028FE24, M_node_count=6
ptr=0x007A1E80 M_left=0x01D5D890 M_parent=0x0028FE24 M_right=0x01D5D850 M_color=1
key=123
ptr=0x01D5D890 M_left=0x01D5D870 M_parent=0x007A1E80 M_right=0x01D5D8B0 M_color=1
key=12
ptr=0x01D5D870 M_left=0x00000000 M_parent=0x01D5D890 M_right=0x00000000 M_color=0
key=11
ptr=0x01D5D8B0 M_left=0x00000000 M_parent=0x01D5D890 M_right=0x00000000 M_color=0
key=100
ptr=0x01D5D850 M_left=0x00000000 M_parent=0x007A1E80 M_right=0x01D5D8D0 M_color=1
key=456
ptr=0x01D5D8D0 M_left=0x00000000 M_parent=0x01D5D850 M_right=0x00000000 M_color=0
key=1001
As a tree:
root----123
    L-----12
        L-----11
            R-----100
R-----456
    R-----1001

s.begin():
ptr=0x01D5D870 M_left=0x00000000 M_parent=0x01D5D890 M_right=0x00000000 M_color=0
key=11
s.end():
ptr=0x0028FE24 M_left=0x01D5D870 M_parent=0x007A1E80 M_right=0x01D5D8D0 M_color=0
```

Реализация в GCC очень похожа ³⁸. Разница только в том, что здесь нет поля `Isn1l`, так что структура занимает немного меньше места в памяти чем та что реализована в MSVC.

Узел-пустышка — это также место, куда указывает итератор `.end()`, не имеющий ключа и/или значения.

Демонстрация перебалансировки (GCC)

Вот также демонстрация, показывающая нам как дерево может перебалансироваться после вставок.

Листинг 3.117: GCC

```
#include <stdio.h>
#include <map>
#include <set>
#include <string>
#include <iostream>

struct map_pair
{
    int key;
    const char *value;
};

struct tree_node
```

³⁸<http://go.yurichev.com/17084>

3.18. CИ++

```
{
    int M_color; // 0 - Red, 1 - Black
    struct tree_node *M_parent;
    struct tree_node *M_left;
    struct tree_node *M_right;
};

struct tree_struct
{
    int M_key_compare;
    struct tree_node M_header;
    size_t M_node_count;
};

const char* ALLOT_OF_TABS="\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t\t";

void dump_as_tree (int tabs, struct tree_node *n)
{
    void *point_after_struct=((char*)n)+sizeof(struct tree_node);

    printf ("%d\n", *(int*)point_after_struct);

    if (n->M_left)
    {
        printf ("%.sL-----", tabs, ALLOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->M_left);
    };
    if (n->M_right)
    {
        printf ("%.sR-----", tabs, ALLOT_OF_TABS);
        dump_as_tree (tabs+1, n->M_right);
    };
};

void dump_map_and_set(struct tree_struct *m)
{
    printf ("root----");
    dump_as_tree (1, m->M_header.M_parent);
};

int main()
{
    std::set<int> s;
    s.insert(123);
    s.insert(456);
    printf ("123, 456 has been inserted\n");
    dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void*)&s);
    s.insert(11);
    s.insert(12);
    printf ("\n");
    printf ("11, 12 has been inserted\n");
    dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void*)&s);
    s.insert(100);
    s.insert(1001);
    printf ("\n");
    printf ("100, 1001 has been inserted\n");
    dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void*)&s);
    s.insert(667);
    s.insert(1);
    s.insert(4);
    s.insert(7);
    printf ("\n");
    printf ("667, 1, 4, 7 has been inserted\n");
    dump_map_and_set ((struct tree_struct *) (void*)&s);
    printf ("\n");
};
```

Листинг 3.118: GCC 4.8.1

```
123, 456 has been inserted
```


3.18. СИ++

```
root----123
      R-----456

11, 12 has been inserted
root----123
      L-----11
            R-----12
      R-----456

100, 1001 has been inserted
root----123
      L-----12
            L-----11
            R-----100
      R-----456
            R-----1001

667, 1, 4, 7 has been inserted
root----12
      L-----4
            L-----1
            R-----11
                  L-----7
      R-----123
            L-----100
            R-----667
                  L-----456
                  R-----1001
```

3.18.5. Память

Иногда вы можете услышать от программистов на Си++ «выделить память на/в стеке» и/или «выделить память в [куче](#)».

Выделение памяти *на стеке*:

```
void f()
{
    ...

    Class o=Class(...);

    ...
};
```

Память для объекта (или структуры) выделяется в стеке, при помощи простого сдвига [SP](#). Память освобождается во время выхода из ф-ции, или, более точно, в конце *области видимости (scope)*—[SP](#) возвращается в своё состояние (такое же, как при старте ф-ции) и вызывается деструктор класса *Class*. В такой же манере, выделяется и освобождается память для структуры в Си.

Выделение памяти для объекта *в куче*:

```
void f1()
{
    ...

    Class *o=new Class(...);

    ...
};

void f2()
{
    ...

    delete o;

    ...
};
```

```
};
```

Это то же самое, как и выделять память для структуры используя ф-цию *malloc()*. На самом деле, *new* в Си++ это *wrapper* для *malloc()*, а *delete* это *wrapper* для *free()*. Т.к., блок памяти был выделен в *куче*, он должен быть освобожден явно, используя *delete*. Деструктор класса будет автоматически вызван прямо перед этим моментом.

Какой метод лучше? Выделение *на стеке* очень быстрое и подходит для маленьких объектов с коротким сроком жизни, которые будут использоваться только в текущей ф-ции.

Выделение *в куче* медленнее, и лучше для объектов с долгим сроком жизни, которые будут использоваться в нескольких (или многих) ф-циях. Также, объекты выделенные в *куче* подвержены утечкам памяти, потому что их нужно освобождать явно, но об этом легко забыть.

Так или иначе, это дело вкуса.

3.19. Отрицательные индексы массивов

Возможно адресовать место в памяти *перед* массивом задавая отрицательный индекс, например, *array[-1]*.

3.19.1. Адресация строки с конца

ЯП Питон позволяет адресовать строки с конца. Например, *string[-1]* возвращает последний символ, *string[-2]* возвращает предпоследний, итд. Трудно поверить, но в Си/Си++ это также возможно:

```
#include <string.h>
#include <stdio.h>

int main()
{
    char *s="Hello, world!";
    char *s_end=s+strlen(s);

    printf ("last character: %c\n", s_end[-1]);
    printf ("penultimate character: %c\n", s_end[-2]);
};
```

Это работает, но *s_end* должен всегда содержать адрес оканчивающего нулевого байта строки *s*. Если длина строки *s* изменилась, *s_end* должен обновиться.

Это сомнительный трюк, но опять же, это хорошая демонстрация отрицательных индексов.

3.19.2. Адресация некоторого блока с конца

Вначале вспомним, почему стек растет в обратную сторону (1.7.1 (стр. 31)). Есть в памяти какой-то блок и вам нужно держать там и кучу (*heap*) и стек, и вы не уверены, насколько вырастут обе структуры во время исполнения кода.

Вы можете установить указатель *heap* в начало блока, затем установить указатель *stack* в конец блока (*heap + size_of_block*), затем вы можете адресовать *n*-ый элемент стека как *stack[-n]*. Например, *stack[-1]* для 1-го элемента, *stack[-2]* для 2-го, итд.

Это работает точно так же, как и трюк с адресацией строки с конца.

Проверять, не пересекаются ли структуры друг с другом легко: просто убедиться что адрес последнего элемента в *heap* всегда меньше чем адрес последнего элемента в *stack*.

К сожалению, индекс *-0* работать не будет, т.к. способ представления отрицательных чисел (*дополнительный код*, 2.2 (стр. 444)) не поддерживает отрицательный ноль, так что он не будет отличаться от положительного нуля.

Этот метод также упоминается в "Transaction processing" Jim Gray, 1993, глава "The Tuple-Oriented File System", стр. 755.

3.19.3. Массивы начинающиеся с 1

В Фортране и Mathematica первый элемент массива адресуется как 1-ый, вероятно, потому что так традиционно в математике. Другие ЯП как Си/Си++ адресуют его как 0-й. Как лучше? Эдсгер Дейкстра считал что последний способ лучше ³⁹.

Но привычка у программистов после Фортрана может остаться, так что все еще возможно адресовать первый элемент через 1 в Си/Си++ используя этот трюк:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int random_value=0x11223344;
    unsigned char array[10];
    int i;
    unsigned char *fakearray=&array[-1];

    for (i=0; i<10; i++)
        array[i]=i;

    printf ("first element %d\n", fakearray[1]);
    printf ("second element %d\n", fakearray[2]);
    printf ("last element %d\n", fakearray[10]);

    printf ("array[-1]=%02X, array[-2]=%02X, array[-3]=%02X, array[-4]=%02X\n",
        array[-1],
        array[-2],
        array[-3],
        array[-4]);
};
```

Листинг 3.119: Неоптимизирующий MSVC 2010

```
1 $SG2751 DB      'first element %d', 0aH, 00H
2 $SG2752 DB      'second element %d', 0aH, 00H
3 $SG2753 DB      'last element %d', 0aH, 00H
4 $SG2754 DB      'array[-1]=%02X, array[-2]=%02X, array[-3]=%02X, array[-4]'
5             DB      ']=%02X', 0aH, 00H
6
7 _fakearray$ = -24                ; size = 4
8 _random_value$ = -20            ; size = 4
9 _array$ = -16                   ; size = 10
10 _i$ = -4                       ; size = 4
11 _main PROC
12     push    ebp
13     mov     ebp, esp
14     sub     esp, 24
15     mov     DWORD PTR _random_value$[ebp], 287454020 ; 11223344H
16     ; установить fakearray[] на байт раньше перед array[]
17     lea     eax, DWORD PTR _array$[ebp]
18     add     eax, -1 ; eax=eax-1
19     mov     DWORD PTR _fakearray$[ebp], eax
20     mov     DWORD PTR _i$[ebp], 0
21     jmp     SHORT $LN3@main
22     ; заполнить array[] 0..9
23 $LN2@main:
24     mov     ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
25     add     ecx, 1
26     mov     DWORD PTR _i$[ebp], ecx
27 $LN3@main:
28     cmp     DWORD PTR _i$[ebp], 10
29     jge     SHORT $LN1@main
30     mov     edx, DWORD PTR _i$[ebp]
31     mov     al, BYTE PTR _i$[ebp]
32     mov     BYTE PTR _array$[ebp+edx], al
33     jmp     SHORT $LN2@main
34 $LN1@main:
```

³⁹See <https://www.cs.utexas.edu/users/EWD/transcriptions/EWD08xx/EWD831.html>

3.19. ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ МАССИВОВ

```

35      mov     ecx, DWORD PTR _fakearray$[ebp]
36      ; ecx=адрес fakearray[0], ecx+1 это fakearray[1] либо array[0]
37      movzx   edx, BYTE PTR [ecx+1]
38      push    edx
39      push    OFFSET $SG2751 ; 'first element %d'
40      call    _printf
41      add     esp, 8
42      mov     eax, DWORD PTR _fakearray$[ebp]
43      ; eax=адрес fakearray[0], eax+2 это fakearray[2] либо array[1]
44      movzx   ecx, BYTE PTR [eax+2]
45      push    ecx
46      push    OFFSET $SG2752 ; 'second element %d'
47      call    _printf
48      add     esp, 8
49      mov     edx, DWORD PTR _fakearray$[ebp]
50      ; edx=адрес fakearray[0], edx+10 это fakearray[10] либо array[9]
51      movzx   eax, BYTE PTR [edx+10]
52      push    eax
53      push    OFFSET $SG2753 ; 'last element %d'
54      call    _printf
55      add     esp, 8
56      ; отнять 4, 3, 2 и 1 от указателя array[0] чтобы найти значения, лежащие перед array[]
57      lea     ecx, DWORD PTR _array$[ebp]
58      movzx   edx, BYTE PTR [ecx-4]
59      push    edx
60      lea     eax, DWORD PTR _array$[ebp]
61      movzx   ecx, BYTE PTR [eax-3]
62      push    ecx
63      lea     edx, DWORD PTR _array$[ebp]
64      movzx   eax, BYTE PTR [edx-2]
65      push    eax
66      lea     ecx, DWORD PTR _array$[ebp]
67      movzx   edx, BYTE PTR [ecx-1]
68      push    edx
69      push    OFFSET $SG2754 ; 'array[-1]=%02X, array[-2]=%02X, array[-3]=%02X, array[-4]=%02X'
70      call    _printf
71      add     esp, 20
72      xor     eax, eax
73      mov     esp, ebp
74      pop     ebp
75      ret     0
76 _main     ENDP

```

Так что у нас тут массив `array[]` из десяти элементов, заполненный байтами 0...9.

Затем у нас указатель `fakearray[]` указывающий на один байт перед `array[]`. `fakearray[1]` указывает точно на `array[0]`. Но нам все еще любопытно, что же находится перед `array[]`? Мы добавляем `random_value` перед `array[]` и установим её в 0x11223344. Неоптимизирующий компилятор выделяет переменные в том же порядке, в котором они объявлены, так что да, 32-битная `random_value` находится точно перед массивом.

Запускаем, и:

```

first element 0
second element 1
last element 9
array[-1]=11, array[-2]=22, array[-3]=33, array[-4]=44

```

Фрагмент стека, который мы скопируем из окна стека в OllyDbg (включая комментарии автора):

Листинг 3.120: Неоптимизирующий MSVC 2010

Address	Value
001DFBCC	/001DFBD3 ; указатель fakearray
001DFBD0	|11223344 ; random_value
001DFBD4	|03020100 ; 4 байта array[]
001DFBD8	|07060504 ; 4 байта array[]
001DFBDC	|00CB0908 ; случайный мусор + 2 последних байта array[]
001DFBE0	|0000000A ; последнее значение i после того как закончился цикл

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
001DFBE4 |001DFC2C ; сохраненное значение EBP
001DFBE8 \00CB129D ; адрес возврата (RA)
```

Указатель на `fakearray[]` (`0x001DFBD3`) это действительно адрес `array[]` в стеке (`0x001DFBD4`), но минус 1 байт.

Трюк этот все-таки слишком хакерский и сомнительный. Вряд ли кто-то будет его использовать в своем коде, но для демонстрации, он здесь очень уместен.

3.20. Больше об указателях

The way C handles pointers, for example, was a brilliant innovation; it solved a lot of problems that we had before in data structuring and made the programs look good afterwards.

Дональд Кнут, интервью (1993)

Для тех, кому все еще трудно понимать указатели в Си/Си++, вот еще примеры. Некоторые из них крайне странные и служат только демонстрационным целям: использовать подобное в production-коде можно только если вы действительно понимаете, что вы делаете.

3.20.1. Работа с адресами вместо указателей

Указатель это просто адрес в памяти. Но почему мы пишем `char* string` вместо чего-нибудь вроде `address string`? Переменная-указатель дополнена типом переменной, на которую указатель указывает. Тогда у компилятора будет возможность находить потенциальные ошибки типизации во время компиляции.

Если быть педантом, типизация данных в языках программирования существует для предотвращения ошибок и самодокументации. Вполне возможно использовать только два типа данных вроде `int` (или `int64_t`) и байт — это те единственные типы, которые доступны для программистов на ассемблере. Но написать что-то больше и практичное на ассемблере, при этом без ошибок, это трудная задача. Любая мелкая опечатка может привести к труднонаходимой ошибке.

Информации о типах нет в скомпилированном коде (и это одна из основных проблем для декомпиляторов), и я могу это продемонстрировать.

Вот как напишет обычный программист на Си/Си++:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

void print_string (char *s)
{
    printf ("(address: 0x%llx)\n", s);
    printf ("%s\n", s);
};

int main()
{
    char *s="Hello, world!";

    print_string (s);
};
```

А вот что могу написать я:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

void print_string (uint64_t address)
{
    printf ("(address: 0x%llx)\n", address);
};
```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
puts ((char*)address);
};

int main()
{
    char *s="Hello, world!";

    print_string ((uint64_t)s);
};
```

Я использую `uint64_t` потому что я запускаю этот пример на Linux x64. `int` сгодится для 32-битных ОС. В начале, указатель на символ (самый первый в строке с приветствием) приводится к `uint64_t`, затем он передается далее. Ф-ция `print_string()` приводит тип переданного значения из `uint64_t` в указатель на символ.

Но вот что интересно, это то что GCC 4.8.4 генерирует идентичный результат на ассемблере для обеих версий:

```
gcc 1.c -S -masm=intel -O3 -fno-inline
```

```
.LC0:
    .string "(address: 0x%llx)\n"
print_string:
    push    rbx
    mov     rdx, rdi
    mov     rbx, rdi
    mov     esi, OFFSET FLAT:.LC0
    mov     edi, 1
    xor     eax, eax
    call    __printf_chk
    mov     rdi, rbx
    pop     rbx
    jmp     puts
.LC1:
    .string "Hello, world!"
main:
    sub     rsp, 8
    mov     edi, OFFSET FLAT:.LC1
    call    print_string
    add     rsp, 8
    ret
```

(Я убрал незначительные директивы GCC.)

Я также пробовал утилиту UNIX *diff* и не нашел разницы вообще.

Продолжим и дальше издеваться над традициями программирования в Си/Си++. Кто-то может написать так:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint8_t load_byte_at_address (uint8_t* address)
{
    return *address;
    //this is also possible: return address[0];
};

void print_string (char *s)
{
    char* current_address=s;
    while (1)
    {
        char current_char=load_byte_at_address(current_address);
        if (current_char==0)
            break;
        printf ("%c", current_char);
        current_address++;
    };
};
```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
int main()
{
    char *s="Hello, world!";

    print_string (s);
};
```

И это может быть переписано так:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint8_t load_byte_at_address (uint64_t address)
{
    return *(uint8_t*)address;
    //this is also possible: return address[0];
};

void print_string (uint64_t address)
{
    uint64_t current_address=address;
    while (1)
    {
        char current_char=load_byte_at_address(current_address);
        if (current_char==0)
            break;
        printf ("%c", current_char);
        current_address++;
    };
};

int main()
{
    char *s="Hello, world!";

    print_string ((uint64_t)s);
};
```

И тот и другой исходный код преобразуется в одинаковый результат на ассемблере:

```
gcc 1.c -S -masm=intel -O3 -fno-inline
```

```
load_byte_at_address:
    movzx    eax, BYTE PTR [rdi]
    ret
print_string:
.LFB15:
    push     rbx
    mov      rbx, rdi
    jmp      .L4
.L7:
    movsx    edi, al
    add      rbx, 1
    call     putchar
.L4:
    mov      rdi, rbx
    call     load_byte_at_address
    test     al, al
    jne      .L7
    pop      rbx
    ret
.LC0:
    .string "Hello, world!"
main:
    sub      rsp, 8
    mov      edi, OFFSET FLAT:.LC0
    call     print_string
    add      rsp, 8
    ret
```

(Здесь я также убрал незначительные директивы GCC.)

Разницы нет: указатели в Си/Си++, в сущности, адреса, но несут в себе также информацию о типе, чтобы предотвратить ошибки во время компиляции. Типы не проверяются во время исполнения, иначе это был бы огромный (и ненужный) прирост времени исполнения.

3.20.2. Передача значений как указателей; тэггированные объединения

Вот как можно передавать обычные значения как указатели:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>

uint64_t multiply1 (uint64_t a, uint64_t b)
{
    return a*b;
};

uint64_t* multiply2 (uint64_t *a, uint64_t *b)
{
    return (uint64_t*)((uint64_t)a*(uint64_t)b);
};

int main()
{
    printf ("%d\n", multiply1(123, 456));
    printf ("%d\n", (uint64_t)multiply2((uint64_t*)123, (uint64_t*)456));
};
```

Это работает нормально и GCC 4.8.4 компилирует обе ф-ции multiply1() и multiply2() полностью идентично!

```
multiply1:
    mov     rax, rdi
    imul    rax, rsi
    ret

multiply2:
    mov     rax, rdi
    imul    rax, rsi
    ret
```

Пока вы не разыменовываете указатель (*dereference*) (иными словами, если вы не пытаетесь прочитать данные по адресу в указателе), всё будет работать нормально. Указатель это переменная, которая может содержать что угодно, как и обычная переменная.

Здесь используется инструкция для знакового умножения (IMUL) вместо беззнакового (MUL), об этом читайте больше здесь: [2.2.1](#).

Кстати, это широко известный хак, называющийся *tagged pointers*. Если коротко, если все ваши указатели указывают на блоки в памяти размером, скажем, 16 байт (или они всегда выровнены по 16-байтной границе), 4 младших бита указателя будут всегда нулевыми, и это пространство может быть как-то использовано. Это очень популярно в компиляторах и интерпретаторах LISP. Они хранят тип ячейки/объекта в неиспользующихся битах, и так можно сэкономить немного памяти. И более того — имея только указатель, можно сразу выяснить тип ячейки/объекта, без дополнительного обращения к памяти. Читайте об этом больше: [Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++1.3*].

3.20.3. Издевательство над указателями в ядре Windows

Секция ресурсов в исполняемых файлах типа PE в Windows это секция, содержащая картинки, иконки, строки, итд. Ранние версии Windows позволяли иметь к ним доступ только при помощи идентификаторов, но потом в Microsoft добавили также и способ адресовать ресурсы при помощи строк.

Так что потом стало возможным передать идентификатор или строку в ф-цию [FindResource\(\)](#). Которая декларирована вот так:


```
HRSRC WINAPI FindResource(
    _In_opt_ HMODULE hModule,
    _In_     LPCTSTR lpName,
    _In_     LPCTSTR lpType
);
```

lpName и *lpType* имеют тип *char** или *wchar**, и когда кто-то всё еще хочет передать идентификатор, нужно использовать макрос [MAKEINTRESOURCE](#), вот так:

```
result = FindResource(..., MAKEINTRESOURCE(1234), ...);
```

Очень интересно то, что всё что делает `MAKEINTRESOURCE` это приводит целочисленное к указателю. В MSVC 2013, в файле *Microsoft SDKs\Windows\v7.1A\Include\Ks.h*, мы можем найти это:

```
...

#if (!defined( MAKEINTRESOURCE ))
#define MAKEINTRESOURCE( res ) ((ULONG_PTR) (USHORT) res)
#endif

...
```

Звучит безумно. Заглянем внутрь древнего, когда-то утекшего, исходного кода Windows NT4. В *private/windows/base/client/module.c* мы можем найти исходный код *FindResource()*:

```
HRSRC
FindResourceA(
    HMODULE hModule,
    LPCSTR lpName,
    LPCSTR lpType
)
...
{
    NTSTATUS Status;
    ULONG IdPath[ 3 ];
    PVOID p;

    IdPath[ 0 ] = 0;
    IdPath[ 1 ] = 0;
    try {
        if ((IdPath[ 0 ] = BaseDllMapResourceIdA( lpType )) == -1) {
            Status = STATUS_INVALID_PARAMETER;
        }
        else
            if ((IdPath[ 1 ] = BaseDllMapResourceIdA( lpName )) == -1) {
                Status = STATUS_INVALID_PARAMETER;
            }
    }
    ...
}
```

Посмотрим в *BaseDllMapResourceIdA()* в том же исходном файле:

```
ULONG
BaseDllMapResourceIdA(
    LPCSTR lpId
)
{
    NTSTATUS Status;
    ULONG Id;
    UNICODE_STRING UnicodeString;
    ANSI_STRING AnsiString;
    PWSTR s;

    try {
        if ((ULONG)lpId & LDR_RESOURCE_ID_NAME_MASK) {
            if (*lpId == '#') {
                Status = RtlCharToInteger( lpId+1, 10, &Id );
                if (!NT_SUCCESS( Status ) || Id & LDR_RESOURCE_ID_NAME_MASK) {
```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
        if (NT_SUCCESS( Status )) {
            Status = STATUS_INVALID_PARAMETER;
        }
        BaseSetLastNtError( Status );
        Id = (ULONG)-1;
    }
else {
    RtlInitAnsiString( &AnsiString, lpId );
    Status = RtlAnsiStringToUnicodeString( &UnicodeString,
                                           &AnsiString,
                                           TRUE
                                           );

    if (!NT_SUCCESS( Status )){
        BaseSetLastNtError( Status );
        Id = (ULONG)-1;
    }
    else {
        s = UnicodeString.Buffer;
        while (*s != UNICODE_NULL) {
            *s = RtlUppcaseUnicodeChar( *s );
            s++;
        }

        Id = (ULONG)UnicodeString.Buffer;
    }
}
else {
    Id = (ULONG)lpId;
}
}
except (EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER) {
    BaseSetLastNtError( GetExceptionCode() );
    Id = (ULONG)-1;
}
return Id;
}
```

К *lpId* применяется операция “И” с *LDR_RESOURCE_ID_NAME_MASK*. Маску можно найти в *public/sdk/inc/ntldr*.

```
...
#define LDR_RESOURCE_ID_NAME_MASK 0xFFFF0000
...
```

Так что к *lpId* применяется операция “И” с *0xFFFF0000*, и если присутствуют какие-либо биты за младшими 16 битами, выполняется первая часть ф-ции и (*lpId* принимается за адрес строки). Иначе — вторая часть ф-ции (*lpId* принимается за 16-битное значение).

Этот же код можно найти и в Windows 7, в файле *kernel32.dll*:

```
....
.text:0000000078D24510 ; __int64 __fastcall BaseDllMapResourceIdA(PCSZ SourceString)
.text:0000000078D24510 BaseDllMapResourceIdA proc near          ; CODE XREF: FindResourceExA+34
.text:0000000078D24510                                     ; FindResourceExA+4B
.text:0000000078D24510
.text:0000000078D24510 var_38             = qword ptr -38h
.text:0000000078D24510 var_30             = qword ptr -30h
.text:0000000078D24510 var_28             = _UNICODE_STRING ptr -28h
.text:0000000078D24510 DestinationString= _STRING ptr -18h
.text:0000000078D24510 arg_8              = dword ptr  10h
.text:0000000078D24510
.text:0000000078D24510 ; FUNCTION CHUNK AT .text:0000000078D42FB4 SIZE 000000D5 BYTES
.text:0000000078D24510
.text:0000000078D24510             push    rbx
.text:0000000078D24512             sub     rsp, 50h
.text:0000000078D24516             cmp     rcx, 10000h
```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
.text:0000000078D2451D          jnb     loc_78D42FB4
.text:0000000078D24523          mov     [rsp+58h+var_38], rcx
.text:0000000078D24528          jmp     short $+2
.text:0000000078D2452A ; ↵
    ↵ -----
.text:0000000078D2452A
.text:0000000078D2452A loc_78D2452A:          ; CODE XREF: ↵
    ↵ BaseDllMapResourceIdA+18
.text:0000000078D2452A          ; BaseDllMapResourceIdA+1EAD0
.text:0000000078D2452A          jmp     short $+2
.text:0000000078D2452C ; ↵
    ↵ -----
.text:0000000078D2452C
.text:0000000078D2452C loc_78D2452C:          ; CODE XREF: ↵
    ↵ BaseDllMapResourceIdA:loc_78D2452A
.text:0000000078D2452C          ; BaseDllMapResourceIdA+1EB74
.text:0000000078D2452C          mov     rax, rcx
.text:0000000078D2452C          add     rsp, 50h
.text:0000000078D2452F          pop     rbx
.text:0000000078D24533          pop     rbp
.text:0000000078D24534          retn
.text:0000000078D24534 ; ↵
    ↵ -----
.text:0000000078D24535          align 20h
.text:0000000078D24535 BaseDllMapResourceIdA endp

....

.text:0000000078D42FB4 loc_78D42FB4:          ; CODE XREF: ↵
    ↵ BaseDllMapResourceIdA+D
.text:0000000078D42FB4          cmp     byte ptr [rcx], '#'
.text:0000000078D42FB7          jnz     short loc_78D43005
.text:0000000078D42FB9          inc     rcx
.text:0000000078D42FBC          lea     r8, [rsp+58h+arg_8]
.text:0000000078D42FC1          mov     edx, 0Ah
.text:0000000078D42FC6          call    cs:__imp_RtlCharToInteger
.text:0000000078D42FCC          mov     ecx, [rsp+58h+arg_8]
.text:0000000078D42FD0          mov     [rsp+58h+var_38], rcx
.text:0000000078D42FD5          test    eax, eax
.text:0000000078D42FD7          js      short loc_78D42FE6
.text:0000000078D42FD9          test    rcx, 0FFFFFFFFFFFFFF0000h
.text:0000000078D42FE0          jz      loc_78D2452A

....
```

Если значение больше чем 0x10000, происходит переход в то место, где обрабатывается строка. Иначе, входное значение *lpId* возвращается как есть. Маска 0xFFFF0000 здесь больше не используется, т.к., это все же 64-битный код, но всё-таки, маска 0xFFFFFFFFFFFF0000 могла бы здесь использоваться.

Внимательный читатель может спросить, что если адрес входной строки будет ниже 0x10000? Этот код полагается на тот факт, что в Windows нет ничего по адресам ниже 0x10000, по крайней мере, в Win32.

Raymond Chen [пишет](#) об этом:

How does MAKEINTRESOURCE work? It just stashes the integer in the bottom 16 bits of a pointer, leaving the upper bits zero. This relies on the convention that the first 64KB of address space is never mapped to valid memory, a convention that is enforced starting in Windows 7.

Коротко говоря, это грязный хак, и наверное не стоит его использовать, если только нет большой необходимости. Вероятно, аргумент ф-ции *FindResource()* в прошлом имел тип *SHORT*, а потом в Microsoft добавили возможность передавать здесь и строки, но старый код также нужно было поддерживать.

Вот мой короткий очищенный пример:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
```

```
void f(char* a)
{
    if (((uint64_t)a)>0x10000)
        printf ("Pointer to string has been passed: %s\n", a);
    else
        printf ("16-bit value has been passed: %d\n", (uint64_t)a);
};

int main()
{
    f("Hello!"); // pass string
    f((char*)1234); // pass 16-bit value
};
```

Работает!

Издавательство над указателями в ядре Linux

Как было упомянуто среди [комментариев на Hacker News](#), в ядре Linux также есть что-то подобное. Например, эта ф-ция может возвращать и код ошибки и указатель:

```
struct kernfs_node *kernfs_create_link(struct kernfs_node *parent,
                                       const char *name,
                                       struct kernfs_node *target)
{
    struct kernfs_node *kn;
    int error;

    kn = kernfs_new_node(parent, name, S_IFLNK|S_IRWXUGO, KERNFS_LINK);
    if (!kn)
        return ERR_PTR(-ENOMEM);

    if (kernfs_ns_enabled(parent))
        kn->ns = target->ns;
    kn->symlink.target_kn = target;
    kernfs_get(target);    /* ref owned by symlink */

    error = kernfs_add_one(kn);
    if (!error)
        return kn;

    kernfs_put(kn);
    return ERR_PTR(error);
}
```

(<https://github.com/torvalds/linux/blob/fceef393a538134f03b778c5d2519e670269342f/fs/kernfs/symlink.c#L25>)

`ERR_PTR` это макрос, приводящий целочисленное к указателю:

```
static inline void * __must_check ERR_PTR(long error)
{
    return (void *) error;
}
```

(<https://github.com/torvalds/linux/blob/61d0b5a4b2777dcf5daef245e212b3c1fa8091ca/tools/virtio/linux/err.h>)

Этот же заголовочный файл имеет также макрос, который можно использовать, чтобы отличить код ошибки от указателя:

```
#define IS_ERR_VALUE(x) unlikely((x) >= (unsigned long)-MAX_ERRNO)
```

Это означает, коды ошибок это “указатели” очень близкие к -1, и, будем надеяться, в памяти ядра ничего не находится по адресам вроде 0xFFFFFFFFFFFFFFFF, 0xFFFFFFFFFFFFFFFE, 0xFFFFFFFFFFFFFFFD, итд.

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

Намного более популярный способ это возвращать *NULL* в случае ошибки и передавать код ошибки через дополнительный аргумент. Авторы ядра Linux так не делают, но все кто пользуется этими функциями, должны помнить, что возвращаемый указатель должен быть вначале проверен при помощи *IS_ERR_VALUE* перед разыменовыванием.

Например:

```
fman->cam_offset = fman_muram_alloc(fman->muram, fman->cam_size);
if (IS_ERR_VALUE(fman->cam_offset)) {
    dev_err(fman->dev, "%s: MURAM alloc for DMA CAM failed\n",
            __func__);
    return -ENOMEM;
}
```

(<https://github.com/torvalds/linux/blob/aa00edc1287a693eadc7bc67a3d73555d969b35d/drivers/net/ethernet/freescale/fman/fman.c#L826>)

Издавательство над указателями в пользовательской среде UNIX

Ф-ция *mmap()* возвращает -1 в случае ошибки (или *MAP_FAILED*, что равно -1). Некоторые люди говорят, что в некоторых случаях, *mmap()* может подключить память по нулевому адресу, так что использовать 0 или *NULL* как код ошибки нельзя.

3.20.4. Нулевые указатели

Ошибка “Null pointer assignment” во времена MS-DOS

Некоторые люди постарше могут помнить очень странную ошибку эпохи MS-DOS: “Null pointer assignment”. Что она означает?

В *NIX и Windows нельзя записывать в память по нулевому адресу, но это было возможно в MS-DOS, из-за отсутствия защиты памяти как таковой.

Так что я могу найти древний Turbo C++ 3.0 (позже он был переименован в C++) из начала 1990-х и попытаться скомпилировать это:

```
#include <stdio.h>

int main()
{
    int *ptr=NULL;
    *ptr=1234;
    printf ("Now let's read at NULL\n");
    printf ("%d\n", *ptr);
};
```

Трудно поверить, но это работает, но с ошибкой при выходе:

Листинг 3.121: Древний Turbo C++ 3.0

```
C:\TC30\BIN\1
Now let's read at NULL
1234
Null pointer assignment
C:\TC30\BIN>_
```

Посмотрим внутри исходного кода [CRT](#) компилятора Borland C++ 3.1, файл *c0.asm*:

```
;      _checknull()      check for null pointer zapping copyright message
...
;      Check for null pointers before exit

__checknull      PROC      DIST
                  PUBLIC   __checknull
```

```

IF      LDATA EQ false
IFDEF  __TINY__
        push    si
        push    di
        mov     es, cs:DGROUP@@
        xor     ax, ax
        mov     si, ax
        mov     cx, lgth_CopyRight
ComputeChecksum label near
        add     al, es:[si]
        adc     ah, 0
        inc     si
        loop    ComputeChecksum
        sub     ax, CheckSum
        jz      @@SumOK
        mov     cx, lgth_NullCheck
        mov     dx, offset DGROUP: NullCheck
        call    ErrorDisplay
@@SumOK:
        pop     di
        pop     si
    ENDIF
ENDIF

_DATA          SEGMENT

;           Magic symbol used by the debug info to locate the data segment
            public DATASEG@
DATASEG@      label    byte

;           The Copyright string must NOT be moved or changed without
;           changing the null pointer check logic

Copyright     db      4 dup(0)
              db      'Borland C++ - Copyright 1991 Borland Intl.',0
lgth_CopyRight equ    $ - Copyright

IF      LDATA EQ false
IFDEF  __TINY__
Checksum      equ     00D5Ch
NullCheck     db      'Null pointer assignment', 13, 10
lgth_NullCheck equ    $ - NullCheck
ENDIF
ENDIF

...

```

Модель памяти в MS-DOS крайне странная (10.6), и, вероятно, её и не нужно изучать, если только вы не фанат ретрокомпьютинга или ретрогейминга. Одну только вещь можно держать в памяти, это то, что сегмент памяти (включая сегмент данных) в MS-DOS это место где хранится код или данные, но в отличие от “серьезных” ОС, он начинается с нулевого адреса.

И в Borland C++ CRT, сегмент данных начинается с 4-х нулевых байт и строки копирайта “Borland C++ - Copyright 1991 Borland Intl.”. Целостность 4-х нулевых байт и текстовой строки проверяется в конце, и если что-то нарушено, выводится сообщение об ошибке.

Но зачем? Запись по нулевому указателю это распространенная ошибка в Си/Си++, и если вы делаете это в *NIX или Windows, ваше приложение упадет. В MS-DOS нет защиты памяти, так что это приходится проверять в CRT во время выхода, пост-фактум. Если вы видите это сообщение, значит ваша программа в каком-то месте что-то записала по нулевому адресу.

Наша программа это сделала. И вот почему число 1234 было прочитано корректно: потому что оно было записано на месте первых 4-х байт. Контрольная сумма во время выхода неверна (потому что наше число там осталось), так что сообщение было выведено.

Прав ли я? Я переписал программу для проверки моих предположений:

```

#include <stdio.h>

int main()

```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
{
    int *ptr=NULL;
    *ptr=1234;
    printf ("Now let's read at NULL\n");
    printf ("%d\n", *ptr);
    *ptr=0; // psst, cover our tracks!
};
```

Программа выполняется без ошибки во время выхода.

Хотя и метод предупреждать о записи по нулевому указателю имел смысл в MS-DOS, вероятно, это всё может использоваться и сегодня, на маломощных MCU без защиты памяти и/или MMU⁴⁰.

Почему кому-то может понадобиться писать по нулевому адресу?

Но почему трезвомыслящему программисту может понадобиться записывать что-то по нулевому адресу? Это может быть сделано случайно, например, указатель должен быть инициализирован и указывать на только что выделенный блок в памяти, а затем должен быть передан в какую-то ф-цию, возвращающую данные через указатель.

```
int *ptr=NULL;

... мы забыли выделить память и инициализировать ptr

strcpy (ptr, buf); // strcpy() завершает работу молча, потому что в MS-DOS нет защиты памяти
```

И даже хуже:

```
int *ptr=malloc(1000);

... мы забыли проверить, действительно ли память была выделена: это же MS-DOS и у тогдашних ↴
  ↴ компьютеров было мало памяти,
... и нехватка памяти была обычной ситуацией.
... если malloc() вернул NULL, тогда ptr будет тоже NULL.

strcpy (ptr, buf); // strcpy() завершает работу молча, потому что в MS-DOS нет защиты памяти
```

NULL в Си/Си++

NULL в C/C++ это просто макрос, который часто определяют так:

```
#define NULL ((void*)0)
```

([libio.h file](#))

*void** это тип данных, отражающий тот факт, что это указатель, но на значение неизвестного типа (*void*).

NULL обычно используется чтобы показать отсутствие объекта. Например, у вас есть односвязный список, и каждый узел имеет значение (или указатель на значение) и указатель вроде *next*. Чтобы показать, что следующего узла нет, в поле *next* записывается 0. Другие решения просто хуже. Вероятно, вы можете использовать какую-то крайне экзотическую среду, где можно выделить память по нулевому адресу. Как вы будете показывать отсутствие следующего узла? Какой-нибудь *magic number*? Может быть -1? Или дополнительным битом?

В Википедии мы можем найти это:

In fact, quite contrary to the zero page's original preferential use, some modern operating systems such as FreeBSD, Linux and Microsoft Windows[2] actually make the zero page inaccessible to trap uses of NULL pointers.

(https://en.wikipedia.org/wiki/Zero_page)

⁴⁰Memory Management Unit

Нулевой указатель на ф-цию

Можно вызывать ф-ции по их адресу. Например, я компилирую это при помощи MSVC 2010 и запускаю в Windows 7:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

int main()
{
    printf ("0x%x\n", &MessageBoxA);
};
```

Результат `0x7578feae`, и он не меняется и после того, как я запустил это несколько раз, потому что `user32.dll` (где находится ф-ция `MessageBoxA`) всегда загружается по одному и тому же адресу. И потому что [ASLR](#)⁴¹ не включено (тогда результат был бы всё время разным).

Вызовем ф-цию `MessageBoxA()` по адресу:

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

typedef int (*msgboxtype)(HWND hWnd, LPCTSTR lpText, LPCTSTR lpCaption,  UINT uType);

int main()
{
    msgboxtype msgboxaddr=0x7578feae;

    // заставить загрузиться DLL в память процесса,
    // тк.., наш код не использует никакую ф-цию– из user32.dll,
    // и DLL не импортируется
    LoadLibrary ("user32.dll");

    msgboxaddr(NULL, "Hello, world!", "hello", MB_OK);
};
```

Странно выглядит, но работает в Windows 7 x86.

Это часто используется в шеллкода, потому что оттуда трудно вызывать ф-ции из DLL по их именам. А [ASLR](#) это контрмера.

И вот теперь что по-настоящему странно выглядит, некоторые программисты на Си для встраиваемых (embedded) систем, могут быть знакомы с таким кодом:

```
int reset()
{
    void (*foo)(void) = 0;
    foo();
};
```

Кому понадобится вызывать ф-цию по адресу 0? Это портатбельный способ перейти на нулевой адрес. Множество маломощных микроконтроллеров не имеют защиты памяти или [MMU](#), и после сброса, они просто начинают исполнять код по нулевому адресу, где может быть записан инициализирующий код. Так что переход по нулевому адресу это способ сброса. Можно использовать и `inline`-ассемблер, но если это неудобно, тогда можно использовать этот портатбельный метод.

Это даже корректно компилируется при помощи GCC 4.8.4 на Linux x64:

```
reset:
    sub    rsp, 8
    xor    eax, eax
    call   rax
    add    rsp, 8
    ret
```

То обстоятельство, что указатель стека сдвинут, это не проблема: инициализирующий код в микроконтроллерах обычно полностью игнорирует состояние регистров и памяти и загружает всё “с чистого листа”.

⁴¹Address Space Layout Randomization

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

И конечно, этот код упадет в *NIX или Windows, из-за защиты памяти, и даже если бы её не было, по нулевому адресу нет никакого кода.

В GCC даже есть нестандартное расширение, позволяющее перейти по определенному адресу, вместо того чтобы вызывать ф-цию: <http://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Labels-as-Values.html>.

3.20.5. Массив как аргумент функции

Кто-то может спросить, какая разница между объявлением аргумента ф-ции как массива и как указателя?

Как видно, разницы вообще нет:

```
void write_something1(int a[16])
{
    a[5]=0;
};

void write_something2(int *a)
{
    a[5]=0;
};

int f()
{
    int a[16];
    write_something1(a);
    write_something2(a);
};
```

Оптимизирующий GCC 4.8.4:

```
write_something1:
    mov     DWORD PTR [rdi+20], 0
    ret

write_something2:
    mov     DWORD PTR [rdi+20], 0
    ret
```

Но вы можете объявлять массив вместо указателя для самодокументации, если размер массива известен заранее и определен. И может быть, какой-нибудь инструмент для статического анализа выявит возможное переполнение буфера. Или такие инструменты есть уже сегодня?

Некоторые люди, включая Линуса Торвальдса, критикуют эту возможность Си/Си++: <https://lkm1.org/lkm1/2015/9/3/428>.

В стандарте C99 имеется также ключевое слово *static* [ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard), (2007) 6.7.5.3]:

If the keyword *static* also appears within the [and] of the array type derivation, then for each call to the function, the value of the corresponding actual argument shall provide access to the first element of an array with at least as many elements as specified by the size expression.

3.20.6. Указатель на функцию

Имя ф-ции в Си/Си++ без скобок, как “printf” это указатель на ф-цию типа *void (*)()*. Попробуем прочитать содержимое ф-ции и пропатчить его:

```
#include <memory.h>
#include <stdio.h>

void print_something ()
{
```

3.20. БОЛЬШЕ ОБ УКАЗАТЕЛЯХ

```
printf ("we are in %s()\n", __FUNCTION__);
};

int main()
{
    print_something();
    printf ("first 3 bytes: %x %x %x...\n",
           *((unsigned char*)print_something,
           *((unsigned char*)print_something+1),
           *((unsigned char*)print_something+2));

    *(unsigned char*)print_something=0xC3; // opcode of RET
    printf ("going to call patched print_something():\n");
    print_something();
    printf ("it must exit at this point\n");
};
```

При запуске видно что первые 3 байта ф-ции это 55 89 e5. Действительно, это опкоды инструкций PUSH EBP и MOV EBP, ESP (это опкоды x86). Но потом процесс падает, потому что секция *text* доступна только для чтения.

Мы можем перекомпилировать наш пример и сделать так, чтобы секция *text* была доступна для записи ⁴²:

```
gcc --static -g -Wl,--omagic -o example example.c
```

Это работает!

```
we are in print_something()
first 3 bytes: 55 89 e5...
going to call patched print_something():
it must exit at this point
```

3.20.7. Указатель как идентификатор объекта

В ассемблере и Си нет возможностей ООП, но там вполне можно писать код в стиле ООП (просто относитесь к структуре, как к объекту).

Интересно что, иногда, указатель на объект (или его адрес) называется идентификатором (в смысле сокрытия данных/инкапсуляции).

Например, LoadLibrary(), судя по MSDN⁴³, возвращает "handle" модуля ⁴⁴. Затем вы передаете этот "handle" в другую ф-цию вроде GetProcAddress(). Но на самом деле, LoadLibrary() возвращает указатель на DLL-файл загруженный (*mapped*) в памяти ⁴⁵. Вы можете прочитать два байта по адресу возвращенному LoadLibrary(), и это будет "MZ" (первые два байта любого файла типа .EXE/.DLL в Windows).

Очевидно, Microsoft "скрывает" этот факт для обеспечения лучшей совместимости в будущем. Также, типы данных HMODULE и HINSTANCE имели другой смысл в 16-битной Windows.

Возможно, это причина, почему printf() имеет модификатор "%p", который используется для вывода указателей (32-битные целочисленные на 32-битных архитектурах, 64-битные на 64-битных, итд) в шестнадцатеричной форме. Адрес структуры сохраненный в отладочном протоколе может помочь в поисках такого же в том же протоколе.

Вот например из исходного кода SQLite:

```
...

struct Pager {
    sqlite3_vfs *pVfs;           /* OS functions to use for IO */
    u8 exclusiveMode;           /* Boolean. True if locking_mode==EXCLUSIVE */
};
```

⁴²<http://stackoverflow.com/questions/27581279/make-text-segment-writable-elf>

⁴³Microsoft Developer Network

⁴⁴[https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/windows/desktop/ms684175\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/ru-ru/library/windows/desktop/ms684175(v=vs.85).aspx)

⁴⁵<https://blogs.msdn.microsoft.com/oldnewthing/20041025-00/?p=37483>

3.21. ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ

```
u8 journalMode;          /* One of the PAGER_JOURNALMODE_* values */
u8 useJournal;           /* Use a rollback journal on this file */
u8 noSync;               /* Do not sync the journal if true */

....

static int pagerLockDb(Pager *pPager, int eLock){
    int rc = SQLITE_OK;

    assert( eLock==SHARED_LOCK || eLock==RESERVED_LOCK || eLock==EXCLUSIVE_LOCK );
    if( pPager->eLock<eLock || pPager->eLock==UNKNOWN_LOCK ){
        rc = sqlite3OsLock(pPager->fd, eLock);
        if( rc==SQLITE_OK && (pPager->eLock!=UNKNOWN_LOCK||eLock==EXCLUSIVE_LOCK) ){
            pPager->eLock = (u8)eLock;
            IOTRACE(("LOCK %p %d\n", pPager, eLock))
        }
    }
    return rc;
}

...

PAGER_INCR(sqlite3_pager_readdb_count);
PAGER_INCR(pPager->nRead);
IOTRACE(("PGIN %p %d\n", pPager, pgno));
PAGERTRACE(("FETCH %d page %d hash(%08x)\n",
            PAGERID(pPager), pgno, pager_pagehash(pPg)));

...
```

3.21. Оптимизации циклов

3.21.1. Странная оптимизация циклов

Это самая простая (из всех возможных) реализация memcpy():

```
void memcpy (unsigned char* dst, unsigned char* src, size_t cnt)
{
    size_t i;
    for (i=0; i<cnt; i++)
        dst[i]=src[i];
};
```

Как минимум MVC 6.0 из конца 90-х вплоть до MSVC 2013 может выдавать вот такой странный код (этот листинг создан MSVC 2013 x86):

```
_dst$ = 8          ; size = 4
_src$ = 12         ; size = 4
_cnt$ = 16         ; size = 4
_memcpy PROC
    mov     edx, DWORD PTR _cnt$[esp-4]
    test    edx, edx
    je      SHORT $LN1@f
    mov     eax, DWORD PTR _dst$[esp-4]
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _src$[esp]
    sub     esi, eax
; ESI=src-dst, те.., разница указателей
$LL8@f:
    mov     cl, BYTE PTR [esi+eax] ; загрузить байт на "esi+dst" или на "src-dst+dst" в
начале, или просто на "src"
    lea     eax, DWORD PTR [eax+1] ; dst++
    mov     BYTE PTR [eax-1], cl   ; сохранить байт на "(dst++)--", или просто на "dst" в
начале
    dec     edx                   ; декремент счетчика, пока не закончим
    jne     SHORT $LL8@f
    pop     esi
```

3.21. ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ

```
$LN1@f:
    ret     0
_memcpy ENDP
```

Это всё странно, потому что как люди работают с двумя указателями? Они сохраняют два адреса в двух регистрах или двух ячейках памяти. Компилятор MSVC в данном случае сохраняет два указателя как один указатель (*скользящий dst* в EAX) и разницу между указателями *src* и *dst* (она остается неизменной во время исполнения цикла, в ESI). (Кстати, это тот редкий случай, когда можно использовать тип `ptrdiff_t`.) Когда нужно загрузить байт из *src*, он загружается на *diff* + *скользящий dst* и сохраняет байт просто на *скользящем dst*.

Должно быть это какой-то трюк для оптимизации. Но я переписал эту ф-цию так:

```
_f2 PROC
    mov     edx, DWORD PTR _cnt$[esp-4]
    test    edx, edx
    je      SHORT $LN1@f
    mov     eax, DWORD PTR _dst$[esp-4]
    push    esi
    mov     esi, DWORD PTR _src$[esp]
    ; eax=dst; esi=src
$LL8@f:
    mov     cl, BYTE PTR [esi+edx]
    mov     BYTE PTR [eax+edx], cl
    dec     edx
    jne     SHORT $LL8@f
    pop     esi
$LN1@f:
    ret     0
_f2 ENDP
```

...и она работает также быстро как и *соптимизированная* версия на моем Intel Xeon E31220 @ 3.10GHz. Может быть, эта оптимизация предназначалась для более старых x86-процессоров 90-х, т.к., этот трюк использует как минимум древний MS VC 6.0?

Есть идеи?

Hex-Rays 2.2 не распознает такие шаблонные фрагменты кода (будем надеяться, это временно?):

```
void __cdecl f1(char *dst, char *src, size_t size)
{
    size_t counter; // edx@1
    char *sliding_dst; // eax@2
    char tmp; // cl@3

    counter = size;
    if ( size )
    {
        sliding_dst = dst;
        do
        {
            tmp = (sliding_dst++)[src - dst];           // разница (src-dst) вычисляется один раз, ↗
            ↙ перед телом цикла
            *(sliding_dst - 1) = tmp;
            --counter;
        }
        while ( counter );
    }
}
```

Тем не менее, этот трюк часто используется в MSVC (и не только в самодельных ф-циях *memcpy()*, но также и во многих циклах, работающих с двумя или более массивами), так что для реверс-инжиниров стоит помнить об этом.

3.21.2. Еще одна оптимизация циклов

Если вы обрабатываете все элементы некоторого массива, который находится в глобальной памяти, компилятор может оптимизировать это. Например, вычисляем сумму всех элементов массива

3.21. ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛОВ

из 128-и *int*-ов:

```
#include <stdio.h>

int a[128];

int sum_of_a()
{
    int rt=0;

    for (int i=0; i<128; i++)
        rt=rt+a[i];

    return rt;
};

int main()
{
    // инициализация
    for (int i=0; i<128; i++)
        a[i]=i;

    // вычисляем сумму
    printf ("%d\n", sum_of_a());
};
```

Оптимизирующий GCC 5.3.1 (x86) может сделать так (IDA):

```
.text:080484B0 sum_of_a      proc near
.text:080484B0              mov     edx, offset a
.text:080484B5              xor     eax, eax
.text:080484B7              mov     esi, esi
.text:080484B9              lea     edi, [edi+0]
.text:080484C0              ; CODE XREF: sum_of_a+1B
.text:080484C0              add     eax, [edx]
.text:080484C2              add     edx, 4
.text:080484C5              cmp     edx, offset __libc_start_main@@GLIBC_2_0
.text:080484CB              jnz     short loc_80484C0
.text:080484CD              rep     retn
.text:080484CD sum_of_a      endp
.text:080484CD

...

.bss:0804A040              public a
.bss:0804A040 a              dd 80h dup(?) ; DATA XREF: main:loc_8048338
.bss:0804A040              ; main+19
.bss:0804A040 _bss          ends
.bss:0804A040

extern:0804A240 ; =====
extern:0804A240
extern:0804A240 ; Segment type: Externs
extern:0804A240 ; extern
extern:0804A240              extrn __libc_start_main@@GLIBC_2_0:near
extern:0804A240              ; DATA XREF: main+25
extern:0804A240              ; main+5D
extern:0804A244              extrn __printf_chk@@GLIBC_2_3_4:near
extern:0804A248              extrn __libc_start_main:near
extern:0804A248              ; CODE XREF: __libc_start_main
extern:0804A248              ; DATA XREF: .got.plt:off_804A00C
```

И что же такое `__libc_start_main@@GLIBC_2_0` на `0x080484C5`? Это метка, находящаяся сразу за концом массива `a[]`. Эта ф-ция может быть переписана так:

```
int sum_of_a_v2()
{
    int *tmp=a;
    int rt=0;
```

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

```
do
{
    rt=rt+(*tmp);
    tmp++;
}
while (tmp<(a+128));

return rt;
};
```

Первая версия имеет счетчик *i*, и адрес каждого элемента массива вычисляется на каждой итерации. Вторая версия более оптимизирована: указатель на каждый элемент массива всегда готов, и продвигается на 4 байта вперед на каждой итерации. Как проверить, закончился ли цикл? Просто сравните указатель с адресом сразу за концом массива, который, как случилось в нашем случае, это просто адрес импортируемой из Glibc 2.0 ф-ции `__libc_start_main()`. Такой когд иногда сбивает с толку, и это очень популярный оптимизационный трюк, поэтому я сделал этот пример.

Моя вторая версия очень близка к тому, что сделал GCC, и когда я компилирую её, код почти такой как и в первой версии, но две первых инструкции поменены местами:

```
.text:080484D0      public sum_of_a_v2
.text:080484D0 sum_of_a_v2      proc near
.text:080484D0      xor     eax, eax
.text:080484D2      mov     edx, offset a
.text:080484D7      mov     esi, esi
.text:080484D9      lea     edi, [edi+0]
.text:080484E0
.text:080484E0 loc_80484E0:      ; CODE XREF: sum_of_a_v2+1B
.text:080484E0      add     eax, [edx]
.text:080484E2      add     edx, 4
.text:080484E5      cmp     edx, offset __libc_start_main@@GLIBC_2_0
.text:080484EB      jnz     short loc_80484E0
.text:080484ED      rep     retn
.text:080484ED sum_of_a_v2      endp
```

Надо сказать, эта оптимизация возможна если компилятор, во время компиляции, может рассчитать адрес за концом массива. Это случается если массив глобальный и его размер фиксирован.

Хотя, если адрес массива не известен во время компиляции, но его размер фиксирован, адрес метки за концом массива можно вычислить в начале цикла.

3.22. Еще о структурах

3.22.1. Иногда вместо массива можно использовать структуру в Си

Арифметическое среднее

```
#include <stdio.h>

int mean(int *a, int len)
{
    int sum=0;
    for (int i=0; i<len; i++)
        sum=sum+a[i];
    return sum/len;
};

struct five_ints
{
    int a0;
    int a1;
    int a2;
    int a3;
    int a4;
};
```

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

```
int main()
{
    struct five_ints a;
    a.a0=123;
    a.a1=456;
    a.a2=789;
    a.a3=10;
    a.a4=100;
    printf ("%d\n", mean(&a, 5));
    // test: https://www.wolframalpha.com/input/?i=mean(123,456,789,10,100)
};
```

Это работает: ф-ция *mean()* никогда не будет читать за концом структуры *five_ints*, потому что передано 5, означая, что только 5 целочисленных значений будет прочитано.

Сохраняем строку в структуре

```
#include <stdio.h>

struct five_chars
{
    char a0;
    char a1;
    char a2;
    char a3;
    char a4;
} __attribute__((aligned (1),packed));

int main()
{
    struct five_chars a;
    a.a0='h';
    a.a1='i';
    a.a2='!';
    a.a3='\n';
    a.a4=0;
    printf (&a); // это печатает "hi!"
};
```

Нужно использовать атрибут *((aligned (1),packed))* потому что иначе, каждое поле структуры будет выровнено по 4-байтной или 8-байтной границе.

Итог

Это просто еще один пример, как структуры и массивы сохраняются в памяти. Вероятно, ни один программист в трезвом уме не будет делать так, как в этом примере, за исключением, может быть, какого-то очень специального хака. Или может быть в случае обфускации исходных текстов?

3.22.2. Безразмерный массив в структуре Си

В некоторых win32-структурах мы можем найти такие, где последнее поле определено как массив из одного элемента:

```
typedef struct _SYMBOL_INFO {
    ULONG    SizeOfStruct;
    ULONG    TypeIndex;

    ...

    ULONG    MaxNameLen;
    TCHAR    Name[1];
} SYMBOL_INFO, *PSYMBOL_INFO;
```

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

([https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680686\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680686(v=vs.85).aspx))

Это хак, в том смысле, что последнее поле это массив неизвестной длины, его размер будет вычислен во время выделения памяти под структуру.

Вот почему: поле *Name* может быть коротким, так зачем же тогда определять константу вроде *MAX_NAME*, которая может быть 128, 256, или даже больше?

Почему вместо этого не использовать указатель? Но тогда придется выделять два блока: один под структуру и второй под строку. Это может быть медленнее и может требовать больше затрат на память. Также, вам нужно разыменовывать указатель (т.е., читать адрес строки из структуры) — не очень большая проблема, но некоторые люди могут сказать вам, что это дополнительные расходы.

Это также известно как *struct hack*: <http://c-faq.com/struct/structhack.html>.

Например:

```
#include <stdio.h>

struct st
{
    int a;
    int b;
    char s[];
};

void f (struct st *s)
{
    printf ("%d %d %s\n", s->a, s->b, s->s);
    // f() не может заменить s[] большей строкой - длина выделенного блока неизвестна на
    этом этапе
};

int main()
{
#define STRING "Hello!"
    struct st *s=malloc(sizeof(struct st)+strlen(STRING)+1); // включая терминирующий ноль.
    s->a=1;
    s->b=2;
    strcpy (s->s, STRING);
    f(s);
};
```

Если коротко, это работает, потому что в Си нет проверок границ массивов. К любому массиву относятся так, будто он бесконечный.

Проблема: после выделения, полный размер выделенного блока для структуры неизвестен (хотя известен менеджеру памяти), так что вы не можете заменить строку большей строкой. Но вы бы смогли делать это, если бы поле было определено как что-то вроде *s[MAX_NAME]*.

Другими словами, вы имеете структуру плюс массив (или строку) спаянных вместе в одном выделенном блоке памяти. Другая проблема еще в том, что вы не можете объявить два таких массива в одной структуре, или объявить еще одно поле после такого массива.

Более старые компиляторы требуют объявить массив хотя бы с одним элементом: *s[1]*, более новые позволяют определять его как массив с переменной длиной: *s[]*. В стандарте C99 это также называется *flexible array member*⁴⁶.

Читайте об этом больше в документации GCC⁴⁷, в документации MSDN⁴⁸.

Деннис Ритчи (один из создателей Си) называет этот трюк «unwarranted chumminess with the C implementation» (вероятно, подтверждая хакерскую природу трюка).

Вам это может нравится, или нет, вы можете использовать это или нет: но это еще одна демонстрация того, как структуры располагаются в памяти, вот почему я написал об этом.

⁴⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Flexible_array_member

⁴⁷<https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/Zero-Length.html>

⁴⁸<https://msdn.microsoft.com/en-us/library/b6fae073.aspx>

3.22.3. Версия структуры в Си

Многие программисты под Windows видели это в MSDN:

SizeOfStruct

The size of the structure, in bytes. This member must be set to sizeof(SYMBOL_INFO).

([https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680686\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/ms680686(v=vs.85).aspx))

Некоторые структуры вроде *SYMBOL_INFO* действительно начинаются с такого поля. Почему? Это что-то вроде версии структуры.

Представьте, что у вас есть ф-ция, рисующая круги. Она берет один аргумент - указатель на структуру с двумя полями: X и Y. И затем цветные дисплеи наводнили рынок, где-то в 80-х. И вы хотите добавить аргумент *цвет* в ф-цию. Но, скажем так, вы не можете добавить еще один аргумент в нее (множество ПО используют ваше [API⁴⁹](#) и его нельзя перекомпилировать). И если какое-то старое ПО использует ваше [API](#) с цветным дисплеем, пусть ваша ф-ция рисует круг в цветах по умолчанию (черный и белый).

Позже вы добавляете еще одну возможность: круг может быть закрашен, и можно выбирать тип заливки.

Вот одно из решений проблемы:

```
#include <stdio.h>

struct ver1
{
    size_t SizeOfStruct;
    int coord_X;
    int coord_Y;
};

struct ver2
{
    size_t SizeOfStruct;
    int coord_X;
    int coord_Y;
    int color;
};

struct ver3
{
    size_t SizeOfStruct;
    int coord_X;
    int coord_Y;
    int color;
    int fill_brush_type; // 0 - не заливка круг
};

void draw_circle(struct ver3 *s) // здесь используется самая последняя версия структуры
{
    // мы полагаем что в SizeOfStruct всегда присутствуют поля coord_X и coord_Y
    printf ("Собираемся рисовать круг на %d:%d\n", s->coord_X, s->coord_Y);

    if (s->SizeOfStruct>=sizeof(int)*4)
    {
        // это минимум ver2, поле цвета присутствует
        printf ("Собираемся установить цвет %d\n", s->color);
    }

    if (s->SizeOfStruct>=sizeof(int)*5)
    {
        // это минимум ver3, присутствует поле с типом заливки
        printf ("Мы собираемся залить его используя тип
заливки %d\n", s->fill_brush_type);
    }
};
```

⁴⁹Application Programming Interface

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

```
// раннее ПО
void call_as_ver1()
{
    struct ver1 s;
    s.SizeOfStruct=sizeof(s);
    s.coord_X=123;
    s.coord_Y=456;
    printf ("** %s()\n", __FUNCTION__);
    draw_circle(&s);
};

// следующая версия
void call_as_ver2()
{
    struct ver2 s;
    s.SizeOfStruct=sizeof(s);
    s.coord_X=123;
    s.coord_Y=456;
    s.color=1;
    printf ("** %s()\n", __FUNCTION__);
    draw_circle(&s);
};

// самая поздняя, наиболее продвинутая версия
void call_as_ver3()
{
    struct ver3 s;
    s.SizeOfStruct=sizeof(s);
    s.coord_X=123;
    s.coord_Y=456;
    s.color=1;
    s.fill_brush_type=3;
    printf ("** %s()\n", __FUNCTION__);
    draw_circle(&s);
};

int main()
{
    call_as_ver1();
    call_as_ver2();
    call_as_ver3();
};
```

Другими словами, поле *SizeOfStruct* берет на себя роль поля *версия структуры*. Это может быть перечисляемый тип (1, 2, 3, итд.), но установка поля *SizeOfStruct* равным *sizeof(struct...)*, это лучше защищено от ошибок.

В Си++ эта проблема решается *наследованием* (3.18.1 (стр. 539)). Просто расширяете ваш базовый класс (назовем его *Circle*), и затем вам нужен *ColoredCircle*, а потом *FilledColoredCircle*, и так далее. Текущая *версия* объекта (или более точно, текущий *тип*) будет определяться при помощи *RTTI* в Си++.

Так что если вы где-то в *MSDN* видите *SizeOfStruct* — вероятно, эта структура уже расширялась в прошлом, как минимум один раз.

3.22.4. Файл с рекордами в игре «Block out» и примитивная сериализация

Многие видеоигры имеют файл с рекордами, иногда называемый «Зал славы». Древняя игра «Block out»⁵⁰ (трехмерный тетрис из 1989) не исключение, вот что мы можем увидеть в конце:

⁵⁰<http://www.bestoldgames.net/eng/old-games/blockout.php>

*** H A L L O F F A M E ***		
Pit: 7x7x18, Block Set: FLAT		
1. Xenia.....	479	(03-27-2018)
2. Paul.....	353	(03-27-2018)
3. John.....	326	(03-27-2018)
4. James.....	324	(03-27-2018)
5. Charlie...	234	(03-27-2018)
6. Mike.....	181	(03-27-2018)
7. Phil.....	172	(03-27-2018)
8. Mary.....	123	(03-27-2018)
9. Tom.....	119	(03-27-2018)
10. Bob.....	119	(03-27-2018)
Start Game Change Setup Main Menu Quit Game		

Рис. 3.4: Таблица рекордов

Мы можем увидеть, что после того как мы всякий раз добавляем свое имя, этот файл меняется: *BLSCORE.DAT*.

```
% xxd -g 1 BLSCORE.DAT
```

```
00000000: 0a 00 58 65 6e 69 61 2e 2e 2e 2e 00 df 01 00 ..Xenia.....
00000010: 00 30 33 2d 32 37 2d 32 30 31 38 00 50 61 75 6c .03-27-2018.Paul
00000020: 2e 2e 2e 2e 2e 2e 00 61 01 00 00 30 33 2d 32 37 .....a...03-27
00000030: 2d 32 30 31 38 00 4a 6f 68 6e 2e 2e 2e 2e 2e 2e -2018.John.....
00000040: 00 46 01 00 00 30 33 2d 32 37 2d 32 30 31 38 00 .F...03-27-2018.
00000050: 4a 61 6d 65 73 2e 2e 2e 2e 2e 00 44 01 00 00 30 James.....D...0
00000060: 33 2d 32 37 2d 32 30 31 38 00 43 68 61 72 6c 69 3-27-2018.Charli
00000070: 65 2e 2e 2e 00 ea 00 00 00 30 33 2d 32 37 2d 32 e.....03-27-2
00000080: 30 31 38 00 4d 69 6b 65 2e 2e 2e 2e 2e 00 b5 018.Mike.....
00000090: 00 00 00 30 33 2d 32 37 2d 32 30 31 38 00 50 68 ...03-27-2018.Ph
000000a0: 69 6c 2e 2e 2e 2e 2e 00 ac 00 00 00 30 33 2d il.....03-
000000b0: 32 37 2d 32 30 31 38 00 4d 61 72 79 2e 2e 2e 2e 27-2018.Mary...
000000c0: 2e 2e 00 7b 00 00 00 30 33 2d 32 37 2d 32 30 31 ...{...03-27-201
000000d0: 38 00 54 6f 6d 2e 2e 2e 2e 2e 2e 00 77 00 00 8.Tom.....w..
000000e0: 00 30 33 2d 32 37 2d 32 30 31 38 00 42 6f 62 2e .03-27-2018.Bob.
000000f0: 2e 2e 2e 2e 2e 2e 00 77 00 00 00 30 33 2d 32 37 .....w...03-27
00000100: 2d 32 30 31 38 00 -2018.
```

Все записи и так хорошо видны. Самый первый байт, вероятно, это количество записей. Второй это 0, и, на самом деле, число записей может быть 16-битным значением, которое простирается на 2 байта.

После имени «Xenia» мы видим байты 0xDF и 0x01. У Xenia 479 очков, и это именно 0x1DF в шестнадцатеричной системе. Так что значение рекорда, вероятно, 16-битное целочисленное, а может и 32-битное: после каждого по два нулевых байта.

Подумаем теперь о том факте, что и элементы массива, и элементы структуры всегда располагаются в памяти друг к другу вплотную. Это позволяет там записывать весь массив/структуру в файл используя простую ф-цию *write()* или *fwrite()*, а затем восстанавливать его используя *read()* или *fread()*, настолько всё просто. Это то, что сейчас называется *сериализацией*.

Чтение

Напишем программу на Си для чтения файла рекордов:

```
#include <assert.h>
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <string.h>
```

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

```
struct entry
{
    char name[11]; // включая терминирующий ноль
    uint32_t score;
    char date[11]; // включая терминирующий ноль
} __attribute__((aligned (1),packed));

struct highscore_file
{
    uint8_t count;
    uint8_t unknown;
    struct entry entries[10];
} __attribute__((aligned (1), packed));

struct highscore_file file;

int main(int argc, char* argv[])
{
    FILE* f=fopen(argv[1], "rb");
    assert (f!=NULL);
    size_t got=fread(&file, 1, sizeof(struct highscore_file), f);
    assert (got==sizeof(struct highscore_file));
    fclose(f);
    for (int i=0; i<file.count; i++)
    {
        printf ("name=%s score=%d date=%s\n",
                file.entries[i].name,
                file.entries[i].score,
                file.entries[i].date);
    };
};
```

Нужно добавить атрибут GCC (*aligned (1),packed*), чтобы все поля структуры были упакованы по 1-байтной границе.

Конечно, это работает:

```
name=Xenia..... score=479 date=03-27-2018
name=Paul..... score=353 date=03-27-2018
name=John..... score=326 date=03-27-2018
name=James..... score=324 date=03-27-2018
name=Charlie... score=234 date=03-27-2018
name=Mike..... score=181 date=03-27-2018
name=Phil..... score=172 date=03-27-2018
name=Mary..... score=123 date=03-27-2018
name=Tom..... score=119 date=03-27-2018
name=Bob..... score=119 date=03-27-2018
```

(Нужно добавить, что каждое имя дополнено точками, и на экране, и в файле, вероятно, с эстетическими целями.)

Запись

Посмотрим, правы ли мы насчет длины значения очков. Действительно ли там 32 бита?

```
int main(int argc, char* argv[])
{
    FILE* f=fopen(argv[1], "rb");
    assert (f!=NULL);
    size_t got=fread(&file, 1, sizeof(struct highscore_file), f);
    assert (got==sizeof(struct highscore_file));
    fclose(f);

    strcpy (file.entries[1].name, "Mallory...");
    file.entries[1].score=12345678;
    strcpy (file.entries[1].date, "08-12-2016");

    f=fopen(argv[1], "wb");
```

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

```
assert (f!=NULL);  
got=fwrite(&file, 1, sizeof(struct highscore_file), f);  
assert (got==sizeof(struct highscore_file));  
fclose(f);  
};
```

Запустим Blockout:

*** H A L L O F F A M E ***			
Pit: 7x7x18, Block Set: FLAT			
1.	Xenia.....	479	(03-27-2018)
2.	Mallory...	345678	(08-12-2016)
3.	John.....	326	(03-27-2018)
4.	James.....	324	(03-27-2018)
5.	Charlie...	234	(03-27-2018)
6.	Mike.....	181	(03-27-2018)
7.	Phil.....	172	(03-27-2018)
8.	Mary.....	123	(03-27-2018)
9.	.....	123	(03-27-2018)
10.	Tom.....	119	(03-27-2018)

Рис. 3.5: Таблица рекордов

Первые две цифры (1 или 2) пропали. Вероятно, это проблемы с форматированием... но число почти корректно. Заменяю на 999999 и запускаю снова:

*** H A L L O F F A M E ***			
Pit: 7x7x18, Block Set: FLAT			
1.	Xenia.....	479	(03-27-2018)
2.	Mallory...	999999	(08-12-2016)
3.	John.....	326	(03-27-2018)
4.	James.....	324	(03-27-2018)
5.	Charlie...	234	(03-27-2018)
6.	Mike.....	181	(03-27-2018)
7.	Phil.....	172	(03-27-2018)
8.	.....	133	(03-27-2018)
9.	.....	132	(03-27-2018)
10.	Mary.....	123	(03-27-2018)

Рис. 3.6: Таблица рекордов

Теперь всё верно. Да, значение очков это 32-битное целочисленное.

Это сериализация?

...почти. Сериализация как эта очень популярна в научном и инженерном ПО, где скорость намного важнее чем конвертирование в [XML](#)⁵¹ или [JSON](#)⁵² и назад.

⁵¹Extensible Markup Language

⁵²JavaScript Object Notation

3.22. ЕЩЕ О СТРУКТУРАХ

Одна очевидная вещь это то что вы, разумеется, не можете сериализовать указатели, потому что каждый раз, когда вы загружаете файл в память, все структуры могут быть размещены в других местах.

Но: если вы работаете на каком-нибудь маломощном MCU с простой ОС на нем, и все ваши структуры всегда расположены в тех же местах в памяти, тогда, вы можете сохранять и восстанавливать указатели.

Случайный шум

Когда я готовил этот пример, я запускал «Block out» много раз и немного играл, чтобы заполнить таблицу рекордов случайными именами.

И когда было только 3 записи в файле, я увидел это:

```
00000000: 03 00 54 6f 6d 61 73 2e 2e 2e 2e 00 da 2a 00 ..Tomas.....*.
00000010: 00 30 38 2d 31 32 2d 32 30 31 36 00 43 68 61 72 .08-12-2016.Char
00000020: 6c 69 65 2e 2e 2e 00 8b 1e 00 00 30 38 2d 31 32 lie.....08-12
00000030: 2d 32 30 31 36 00 4a 6f 68 6e 2e 2e 2e 2e 2e -2016.John.....
00000040: 00 80 00 00 00 30 38 2d 31 32 2d 32 30 31 36 00 ....08-12-2016.
00000050: 00 00 57 c8 a2 01 06 01 ba f9 47 c7 05 00 f8 4f ..W.....G....0
00000060: 06 01 06 01 a6 32 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .....2.....
00000070: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .....
00000080: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .....
00000090: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .....
000000a0: 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 93 c6 a2 01 46 72 .....Fr
000000b0: 8c f9 f6 c5 05 00 f8 4f 00 02 06 01 a6 32 06 01 .....0....2..
000000c0: 00 00 98 f9 f2 c0 05 00 f8 4f 00 02 a6 32 a2 f9 .....0....2..
000000d0: 80 c1 a6 32 a6 32 f4 4f aa f9 39 c1 a6 32 06 01 ...2.2.0..9..2..
000000e0: b4 f9 2b c5 a6 32 e1 4f c7 c8 a2 01 82 72 c6 f9 ..+..2.0.....r..
000000f0: 30 c0 05 00 00 00 00 00 00 a6 32 d4 f9 76 2d 0.....2..v-
00000100: a6 32 00 00 00 00 ..2....
```

Первый байт это 3, означая, что здесь 3 записи. И присутствуют 3 записи. Но затем мы видим случайный шум во второй части файла.

Шум, вероятно, связан с неинициализированными данными. Вероятно, «Block out» выделил память для 10 записей где-то в куче, где, очевидно, присутствует некоторый псевдослучайный шум (оставшийся от чего-то еще). Затем он выставил первый/второй байт, заполнил 3 записи и затем он никогда не трогал оставшиеся 7 записей, так что они были записаны в файл как есть.

Когда «Block out», при следующем запуске, загружает файл с рекордами, он читает кол-во записей из первого/второго байта (3) и полностью игнорирует всё, что идет после.

Это распространенная проблема. Вернее, не совсем проблема в строгом смысле: ничего не глючит, но лишняя информация может попадать наружу.

Microsoft Word версий 90-х часто оставлял куски ранее отредактированных текстов в файлах *.doc*. В те времена это было что-то вроде развлечения, получить .doc-файл от кого-то, открыть его в шестнадцатеричном редакторе и прочитать что-то еще, что редактировалось на том компьютере до этого.

Эта проблема может быть куда более серьезная: ошибка Heartbleed⁵³ в OpenSSL.

Домашнее задание

«Block out» поддерживает несколько поликубов (flat/basic/extended), размер стакана можно конфигурировать, итд. И похоже на то, что для каждой конфигурации, «Block out» имеет свою таблицу рекордов. Я заметил, что некоторая информация вероятно сохраняется в файле *BLSCORE.IDX*. Это может быть домашнее задание для хардкорных фанатов «Block out» — разобраться также и в этой структуре.

Файлы «Block out» здесь: <http://beginners.re/examples/blockout.zip> (включая двоичные файлы с рекордами, которые я использовал в этом примере). Для запуска можно использовать DosBox.

⁵³<https://en.wikipedia.org/wiki/Heartbleed>

3.23. memmove() и memcpy()

Разница между этими стандартными ф-циями в том, что *memcpy()* слепо копирует блок в другое место, в то время как *memmove()* корректно обрабатывает блоки, хранимые внахлест. Например, вы хотите оттащить строку на два байта вперед:

```
`|.|. |h|e|l|l|o|...` -> `|h|e|l|l|o|...`
```

memcpy(), которая копирует 32-битные или 64-битные слова за раз, или даже SIMD, здесь очевидно не сработают, потому как нужно использовать ф-цию копирования работающую побайтово.

Теперь даже более сложный пример, вставьте 2 байта впереди строки:

```
`|h|e|l|l|o|...` -> `|.|. |h|e|l|l|o|...`
```

Теперь даже ф-ция работающая побайтово не сработает, нужно копировать байты с конца.

Это тот редкий случай, когда x86 флаг DF нужно выставлять перед инструкцией REP MOVSB: DF определяет направление, и теперь мы должны двигаться назад.

Обычная процедура *memmove()* работает примерно так: 1) если источник ниже назначения, копируем вперед; 2) если источник над назначением, копируем назад.

Это *memmove()* из uClibc:

```
void *memmove(void *dest, const void *src, size_t n)
{
    int eax, ecx, esi, edi;
    __asm__ __volatile__(
        "    movl    %eax, %%edi\n"
        "    cmpl    %esi, %eax\n"
        "    je      2f\n" /* (optional) src == dest -> NOP */
        "    jnb     1f\n" /* src > dest -> simple copy */
        "    leal    -1(%%esi,%%ecx), %%esi\n"
        "    leal    -1(%%eax,%%ecx), %%edi\n"
        "    std\n"
        "1:      rep; movsb\n"
        "    cld\n"
        "2:\n"
        : "=&c" (ecx), "=&S" (esi), "=&a" (eax), "=&D" (edi)
        : "0" (n), "1" (src), "2" (dest)
        : "memory"
    );
    return (void*)eax;
}
```

В первом случае, REP MOVSB вызывается со сброшенным флагом DF. Во втором, DF в начале выставляется, но потом сбрасывается.

Более сложный алгоритм имеет такую часть:

«если разница между *источником* и *назначением* больше чем ширина *слова*, копируем используя слова нежели байты, и используем побитовое копирование для копирования невыровненных частей».

Так происходит в неоптимизированной части на Си в Glibc 2.24.

Учитывая всё это, *memmove()* может работать медленнее, чем *memcpy()*. Но некоторые люди, включая Линуса Торвальдса, спорят⁵⁴ что *memcpy()* должна быть синонимом *memmove()*, а последняя ф-ция должна в начале проверять, пересекаются ли буферы или нет, и затем вести себя как *memcpy()* или *memmove()*. Все же, в наше время, проверка на пересекающиеся буферы это очень дешевая операция.

3.23.1. Анти-отладочный прием

Я слышал об анти-отладочном приеме, где всё что вам нужно для падения процесса это выставить DF: следующий вызов *memcpy()* приведет к падению, потому что будет копировать назад. Но я не

⁵⁴https://bugzilla.redhat.com/show_bug.cgi?id=638477#c132

3.24. SETJMP/LONGJMP

могу это проверить: похоже, все процедуры копирования сбрасывают/выставляют DF, как им надо. С другой стороны, *memmove()* из uClibc, код которой я цитировал здесь, не имеет явного сброса DF (он подразумевает, что DF всегда сброшен?), так что он может и упасть.

3.24. setjmp/longjmp

setjmp/longjmp это механизм в Си, очень похожий на throw/catch в Си++ и других высокоуровневых ЯП. Вот пример из zlib:

```
...

/* return if bits() or decode() tries to read past available input */
if (setjmp(s.env) != 0)          /* if came back here via longjmp(), */
    err = 2;                     /* then skip decomp(), return error */
else
    err = decomp(&s); /* decompress */

...

/* load at least need bits into val */
val = s->bitbuf;
while (s->bitcnt < need) {
    if (s->left == 0) {
        s->left = s->infun(s->inhow, &(s->in));
        if (s->left == 0) longjmp(s->env, 1); /* out of input */
    }
    ...
}

if (s->left == 0) {
    s->left = s->infun(s->inhow, &(s->in));
    if (s->left == 0) longjmp(s->env, 1); /* out of input */
}
```

(zlib/contrib/blast/blast.c)

Вызов setjmp() сохраняет текущие PC, SP и другие регистры в структуре env, затем возвращает 0.

В случае ошибки, longjmp() телепортирует вас в место точно после вызова setjmp(), как если бы вызов setjmp() вернул ненулевое значение (которое было передано в longjmp()). Это напоминает нам сисколл fork() в UNIX.

Посмотрим в более дистиллированный пример:

```
#include <stdio.h>
#include <setjmp.h>

jmp_buf env;

void f2()
{
    printf ("%s() begin\n", __FUNCTION__);
    // something odd happened here
    longjmp (env, 1234);
    printf ("%s() end\n", __FUNCTION__);
};

void f1()
{
    printf ("%s() begin\n", __FUNCTION__);
    f2();
    printf ("%s() end\n", __FUNCTION__);
};

int main()
{
    int err=setjmp(env);
    if (err==0)
    {
```


3.24. SETJMP/LONGJMP

```
        f1();
    }
    else
    {
        printf ("Error %d\n", err);
    };
};
```

Если запустим, то увидим:

```
f1() begin
f2() begin
Error 1234
```

Структура jmp_buf обычно недокументирована, чтобы сохранить прямую совместимость.

Посмотрим, как setjmp() реализован в MSVC 2013 x64:

```
...

; RCX = address of jmp_buf

mov     [rcx], rax
mov     [rcx+8], rbx
mov     [rcx+18h], rbp
mov     [rcx+20h], rsi
mov     [rcx+28h], rdi
mov     [rcx+30h], r12
mov     [rcx+38h], r13
mov     [rcx+40h], r14
mov     [rcx+48h], r15
lea     r8, [rsp+arg_0]
mov     [rcx+10h], r8
mov     r8, [rsp+0]      ; get saved RA from stack
mov     [rcx+50h], r8    ; save it
stmxcsr dword ptr [rcx+58h]
fstcw   word ptr [rcx+5Ch]
movdqa  xmmword ptr [rcx+60h], xmm6
movdqa  xmmword ptr [rcx+70h], xmm7
movdqa  xmmword ptr [rcx+80h], xmm8
movdqa  xmmword ptr [rcx+90h], xmm9
movdqa  xmmword ptr [rcx+0A0h], xmm10
movdqa  xmmword ptr [rcx+0B0h], xmm11
movdqa  xmmword ptr [rcx+0C0h], xmm12
movdqa  xmmword ptr [rcx+0D0h], xmm13
movdqa  xmmword ptr [rcx+0E0h], xmm14
movdqa  xmmword ptr [rcx+0F0h], xmm15
retn
```

Она просто заполняет структуру jmp_buf текущими значениями почти всех регистров. Также, текущее значение [RA](#) берется из стека и сохраняется в jmp_buf: В будущем, оно будет использовано как новое значение [PC](#).

Теперь longjmp():

```
...

; RCX = address of jmp_buf

mov     rax, rdx
mov     rbx, [rcx+8]
mov     rsi, [rcx+20h]
mov     rdi, [rcx+28h]
mov     r12, [rcx+30h]
mov     r13, [rcx+38h]
mov     r14, [rcx+40h]
mov     r15, [rcx+48h]
ldmxcsr dword ptr [rcx+58h]
```

3.25. ДРУГИЕ НЕЗДОРОВЫЕ ХАКИ СВЯЗАННЫЕ СО СТЕКОМ

```
fnclex
fldcw   word ptr [rcx+5Ch]
movdqa  xmm6, xmmword ptr [rcx+60h]
movdqa  xmm7, xmmword ptr [rcx+70h]
movdqa  xmm8, xmmword ptr [rcx+80h]
movdqa  xmm9, xmmword ptr [rcx+90h]
movdqa  xmm10, xmmword ptr [rcx+0A0h]
movdqa  xmm11, xmmword ptr [rcx+0B0h]
movdqa  xmm12, xmmword ptr [rcx+0C0h]
movdqa  xmm13, xmmword ptr [rcx+0D0h]
movdqa  xmm14, xmmword ptr [rcx+0E0h]
movdqa  xmm15, xmmword ptr [rcx+0F0h]
mov     rdx, [rcx+50h] ; get PC (RIP)
mov     rbp, [rcx+18h]
mov     rsp, [rcx+10h]
jmp     rdx             ; jump to saved PC

...
```

Она просто восстанавливает (почти) все регистры, берет из структуры [RA](#) и переходит туда. Эффект такой же, как если бы `setjmp()` вернула управление в вызывающую ф-цию. Также, `RAX` выставляется такой же, как и второй аргумент `longjmp()`. Это работает, как если бы `setjmp()` вернуло ненулевое значение в самом начале.

Как побочный эффект восстановления [SP](#), все значения в стеке, которые были установлены и использованы между вызовами `setjmp()` и `longjmp()`, просто выкидываются. Они больше не будут использоваться. Следовательно, `longjmp()` обычно делает переход назад ⁵⁵.

Это подразумевает, что в отличие от механизма `throw/catch` в Си++, память не будет освобождаться, деструкторы не будут вызываться, итд. Следовательно, эта техника иногда опасна. Тем не менее, всё это довольно популярно, до сих пор. Это все еще используется в Oracle RDBMS.

Это также имеет неожиданный побочный эффект: если некий буфер был перезаписан внутри ф-ции (может даже из-за удаленной атаки), и ф-ция хочет сообщить об ошибке, и вызывает `longjmp()`, перезаписанная часть стека становится просто неиспользованной.

В качестве упражнения, попробуйте понять, почему не все регистры сохраняются. Почему пропускаются регистры `XMM0-XMM5` и другие?

3.25. Другие нездоровые хаки связанные со стеком

3.25.1. Доступ к аргументам и локальным переменным вызывающей ф-ции

Из основ Си/Си++ мы знаем, что иметь доступ к аргументам ф-ции или её локальным переменным — невозможно.

Тем не менее, при помощи грязных хаків это возможно. Например:

```
#include <stdio.h>

void f(char *text)
{
    // распечатать стек
    int *tmp=&text;
    for (int i=0; i<20; i++)
    {
        printf ("0x%x\n", *tmp);
        tmp++;
    };
};

void draw_text(int X, int Y, char* text)
{
    f(text);
}
```

⁵⁵Впрочем, существуют люди, которые используют всё это для куда более сложных вещей, включая имитацию копирования, итд: <https://www.embeddedrelated.com/showarticle/455.php>, <http://fanf.livejournal.com/105413.html>

3.25. ДРУГИЕ НЕЗДОРОВЫЕ ХАКИ СВЯЗАННЫЕ СО СТЕКОМ

```
printf ("Собираемся нарисовать [%s] на %d:%d\n", text, X, Y);
};

int main()
{
    printf ("адрес main()=0x%x\n", &main);
    printf ("адрес draw_text()=0x%x\n", &draw_text);
    draw_text(100, 200, "Hello!");
};
```

На 32-битной Ubuntu 16.04 и GCC 5.4.0, я получил это:

```
адрес main()=0x80484f8
адрес draw_text()=0x80484cb
0x8048645      первый аргумент f()
0x8048628
0xbfd8ab98
0xb7634590
0xb779eddc
0xb77e4918
0xbfd8aba8
0x8048547      адрес возврата в середину main()
0x64          первый аргумент draw_text()
0xc8          второй аргумент draw_text()
0x8048645      третий аргумент draw_text()
0x8048581
0xb779d3dc
0xbfd8abc0
0x0
0xb7603637
0xb779d000
0xb779d000
0x0
0xb7603637
```

(Комментарии мои.)

Так как *f()* начинает перебирать элементы стека начиная со своего первого аргумента, первый элемент стека это действительно указатель на строку «Hello!». Мы видим что её адрес также используется как третий аргумент для ф-ции *draw_text()*.

В *f()* мы можем читать аргументы и локальные переменные ф-ций, если мы точно знаем разметку стека, но она все время меняется, от компилятора к компилятору. Различные уровни оптимизаций также сильно влияют на разметку.

Но если мы можем каким-то образом распознать нужную нам информацию, мы даже можем модифицировать её. Как пример, я переработаю ф-цию *f()*:

```
void f(char *text)
{
    ...

    // найти пару переменных 100, 200 и модифицировать вторую
    tmp=&text;
    for (int i=0; i<20; i++)
    {
        if (*tmp==100 && *(tmp+1)==200)
        {
            printf ("нашли\n");
            *(tmp+1)=210; // поменять 200 на 210
            break;
        }
        tmp++;
    }
};
```

Таки работает:

```
нашли
Собираемся нарисовать [Hello!] на 100:210
```

Summary

Это экстремально грязный хак, предназначенный для демонстрации внутренностей стека. я никогда даже не видел и не слышал чтобы кто-то использовал такое в реальном коде. Но это, как всегда, хороший пример.

Упражнение

Этот пример был скомпилирован без оптимизации на 32-битной Ubuntu используя GCC 5.4.0 и он работает. Но когда я включил максимальную оптимизацию (-O3), всё перестало работать. Попробуйте разобраться, почему.

Используйте свой любимый компилятор и OS, попробуйте разные уровни оптимизации, узнайте, заработает или нет, если нет, попробуйте понять, почему.

3.25.2. Возврат строки

Классическая ошибка из Brian W. Kernighan, Rob Pike, *Practice of Programming*, (1999):

```
#include <stdio.h>

char* amsg(int n, char* s)
{
    char buf[100];

    sprintf (buf, "error %d: %s\n", n, s) ;

    return buf;
};

int main()
{
    amsg ("%s\n", interim (1234, "something wrong!"));
};
```

Она упадет. В начале, попытаемся понять, почему.

Это состояние стека перед возвратом из amsg():

```
(низкие адреса)

[amsg(): 100 байт]
[RA] <- текущий SP
[два аргумента amsg]
[что-то еще]
[локальные переменные main()]

(высокие адреса)
```

Когда управление возвращается из amsg() в main(), пока всё хорошо. Но когда printf() вызывается из main(), который, в свою очередь, использует стек для своих нужд, затирая 100-байтный буфер. В лучшем случае, будет выведен случайный мусор.

Трудно поверить, но я знаю, как это исправить:

```
#include <stdio.h>

char* amsg(int n, char* s)
{
    char buf[100];

    sprintf (buf, "error %d: %s\n", n, s) ;

    return buf;
};
```

3.26. OPENMP

```
char* interim (int n, char* s)
{
    char large_buf[8000];
    // используем локальный массив.
    // а иначе компилятор выбросит его при оптимизации, как неиспользуемый.
    large_buf[0]=0;
    return amsg (n, s);
};

int main()
{
    printf ("%s\n", interim (1234, "something wrong!"));
};
```

Это заработает если скомпилировано в MSVC 2013 без оптимизаций и с опцией /GS-⁵⁶. MSVC предупредит: “warning C4172: returning address of local variable or temporary”, но код запустится и сообщение выведется. Посмотрим состояние стека в момент, когда amsg() возвращает управление в interim():

```
(низкие адреса)

[amsg(): 100 байт]
[RA] <- текущий SP
[два аргумента amsg()]
[введения interim(), включая 8000 байт]
[еще что-то]
[локальные переменные main()]

(высокие адреса)
```

Теперь состояние стека на момент, когда interim() возвращает управление в main():

```
(низкие адреса)

[amsg(): 100 байт]
[RA]
[два аргумента amsg()]
[введения interim(), включая 8000 байт]
[еще что-то] <- текущий SP
[локальные переменные main()]

(высокие адреса)
```

Так что когда main() вызывает printf(), он использует стек в месте, где выделен буфер в interim(), и не затирает 100 байт с сообщением об ошибке внутри, потому что 8000 байт (или может быть меньше) это достаточно для всего, что делает printf() и другие нисходящие ф-ции!

Это также может сработать, если между ними много ф-ций, например: main() → f1() → f2() → f3() ... → amsg(), и тогда результат amsg() используется в main(). Дистанция между SP в main() и адресом буфера buf[] должна быть достаточно длинной.

Вот почему такие ошибки опасны: иногда ваш код работает (и бага прячется незамеченной). иногда нет. Такие баги в шутку называют хейзенбаги или шрёдинбаги⁵⁷.

3.26. OpenMP

OpenMP это один из простейших способов распараллелить работу простого алгоритма.

В качестве примера, попытаемся написать программу для вычисления криптографического *nonce*. В моем простейшем примере, *nonce* это число, добавляемое к нешифрованному тексту, чтобы получить хэш с какой-то особенностью. Например, на одной из стадий, протокол Bitcoin требует найти такую *nonce*, чтобы в результате хэширования подряд шли определенное количество нулей.

⁵⁶Выключить защиту от переполнения буфера

⁵⁷<https://en.wikipedia.org/wiki/Heisenbug>

3.26. OPENMP

Это еще называется «proof of work» ⁵⁸ (т.е. система доказывает, что она произвела какие-то очень ресурсоёмкие вычисления и затратила время на это).

Мой пример не связан с Bitcoin, он будет пытаться добавлять числа к строке «hello, world!_» чтобы найти такое число, при котором строка вида «hello, world!_<number>» после хеширования алгоритмом SHA512 будет содержать как минимум 3 нулевых байта в начале.

Ограничимся перебором всех чисел в интервале 0..INT32_MAX-1 (т.е., 0x7FFFFFFE или 2147483646).

Алгоритм очень простой:

```
#include <stdio.h>
#include <string.h>
#include <stdlib.h>
#include <time.h>
#include "sha512.h"

int found=0;
int32_t checked=0;

int32_t* __min;
int32_t* __max;

time_t start;

#ifdef __GNUC__
#define min(X,Y) ((X) < (Y) ? (X) : (Y))
#define max(X,Y) ((X) > (Y) ? (X) : (Y))
#endif

void check_nonce (int32_t nonce)
{
    uint8_t buf[32];
    struct sha512_ctx ctx;
    uint8_t res[64];

    // update statistics
    int t=omp_get_thread_num();

    if (__min[t]==-1)
        __min[t]=nonce;
    if (__max[t]==-1)
        __max[t]=nonce;

    __min[t]=min(__min[t], nonce);
    __max[t]=max(__max[t], nonce);

    // idle if valid nonce found
    if (found)
        return;

    memset (buf, 0, sizeof(buf));
    sprintf (buf, "hello, world!_%d", nonce);

    sha512_init_ctx (&ctx);
    sha512_process_bytes (buf, strlen(buf), &ctx);
    sha512_finish_ctx (&ctx, &res);
    if (res[0]==0 && res[1]==0 && res[2]==0)
    {
        printf ("found (thread %d): [%s]. seconds spent=%d\n", t, buf, time(NULL)-start);
        found=1;
    }
    #pragma omp atomic
    checked++;

    #pragma omp critical
    if ((checked % 100000)==0)
        printf ("checked=%d\n", checked);
};
```

⁵⁸[wikipedia](#)

3.26. OPENMP

```
int main()
{
    int32_t i;
    int threads=omp_get_max_threads();
    printf ("threads=%d\n", threads);

    __min=(int32_t*)malloc(threads*sizeof(int32_t));
    __max=(int32_t*)malloc(threads*sizeof(int32_t));
    for (i=0; i<threads; i++)
        __min[i]=__max[i]=-1;

    start=time(NULL);

    #pragma omp parallel for
    for (i=0; i<INT32_MAX; i++)
        check_nonce (i);

    for (i=0; i<threads; i++)
        printf ("__min[%d]=0x%08x __max[%d]=0x%08x\n", i, __min[i], i, __max[i]);

    free(__min); free(__max);
};
```

check_nonce() просто добавляет число к строке, хеширует алгоритмом SHA512 и проверяет 3 нулевых байта в начале.

Очень важная часть кода — это:

```
#pragma omp parallel for
for (i=0; i<INT32_MAX; i++)
    check_nonce (i);
```

Да, вот настолько просто, без #pragma мы просто вызываем check_nonce() для каждого числа от 0 до INT32_MAX (0x7fffffff или 2147483647). С #pragma, компилятор добавляет специальный код, который разрежет интервал цикла на меньшие интервалы, чтобы запустить их на доступных ядрах CPU ⁵⁹.

Пример может быть скомпилирован ⁶⁰ в MSVC 2012:

```
cl openmp_example.c sha512.obj /openmp /O1 /Zi /Faopenmp_example.asm
```

Или в GCC:

```
gcc -fopenmp 2.c sha512.c -S -masm=intel
```

3.26.1. MSVC

Вот как MSVC 2012 генерирует главный цикл:

Листинг 3.122: MSVC 2012

```
push    OFFSET _main$omp$1
push    0
push    1
call    __vcomp_fork
add     esp, 16
```

Функции с префиксом vcomp связаны с OpenMP и находятся в файле vcomp*.dll. Так что тут запускается группа тредов.

Посмотрим на _main\$omp\$1:

⁵⁹N.B.: Это намеренно упрощенный пример, но на практике, применение OpenMP может быть труднее и сложнее

⁶⁰файлы sha512.(c|h) и u64.h можно взять из библиотеки OpenSSL: <http://go.yurichev.com/17324>

```

$T1 = -8      ; size = 4
$T2 = -4      ; size = 4
_main$omp$1 PROC
    push     ebp
    mov     ebp, esp
    push     ecx
    push     ecx
    push     esi
    lea     eax, DWORD PTR $T2[ebp]
    push     eax
    lea     eax, DWORD PTR $T1[ebp]
    push     eax
    push     1
    push     1
    push     2147483646      ; 7fffffffH
    push     0
    call     __vcomp_for_static_simple_init
    mov     esi, DWORD PTR $T1[ebp]
    add     esp, 24
    jmp     SHORT $LN6@main$omp$1
$LL2@main$omp$1:
    push     esi
    call     _check_nonce
    pop     ecx
    inc     esi
$LN6@main$omp$1:
    cmp     esi, DWORD PTR $T2[ebp]
    jle     SHORT $LL2@main$omp$1
    call     __vcomp_for_static_end
    pop     esi
    leave
    ret     0
_main$omp$1 ENDP

```

Эта функция будет запущена n раз параллельно, где n это число ядер CPU.

`vcomp_for_static_simple_init()` вычисляет интервал для конструкта `for()` для текущего треда, в зависимости от текущего номера треда. Значения начала и конца цикла записаны в локальных переменных `$T1` и `$T2`. Вы также можете заметить `7fffffffH` (или `2147483646`) как аргумент для функции `vcomp_for_static_simple_init()` это количество итераций всего цикла, оно будет поделено на равные части.

Потом мы видим новый цикл с вызовом функции `check_nonce()` делающей всю работу.

Добавил также немного кода в начале функции `check_nonce()` для сбора статистики, с какими аргументами эта функция вызывалась.

Вот что мы видим если запустим:

```

threads=4
...
checked=2800000
checked=3000000
checked=3200000
checked=3300000
found (thread 3): [hello, world!_1611446522]. seconds spent=3
__min[0]=0x00000000 __max[0]=0x1fffffff
__min[1]=0x20000000 __max[1]=0x3fffffff
__min[2]=0x40000000 __max[2]=0x5fffffff
__min[3]=0x60000000 __max[3]=0x7fffffff

```

Да, результат правильный, первые 3 байта это нули:

```

C:\...\sha512sum test
000000f4a8fac5a4ed38794da4c1e39f54279ad5d9bb3c5465cdf57adaf60403
df6e3fe6019f5764fc9975e505a7395fed780fee50eb38dd4c0279cb114672e2 *test

```

Оно требует $\approx 2..3$ секунды на 4-х ядерном Intel Xeon E3-1220 3.10 GHz.

3.26. OPENMP

В task manager мы видим 5 тредов: один главный тред + 4 запущенных. Никаких оптимизаций не было сделано, чтобы оставить этот пример в как можно более простом виде. Но, наверное, этот алгоритм может работать быстрее. У моего CPU 4 ядра, вот почему OpenMP запустил именно 4 тредов.

Глядя на таблицу статистики, можно легко увидеть, что цикл был разделен очень точно на 4 равных части. Ну хорошо, почти равных, если не учитывать последний бит.

Имеются также прагмы и для [атомарных операций](#).

Посмотрим, как вот этот код будет скомпилирован:

```
#pragma omp atomic
checked++;

#pragma omp critical
if ((checked % 100000)==0)
    printf ("checked=%d\n", checked);
```

Листинг 3.124: MSVC 2012

```
push    edi
push    OFFSET _checked
call    __vcomp_atomic_add_i4
; Line 55
push    OFFSET _$vcomp$critsect$
call    __vcomp_enter_critsect
add     esp, 12
; Line 56
mov     ecx, DWORD PTR _checked
mov     eax, ecx
cdq
mov     esi, 100000      ; 000186a0H
idiv    esi
test    edx, edx
jne     SHORT $LN1@check_nonc
; Line 57
push    ecx
push    OFFSET ??_C@_0M@NPNHLI00@checked?$DN?$CFd?6?$AA@
call    _printf
pop     ecx
pop     ecx
$LN1@check_nonc:
push    DWORD PTR _$vcomp$critsect$
call    __vcomp_leave_critsect
pop     ecx
```

Как выясняется, функция `vcomp_atomic_add_i4()` в `vcomp*.dll` это просто крохотная функция имеющая инструкцию `LOCK XADD`⁶¹.

`vcomp_enter_critsect()` в конце концов вызывает функцию win32 [API](#) `EnterCriticalSection()`⁶².

3.26.2. GCC

GCC 4.8.1 выдает программу показывающую точно такую же таблицу со статистикой, так что, реализация GCC делит цикл на части точно так же.

Листинг 3.125: GCC 4.8.1

```
mov     edi, OFFSET FLAT:main._omp_fn.0
call    GOMP_parallel_start
mov     edi, 0
call    main._omp_fn.0
call    GOMP_parallel_end
```

⁶¹О префиксе `LOCK` читайте больше: [.1.6](#) (стр. [1001](#))

⁶²О критических секциях читайте больше тут: [6.5.4](#) (стр. [766](#))

3.26. OPENMP

В отличие от реализации MSVC, то, что делает код GCC, это запускает 3 треда, но также запускает четвертый прямо в текущем треде. Так что здесь всего 4 треда а не 5 как в случае с MSVC.

Вот функция `main._omp_fn.0`:

Листинг 3.126: GCC 4.8.1

```
main._omp_fn.0:
    push    rbp
    mov     rbp, rsp
    push    rbx
    sub     rsp, 40
    mov     QWORD PTR [rbp-40], rdi
    call    omp_get_num_threads
    mov     ebx, eax
    call    omp_get_thread_num
    mov     esi, eax
    mov     eax, 2147483647 ; 0x7FFFFFFF
    cdq
    idiv    ebx
    mov     ecx, eax
    mov     eax, 2147483647 ; 0x7FFFFFFF
    cdq
    idiv    ebx
    mov     eax, edx
    cmp     esi, eax
    jl      .L15
.L18:
    imul    esi, ecx
    mov     edx, esi
    add     eax, edx
    lea     ebx, [rax+rcx]
    cmp     eax, ebx
    jge     .L14
    mov     DWORD PTR [rbp-20], eax
.L17:
    mov     eax, DWORD PTR [rbp-20]
    mov     edi, eax
    call    check_nonce
    add     DWORD PTR [rbp-20], 1
    cmp     DWORD PTR [rbp-20], ebx
    jl      .L17
    jmp     .L14
.L15:
    mov     eax, 0
    add     ecx, 1
    jmp     .L18
.L14:
    add     rsp, 40
    pop     rbx
    pop     rbp
    ret
```

Здесь мы видим это деление явно: вызывая `omp_get_num_threads()` и `omp_get_thread_num()` мы получаем количество запущенных тредов, а также номер текущего треда, и затем определяем интервал цикла. И затем запускаем `check_nonce()`.

GCC также вставляет инструкцию `LOCK ADD` прямо в том месте кода, где MSVC сгенерировал вызов отдельной функции в DLL:

Листинг 3.127: GCC 4.8.1

```
lock add     DWORD PTR checked[rip], 1
call        GOMP_critical_start
mov         ecx, DWORD PTR checked[rip]
mov         edx, 351843721
mov         eax, ecx
imul        edx
sar         edx, 13
mov         eax, ecx
sar         eax, 31
sub         edx, eax
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
mov     eax, edx
imul    eax, eax, 100000
sub     ecx, eax
mov     eax, ecx
test    eax, eax
jne     .L7
mov     eax, DWORD PTR checked[rip]
mov     esi, eax
mov     edi, OFFSET FLAT:.LC2 ; "checked=%d\n"
mov     eax, 0
call    printf
.L7:
call    GOMP_critical_end
```

Функции с префиксом GOMP это часть библиотеки GNU OpenMP. В отличие от vcomp*.dll, её исходный код свободно доступен: [GitHub](#).

3.27. Windows 16-bit

16-битные программы под Windows в наше время редки, хотя иногда можно поработать с ними, в смысле ретрокомпьютинга, либо которые защищенные донглами (8.5 (стр. 793)).

16-битные версии Windows были вплоть до 3.11. 95/98/ME также поддерживает 16-битный код, как и все 32-битные OS линейки [Windows NT](#). 64-битные версии [Windows NT](#) не поддерживают 16-битный код вообще .

Код напоминает тот что под MS-DOS.

Исполняемые файлы имеют NE-тип (так называемый «new executable»).

Все рассмотренные здесь примеры скомпилированы компилятором OpenWatcom 1.9 используя эти опции:

```
wcl.exe -i=C:/WATCOM/h/win/ -s -os -bt=windows -bcl=windows example.c
```

3.27.1. Пример#1

```
#include <windows.h>

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    MessageBeep(MB_ICONEXCLAMATION);
    return 0;
};
```

```
WinMain      proc near
              push    bp
              mov     bp, sp
              mov     ax, 30h ; '0'      ; MB_ICONEXCLAMATION constant
              push    ax
              call    MESSAGEBEEP
              xor     ax, ax              ; return 0
              pop     bp
              retn    0Ah
WinMain      endp
```

Пока всё просто.

3.27.2. Пример #2

```
#include <windows.h>

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    MessageBox (NULL, "hello, world", "caption", MB_YESNOCANCEL);
    return 0;
};
```

```
WinMain      proc near
              push    bp
              mov     bp, sp
              xor     ax, ax          ; NULL
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aHelloWorld ; 0x18. "hello, world"
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aCaption ; 0x10. "caption"
              push    ax
              mov     ax, 3           ; MB_YESNOCANCEL
              push    ax
              call    MESSAGEBOX
              xor     ax, ax          ; return 0
              pop     bp
              retn    0Ah
WinMain      endp

dseg02:0010 aCaption      db 'caption',0
dseg02:0018 aHelloWorld  db 'hello, world',0
```

Пара важных моментов: соглашение о передаче аргументов здесь PASCAL: оно указывает что самый первый аргумент должен передаваться первым (MB_YESNOCANCEL), а самый последний аргумент — последним (NULL). Это соглашение также указывает вызываемой функции восстановить [stack pointer](#): поэтому инструкция RETN имеет аргумент 0Ah означая что указатель нужно сдвинуть вперед на 10 байт во время возврата из функции . Это как stdcall (6.1.2 (стр. 713)), только аргументы передаются в «естественном» порядке.

Указатели передаются парами: сначала сегмент данных, потом указатель внутри сегмента . В этом примере только один сегмент, так что DS всегда указывает на сегмент данных в исполняемом файле.

3.27.3. Пример #3

```
#include <windows.h>

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    int result=MessageBox (NULL, "hello, world", "caption", MB_YESNOCANCEL);

    if (result==IDCANCEL)
        MessageBox (NULL, "you pressed cancel", "caption", MB_OK);
    else if (result==IDYES)
        MessageBox (NULL, "you pressed yes", "caption", MB_OK);
    else if (result==IDNO)
        MessageBox (NULL, "you pressed no", "caption", MB_OK);

    return 0;
};
```

```

WinMain      proc near
              push    bp
              mov     bp, sp
              xor     ax, ax          ; NULL
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aHelloWorld ; "hello, world"
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aCaption ; "caption"
              push    ax
              mov     ax, 3           ; MB_YESNOCANCEL
              push    ax
              call    MESSAGEBOX
              cmp     ax, 2           ; IDCANCEL
              jnz     short loc_2F
              xor     ax, ax
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aYouPressedCanc ; "you pressed cancel"
              jmp     short loc_49
loc_2F:
              cmp     ax, 6           ; IDYES
              jnz     short loc_3D
              xor     ax, ax
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aYouPressedYes ; "you pressed yes"
              jmp     short loc_49
loc_3D:
              cmp     ax, 7           ; IDNO
              jnz     short loc_57
              xor     ax, ax
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aYouPressedNo ; "you pressed no"
loc_49:
              push    ax
              push    ds
              mov     ax, offset aCaption ; "caption"
              push    ax
              xor     ax, ax
              push    ax
              call    MESSAGEBOX
loc_57:
              xor     ax, ax
              pop     bp
              retn    0Ah
WinMain      endp

```

Немного расширенная версия примера из предыдущей секции .

3.27.4. Пример #4

```

#include <windows.h>

int PASCAL func1 (int a, int b, int c)
{
    return a*b+c;
};

long PASCAL func2 (long a, long b, long c)
{
    return a*b+c;
};

long PASCAL func3 (long a, long b, long c, int d)

```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
{
    return a*b+c-d;
};

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                    HINSTANCE hPrevInstance,
                    LPSTR lpCmdLine,
                    int nCmdShow )
{
    func1 (123, 456, 789);
    func2 (600000, 700000, 800000);
    func3 (600000, 700000, 800000, 123);
    return 0;
};
```

```
func1      proc near

c           = word ptr 4
b           = word ptr 6
a           = word ptr 8

            push    bp
            mov     bp, sp
            mov     ax, [bp+a]
            imul    [bp+b]
            add     ax, [bp+c]
            pop     bp
            retn    6

func1      endp

func2      proc near

arg_0       = word ptr 4
arg_2       = word ptr 6
arg_4       = word ptr 8
arg_6       = word ptr 0Ah
arg_8       = word ptr 0Ch
arg_A       = word ptr 0Eh

            push    bp
            mov     bp, sp
            mov     ax, [bp+arg_8]
            mov     dx, [bp+arg_A]
            mov     bx, [bp+arg_4]
            mov     cx, [bp+arg_6]
            call    sub_B2 ; long 32-bit multiplication
            add     ax, [bp+arg_0]
            adc     dx, [bp+arg_2]
            pop     bp
            retn    12

func2      endp

func3      proc near

arg_0       = word ptr 4
arg_2       = word ptr 6
arg_4       = word ptr 8
arg_6       = word ptr 0Ah
arg_8       = word ptr 0Ch
arg_A       = word ptr 0Eh
arg_C       = word ptr 10h

            push    bp
            mov     bp, sp
            mov     ax, [bp+arg_A]
            mov     dx, [bp+arg_C]
            mov     bx, [bp+arg_6]
            mov     cx, [bp+arg_8]
            call    sub_B2 ; long 32-bit multiplication
            mov     cx, [bp+arg_2]
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```

    add    cx, ax
    mov    bx, [bp+arg_4]
    adc    bx, dx          ; BX=high part, CX=low part
    mov    ax, [bp+arg_0]
    cwd                    ; AX=low part d, DX=high part d
    sub    cx, ax
    mov    ax, cx
    sbb    bx, dx
    mov    dx, bx
    pop    bp
    retn   14
func3
endp

WinMain
proc near
push    bp
mov     bp, sp
mov     ax, 123
push    ax
mov     ax, 456
push    ax
mov     ax, 789
push    ax
call    func1
mov     ax, 9             ; high part of 600000
push    ax
mov     ax, 27C0h         ; low part of 600000
push    ax
mov     ax, 0Ah           ; high part of 700000
push    ax
mov     ax, 0AE60h        ; low part of 700000
push    ax
mov     ax, 0Ch           ; high part of 800000
push    ax
mov     ax, 3500h         ; low part of 800000
push    ax
call    func2
mov     ax, 9             ; high part of 600000
push    ax
mov     ax, 27C0h         ; low part of 600000
push    ax
mov     ax, 0Ah           ; high part of 700000
push    ax
mov     ax, 0AE60h        ; low part of 700000
push    ax
mov     ax, 0Ch           ; high part of 800000
push    ax
mov     ax, 3500h         ; low part of 800000
push    ax
mov     ax, 7Bh           ; 123
push    ax
call    func3
xor     ax, ax            ; return 0
pop     bp
retn    0Ah
WinMain
endp

```

32-битные значения (тип данных `long` означает 32-бита, а `int` здесь 16-битный) в 16-битном коде (и в MS-DOS и в Win16) передаются парами) . Это так же как и 64-битные значения передаются в 32-битной среде ([1.27](#) (стр. [386](#))).

`sub_B2` здесь это библиотечная функция написанная разработчиками компилятора, делающая «long multiplication», т.е. перемножает два 32-битных значения. Другие функции компиляторов делающие то же самое перечислены здесь : [.5](#) (стр. [1019](#)), [.4](#) (стр. [1019](#)).

Пара инструкций `ADD/ADC` используется для сложения этих составных значений : `ADD` может установить или сбросить флаг `CF`, а `ADC` будет использовать его после.

Пара инструкций `SUB/SBB` используется для вычитания: `SUB` может установить или сбросить флаг `CF`, `SBB` будет использовать его после.

3.27. WINDOWS 16-BIT

32-битные значения возвращаются из функций в паре регистров DX:AX .

Константы так же передаются как пары в WinMain().

Константа 123 типа *int* в начале конвертируется (учитывая знак) в 32-битное значение используя инструкция CWD .

3.27.5. Пример #5

```
#include <windows.h>

int PASCAL string_compare (char *s1, char *s2)
{
    while (1)
    {
        if (*s1!=*s2)
            return 0;
        if (*s1==0 || *s2==0)
            return 1; // end of string
        s1++;
        s2++;
    };
};

int PASCAL string_compare_far (char far *s1, char far *s2)
{
    while (1)
    {
        if (*s1!=*s2)
            return 0;
        if (*s1==0 || *s2==0)
            return 1; // end of string
        s1++;
        s2++;
    };
};

void PASCAL remove_digits (char *s)
{
    while (*s)
    {
        if (*s>='0' && *s<='9')
            *s='-';
        s++;
    };
};

char str[]="hello 1234 world";

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    string_compare ("asd", "def");
    string_compare_far ("asd", "def");
    remove_digits (str);
    MessageBox (NULL, str, "caption", MB_YESNOCANCEL);
    return 0;
};
```

```
string_compare proc near
```

```
arg_0 = word ptr 4
arg_2 = word ptr 6
```


3.27. WINDOWS 16-BIT

```
    push    bp
    mov     bp, sp
    push    si
    mov     si, [bp+arg_0]
    mov     bx, [bp+arg_2]

loc_12: ; CODE XREF: string_compare+21j
    mov     al, [bx]
    cmp     al, [si]
    jz      short loc_1C
    xor     ax, ax
    jmp     short loc_2B

loc_1C: ; CODE XREF: string_compare+Ej
    test    al, al
    jz      short loc_22
    jnz     short loc_27

loc_22: ; CODE XREF: string_compare+16j
    mov     ax, 1
    jmp     short loc_2B

loc_27: ; CODE XREF: string_compare+18j
    inc     bx
    inc     si
    jmp     short loc_12

loc_2B: ; CODE XREF: string_compare+12j
        ; string_compare+1Dj
    pop     si
    pop     bp
    retn    4
string_compare endp

string_compare_far proc near ; CODE XREF: WinMain+18p

arg_0 = word ptr 4
arg_2 = word ptr 6
arg_4 = word ptr 8
arg_6 = word ptr 0Ah

    push    bp
    mov     bp, sp
    push    si
    mov     si, [bp+arg_0]
    mov     bx, [bp+arg_4]

loc_3A: ; CODE XREF: string_compare_far+35j
    mov     es, [bp+arg_6]
    mov     al, es:[bx]
    mov     es, [bp+arg_2]
    cmp     al, es:[si]
    jz      short loc_4C
    xor     ax, ax
    jmp     short loc_67

loc_4C: ; CODE XREF: string_compare_far+16j
    mov     es, [bp+arg_6]
    cmp     byte ptr es:[bx], 0
    jz      short loc_5E
    mov     es, [bp+arg_2]
    cmp     byte ptr es:[si], 0
    jnz     short loc_63

loc_5E: ; CODE XREF: string_compare_far+23j
    mov     ax, 1
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
        jmp     short loc_67

loc_63: ; CODE XREF: string_compare_far+2Cj
        inc     bx
        inc     si
        jmp     short loc_3A

loc_67: ; CODE XREF: string_compare_far+1Aj
        ; string_compare_far+31j
        pop     si
        pop     bp
        retn    8
string_compare_far endp

remove_digits  proc near ; CODE XREF: WinMain+1Fp
arg_0 = word ptr 4

        push    bp
        mov     bp, sp
        mov     bx, [bp+arg_0]

loc_72: ; CODE XREF: remove_digits+18j
        mov     al, [bx]
        test    al, al
        jz      short loc_86
        cmp     al, 30h ; '0'
        jb      short loc_83
        cmp     al, 39h ; '9'
        ja      short loc_83
        mov     byte ptr [bx], 2Dh ; '-'

loc_83: ; CODE XREF: remove_digits+Ej
        ; remove_digits+12j
        inc     bx
        jmp     short loc_72

loc_86: ; CODE XREF: remove_digits+Aj
        pop     bp
        retn    2
remove_digits  endp

WinMain proc near ; CODE XREF: start+EDp
        push    bp
        mov     bp, sp
        mov     ax, offset aAsd ; "asd"
        push    ax
        mov     ax, offset aDef ; "def"
        push    ax
        call    string_compare
        push    ds
        mov     ax, offset aAsd ; "asd"
        push    ax
        push    ds
        mov     ax, offset aDef ; "def"
        push    ax
        call    string_compare_far
        mov     ax, offset aHello1234World ; "hello 1234 world"
        push    ax
        call    remove_digits
        xor     ax, ax
        push    ax
        push    ds
        mov     ax, offset aHello1234World ; "hello 1234 world"
        push    ax
        push    ds
        mov     ax, offset aCaption ; "caption"
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
push    ax
mov     ax, 3 ; MB_YESNOCANCEL
push    ax
call    MESSAGEBOX
xor     ax, ax
pop     bp
retn    0Ah
WinMain endp
```

Здесь мы можем увидеть разницу между указателями «near» и указателями «far» еще один ужасный артефакт сегментированной памяти 16-битного 8086 .

Читайте больше об этом: [10.6](#) (стр. 978).

Указатели «near» («близкие») это те которые указывают в пределах текущего сегмента . Поэтому, функция `string_compare()` берет на вход только 2 16-битных значения и работает с данными расположенными в сегменте, на который указывает `DS` (инструкция `mov al, [bx]` на самом деле работает как `mov al, ds:[bx]` — `DS` используется здесь неявно).

Указатели «far» (далекие) могут указывать на данные в другом сегменте памяти. Поэтому `string_compare_far()` берет на вход 16-битную пару как указатель, загружает старшую часть в сегментный регистр `ES` и обращается к данным через него (`mov al, es:[bx]`). Указатели «far» также используются в моем win16-примере касательно `MessageBox()`: [3.27.2](#) (стр. 627). Действительно, ядро Windows должно знать, из какого сегмента данных читать текстовые строки, так что ему нужна полная информация.

Причина этой разницы в том, что компактная программа вполне может обойтись одним сегментом данных размером 64 килобайта, так что старшую часть указателя передавать не нужна (ведь она одинаковая везде) . Большие программы могут использовать несколько сегментов данных размером 64 килобайта, так что нужно указывать каждый раз, в каком сегменте расположены данные .

То же касается и сегментов кода. Компактная программа может расположиться в пределах одного 64kb-сегмента, тогда функции в ней будут вызываться инструкцией `CALL NEAR`, а возвращаться управление используя `RETN`. Но если сегментов кода несколько, тогда и адрес вызываемой функции будет задаваться парой, вызываться она будет используя `CALL FAR`, а возвращаться управление используя `RETF`.

Это то что задается в компиляторе указывая «memory model».

Компиляторы под MS-DOS и Win16 имели разные библиотеки под разные модели памяти: они отличались типами указателей для кода и данных.

3.27.6. Пример #6

```
#include <windows.h>
#include <time.h>
#include <stdio.h>

char strbuf[256];

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    struct tm *t;
    time_t unix_time;

    unix_time=time(NULL);

    t=localtime (&unix_time);

    sprintf (strbuf, "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d", t->tm_year+1900, t->tm_mon, t->tm_mday,
    ↵ t->tm_hour, t->tm_min, t->tm_sec);

    MessageBox (NULL, strbuf, "caption", MB_OK);
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
    return 0;
};
```

```
WinMain    proc near

var_4      = word ptr -4
var_2      = word ptr -2

    push    bp
    mov     bp, sp
    push    ax
    push    ax
    xor     ax, ax
    call    time_
    mov     [bp+var_4], ax    ; low part of UNIX time
    mov     [bp+var_2], dx    ; high part of UNIX time
    lea     ax, [bp+var_4]    ; take a pointer of high part
    call    localtime_
    mov     bx, ax            ; t
    push    word ptr [bx]     ; second
    push    word ptr [bx+2]   ; minute
    push    word ptr [bx+4]   ; hour
    push    word ptr [bx+6]   ; day
    push    word ptr [bx+8]   ; month
    mov     ax, [bx+0Ah]      ; year
    add     ax, 1900
    push    ax
    mov     ax, offset a04d02d02d02d02 ; "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d"
    push    ax
    mov     ax, offset strbuf
    push    ax
    call    sprintf_
    add     sp, 10h
    xor     ax, ax            ; NULL
    push    ax
    push    ds
    mov     ax, offset strbuf
    push    ax
    push    ds
    mov     ax, offset aCaption ; "caption"
    push    ax
    xor     ax, ax            ; MB_OK
    push    ax
    call    MESSAGEBOX
    xor     ax, ax
    mov     sp, bp
    pop     bp
    retn    0Ah

WinMain    endp
```

Время в формате UNIX это 32-битное значение, так что оно возвращается в паре регистров DX:AX и сохраняется в двух локальных 16-битных переменных. Потом указатель на эту пару передается в функцию `localtime()`. Функция `localtime()` имеет структуру `struct tm` расположенную у себя где-то внутри, так что только указатель на нее возвращается. Кстати, это также означает, что функцию нельзя вызывать еще раз, пока её результаты не были использованы.

Для функций `time()` и `localtime()` используется Watcom-соглашение о вызовах: первые четыре аргумента передаются через регистры AX, DX, BX и CX, а остальные аргументы через стек. Функции, использующие это соглашение, маркируются символом подчеркивания в конце имени.

Для вызова функции `sprintf()` используется обычное соглашение *cdecl* (6.1.1 (стр. 713)) вместо PASCAL или Watcom, так что аргументы передаются привычным образом.

Глобальные переменные

Это тот же пример, только переменные теперь глобальные:

```
#include <windows.h>
```

3.27. WINDOWS 16-BIT

```
#include <time.h>
#include <stdio.h>

char strbuf[256];
struct tm *t;
time_t unix_time;

int PASCAL WinMain( HINSTANCE hInstance,
                   HINSTANCE hPrevInstance,
                   LPSTR lpCmdLine,
                   int nCmdShow )
{
    unix_time=time(NULL);

    t=localtime (&unix_time);

    sprintf (strbuf, "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d", t->tm_year+1900, t->tm_mon, t->tm_mday,
    ↵ t->tm_hour, t->tm_min, t->tm_sec);

    MessageBox (NULL, strbuf, "caption", MB_OK);
    return 0;
};
```

```
unix_time_low    dw 0
unix_time_high   dw 0
t                dw 0

WinMain          proc near
    push        bp
    mov         bp, sp
    xor         ax, ax
    call        time_
    mov         unix_time_low, ax
    mov         unix_time_high, dx
    mov         ax, offset unix_time_low
    call        localtime_
    mov         bx, ax
    mov         t, ax                ; will not be used in future...
    push        word ptr [bx]        ; seconds
    push        word ptr [bx+2]      ; minutes
    push        word ptr [bx+4]      ; hour
    push        word ptr [bx+6]      ; day
    push        word ptr [bx+8]      ; month
    mov         ax, [bx+0Ah]         ; year
    add         ax, 1900
    push        ax
    mov         ax, offset a04d02d02d02d02 ; "%04d-%02d-%02d %02d:%02d:%02d"
    push        ax
    mov         ax, offset strbuf
    push        ax
    call        sprintf_
    add         sp, 10h
    xor         ax, ax                ; NULL
    push        ax
    push        ds
    mov         ax, offset strbuf
    push        ax
    push        ds
    mov         ax, offset aCaption ; "caption"
    push        ax
    xor         ax, ax                ; MB_OK
    push        ax
    call        MESSAGEBOX
    xor         ax, ax                ; return 0
    pop         bp
    retn        0Ah

WinMain          endp
```

3.27. *WINDOWS 16-BIT*

`t` не будет использоваться, но компилятор создал код, записывающий в эту переменную.

Потому что он не уверен, может быть это значение будет прочитано где-то в другом модуле.

Глава 4

Java

4.1. Java

4.1.1. Введение

Есть немало известных декомпиляторов для Java (или для JVM-байткода вообще) ¹.

Причина в том что декомпиляция JVM-байткода проще чем низкоуровневого x86-кода:

- Здесь намного больше информации о типах.
- Модель памяти в JVM более строгая и очерченная.
- Java-компилятор не делает никаких оптимизаций (это делает JVM JIT² во время исполнения), так что байткод в class-файлах легко читаем.

Когда знания JVM-байткода могут быть полезны?

- Мелкая/несложная работа по патчингу class-файлов без необходимости снова компилировать результаты декомпилятора.
- Анализ обфусцированного кода.
- Создание вашего собственного обфускатора.
- Создание кодегенератора компилятора (back-end), создающего код для JVM (как Scala, Clojure, итд ³).

Начнем с простых фрагментов кода.

Если не указано иное, везде используется JDK 1.7.

Эта команда использовалась везде для декомпиляции class-файлов:

```
javap -c -verbose.
```

Эта книга использовалась мною для подготовки всех примеров: [Tim Lindholm, Frank Yellin, Gilad Bracha, Alex Buckley, *The Java(R) Virtual Machine Specification / Java SE 7 Edition*] ⁴.

4.1.2. Возврат значения

Наверное, самая простая из всех возможных функций на Java это та, что возвращает некоторое значение.

О, и мы не должны забывать, что в Java нет «свободных» функций в общем смысле, это «методы».

Каждый метод принадлежит какому-то классу, так что невозможно объявить метод вне какого-либо класса.

Но мы все равно будем называть их «функциями», для простоты.

¹Например, JAD: <http://varaneckas.com/jad/>

²Just-In-Time compilation

³Полный список: http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_JVM_languages

⁴Также доступно здесь: <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/jvms7.pdf>; <http://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html/>

4.1. JAVA

```
public class ret
{
    public static int main(String[] args)
    {
        return 0;
    }
}
```

Компилируем это:

```
javac ret.java
```

...и декомпилирую используя стандартную утилиту в Java:

```
javap -c -verbose ret.class
```

И получаем:

Листинг 4.1: JDK 1.7 (excerpt)

```
public static int main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
       0: iconst_0
       1: ireturn
```

Разработчики Java решили, что 0 это самая используемая константа в программировании, так что здесь есть отдельная однобайтная инструкция `iconst_0`, заталкивающая 0 в стек ⁵.

Здесь есть также `iconst_1` (заталкивающая 1), `iconst_2`, итд, вплоть до `iconst_5`. Есть также `iconst_m1` заталкивающая -1.

Стек также используется в JVM для передачи данных в вызывающие ф-ции, и также для возврата значений. Так что `iconst_0` заталкивает 0 в стек. `ireturn` возвращает целочисленное значение (*i* в названии означает *integer*) из [TOS](#)⁶.

Немного перепишем наш пример, теперь возвращаем 1234:

```
public class ret
{
    public static int main(String[] args)
    {
        return 1234;
    }
}
```

...получаем:

Листинг 4.2: JDK 1.7 (excerpt)

```
public static int main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
       0: sipush      1234
       3: ireturn
```

`sipush` (*short integer*) заталкивает значение 1234 в стек. *short* в имени означает, что 16-битное значение будет заталкиваться в стек.

Число 1234 действительно помещается в 16-битное значение.

Как насчет бóльших значений?

```
public class ret
{
    public static int main(String[] args)
```

⁵Так же как и в MIPS, где для нулевой константы имеется отдельный регистр: [1.5.5](#) (стр. 26).

⁶Top of Stack (вершина стека)

4.1. JAVA

```
{
    return 12345678;
}
```

Листинг 4.3: Constant pool

```
...
#2 = Integer          12345678
...
```

```
public static int main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
       0: ldc          #2              // int 12345678
       2: ireturn
```

Невозможно закодировать 32-битное число в опкоде какой-либо JVM-инструкции, разработчики не оставили такой возможности.

Так что 32-битное число 12345678 сохранено в так называемом «constant pool» (пул констант), который, так скажем, является библиотекой наиболее используемых констант (включая строки, объекты, итд).

Этот способ передачи констант не уникален для JVM.

MIPS, ARM и прочие RISC-процессоры не могут кодировать 32-битные числа в 32-битных опкодах, так что код для RISC-процессоров (включая MIPS и ARM) должен конструировать значения в несколько шагов, или держать их в сегменте данных: [1.31.3](#) (стр. 431), [1.32.1](#) (стр. 434).

Код для MIPS также традиционно имеет пул констант, называемый «literal pool», это сегменты с названиями «.lit4» (для хранения 32-битных чисел с плавающей точкой одинарной точности) и «.lit8» (для хранения 64-битных чисел с плавающей точкой двойной точности).

Попробуем некоторые другие типы данных!

Boolean:

```
public class ret
{
    public static boolean main(String[] args)
    {
        return true;
    }
}
```

```
public static boolean main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
       0: iconst_1
       1: ireturn
```

Этот JVM-байткод не отличается от того, что возвращает целочисленную 1.

32-битные слоты данных в стеке также используются для булевых значений, как в Си/Си++.

Но нельзя использовать возвращаемое значение булевого типа как целочисленное и наоборот — информация о типах сохраняется в class-файлах и проверяется при запуске.

Та же история с 16-битным *short*:

```
public class ret
{
    public static short main(String[] args)
    {
        return 1234;
    }
}
```

4.1. JAVA

```
public static short main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: sipush      1234
      3: ireturn
```

...и *char*!

```
public class ret
{
    public static char main(String[] args)
    {
        return 'A';
    }
}
```

```
public static char main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: bipush        65
      2: ireturn
```

bipush означает «push byte».

Нужно сказать, что *char* в Java, это 16-битный символ в кодировке UTF-16, и он эквивалентен *short*, но ASCII-код символа «А» это 65, и можно воспользоваться инструкцией для передачи байта в стек.

Попробуем также *byte*:

```
public class retc
{
    public static byte main(String[] args)
    {
        return 123;
    }
}
```

```
public static byte main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: bipush        123
      2: ireturn
```

Кто-то может спросить, зачем заморачиваться использованием 16-битного типа *short*, который внутри все равно 32-битный *integer*?

Зачем использовать тип данных *char*, если это то же самое что и тип *short*?

Ответ прост: для контроля типов данных и читабельности исходников.

char может быть эквивалентом *short*, но мы быстро понимаем, что это ячейка для символа в кодировке UTF-16, а не для какого-то другого целочисленного значения.

Когда используем *short*, мы можем показать всем, что диапазон этой переменной ограничен 16-ю битами.

Очень хорошая идея использовать тип *boolean* где нужно, вместо *int* для тех же целей, как это было в Си.

В Java есть также 64-битный целочисленный тип:

```
public class ret3
{
    public static long main(String[] args)
    {
        return 1234567890123456789L;
    }
}
```

4.1. JAVA

Листинг 4.4: Constant pool

```
...
#2 = Long          1234567890123456789l
...

public static long main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
      0: ldc2_w      #2          // long 1234567890123456789l
      3: lreturn
```

64-битное число также хранится в пуле констант, `ldc2_w` загружает его и `lreturn` (*long return*) возвращает его.

Инструкция `ldc2_w` также используется для загрузки чисел с плавающей точкой двойной точности (которые также занимают 64 бита) из пула констант:

```
public class ret
{
    public static double main(String[] args)
    {
        return 123.456d;
    }
}
```

Листинг 4.5: Constant pool

```
...
#2 = Double        123.456d
...

public static double main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
      0: ldc2_w      #2          // double 123.456d
      3: dreturn
```

`dreturn` означает «return double».

И наконец, числа с плавающей точкой одинарной точности:

```
public class ret
{
    public static float main(String[] args)
    {
        return 123.456f;
    }
}
```

Листинг 4.6: Constant pool

```
...
#2 = Float         123.456f
...

public static float main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: ldc        #2          // float 123.456f
      2: freturn
```

Используемая здесь инструкция `ldc` та же, что и для загрузки 32-битных целочисленных чисел из пула констант.

`freturn` означает «return float».

А что насчет тех случаев, когда функция ничего не возвращает?

4.1. JAVA

```
public class ret
{
    public static void main(String[] args)
    {
        return;
    }
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=0, locals=1, args_size=1
      0: return
```

Это означает, что инструкция `return` используется для возврата управления без возврата какого-либо значения.

Зная все это, по последней инструкции очень легко определить тип возвращаемого значения функции (или метода).

4.1.3. Простая вычисляющая функция

Продолжим с простой вычисляющей функцией.

```
public class calc
{
    public static int half(int a)
    {
        return a/2;
    }
}
```

Это тот случай, когда используется инструкция `iconst_2`:

```
public static int half(int);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
      0: iload_0
      1: iconst_2
      2: idiv
      3: ireturn
```

`iload_0` Берет нулевой аргумент функции и заталкивает его в стек. `iconst_2` заталкивает в стек 2.

Вот как выглядит стек после исполнения этих двух инструкций:

```
      +---+
TOS ->| 2 |
      +---+
      | a |
      +---+
```

`idiv` просто берет два значения на вершине стека ([TOS](#)), делит одно на другое и оставляет результат на вершине ([TOS](#)):

```
      +-----+
TOS ->| result |
      +-----+
```

`ireturn` берет его и возвращает.

Продолжим с числами с плавающей запятой, двойной точности:

4.1. JAVA

```
public class calc
{
    public static double half_double(double a)
    {
        return a/2.0;
    }
}
```

Листинг 4.7: Constant pool

```
...
#2 = Double          2.0d
...
```

```
public static double half_double(double);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=4, locals=2, args_size=1
     0: dload_0
     1: ldc2_w      #2          // double 2.0d
     4: ddiv
     5: dreturn
```

Почти то же самое, но инструкция `ldc2_w` используется для загрузки константы 2.0 из пула констант.

Также, все три инструкции имеют префикс *d*, что означает, что они работают с переменными типа *double*.

Теперь перейдем к функции с двумя аргументами:

```
public class calc
{
    public static int sum(int a, int b)
    {
        return a+b;
    }
}
```

```
public static int sum(int, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
     0: iload_0
     1: iload_1
     2: iadd
     3: ireturn
```

`iload_0` загружает первый аргумент функции (a), `iload_1` — второй (b).

Вот так выглядит стек после исполнения обеих инструкций:

```

+---+
TOS ->| b |
+---+
    | a |
+---+
```

`iadd` складывает два значения и оставляет результат на [TOS](#):

```

+-----+
TOS ->| result |
+-----+
```

Расширим этот пример до типа данных *long*:

```
public static long lsum(long a, long b)
{
    return a+b;
}
```

4.1. JAVA

...получим:

```
public static long lsum(long, long);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=4, locals=4, args_size=2
      0: lload_0
      1: lload_2
      2: ladd
      3: lreturn
```

Вторая инструкция `lload` берет второй аргумент из второго слота.

Это потому что 64-битное значение *long* занимает ровно два 32-битных слота.

Немного более сложный пример:

```
public class calc
{
    public static int mult_add(int a, int b, int c)
    {
        return a*b+c;
    }
}
```

```
public static int mult_add(int, int, int);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=2, locals=3, args_size=3
      0: iload_0
      1: iload_1
      2: imul
      3: iload_2
      4: iadd
      5: ireturn
```

Первый шаг это умножение. Произведение остается на [TOS](#):

```
+-----+
TOS ->| product |
+-----+
```

`iload_2` загружает третий аргумент (c) в стек:

```
+-----+
TOS ->|  c  |
+-----+
| product |
+-----+
```

Теперь инструкция `iadd` может сложить два значения.

4.1.4. Модель памяти в JVM

x86 и другие низкоуровневые среды используют стек для передачи аргументов и как хранилище локальных переменных. [JVM](#) устроена немного иначе.

Тут есть:

- Массив локальных переменных ([LVA](#)⁷).

Используется как хранилище для аргументов функций и локальных переменных.

Инструкции вроде `iload_0` загружают значения оттуда. `istore` записывает значения туда.

В начале идут аргументы функции: начиная с 0, или с 1 (если нулевой аргумент занят указателем *this*).

Затем располагаются локальные переменные.

⁷(Java) Local Variable Array (массив локальных переменных)

4.1. JAVA

Каждый слот имеет размер 32 бита.

Следовательно, значения типов *long* и *double* занимают два слота.

- Стек операндов (или просто «стек»).

Используется для вычислений и для передачи аргументов во время вызова других функций.

В отличие от низкоуровневых сред вроде x86, здесь невозможно работать со стеком без использования инструкций, которые явно заталкивают или выталкивают значения туда/оттуда.

- Куча (heap). Используется как хранилище для объектов и массивов.

Эти 3 области изолированы друг от друга.

4.1.5. Простой вызов функций

`Math.random()` возвращает псевдослучайное число в пределах [0.0 ...1.0), но представим, по какой-то причине, нам нужна функция, возвращающая число в пределах [0.0 ...0.5):

```
public class HalfRandom
{
    public static double f()
    {
        return Math.random()/2;
    }
}
```

Листинг 4.8: Constant pool

```
...
#2 = Methodref      #18.#19    //  java/lang/Math.random:()D
#3 = Double         2.0d
...
#12 = Utf8          ()D
...
#18 = Class         #22         //  java/lang/Math
#19 = NameAndType   #23:#12    //  random:()D
#22 = Utf8          java/lang/Math
#23 = Utf8          random
```

```
public static double f();
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=4, locals=0, args_size=0
     0: invokestatic  #2          //  Method java/lang/Math.random:()D
     3: ldc2_w       #3          //  double 2.0d
     6: ddiv
     7: dreturn
```

`invokestatic` вызывает функцию `Math.random()` и оставляет результат на [TOS](#).

Затем результат делится на 2.0 и возвращается.

Но как закодировано имя функции?

Оно закодировано в пуле констант используя выражение `Methodref`.

Оно определяет имена класса и метода.

Первое поле `Methodref` указывает на выражение `Class`, которое, в свою очередь, указывает на обычную текстовую строку («`java/lang/Math`»).

Второе выражение `Methodref` указывает на выражение `NameAndType`, которое также имеет две ссылки на строки.

Первая строка это «`random`», это имя метода.

Вторая строка это «`()D`», которая кодирует тип функции. Это означает, что возвращаемый тип — *double* (отсюда *D* в строке).

Благодаря этому 1) JVM проверяет корректность типов данных; 2) Java-декомпиляторы могут восстанавливать типы данных из class-файлов.

4.1. JAVA

Наконец попробуем пример «Hello, world!»:

```
public class HelloWorld
{
    public static void main(String[] args)
    {
        System.out.println("Hello, World");
    }
}
```

Листинг 4.9: Constant pool

```
...
#2 = Fieldref      #16.#17      // java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
#3 = String        #18          // Hello, World
#4 = Methodref     #19.#20      // java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
...
#16 = Class        #23          // java/lang/System
#17 = NameAndType  #24:#25      // out:Ljava/io/PrintStream;
#18 = Utf8         Hello, World
#19 = Class        #26          // java/io/PrintStream
#20 = NameAndType  #27:#28      // println:(Ljava/lang/String;)V
...
#23 = Utf8         java/lang/System
#24 = Utf8         out
#25 = Utf8         Ljava/io/PrintStream;
#26 = Utf8         java/io/PrintStream
#27 = Utf8         println
#28 = Utf8         (Ljava/lang/String;)V
...
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
       0: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
       3: ldc           #3          // String Hello, World
       5: invokevirtual #4          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
       8: return
```

`ldc` по смещению 3 берет указатель (или адрес) на строку «Hello, World» в пуле констант и заталкивает его в стек.

В мире Java это называется *reference*, но это скорее указатель или просто адрес ⁸.

Уже знакомая нам инструкция `invokevirtual` берет информацию о функции (или методе) `println` из пула констант и вызывает её.

Как мы можем знать, есть несколько методов `println`, каждый предназначен для каждого типа данных.

В нашем случае, используется та версия `println`, которая для типа данных *String*.

Что насчет первой инструкции `getstatic`?

Эта инструкция берет *reference* (или адрес) поля объекта `System.out` и заталкивает его в стек.

Это значение работает как указатель *this* для метода `println`.

Таким образом, внутри, метод `println` берет на вход два аргумента: 1) *this*, т.е. указатель на объект ⁹; 2) адрес строки «Hello, World».

Действительно, `println()` вызывается как метод в рамках инициализированного объекта `System.out`.

Для удобства, утилита `javap` пишет всю эту информацию в комментариях.

4.1.6. Вызов `beep()`

Вот простейший вызов двух функций без аргументов:

⁸О разнице между указателями и *reference* в C++: [3.18.3](#) (стр. 550).

⁹Или «экземпляр класса» в некоторой русскоязычной литературе.

4.1. JAVA

```
public static void main(String[] args)
{
    java.awt.Toolkit.getDefaultToolkit().beep();
};
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: invokestatic #2          // Method java/awt/Toolkit.getDefaultToolkit:()Ljava/awt/Toolkit;
      3: invokevirtual #3          // Method java/awt/Toolkit.beep:()V
      6: return
```

Первая `invokestatic` по смещению 0 вызывает `java.awt.Toolkit.getDefaultToolkit()`, которая возвращает *reference* (указатель) на объект класса `Toolkit`.

Инструкция `invokevirtual` по смещению 3 вызывает метод `beep()` этого класса.

4.1.7. Линейный конгруэнтный ГПСЧ

Попробуем простой генератор псевдослучайных чисел, который мы однажды уже рассматривали в этой книге ([1.23](#) (стр. 329)):

```
public class LCG
{
    public static int rand_state;

    public void my_srand (int init)
    {
        rand_state=init;
    }

    public static int RNG_a=1664525;
    public static int RNG_c=1013904223;

    public int my_rand ()
    {
        rand_state=rand_state*RNG_a;
        rand_state=rand_state+RNG_c;
        return rand_state & 0x7fff;
    }
}
```

Здесь пара полей класса, которые инициализируются в начале. Но как?

В выводе `javap` мы можем найти конструктор класса:

```
static {};
  flags: ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=0, args_size=0
      0: ldc          #5          // int 1664525
      2: putstatic    #3          // Field RNG_a:I
      5: ldc          #6          // int 1013904223
      7: putstatic    #4          // Field RNG_c:I
     10: return
```

Так инициализируются переменные.

`RNG_a` занимает третий слот в классе и `RNG_c` — четвертый, и `putstatic` записывает туда константы.

Функция `my_srand()` просто записывает входное значение в `rand_state`:

4.1. JAVA

```
public void my_srand(int);
  flags: ACC_PUBLIC
  Code:
    stack=1, locals=2, args_size=2
      0: iload_1
      1: putstatic      #2          // Field rand_state:I
      4: return
```

`iload_1` берет входное значение и заталкивает его в стек. Но почему не `iload_0`?

Это потому что эта функция может использовать поля класса, а переменная *this* также передается в эту функцию как нулевой аргумент.

Поле `rand_state` занимает второй слот в классе, так что `putstatic` копирует переменную из [TOS](#) во второй слот.

Теперь `my_rand()`:

```
public int my_rand();
  flags: ACC_PUBLIC
  Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
      0: getstatic      #2          // Field rand_state:I
      3: getstatic      #3          // Field RNG_a:I
      6: imul
      7: putstatic      #2          // Field rand_state:I
     10: getstatic      #2          // Field rand_state:I
     13: getstatic      #4          // Field RNG_c:I
     16: iadd
     17: putstatic      #2          // Field rand_state:I
     20: getstatic      #2          // Field rand_state:I
     23: sipush        32767
     26: iand
     27: ireturn
```

Она просто загружает все переменные из полей объекта, производит с ними операции и обновляет значение `rand_state`, используя инструкцию `putstatic`.

По смещению 20, значение `rand_state` перезагружается снова (это потому что оно было выброшено из стека перед этим, инструкцией `putstatic`).

Это выглядит как неэффективный код, но можете быть уверенными, [JVM](#) обычно достаточно хорош, чтобы хорошо оптимизировать подобные вещи.

4.1.8. Условные переходы

Перейдем к условным переходам.

```
public class abs
{
    public static int abs(int a)
    {
        if (a<0)
            return -a;
        return a;
    }
}
```

```
public static int abs(int);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
      0: iload_0
      1: ifge           7
      4: iload_0
      5: ineg
      6: ireturn
      7: iload_0
      8: ireturn
```

4.1. JAVA

ifge переходит на смещение 7 если значение на [TOS](#) больше или равно 0.

Не забывайте, любая инструкция ifXX выталкивает значение (с которым будет производиться сравнение) из стека.

ineg просто меняет знак значения на [TOS](#).

Еще пример:

```
public static int min (int a, int b)
{
    if (a>b)
        return b;
    return a;
}
```

Получаем:

```
public static int min(int, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
     0: iload_0
     1: iload_1
     2: if_icmple      7
     5: iload_1
     6: ireturn
     7: iload_0
     8: ireturn
```

if_icmple выталкивает два значения и сравнивает их.

Если второе меньше первого (или равно), происходит переход на смещение 7.

Когда мы определяем функцию max() ...

```
public static int max (int a, int b)
{
    if (a>b)
        return a;
    return b;
}
```

...итоговый код точно такой же, только последние инструкции iload (на смещениях 5 и 7) поменяны местами:

```
public static int max(int, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
     0: iload_0
     1: iload_1
     2: if_icmple      7
     5: iload_0
     6: ireturn
     7: iload_1
     8: ireturn
```

Более сложный пример:

```
public class cond
{
    public static void f(int i)
    {
        if (i<100)
            System.out.print("<100");
        if (i==100)
            System.out.print("==100");
        if (i>100)
            System.out.print(">100");
        if (i==0)
            System.out.print("==0");
    }
}
```

4.1. JAVA

```
}  
}
```

```
public static void f(int);  
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC  
  Code:  
    stack=2, locals=1, args_size=1  
      0: iload_0  
      1: bipush      100  
      3: if_icmpge     14  
      6: getstatic     #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
      9: ldc          #3      // String <100  
     11: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V  
     14: iload_0  
     15: bipush      100  
     17: if_icmpne     28  
     20: getstatic     #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
     23: ldc          #5      // String ==100  
     25: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V  
     28: iload_0  
     29: bipush      100  
     31: if_icmple     42  
     34: getstatic     #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
     37: ldc          #6      // String >100  
     39: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V  
     42: iload_0  
     43: ifne          54  
     46: getstatic     #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
     49: ldc          #7      // String ==0  
     51: invokevirtual #4      // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V  
     54: return
```

if_icmpge Выталкивает два значения и сравнивает их.

Если второй больше первого, происходит переход на смещение 14.

if_icmpne и if_icmple работают одинаково, но используются разные условия.

По смещению 43 есть также инструкция ifne.

Название неудачное, её было бы лучше назвать ifnz (переход если переменная на [TOS](#) не равна нулю).

И вот что она делает: производит переход на смещение 54, если входное значение не ноль.

Если ноль, управление передается на смещение 46, где выводится строка «==0».

N.B.: В [JVM](#) нет беззнаковых типов данных, так что инструкции сравнения работают только со знаковыми целочисленными значениями.

4.1.9. Передача аргументов

Теперь расширим пример min()/max():

```
public class minmax  
{  
    public static int min (int a, int b)  
    {  
        if (a>b)  
            return b;  
        return a;  
    }  
  
    public static int max (int a, int b)  
    {  
        if (a>b)  
            return a;  
        return b;  
    }  
}
```

4.1. JAVA

```
public static void main(String[] args)
{
    int a=123, b=456;
    int max_value=max(a, b);
    int min_value=min(a, b);
    System.out.println(min_value);
    System.out.println(max_value);
}
```

Вот код функции main():

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=5, args_size=1
     0: bipush      123
     2: istore_1
     3: sipush      456
     6: istore_2
     7: iload_1
     8: iload_2
     9: invokestatic #2      // Method max:(II)I
    12: istore_3
    13: iload_1
    14: iload_2
    15: invokestatic #3      // Method min:(II)I
    18: istore      4
    20: getstatic   #4      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    23: iload      4
    25: invokevirtual #5      // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
    28: getstatic   #4      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    31: iload_3
    32: invokevirtual #5      // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
    35: return
```

В другую функцию аргументы передаются в стеке, а возвращаемое значение остается на [TOS](#).

4.1.10. Битовые поля

Все побитовые операции работают также, как и в любой другой [ISA](#):

```
public static int set (int a, int b)
{
    return a | 1<<b;
}

public static int clear (int a, int b)
{
    return a & ~(1<<b));
}
```

```
public static int set(int, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=3, locals=2, args_size=2
     0: iload_0
     1: iconst_1
     2: iload_1
     3: ishl
     4: ior
     5: ireturn

public static int clear(int, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=3, locals=2, args_size=2
     0: iload_0
```

4.1. JAVA

```
1: iconst_1
2: iload_1
3: ishl
4: iconst_m1
5: ixor
6: iand
7: ireturn
```

`iconst_m1` загружает `-1` в стек, это то же что и значение `0xFFFFFFFF`.

Операция XOR с `0xFFFFFFFF` в одном из операндов, это тот же эффект что инвертирование всех бит (2.6 (стр. 452)).

Попробуем также расширить все типы данных до 64-битного *long*:

```
public static long lset (long a, int b)
{
    return a | 1<<b;
}

public static long lclear (long a, int b)
{
    return a & ~(1<<b);
}
```

```
public static long lset(long, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=4, locals=3, args_size=2
    0: lload_0
    1: iconst_1
    2: iload_2
    3: ishl
    4: i2l
    5: lor
    6: lreturn

public static long lclear(long, int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=4, locals=3, args_size=2
    0: lload_0
    1: iconst_1
    2: iload_2
    3: ishl
    4: iconst_m1
    5: ixor
    6: i2l
    7: land
    8: lreturn
```

Код такой же, но используются инструкции с префиксом *l*, которые работают с 64-битными значениями.

Так же, второй аргумент функции все еще имеет тип *int*, и когда 32-битное число в нем должно быть расширено до 64-битного значения, используется инструкция `i2l`, которая расширяет значение типа *integer* в значение типа *long*.

4.1.11. Циклы

```
public class Loop
{
    public static void main(String[] args)
    {
        for (int i = 1; i <= 10; i++)
        {
            System.out.println(i);
        }
    }
}
```

4.1. JAVA

```
}  
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);  
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC  
  Code:  
    stack=2, locals=2, args_size=1  
      0: iconst_1  
      1: istore_1  
      2: iload_1  
      3: bipush      10  
      5: if_icmpgt    21  
      8: getstatic     #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;  
     11: iload_1  
     12: invokevirtual #3          // Method java/io/PrintStream.println:(I)V  
     15: iinc           1, 1  
     18: goto          2  
     21: return
```

`iconst_1` загружает 1 в [TOS](#), `istore_1` сохраняет её в первом слоте [LVA](#). Почему не нулевой слот? Потому что функция `main()` имеет один аргумент (массив `String`), и указатель на него (или *reference*) сейчас в нулевом слоте.

Так что локальная переменная *i* всегда будет в первом слоте.

Инструкции по смещениями 3 и 5 сравнивают *i* с 10.

Если *i* больше, управление передается на смещение 21, где функция заканчивает работу.

Если нет, вызывается `println`.

i перезагружается по смещению 11, для `println`.

Кстати, мы вызываем метод `println` для типа данных *integer*, и мы видим это в комментариях: «(I)V» (*I* означает *integer* и *V* означает, что возвращаемое значение имеет тип *void*).

Когда `println` заканчивается, *i* увеличивается на 1 по смещению 15.

Первый операнд инструкции это номер слота (1), второй это число (1) для прибавления.

`goto` это просто GOTO, она переходит на начало цикла по смещению 2.

Перейдем к более сложному примеру:

```
public class Fibonacci  
{  
    public static void main(String[] args)  
    {  
        int limit = 20, f = 0, g = 1;  
  
        for (int i = 1; i <= limit; i++)  
        {  
            f = f + g;  
            g = f - g;  
            System.out.println(f);  
        }  
    }  
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);  
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC  
  Code:  
    stack=2, locals=5, args_size=1  
      0: bipush      20  
      2: istore_1  
      3: iconst_0  
      4: istore_2  
      5: iconst_1  
      6: istore_3  
      7: iconst_1  
      8: istore      4  
     10: iload      4
```

4.1. JAVA

```
12: iload_1
13: if_icmpgt      37
16: iload_2
17: iload_3
18: iadd
19: istore_2
20: iload_2
21: iload_3
22: isub
23: istore_3
24: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
27: iload_2
28: invokevirtual  #3          // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
31: iinc           4, 1
34: goto          10
37: return
```

Вот карта слотов в [LVA](#):

- 0 — единственный аргумент функции `main()`
- 1 — *limit*, всегда содержит 20
- 2 — *f*
- 3 — *g*
- 4 — *i*

Мы видим, что компилятор Java расположил переменные в слотах [LVA](#) в точно таком же порядке, в котором переменные были определены в исходном коде.

Существуют отдельные инструкции `istore` для слотов 0, 1, 2, 3, но не 4 и более, так что здесь есть `istore` с дополнительным операндом по смещению 8, которая имеет номер слота в операнде.

Та же история с `iload` по смещению 10.

Но не слишком ли это сомнительно, выделить целый слот для переменной *limit*, которая всегда содержит 20 (так что это по сути константа), и перезагружать её так часто?

[JIT](#)-компилятор в [JVM](#) обычно достаточно хорош, чтобы всё это оптимизировать.

Самостоятельное вмешательство в код, наверное, того не стоит.

4.1.12. switch()

Выражение `switch()` реализуется инструкцией `tableswitch`:

```
public static void f(int a)
{
    switch (a)
    {
        case 0: System.out.println("zero"); break;
        case 1: System.out.println("one\n"); break;
        case 2: System.out.println("two\n"); break;
        case 3: System.out.println("three\n"); break;
        case 4: System.out.println("four\n"); break;
        default: System.out.println("something unknown\n"); break;
    };
}
```

Проще не бывает:

```
public static void f(int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=2, locals=1, args_size=1
    0: iload_0
    1: tableswitch { // 0 to 4
                0: 36
                1: 47
                2: 58
```


4.1. JAVA

```

3: 69
4: 80
  default: 91
}
36: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
39: ldc          #3    // String zero
41: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
44: goto         99
47: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
50: ldc          #5    // String one\n
52: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
55: goto         99
58: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
61: ldc          #6    // String two\n
63: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
66: goto         99
69: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
72: ldc          #7    // String three\n
74: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
77: goto         99
80: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
83: ldc          #8    // String four\n
85: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
88: goto         99
91: getstatic    #2    // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
94: ldc          #9    // String something unknown\n
96: invokevirtual #4    // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
99: return
```

4.1.13. Массивы

Простой пример

Создадим массив из 10-и чисел и заполним его:

```
public static void main(String[] args)
{
    int a[]=new int[10];
    for (int i=0; i<10; i++)
        a[i]=i;
    dump (a);
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=3, locals=3, args_size=1
   0: bipush      10
   2: newarray     int
   4: astore_1
   5: iconst_0
   6: istore_2
   7: iload_2
   8: bipush      10
  10: if_icmpge    23
  13: aload_1
  14: iload_2
  15: iload_2
  16: iastore
  17: iinc         2, 1
  20: goto         7
  23: aload_1
  24: invokestatic #4    // Method dump:([I)V
  27: return
```

Инструкция `newarray` создает объект массива из 10 элементов типа `int`.

4.1. JAVA

Размер массива выставляется инструкцией `bipush` и остается на [TOS](#).

Тип массива выставляется в операнде инструкции `newarray`.

После исполнения `newarray`, *reference* (или указатель) только что созданного в куче (heap) массива остается на [TOS](#).

`astore_1` сохраняет *reference* на него в первом слоте [LVA](#).

Вторая часть функции `main()` это цикл, сохраняющий значение *i* в соответствующий элемент массива.

`aload_1` берет *reference* массива и сохраняет его в стеке.

`istore` затем сохраняет значение из стека в массив, *reference* на который в это время находится на [TOS](#).

Третья часть функции `main()` вызывает функцию `dump()`.

Аргумент для нее готовится инструкцией `aload_1` (смещение 23).

Перейдем к функции `dump()`:

```
public static void dump(int a[])
{
    for (int i=0; i<a.length; i++)
        System.out.println(a[i]);
}
```

```
public static void dump(int[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=3, locals=2, args_size=1
     0: iconst_0
     1: istore_1
     2: iload_1
     3: aload_0
     4: arraylength
     5: if_icmpge    23
     8: getstatic    #2      // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    11: aload_0
    12: iload_1
    13: iaload
    14: invokevirtual #3      // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
    17: iinc         1, 1
    20: goto         2
    23: return
```

Входящий *reference* на массив в нулевом слоте.

Выражение `a.length` в исходном коде конвертируется в инструкцию `arraylength`, она берет *reference* на массив и оставляет размер массива на [TOS](#).

Инструкция `iaload` по смещению 13 используется для загрузки элементов массива, она требует, чтобы в стеке присутствовал *reference* на массив (подготовленный `aload_0` на 11), а также индекс (подготовленный `iload_1` по смещению 12).

Нужно сказать, что инструкции с префиксом *a* могут быть неверно поняты, как инструкции работающие с массивами (*array*). Это неверно.

Эти инструкции работают с *reference*-ами на объекты.

А массивы и строки это тоже объекты.

Суммирование элементов массива

Еще один пример:

```
public class ArraySum
{
    public static int f (int[] a)
    {
        int sum=0;
```

4.1. JAVA

```
        for (int i=0; i<a.length; i++)
            sum=sum+a[i];
        return sum;
    }
}
```

```
public static int f(int[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=3, locals=3, args_size=1
     0: iconst_0
     1: istore_1
     2: iconst_0
     3: istore_2
     4: iload_2
     5: aload_0
     6: arraylength
     7: if_icmpge      22
    10: iload_1
    11: aload_0
    12: iload_2
    13: iaload
    14: iadd
    15: istore_1
    16: iinc           2, 1
    19: goto           4
    22: iload_1
    23: ireturn
```

Нулевой слот в [LVA](#) содержит указатель (*reference*) на входной массив.

Первый слот [LVA](#) содержит локальную переменную *sum*.

Единственный аргумент `main()` это также массив

Будем использовать единственный аргумент `main()`, который массив строк:

```
public class UseArgument
{
    public static void main(String[] args)
    {
        System.out.print("Hi, ");
        System.out.print(args[1]);
        System.out.println(". How are you?");
    }
}
```

Нулевой аргумент это имя программы (как в Си/Си++, итд), так что первый аргумент это тот, что пользователь добавил первым.

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=3, locals=1, args_size=1
     0: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
     3: ldc            #3          // String Hi,
     5: invokevirtual  #4          // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V
     8: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    11: aload_0
    12: iconst_1
    13: aaload
    14: invokevirtual  #4          // Method java/io/PrintStream.print:(Ljava/lang/String;)V
    17: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    20: ldc            #5          // String . How are you?
    22: invokevirtual  #6          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
    25: return
```

4.1. JAVA

`aload_0` на 11 загружают *reference* на нулевой слот **LVA** (первый и единственный аргумент `main()`).

`iconst_1` и `aaload` на 12 и 13 берут *reference* на первый (считая с 0) элемент массива.

Reference на строковый объект на **TOS** по смещению 14, и оттуда он берется методом `println`.

Заранее инициализированный массив строк

```
class Month
{
    public static String[] months =
    {
        "January",
        "February",
        "March",
        "April",
        "May",
        "June",
        "July",
        "August",
        "September",
        "October",
        "November",
        "December"
    };

    public String get_month (int i)
    {
        return months[i];
    };
}
```

```
public java.lang.String get_month(int);
flags: ACC_PUBLIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
    0: getstatic    #2          // Field months:[Ljava/lang/String;
    3: iload_1
    4: aaload
    5: areturn
```

`aaload` работает с массивом *reference*-ов.

Строка в Java это объект, так что используются *a*-инструкции для работы с ними.

`areturn` возвращает *reference* на объект `String`.

Как инициализируется массив `months[]`?

```
static {};
flags: ACC_STATIC
Code:
    stack=4, locals=0, args_size=0
    0: bipush        12
    2: anewarray     #3          // class java/lang/String
    5: dup
    6: iconst_0
    7: ldc          #4          // String January
    9: aastore
   10: dup
   11: iconst_1
   12: ldc          #5          // String February
   14: aastore
   15: dup
   16: iconst_2
   17: ldc          #6          // String March
   19: aastore
   20: dup
   21: iconst_3
   22: ldc          #7          // String April
```

4.1. JAVA

```
24: astore
25: dup
26: iconst_4
27: ldc      #8      // String May
29: astore
30: dup
31: iconst_5
32: ldc      #9      // String June
34: astore
35: dup
36: bipush   6
38: ldc      #10     // String July
40: astore
41: dup
42: bipush   7
44: ldc      #11     // String August
46: astore
47: dup
48: bipush   8
50: ldc      #12     // String September
52: astore
53: dup
54: bipush   9
56: ldc      #13     // String October
58: astore
59: dup
60: bipush  10
62: ldc      #14     // String November
64: astore
65: dup
66: bipush  11
68: ldc      #15     // String December
70: astore
71: putstatic #2      // Field months:[Ljava/lang/String;
74: return
```

`anewarray` создает новый массив *reference*-ов (отсюда префикс *a*).

Тип объекта определяется в операнде `anewarray`, там текстовая строка «`java/lang/String`».

`bipush 12` перед `anewarray` устанавливает размер массива.

Новая для нас здесь инструкция: `dup`.

Это стандартная инструкция в стековых компьютерах (включая ЯП Forth), которая делает дубликат значения на [TOS](#).

Кстати, FPU 80x87 это тоже стековый компьютер, и в нем есть аналогичная инструкция – `FDUP`.

Она используется здесь для дублирования *reference*-а на массив, потому что инструкция `aastore` выталкивает из стека *reference* на массив, но последующая инструкция `aastore` снова нуждается в нем.

Компилятор Java решил, что лучше генерировать `dup` вместо генерации инструкции `getstatic` перед каждой операцией записи в массив (т.е. 11 раз).

`aastore` кладет *reference* (на строку) в массив по индексу взятому из [TOS](#).

И наконец, `putstatic` кладет *reference* на только что созданный массив во второе поле нашего объекта, т.е. в поле *months*.

Функции с переменным кол-вом аргументов (variadic)

Функции с переменным кол-вом аргументов (variadic) на самом деле используют массивы:

```
public static void f(int... values)
{
    for (int i=0; i<values.length; i++)
        System.out.println(values[i]);
}
```

4.1. JAVA

```
public static void main(String[] args)
{
    f (1,2,3,4,5);
}
```

```
public static void f(int...);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC, ACC_VARARGS
Code:
  stack=3, locals=2, args_size=1
    0: iconst_0
    1: istore_1
    2: iload_1
    3: aload_0
    4: arraylength
    5: if_icmpge      23
    8: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
   11: aload_0
   12: iload_1
   13: iaload
   14: invokevirtual #3          // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
   17: iinc            1, 1
   20: goto            2
   23: return
```

По смещению 3, f() просто берет массив переменных используя aload_0.

Затем берет размер массива, итд.

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=4, locals=1, args_size=1
    0: iconst_5
    1: newarray        int
    3: dup
    4: iconst_0
    5: iconst_1
    6: iastore
    7: dup
    8: iconst_1
    9: iconst_2
   10: iastore
   11: dup
   12: iconst_2
   13: iconst_3
   14: iastore
   15: dup
   16: iconst_3
   17: iconst_4
   18: iastore
   19: dup
   20: iconst_4
   21: iconst_5
   22: iastore
   23: invokestatic   #4          // Method f:([I)V
   26: return
```

Массив конструируется в main() используя инструкцию newarray, затем он заполняется, и вызывается f().

Кстати, объект массива не уничтожается в конце main().

В Java вообще нет деструкторов, потому что в JVM есть сборщик мусора (garbage collector), делающий это автоматически, когда считает нужным.

Как насчет метода format()?

Он берет на вход два аргумента: строку и массив объектов:

```
public PrintStream format(String format, Object... args)
```

4.1. JAVA

(<http://docs.oracle.com/javase/tutorial/java/data/numberformat.html>)

Посмотрим:

```
public static void main(String[] args)
{
    int i=123;
    double d=123.456;
    System.out.format("int: %d double: %f.%n", i, d);
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=7, locals=4, args_size=1
     0: bipush      123
     2: istore_1
     3: ldc2_w       #2          // double 123.456d
     6: dstore_2
     7: getstatic    #4          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    10: ldc         #5          // String int: %d double: %f.%n
    12: iconst_2
    13: anewarray    #6          // class java/lang/Object
    16: dup
    17: iconst_0
    18: iload_1
    19: invokestatic #7          // Method java/lang/Integer.valueOf:(I)Ljava/lang/Integer;
    22: astore
    23: dup
    24: iconst_1
    25: dload_2
    26: invokestatic #8          // Method java/lang/Double.valueOf:(D)Ljava/lang/Double;
    29: astore
    30: invokevirtual #9         // Method java/io/PrintStream.format:(Ljava/lang/String;[L
    ↪ java/lang/Object;)Ljava/io/PrintStream;
    33: pop
    34: return
```

Так что в начале значения типов *int* и *double* конвертируются в объекты типов *Integer* и *Double* используя методы *valueOf*.

Метод *format()* требует на входе объекты типа *Object*, а так как классы *Integer* и *Double* наследуются от корневого класса *Object*, они подходят как элементы во входном массиве.

С другой стороны, массив всегда гомогенный, т.е. он не может содержать элементы разных типов, что делает невозможным хранение там значений типов *int* и *double*.

Массив объектов *Object* создается по смещению 13, объект *Integer* добавляется в массив по смещению 22, объект *Double* добавляется в массив по смещению 29.

Предпоследняя инструкция *pop* удаляет элемент на [TOS](#), так что в момент исполнения *return*, стек пуст (или сбалансирован).

Двухмерные массивы

Двухмерные массивы в Java это просто одномерные массивы *reference*-в на другие одномерные массивы.

Создадим двухмерный массив:

```
public static void main(String[] args)
{
    int[][] a = new int[5][10];
    a[1][2]=3;
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
```

4.1. JAVA

```
stack=3, locals=2, args_size=1
 0: iconst_5
 1: bipush      10
 3: multianewarray #2, 2      // class "[[I"
 7: astore_1
 8: aload_1
 9: iconst_1
10: aaload
11: iconst_2
12: iconst_3
13: iastore
14: return
```

Он создается при помощи инструкции `multianewarray`: тип объекта и размерность передаются в операндах.

Размер массива (10*5) остается в стеке (используя инструкции `iconst_5` и `bipush`).

Reference на строку #1 загружается по смещению 10 (`iconst_1` и `aaload`).

Выборка столбца происходит используя инструкцию `iconst_2` по смещению 11.

Значение для записи устанавливается по смещению 12.

`iastore` на 13 записывает элемент массива.

Как его прочитать?

```
public static int get12 (int[][] in)
{
    return in[1][2];
}
```

```
public static int get12(int[][]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=2, locals=1, args_size=1
  0: aload_0
  1: iconst_1
  2: aaload
  3: iconst_2
  4: iaload
  5: ireturn
```

Reference на строку массива загружается по смещению 2, столбец устанавливается по смещению 3, `iaload` загружает элемент массива.

Трехмерные массивы

Трехмерные массивы это просто одномерные массивы *reference*-ов на одномерные массивы *reference*-ов.

```
public static void main(String[] args)
{
    int[][][] a = new int[5][10][15];

    a[1][2][3]=4;

    get_elem(a);
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=3, locals=2, args_size=1
  0: iconst_5
  1: bipush      10
  3: bipush      15
  5: multianewarray #2, 3      // class "[[[I"
```


4.1. JAVA

```
9: astore_1
10: aload_1
11: iconst_1
12: aaload
13: iconst_2
14: aaload
15: iconst_3
16: iconst_4
17: iastore
18: aload_1
19: invokestatic #3          // Method get_elem:([[[I)I
22: pop
23: return
```

Чтобы найти нужный *reference*, теперь нужно две инструкции *aaload*:

```
public static int get_elem (int[][][] a)
{
    return a[1][2][3];
}
```

```
public static int get_elem(int[][][]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=2, locals=1, args_size=1
    0: aload_0
    1: iconst_1
    2: aaload
    3: iconst_2
    4: aaload
    5: iconst_3
    6: iaload
    7: ireturn
```

Итоги

Возможно ли сделать переполнение буфера в Java?

Нет, потому что длина массива всегда присутствует в объекте массива, границы массива контролируются и при попытке выйти за границы, сработает исключение.

В Java нет многомерных массивов в том смысле, как в Си/Си++, так что Java не очень подходит для быстрых научных вычислений.

4.1.14. Строки

Первый пример

Строки это объекты, и конструируются так же как и другие объекты (и массивы).

```
public static void main(String[] args)
{
    System.out.println("What is your name?");
    String input = System.console().readLine();
    System.out.println("Hello, "+input);
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
  stack=3, locals=2, args_size=1
    0: getstatic    #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    3: ldc         #3           // String What is your name?
    5: invokevirtual #4          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
    8: invokestatic #5          // Method java/lang/System.console:()Ljava/io/Console;
```

4.1. JAVA

```
11: invokevirtual #6          // Method java/io/Console.readLine:()Ljava/lang/String;
14: astore_1
15: getstatic      #2          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
18: new           #7          // class java/lang/StringBuilder
21: dup
22: invokespecial #8          // Method java/lang/StringBuilder."<init>":()V
25: ldc           #9          // String Hello,
27: invokevirtual #10         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String;
↳ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
30: aload_1
31: invokevirtual #10         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String;
↳ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
34: invokevirtual #11         // Method java/lang/StringBuilder.toString:()Ljava/lang/
↳ String;
37: invokevirtual #4          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
40: return
```

Метод `readLine()` вызывается по смещению 11, *reference* на строку (введенную пользователем) остается на [TOS](#).

По смещению 14, *reference* на строку сохраняется в первом слоте [LVA](#).

Строка введенная пользователем перезагружается по смещению 30 и складывается со строкой «Hello, » используя класс `StringBuilder`.

Сконструированная строка затем выводится используя метод `println` по смещению 37.

Второй пример

Еще один пример:

```
public class strings
{
    public static char test (String a)
    {
        return a.charAt(3);
    };

    public static String concat (String a, String b)
    {
        return a+b;
    }
}
```

```
public static char test(java.lang.String);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=1, args_size=1
    0: aload_0
    1: iconst_3
    2: invokevirtual #2          // Method java/lang/String.charAt:(I)C
    5: ireturn
```

Складывание строк происходит при помощи класса `StringBuilder`:

```
public static java.lang.String concat(java.lang.String, java.lang.String);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
    0: new           #3          // class java/lang/StringBuilder
    3: dup
    4: invokespecial #4          // Method java/lang/StringBuilder."<init>":()V
    7: aload_0
    8: invokevirtual #5          // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String;
↳ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
    11: aload_1
    12: invokevirtual #5          // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String;
↳ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
```

4.1. JAVA

```
15: invokevirtual #6          // Method java/lang/StringBuilder.toString:()Ljava/lang/↵
↵ String;
18: areturn
```

Еще пример:

```
public static void main(String[] args)
{
    String s="Hello!";
    int n=123;
    System.out.println("s=" + s + " n=" + n);
}
```

И снова, строки создаются используя класс `StringBuilder` и его метод `append`, затем сконструированная строка передается в метод `println`:

```
public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=3, locals=3, args_size=1
     0: ldc         #2          // String Hello!
     2: astore_1
     3: bipush      123
     5: istore_2
     6: getstatic   #3          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
     9: new         #4          // class java/lang/StringBuilder
    12: dup
    13: invokespecial #5         // Method java/lang/StringBuilder."<init>":()V
    16: ldc         #6          // String s=
    18: invokevirtual #7         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String↵
↵ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
    21: aload_1
    22: invokevirtual #7         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String↵
↵ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
    25: ldc         #8          // String n=
    27: invokevirtual #7         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String↵
↵ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
    30: iload_2
    31: invokevirtual #9         // Method java/lang/StringBuilder.append:(I)Ljava/lang/↵
↵ StringBuilder;
    34: invokevirtual #10        // Method java/lang/StringBuilder.toString:()Ljava/lang/↵
↵ String;
    37: invokevirtual #11        // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
    40: return
```

4.1.15. Исключения

Немного переделаем пример *Month* (4.1.13 (стр. 659)):

Листинг 4.10: `IncorrectMonthException.java`

```
public class IncorrectMonthException extends Exception
{
    private int index;

    public IncorrectMonthException(int index)
    {
        this.index = index;
    }
    public int getIndex()
    {
        return index;
    }
}
```

Листинг 4.11: `Month2.java`

```
class Month2
```

4.1. JAVA

```
{
    public static String[] months =
    {
        "January",
        "February",
        "March",
        "April",
        "May",
        "June",
        "July",
        "August",
        "September",
        "October",
        "November",
        "December"
    };

    public static String get_month (int i) throws IncorrectMonthException
    {
        if (i<0 || i>11)
            throw new IncorrectMonthException(i);
        return months[i];
    };

    public static void main (String[] args)
    {
        try
        {
            System.out.println(get_month(100));
        }
        catch(IncorrectMonthException e)
        {
            System.out.println("incorrect month index: "+ e.getIndex());
            e.printStackTrace();
        }
    };
}
```

Коротко говоря, `IncorrectMonthException.class` имеет только конструктор объекта и один метод-акцессор.

Класс `IncorrectMonthException` наследуется от `Exception`, так что конструктор `IncorrectMonthException` в начале вызывает конструктор класса `Exception`, затем он перекладывает входящее значение в единственное поле класса `IncorrectMonthException`:

```
public IncorrectMonthException(int);
flags: ACC_PUBLIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=2
    0: aload_0
    1: invokespecial #1          // Method java/lang/Exception."<init>":()V
    4: aload_0
    5: iload_1
    6: putfield      #2          // Field index:I
    9: return
```

`getIndex()` это просто акцессор.

Reference (указатель) на `IncorrectMonthException` передается в нулевом слоте *LVA* (*this*), `aload_0` берет его, `getfield` загружает значение из объекта, `ireturn` возвращает его.

```
public int getIndex();
flags: ACC_PUBLIC
Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
    0: aload_0
    1: getfield      #2          // Field index:I
    4: ireturn
```

Посмотрим на `get_month()` в `Month2.class`:

Листинг 4.12: Month2.class

```

public static java.lang.String get_month(int) throws IncorrectMonthException;
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=3, locals=1, args_size=1
      0: iload_0
      1: iflt      10
      4: iload_0
      5: bipush    11
      7: if_icmple 19
     10: new        #2          // class IncorrectMonthException
     13: dup
     14: iload_0
     15: invokespecial #3          // Method IncorrectMonthException."<init>":(I)V
     18: athrow
     19: getstatic    #4          // Field months:[Ljava/lang/String;
     22: iload_0
     23: aaload
     24: areturn

```

iflt по смещению 1 это *if less than* (если меньше, чем).

В случае неправильного индекса, создается новый объект при помощи инструкции new по смещению 10.

Тип объекта передается как операнд инструкции (и это IncorrectMonthException).

Затем вызывается его конструктор, в который передается индекс (через TOS) (по смещению 15).

В то время как управление находится на смещении 18, объект уже создан, теперь инструкция athrow берет указатель (*reference*) на только что созданный объект и сигнализирует в JVM, чтобы тот нашел подходящий обработчик исключения.

Инструкция athrow не возвращает управление сюда, так что по смещению 19 здесь совсем другой *basic block*, не имеющий отношения к исключениям, сюда можно попасть со смещения 7.

Как работает обработчик? Посмотрим на main() в Month2.class:

Листинг 4.13: Month2.class

```

public static void main(java.lang.String[]);
  flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
  Code:
    stack=3, locals=2, args_size=1
      0: getstatic    #5          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
      3: bipush      100
      5: invokestatic #6          // Method get_month:(I)Ljava/lang/String;
      8: invokevirtual #7          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
     11: goto        47
     14: astore_1
     15: getstatic    #5          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
     18: new          #8          // class java/lang/StringBuilder
     21: dup
     22: invokespecial #9          // Method java/lang/StringBuilder."<init>":()V
     25: ldc          #10         // String incorrect month index:
     27: invokevirtual #11         // Method java/lang/StringBuilder.append:(Ljava/lang/String;
    ↪ ;)Ljava/lang/StringBuilder;
     30: aload_1
     31: invokevirtual #12         // Method IncorrectMonthException.getIndex:()I
     34: invokevirtual #13         // Method java/lang/StringBuilder.append:(I)Ljava/lang/
    ↪ StringBuilder;
     37: invokevirtual #14         // Method java/lang/StringBuilder.toString:()Ljava/lang/
    ↪ String;
     40: invokevirtual #7          // Method java/io/PrintStream.println:(Ljava/lang/String;)V
     43: aload_1
     44: invokevirtual #15         // Method IncorrectMonthException.printStackTrace:()V
     47: return
  Exception table:
    from   to   target type
      0     11   14     Class IncorrectMonthException

```

4.1. JAVA

Тут есть Exception table, которая определяет, что между смещениями 0 и 11 (включительно) может случиться исключение

IncorrectMonthException, и если это произойдет, то нужно передать управление на смещение 14.

Действительно, основная программа заканчивается на смещении 11.

По смещению 14 начинается обработчик, и сюда невозможно попасть, здесь нет никаких условных/безусловных переходов в эту область.

Но JVM передаст сюда управление в случае исключения.

Самая первая astore_1 (на 14) берет входящий указатель (*reference*) на объект исключения и сохраняет его в слоте 1 LVA.

Позже, по смещению 31 будет вызван метод этого объекта (getIndex()).

Указатель *reference* на текущий объект исключения передался немного раньше (смещение 30).

Остальной код это просто код для манипуляции со строками: в начале значение возвращенное методом getIndex() конвертируется в строку используя метод toString(), затем эта строка прибавляется к текстовой строке «incorrect month index: » (как мы уже рассматривали ранее), затем вызываются println() и printStackTrace().

После того как printStackTrace() заканчивается, исключение уже обработано, мы можем возвращаться к нормальной работе.

По смещению 47 есть return, который заканчивает работу функции main(), но там может быть любой другой код, который исполнится, если исключения не произошло.

Вот пример, как IDA показывает интервалы исключений:

Листинг 4.14: из какого-то случайного найденного на компьютере автора .class-файла

```
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_335 to met001_360\
using met001_360
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_185 to met001_214\
using met001_214
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_181 to met001_192\
using met001_195
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_155 to met001_176\
using met001_176
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_83 to met001_129 using \
met001_129
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_42 to met001_66 using \
met001_69
.catch java/io/FileNotFoundException from met001_begin to met001_37\
using met001_37
```

4.1.16. Классы

Простой класс:

Листинг 4.15: test.java

```
public class test
{
    public static int a;
    private static int b;

    public test()
    {
        a=0;
        b=0;
    }
    public static void set_a (int input)
    {
        a=input;
    }
    public static int get_a ()
    {
        return a;
    }
}
```

4.1. JAVA

```
}
public static void set_b (int input)
{
    b=input;
}
public static int get_b ()
{
    return b;
}
}
```

Конструктор просто выставляет оба поля класса в нули:

```
public test();
flags: ACC_PUBLIC
Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
    0: aload_0
    1: invokespecial #1          // Method java/lang/Object."<init>":()V
    4: iconst_0
    5: putstatic     #2          // Field a:I
    8: iconst_0
    9: putstatic     #3          // Field b:I
   12: return
```

Сеттер a:

```
public static void set_a(int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
    0: iload_0
    1: putstatic     #2          // Field a:I
    4: return
```

Геттер a:

```
public static int get_a();
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=1, locals=0, args_size=0
    0: getstatic     #2          // Field a:I
    3: ireturn
```

Сеттер b:

```
public static void set_b(int);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=1, locals=1, args_size=1
    0: iload_0
    1: putstatic     #3          // Field b:I
    4: return
```

Геттер b:

```
public static int get_b();
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=1, locals=0, args_size=0
    0: getstatic     #3          // Field b:I
    3: ireturn
```

Здесь нет разницы между кодом, работающим для public-полей и private-полей.

Но эта информация присутствует в .class-файле, и в любом случае невозможно иметь доступ к private-полям.

Создадим объект и вызовем метод:

```
public class ex1
{
    public static void main(String[] args)
    {
        test obj=new test();
        obj.set_a (1234);
        System.out.println(obj.a);
    }
}
```

```
public static void main(java.lang.String[]);
flags: ACC_PUBLIC, ACC_STATIC
Code:
    stack=2, locals=2, args_size=1
     0: new          #2          // class test
     3: dup
     4: invokespecial #3          // Method test."<init>":()V
     7: astore_1
     8: aload_1
     9: pop
    10: sipush        1234
    13: invokestatic  #4          // Method test.set_a:(I)V
    16: getstatic    #5          // Field java/lang/System.out:Ljava/io/PrintStream;
    19: aload_1
    20: pop
    21: getstatic    #6          // Field test.a:I
    24: invokevirtual #7          // Method java/io/PrintStream.println:(I)V
    27: return
```

Инструкция new создает объект, но не вызывает конструктор (он вызывается по смещению 4).

Метод set_a() вызывается по смещению 16.

К полю a имеется доступ используя инструкцию getstatic по смещению 21.

4.1.17. Простейшая модификация

Первый пример

Перейдем к простой задаче модификации кода.

```
public class nag
{
    public static void nag_screen()
    {
        System.out.println("This program is not registered");
    };
    public static void main(String[] args)
    {
        System.out.println("Greetings from the mega-software");
        nag_screen();
    }
}
```

Как можно избавиться от печати строки «This program is not registered»?

Наконец загрузим .class-файл в IDA:

4.1. JAVA

```

; Segment type: Pure code
.method public static nag_screen()V
.limit stack 2
.line 4
178 000 002 |  getstatic java/lang/System.out Ljava/io/PrintStream; ; CODE XREF: main+8↓P
018 003      ldc "This program is not registered"
182 000 004      invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
.line 5
177          return
??? ??? ???+ .end method
??? ??? ???+
??? ; -----

; Segment type: Pure code
.method public static main([Ljava/lang/String;)V
.limit stack 2
.limit locals 1
.line 8
178 000 002      getstatic java/lang/System.out Ljava/io/PrintStream;
018 005      ldc "Greetings from the mega-software"
182 000 004      invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
.line 9
184 000 006      invokestatic nag.nag_screen()V
.line 10
177          return
```

Рис. 4.1: IDA

В начале заменим первый байт функции на 177 (это опкод инструкции return):

```

; Segment type: Pure code
.method public static nag_screen()V
.limit stack 2
.line 4
nag_screen: ; CODE XREF: main+8↓P
177      return
000      0 ; 0x00
002      2 ; 0x02
018 003      ldc "This program is not registered"
182 000 004      invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
.line 5
177          return
??? ??? ???+ .end method
??? ??? ???+
??? ; -----
```

Рис. 4.2: IDA

Но это не работает (JRE 1.7):

```
Exception in thread "main" java.lang.VerifyError: Expecting a stack map frame
Exception Details:
Location:
  nag.nag_screen()V @1: nop
Reason:
  Error exists in the bytecode
Bytecode:
  00000000: b100 0212 03b6 0004 b1

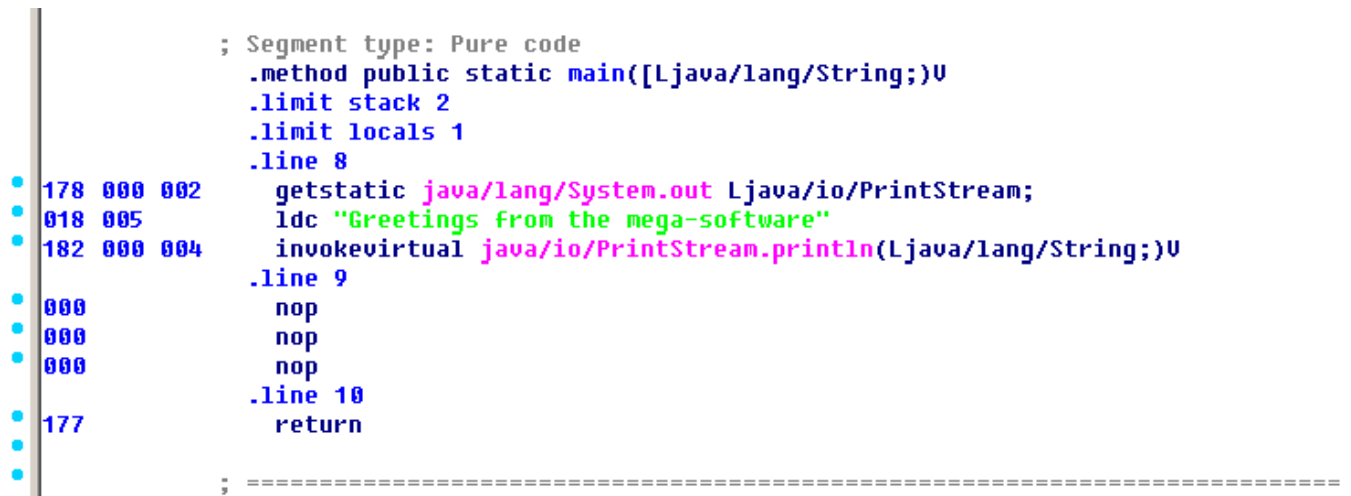
  at java.lang.Class.getDeclaredMethods0(Native Method)
  at java.lang.Class.privateGetDeclaredMethods(Class.java:2615)
  at java.lang.Class.getMethod0(Class.java:2856)
  at java.lang.Class.getMethod(Class.java:1668)
```

4.1. JAVA

```
at sun.launcher.LauncherHelper.getMainMethod(LauncherHelper.java:494)
at sun.launcher.LauncherHelper.checkAndLoadMain(LauncherHelper.java:486)
```

Вероятно, в JVM есть проверки связанные с картами стека.

ОК, попробуем пропатчить её иначе, удаляя вызов функции `pag()`:



```
; Segment type: Pure code
.method public static main([Ljava/lang/String;)V
.limit stack 2
.limit locals 1
.line 8
178 000 002    getstatic java/lang/System.out Ljava/io/PrintStream;
018 005      ldc "Greetings from the mega-software"
182 000 004    invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
.line 9
000          nop
000          nop
000          nop
.line 10
177          return
; =====
```

Рис. 4.3: IDA

0 это опкод инструкции `NOP`.

Теперь всё работает!

Второй пример

Еще один простой пример crackme:

```
public class password
{
    public static void main(String[] args)
    {
        System.out.println("Please enter the password");
        String input = System.console().readLine();
        if (input.equals("secret"))
            System.out.println("password is correct");
        else
            System.out.println("password is not correct");
    }
}
```

Загрузим в IDA:

4.1. JAVA

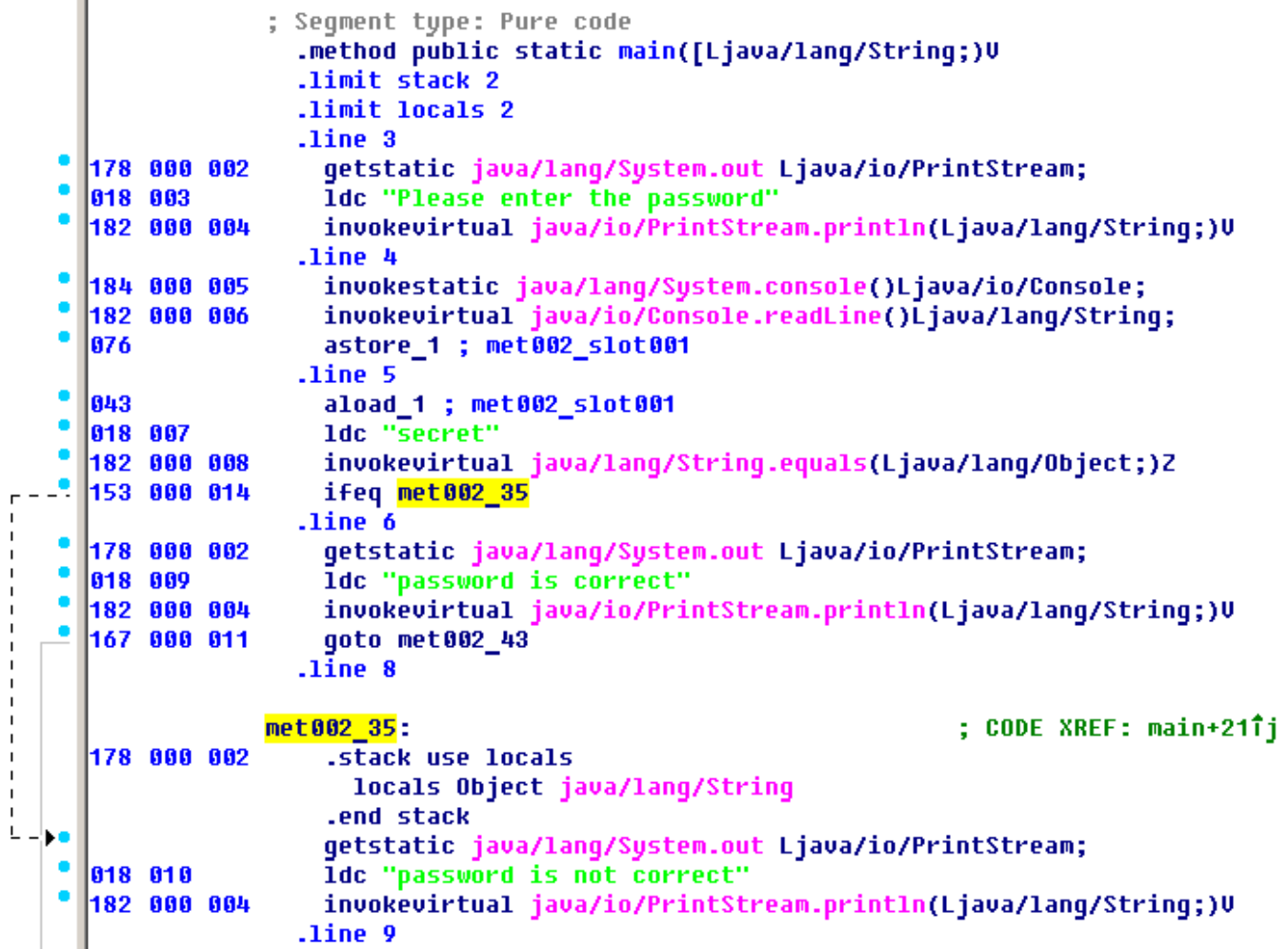


Рис. 4.4: IDA

Видим здесь инструкцию `ifeq`, которая, собственно, всё и делает.

Её имя означает *if equal*, и это не очень удачное название, её следовало бы назвать `ifz` (*if zero*), т.е. если значение на **TOS** ноль, тогда совершить переход.

В нашем случае, переход происходит если пароль не верный (метод `equals` возвращает `False`, а это 0).

Первое что приходит в голову это пропатчить эту инструкцию.

В опкоде `ifeq` два байта, в которых закодировано смещение для перехода.

Чтобы инструкция не работала, мы должны установить байт 3 на третьем байте (потому что 3 будет прибавляться к текущему смещению, и в итоге переход будет на следующую инструкцию, ведь длина инструкции `ifeq` это 3 байта):

4.1. JAVA

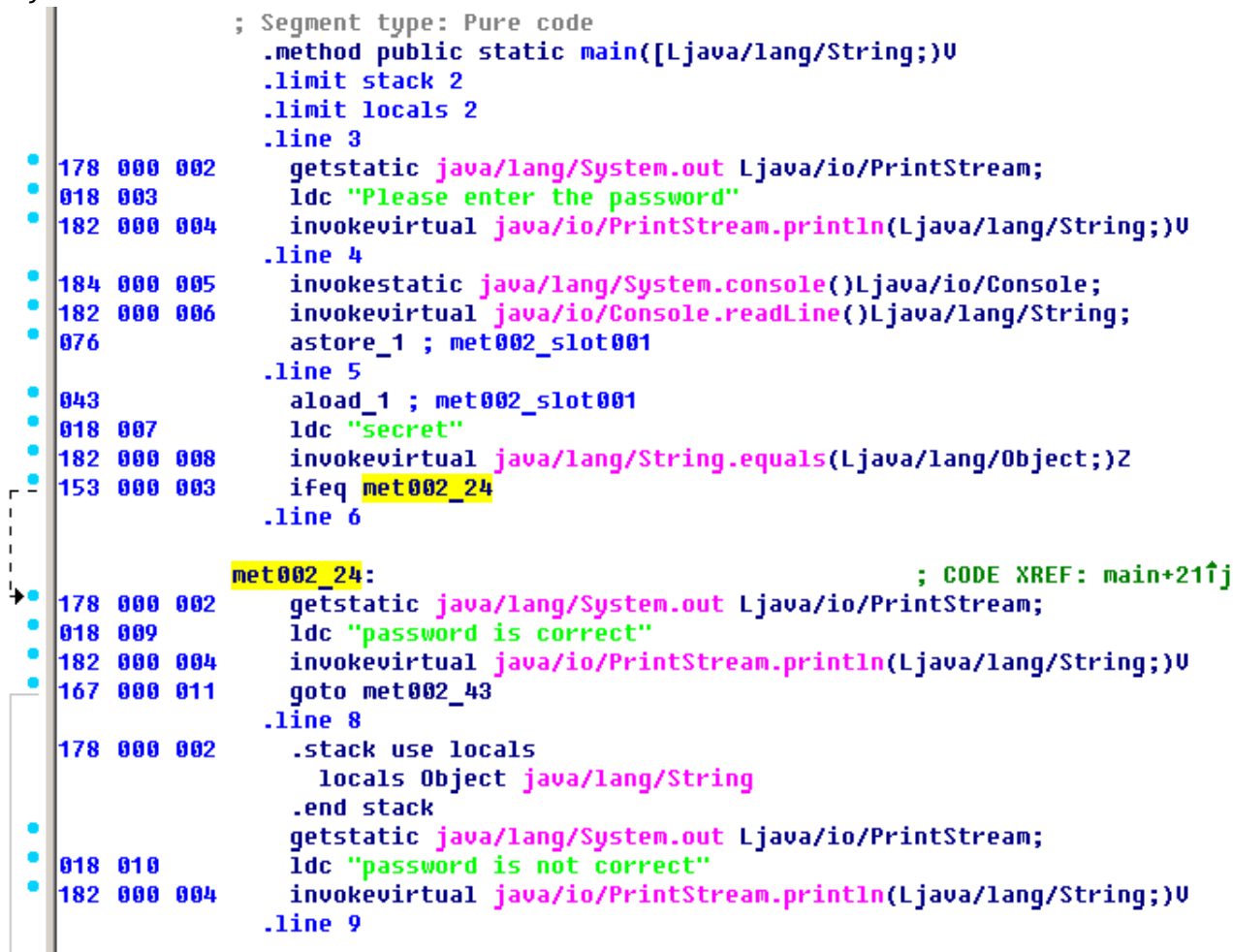


Рис. 4.5: IDA

Это не работает (JRE 1.7):

```
Exception in thread "main" java.lang.VerifyError: Expecting a stackmap frame at branch target ↗
↳ 24
Exception Details:
Location:
    password.main([Ljava/lang/String;)V @21: ifeq
Reason:
    Expected stackmap frame at this location.
Bytecode:
    00000000: b200 0212 03b6 0004 b800 05b6 0006 4c2b
    00000010: 1207 b600 0899 0003 b200 0212 09b6 0004
    00000020: a700 0bb2 0002 120a b600 04b1
Stackmap Table:
    append_frame(@35,Object[#20])
    same_frame(@43)

    at java.lang.Class.getDeclaredMethods0(Native Method)
    at java.lang.Class.privateGetDeclaredMethods(Class.java:2615)
    at java.lang.Class.getMethod0(Class.java:2856)
    at java.lang.Class.getMethod(Class.java:1668)
    at sun.launcher.LauncherHelper.getMainMethod(LauncherHelper.java:494)
    at sun.launcher.LauncherHelper.checkAndLoadMain(LauncherHelper.java:486)
```

Хотя, надо сказать, работает в JRE 1.6.

Мы также можем попробовать заменить все три байта опкода `ifeq` на нулевые байты (`NOP`), но это тоже не работает.

Видимо, начиная с JRE 1.7, там появилось больше проверок карт стека.

ОК, заменим весь вызов метода `equals` на инструкцию `iconst_1` плюс набор `NOP`-ов:

4.1. JAVA

```

; Segment type: Pure code
.method public static main([Ljava/lang/String;)V
.limit stack 2
.limit locals 2
.line 3
178 000 002    getstatic java/lang/System.out Ljava/io/PrintStream;
018 003      ldc "Please enter the password"
182 000 004    invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
.line 4
184 000 005    invokestatic java/lang/System.console()Ljava/io/Console;
182 000 006    invokevirtual java/io/Console.readLine()Ljava/lang/String;
076          astore_1 ; met002_slot001
.line 5
004          iconst_1
000          nop
000          nop
000          nop
000          nop
000          nop
000          nop
-- 153 000 014    ifeq met002_35
.line 6
178 000 002    getstatic java/lang/System.out Ljava/io/PrintStream;
018 009      ldc "password is correct"
182 000 004    invokevirtual java/io/PrintStream.println(Ljava/lang/String;)V
167 000 011    goto met002_43
.line 8

met002_35:                                     ; CODE XREF: main+21↑j
178 000 002    .stack use locals
          locals Object java/lang/String
          .end stack
```

Рис. 4.6: IDA

1 будет всегда на TOS во время исполнения инструкции ifeq, так что ifeq никогда не совершит переход.

Это работает.

4.1.18. Итоги

Чего не хватает в Java в сравнении с Си/Си++?

- Структуры: используйте классы.
- Объединения (union): используйте иерархии классов.
- Беззнаковые типы данных.

Кстати, из-за этого реализовывать криптографические алгоритмы на Java немного труднее.

- Указатели на функции.

Глава 5

Поиск в коде того что нужно

Современное ПО, в общем-то, минимализмом не отличается.

Но не потому, что программисты слишком много пишут, а потому что к исполняемым файлам обыкновенно прикомпилируют все подряд библиотеки. Если бы все вспомогательные библиотеки всегда выносили во внешние DLL, мир был бы иным. (Еще одна причина для Си++ — [STL](#) и прочие библиотеки шаблонов.)

Таким образом, очень полезно сразу понимать, какая функция из стандартной библиотеки или более-менее известной (как Boost¹, libpng²), а какая — имеет отношение к тому что мы пытаемся найти в коде.

Переписывать весь код на Си/Си++, чтобы разобраться в нем, безусловно, не имеет никакого смысла.

Одна из важных задач reverse engineer-а это быстрый поиск в коде того что собственно его интересует.

Дизассемблер [IDA](#) позволяет делать поиск как минимум строк, последовательностей байт, констант. Можно даже сделать экспорт кода в текстовый файл .lst или .asm и затем натравить на него grep, awk, итд.

Когда вы пытаетесь понять, что делает тот или иной код, это запросто может быть какая-то опенсорсная библиотека вроде libpng. Поэтому, когда находите константы, или текстовые строки, которые выглядят явно знакомыми, всегда полезно их *погуглить*. А если вы найдете искомый опенсорсный проект где это используется, то тогда будет достаточно просто сравнить вашу функцию с ней. Это решит часть проблем.

К примеру, если программа использует какие-то XML-файлы, первым шагом может быть установление, какая именно XML-библиотека для этого используется, ведь часто используется какая-то стандартная (или очень известная) вместо самодельной.

К примеру, автор этих строк однажды пытался разобраться как происходит компрессия/декомпрессия сетевых пакетов в SAP 6.0. Это очень большая программа, но к ней идет подробный [PDB](#)-файл с отладочной информацией, и это очень удобно. Он в конце концов пришел к тому что одна из функций декомпрессирующая пакеты называется CsDecomprLZC(). Не сильно раздумывая, он решил погуглить и оказалось, что функция с таким же названием имеется в MaxDB (это опенсорсный проект SAP)³.

<http://www.google.com/search?q=CsDecomprLZC>

Каково же было мое удивление, когда оказалось, что в MaxDB используется точно такой же алгоритм, скорее всего, с таким же исходником.

¹<http://go.yurichev.com/17036>

²<http://go.yurichev.com/17037>

³Больше об этом в соответствующей секции (8.9.1 (стр. 858))

5.1. Идентификация исполняемых файлов

5.1.1. Microsoft Visual C++

Версии MSVC и DLL которые могут быть импортированы:

Маркетинговая вер.	Внутренняя вер.	Вер. CL.EXE	Импорт.DLL	Дата выхода
6	6.0	12.00	msvcrt.dll msvcp60.dll	June 1998
.NET (2002)	7.0	13.00	msvcr70.dll msvcp70.dll	February 13, 2002
.NET 2003	7.1	13.10	msvcr71.dll msvcp71.dll	April 24, 2003
2005	8.0	14.00	msvcr80.dll msvcp80.dll	November 7, 2005
2008	9.0	15.00	msvcr90.dll msvcp90.dll	November 19, 2007
2010	10.0	16.00	msvcr100.dll msvcp100.dll	April 12, 2010
2012	11.0	17.00	msvcr110.dll msvcp110.dll	September 12, 2012
2013	12.0	18.00	msvcr120.dll msvcp120.dll	October 17, 2013

msvcp*.dll содержит функции связанные с Си++, так что если она импортируется, скорее всего, вы имеете дело с программой на Си++.

Name mangling

Имена обычно начинаются с символа `?`.

О [name mangling](#) в MSVC читайте также здесь: [3.18.1](#) (стр. 534).

5.1.2. GCC

Кроме компиляторов под *NIX, GCC имеется так же и для win32-окружения: в виде Cygwin и MinGW.

Name mangling

Имена обычно начинаются с символов `_Z`.

О [name mangling](#) в GCC читайте также здесь: [3.18.1](#) (стр. 534).

Cygwin

cygwin1.dll часто импортируется.

MinGW

msvcrt.dll может импортироваться.

5.1.3. Intel Fortran

libifcoremd.dll, libifportmd.dll и libiomp5md.dll (поддержка OpenMP) могут импортироваться.

В libifcoremd.dll много функций с префиксом `for_`, что значит *Fortran*.

Имена обычно начинаются с символа W.

```
W?method$ class$n v
```

5.1.5. Borland

Вот пример **name mangling** в Borland Delphi и C++Builder:

```
@TApplication@IdleAction$qv
@TApplication@ProcessMDIAccels$qp6tagMSG
@TModule@$bctr$qpctp1
@TModule@$bdtr$qv
@TModule@ValidWindow$qp14TWindowsObject
@TrueColorTo8BitN$qpviitlii
@TrueColorTo16BitN$qpviitlii
@DIB24BitTo8BitBitmap$qpviitlii
@TrueBitmap@$bctr$qpcl
@TrueBitmap@$bctr$qpvl
@TrueBitmap@$bctr$qiilll
```

Имена всегда начинаются с символа @ затем следует имя класса, имя метода и закодированные типы аргументов.

Эти имена могут присутствовать с импортах .exe, экспортах .dll, отладочной информации, итд.

Borland Visual Component Libraries (VCL) находятся в файлах .bpl вместо .dll, например, vcl50.dll, rtl60.dll.

Другие DLL которые могут импортироваться: BORLNDMM.DLL.

Delphi

Почти все исполняемые файлы имеют текстовую строку «Boolean» в самом начале сегмента кода, среди остальных имен типов.

Вот очень характерное для Delphi начало сегмента CODE, этот блок следует сразу за заголовком win32 PE-файла:

[illegible]

5.2. СВЯЗЬ С ВНЕШНИМ МИРОМ (НА УРОВНЕ ФУНКЦИИ)

00000560	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 98 11 40 00	|.....@.
00000570	04 00 00 00 00 00 00 00	18 4d 40 00 24 4d 40 00	|.....M@.\$M@.
00000580	28 4d 40 00 2c 4d 40 00	20 4d 40 00 68 4a 40 00	| (M@.,M@. M@.hJ@.
00000590	84 4a 40 00 c0 4a 40 00	07 54 4f 62 6a 65 63 74	|.J@..J@..TObject|
000005a0	a4 11 40 00 07 07 54 4f	62 6a 65 63 74 98 11 40	|..@...TObject..@|
000005b0	00 00 00 00 00 00 00 06	53 79 73 74 65 6d 00 00	|.....System..|
000005c0	c4 11 40 00 0f 0a 49 49	6e 74 65 72 66 61 63 65	|..@...IInterface|
000005d0	00 00 00 00 01 00 00 00	00 00 00 00 00 c0 00 00	|.....|
000005e0	00 00 00 00 46 06 53 79	73 74 65 6d 03 00 ff ff	|....F.System....|
000005f0	f4 11 40 00 0f 09 49 44	69 73 70 61 74 63 68 c0	|..@...IDispatch.|
00000600	11 40 00 01 00 04 02 00	00 00 00 00 c0 00 00 00	|..@.....|
00000610	00 00 00 46 06 53 79 73	74 65 6d 04 00 ff ff 90	|...F.System.....|
00000620	cc 83 44 24 04 f8 e9 51	6c 00 00 83 44 24 04 f8	|..D\$...Ql...D\$..|
00000630	e9 6f 6c 00 00 83 44 24	04 f8 e9 79 6c 00 00 cc	|.ol...D\$...yl...|
00000640	cc 21 12 40 00 2b 12 40	00 35 12 40 00 01 00 00	|.!.@.+.@.5.@....|
00000650	00 00 00 00 00 00 00 00	00 c0 00 00 00 00 00 00	|.....|
00000660	46 41 12 40 00 08 00 00	00 00 00 00 00 8d 40 00	|FA.@.....@.
00000670	bc 12 40 00 4d 12 40 00	00 00 00 00 00 00 00 00	|..@.M.@.....|
00000680	00 00 00 00 00 00 00 00	00 00 00 00 00 00 00 00	|.....|
00000690	bc 12 40 00 0c 00 00 00	4c 11 40 00 18 4d 40 00	|..@.....L.@..M@.
000006a0	50 7e 40 00 5c 7e 40 00	2c 4d 40 00 20 4d 40 00	|P~@.\~@.,M@. M@.
000006b0	6c 7e 40 00 84 4a 40 00	c0 4a 40 00 11 54 49 6e	|l~@..J@..J@..TIn|
000006c0	74 65 72 66 61 63 65 64	4f 62 6a 65 63 74 8b c0	|terfacedObject..|
000006d0	d4 12 40 00 07 11 54 49	6e 74 65 72 66 61 63 65	|..@...TInterface|
000006e0	64 4f 62 6a 65 63 74 bc	12 40 00 a0 11 40 00 00	|dObject..@...@..|
000006f0	00 06 53 79 73 74 65 6d	00 00 8b c0 00 13 40 00	|..System.....@.
00000700	11 0b 54 42 6f 75 6e 64	41 72 72 61 79 04 00 00	|..TBoundArray...|
00000710	00 00 00 00 00 03 00 00	00 6c 10 40 00 06 53 79	|.....l.@..Sy|
00000720	73 74 65 6d 28 13 40 00	04 09 54 44 61 74 65 54	|stem(.@...TDateT|
00000730	69 6d 65 01 ff 25 48 e0	c4 00 8b c0 ff 25 44 e0	|ime..%H.....%D.|

Первые 4 байта сегмента данных (DATA) в исполняемых файлах могут быть 00 00 00 00, 32 13 8B C0 или FF FF FF FF. Эта информация может помочь при работе с запакованными/зашифрованными программами на Delphi.

5.1.6. Другие известные DLL

- vcomp*.dll — Реализация OpenMP от Microsoft.

5.2. Связь с внешним миром (на уровне функции)

Очень желательно следить за аргументами ф-ции и возвращаемыми значениями, в отладчике или DBI. Например, автор этих строк однажды пытался понять значение некоторой очень запутанной ф-ции, которая, как потом оказалось, была неверно реализованной пузырьковой сортировкой⁴. (Она работала правильно, но медленнее.) В то же время, наблюдение за входами и выходами этой ф-ции помогает мгновенно понять, что она делает.

Часто, когда вы видите деление через умножение (3.9 (стр. 487)), но забыли все детали о том, как оно работает, вы можете просто наблюдать за входом и выходом, и так быстро найти делитель.

5.3. Связь с внешним миром (win32)

Иногда, чтобы понять, что делает та или иная функция, можно её не разбирать, а просто посмотреть на её входы и выходы. Так можно сэкономить время.

Обращения к файлам и реестру: для самого простого анализа может помочь утилита Process Monitor⁵ от SysInternals.

Для анализа обращения программы к сети, может помочь Wireshark⁶.

⁴https://yurichev.com/blog/weird_sort/

⁵<http://go.yurichev.com/17301>

⁶<http://go.yurichev.com/17303>

Затем всё-таки придётся смотреть внутрь.

Первое на что нужно обратить внимание, это какие функции из [API ОС](#) и какие функции стандартных библиотек используются. Если программа поделена на главный исполняемый файл и группу DLL-файлов, то имена функций в этих DLL, бывает так, могут помочь.

Если нас интересует, что именно приводит к вызову `MessageBox()` с определенным текстом, то первое, что можно попробовать сделать: найти в сегменте данных этот текст, найти ссылки на него, и найти, откуда может передаваться управление к интересующему нас вызову `MessageBox()`.

Если речь идет о компьютерной игре, и нам интересно какие события в ней более-менее случайны, мы можем найти функцию `rand()` или её заменитель (как алгоритм Mersenne twister), и посмотреть, из каких мест эта функция вызывается и что самое главное: как используется результат этой функции.

Один пример: [8.2](#).

Но если это не игра, а `rand()` используется, то также весьма любопытно, зачем. Бывают неожиданные случаи вроде использования `rand()` в алгоритме для сжатия данных (для имитации шифрования): blog.yurichev.com.

5.3.1. Часто используемые функции Windows API

Это функции которые можно увидеть в числе импортируемых. Но также нельзя забывать, что далеко не все они были использованы в коде написанном автором. Немалая часть может вызываться из библиотечных функций и [CRT](#)-кода.

Многие ф-ции могут иметь суффикс `-A` для ASCII-версии и `-W` для Unicode-версии.

- Работа с реестром (`advapi32.dll`): `RegEnumKeyEx`, `RegEnumValue`, `RegGetValue`, `RegOpenKeyEx`, `RegQueryValueEx`.
- Работа с текстовыми `.ini`-файлами (`kernel32.dll`): `GetPrivateProfileString`.
- Диалоговые окна (`user32.dll`): `MessageBox`, `MessageBoxEx`, `CreateDialog`, `SetDlgItemText`, `GetDlgItemText`.
- Работа с ресурсами ([6.5.2](#) (стр. [743](#))): (`user32.dll`): `LoadMenu`.
- Работа с TCP/IP-сетью (`ws2_32.dll`): `WSARecv`, `WSASend`.
- Работа с файлами (`kernel32.dll`): `CreateFile`, `ReadFile`, `ReadFileEx`, `WriteFile`, `WriteFileEx`.
- Высокоуровневая работа с Internet (`wininet.dll`): `WinHttpOpen`.
- Проверка цифровой подписи исполняемого файла (`wintrust.dll`): `WinVerifyTrust`.
- Стандартная библиотека MSVC (в случае динамического связывания)(`msvcr*.dll`): `assert`, `itoa`, `ltoa`, `open`, `printf`, `read`, `strcmp`, `atol`, `atoi`, `fopen`, `fread`, `fwrite`, `memcmp`, `rand`, `strlen`, `strstr`, `strchr`.

5.3.2. Расширение триального периода

Ф-ции доступа к реестру это частая цель тех, кто пытается расширить триальный период ПО, которое может сохранять дату/время инсталляции в реестре.

Другая популярная цель это ф-ции `GetLocalTime()` и `GetSystemTime()`: триальное ПО, при каждом запуске, должно как-то проверять текущую дату/время.

5.3.3. Удаление nag-окна

Популярный метод поиска того, что заставляет выводить nag-окно это перехват ф-ций `MessageBox()`, `CreateDialog()` и `CreateWindow()`.

5.3.4. tracer: Перехват всех функций в отдельном модуле

В **tracer** есть поддержка точек останова INT3, хотя и срабатывающие только один раз, но зато их можно установить на все сразу функции в некоей DLL.

```
--one-time-INT3-bp:somedll.dll!.*
```

Либо, поставим INT3-прерывание на все функции, имена которых начинаются с префикса `xml`:

```
--one-time-INT3-bp:somedll.dll!xml.*
```

В качестве обратной стороны медали, такие прерывания срабатывают только один раз. Tracer покажет вызов какой-либо функции, если он случится, но только один раз. Еще один недостаток — увидеть аргументы функции также нельзя.

Тем не менее, эта возможность очень удобна для тех ситуаций, когда вы знаете что некая программа использует некую DLL, но не знаете какие именно функции в этой DLL.

И функций много.

Например, попробуем узнать, что использует `cygwin`-утилита `uptime`:

```
tracer -l:uptime.exe --one-time-INT3-bp:cygwin1.dll!.*
```

Так мы можем увидеть все функции из библиотеки `cygwin1.dll`, которые были вызваны хотя бы один раз, и откуда:

```
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_main (called from uptime.exe!0EP+0x6d (0x40106d))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_geteuid32 (called from uptime.exe!0EP+0xba3 (0x401ba3))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_getuid32 (called from uptime.exe!0EP+0xbaa (0x401baa))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_getegid32 (called from uptime.exe!0EP+0xcb7 (0x401cb7))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_getgid32 (called from uptime.exe!0EP+0xcbe (0x401cbe))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!sysconf (called from uptime.exe!0EP+0x735 (0x401735))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!setlocale (called from uptime.exe!0EP+0x7b2 (0x4017b2))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_open64 (called from uptime.exe!0EP+0x994 (0x401994))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!_lseek64 (called from uptime.exe!0EP+0x7ea (0x4017ea))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!read (called from uptime.exe!0EP+0x809 (0x401809))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!sscanf (called from uptime.exe!0EP+0x839 (0x401839))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!uname (called from uptime.exe!0EP+0x139 (0x401139))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!time (called from uptime.exe!0EP+0x22e (0x40122e))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!localtime (called from uptime.exe!0EP+0x236 (0x401236))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!sprintf (called from uptime.exe!0EP+0x25a (0x40125a))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!setutent (called from uptime.exe!0EP+0x3b1 (0x4013b1))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!getutent (called from uptime.exe!0EP+0x3c5 (0x4013c5))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!endutent (called from uptime.exe!0EP+0x3e6 (0x4013e6))
One-time INT3 breakpoint: cygwin1.dll!puts (called from uptime.exe!0EP+0x4c3 (0x4014c3))
```

5.4. Строки

5.4.1. Текстовые строки

Си/Си++

Обычные строки в Си заканчиваются нулем ([ASCIIZ](#)-строки).

Причина, почему формат строки в Си именно такой (оканчивающийся нулем) вероятно историческая. В [Dennis M. Ritchie, *The Evolution of the Unix Time-sharing System*, (1979)] мы можем прочитать:

A minor difference was that the unit of I/O was the word, not the byte, because the PDP-7 was a word-addressed machine. In practice this meant merely that all programs dealing with character streams ignored null characters, because null was used to pad a file to an even number of characters.

Строки выглядят в Hiew или FAR Manager точно так же:

```
int main()
{
    printf ("Hello, world!\n");
};
```

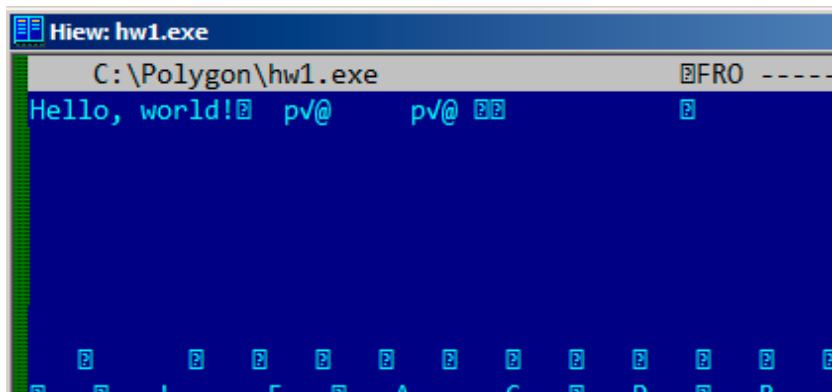


Рис. 5.1: Hiew

Borland Delphi

Когда кодируются строки в Pascal и Delphi, сама строка предваряется 8-битным или 32-битным значением, в котором закодирована длина строки.

Например:

Листинг 5.1: Delphi

```
CODE:00518AC8          dd 19h
CODE:00518ACC aLoading__Plea db 'Loading... , please wait.',0

...

CODE:00518AFC          dd 10h
CODE:00518B00 aPreparingRun__ db 'Preparing run...',0
```

Unicode

Нередко уникодом называют все способы передачи символов, когда символ занимает 2 байта или 16 бит. Это распространенная терминологическая ошибка. Уникод — это стандарт, присваивающий номер каждому символу многих письменностей мира, но не описывающий способ кодирования.

Наиболее популярные способы кодирования: UTF-8 (наиболее часто используется в Интернете и *NIX-системах) и UTF-16LE (используется в Windows).

UTF-8

UTF-8 это один из очень удачных способов кодирования символов. Все символы латиницы кодируются так же, как и в ASCII-кодировке, а символы, выходящие за пределы ASCII-7-таблицы, кодируются несколькими байтами. 0 кодируется, как и прежде, нулевым байтом, так что все стандартные функции Си продолжают работать с UTF-8-строками так же как и с обычными строками.

Посмотрим, как символы из разных языков кодируются в UTF-8 и как это выглядит в FAR, в кодировке 437

7:

⁷Пример и переводы на разные языки были взяты здесь: <http://go.yurichev.com/17304>

How much? 100€?

(English) I can eat glass and it doesn't hurt me.
 (Greek) Μπορώ να φάω σπασμένα γυαλιά χωρίς να πάθω τίποτα.
 (Hungarian) Meg tudom enni az üveget, nem lesz tőle bajom.
 (Icelandic) Ég get etið gler án þess að meiða mig.
 (Polish) Mogę jeść szkło i mi nie szkodzi.
 (Russian) Я могу есть стекло, оно мне не вредит.
 (Arabic) أنا قادر على أكل الزجاج و هذا لا يؤلمني.
 (Hebrew) אני יכול לאכול זכוכית וזה לא מזיק לי.
 (Chinese) 我能吞下玻璃而不伤身体。
 (Japanese) 私はガラスを食べられます。それは私を傷つけません。
 (Hindi) मैं काँच खा सकता हूँ और मुझे उससे कोई चोट नहीं पहुंचती।

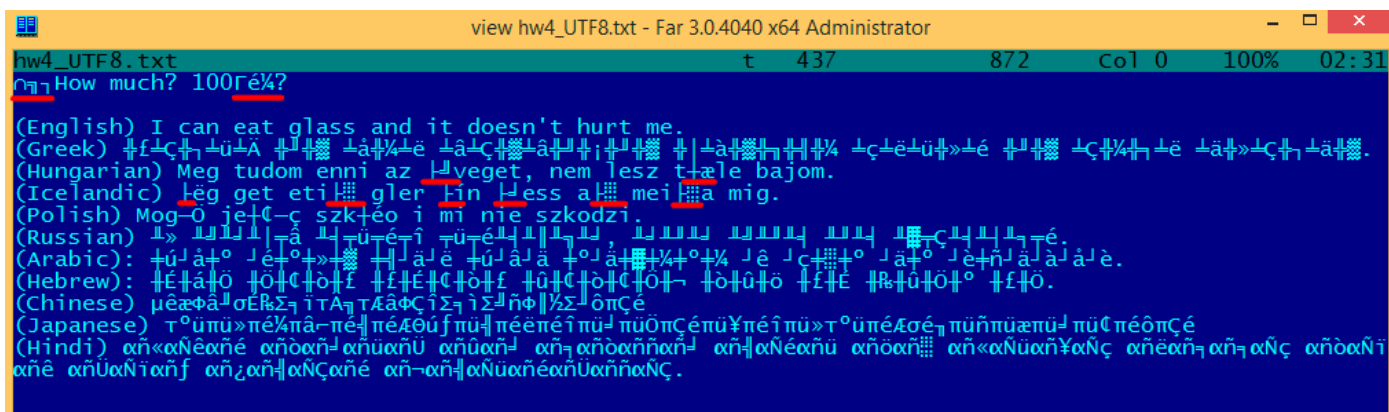


Рис. 5.2: FAR: UTF-8

Видно, что строка на английском языке выглядит точно так же, как и в ASCII-кодировке. В венгерском языке используются латиница плюс латинские буквы с диакритическими знаками. Здесь видно, что эти буквы кодируются несколькими байтами, они подчеркнуты красным. То же самое с исландским и польским языками. В самом начале имеется также символ валюты «Евро», который кодируется тремя байтами. Остальные системы письма здесь никак не связаны с латиницей. По крайней мере о русском, арабском, иврите и хинди мы можем сказать, что здесь видны повторяющиеся байты, что не удивительно, ведь, обычно буквы из одной и той же системы письменности расположены в одной или нескольких таблицах уникода, поэтому часто их коды начинаются с одних и тех же цифр.

В самом начале, перед строкой «How much?», видны три байта, которые на самом деле BOM⁸. BOM показывает, какой способ кодирования будет сейчас использоваться.

UTF-16LE

Многие функции win32 в Windows имеют суффикс -A и -W. Первые функции работают с обычными строками, вторые с UTF-16LE-строками (*wide*). Во втором случае, каждый символ обычно хранится в 16-битной переменной типа *short*.

Строки с латинскими буквами выглядят в Hiew или FAR как перемежающиеся с нулевыми байтами:

```
int wmain()
{
    wprintf (L"Hello, world!\n");
};
```

⁸Byte Order Mark

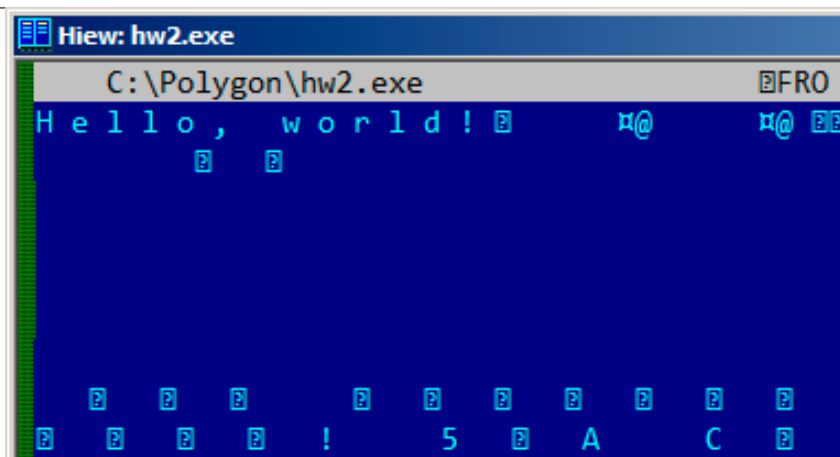


Рис. 5.3: Hiew

Подобное можно часто увидеть в системных файлах [Windows NT](#):

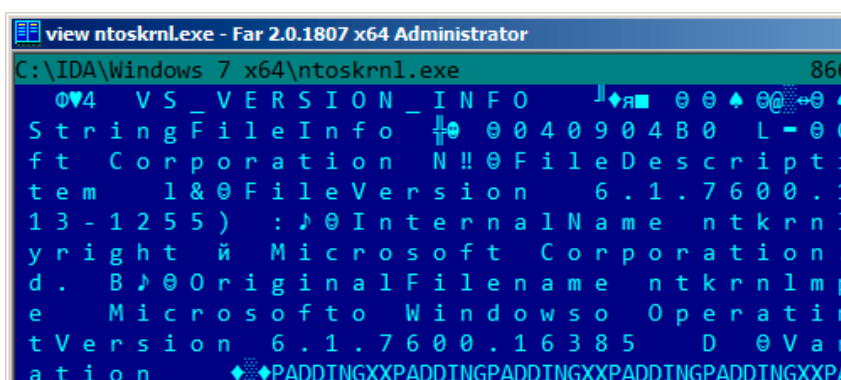


Рис. 5.4: Hiew

В [IDA](#), уникодом называется именно строки с символами, занимающими 2 байта:

```
.data:0040E000 aHelloWorld:
.data:0040E000          unicode 0, <Hello, world!>
.data:0040E000          dw 0Ah, 0
```

Вот как может выглядеть строка на русском языке («И снова здравствуйте!») закодированная в UTF-16LE:

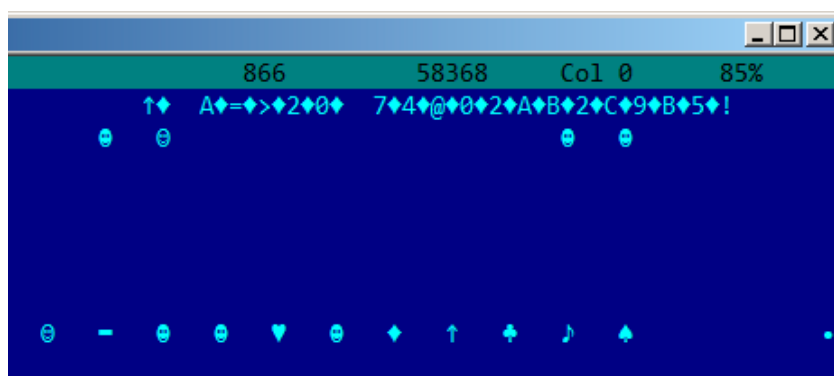


Рис. 5.5: Hiew: UTF-16LE

То что бросается в глаза — это то что символы перемежаются ромбиками (который имеет код 4). Действительно, в уникоде кириллические символы находятся в четвертом блоке⁹. Таким образом, все кириллические символы в UTF-16LE находятся в диапазоне 0x400-0x4FF.

⁹[wikipedia](#)

5.4. СТРОКИ

Вернемся к примеру, где одна и та же строка написана разными языками. Здесь посмотрим в кодировке UTF-16LE.

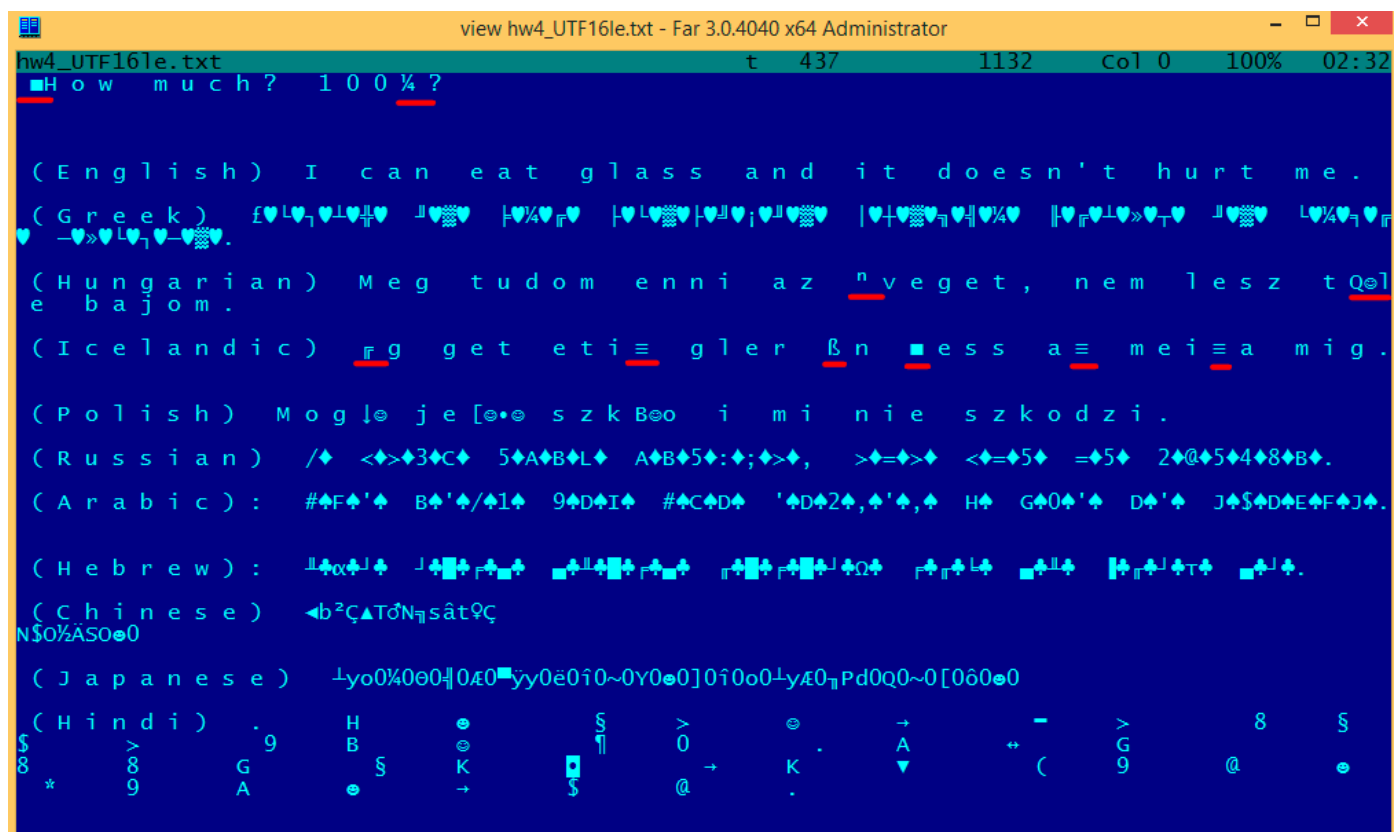


Рис. 5.6: FAR: UTF-16LE

Здесь мы также видим **BOM** в самом начале. Все латинские буквы перемежаются с нулевыми байтом. Некоторые буквы с диакритическими знаками (венгерский и исландский языки) также подчеркнуты красным.

Base64

Кодировка base64 очень популярна в тех случаях, когда нужно передать двоичные данные как текстовую строку.

По сути, этот алгоритм кодирует 3 двоичных байта в 4 печатаемых символа: все 26 букв латинского алфавита (в обоих регистрах), цифры, знак плюса («+») и слэша («/»), в итоге это получается 64 символа.

Одна отличительная особенность строк в формате base64, это то что они часто (хотя и не всегда) заканчиваются одним или двумя символами знака равенства («=») для выравнивания (**padding**), например:

```
AVjbbVSVfcUMu1xvjaMgjNtueRwBbxnyJw8dpGnLW8ZW8aKG3v4Y0icuQT+qEJAp9lA0uWs=
```

```
WVjbbVSVfcUMu1xvjaMgjNtueRwBbxnyJw8dpGnLW8ZW8aKG3v4Y0icuQT+qEJAp9lA0uQ==
```

Так что знак равенства («=») никогда не встречается в середине строк закодированных в base64.

Теперь пример кодирования вручну. Попробуем закодировать шестнадцатеричные байты 0x00, 0x11, 0x22, 0x33 в строку в формате base64:

```
$ echo -n "\x00\x11\x22\x33" | base64
ABEiMw==
```

Запишем все 4 байта в двоичной форме, затем перегруппируем их в 6-битные группы:

| 00	|| 11	|| 22	|| 33	||	||	|
0000000000001000100010001000110011	????????????????					
| A	|| B	|| E	|| i	|| M	|| w	|| = || =

Первые три байта (0x00, 0x11, 0x22) можно закодировать в 4 base64-символа ("ABEi"), но последний (0x33) — нельзя, так что он кодируется используя два символа ("Mw") и **padding**-символ ("=") добавляется дважды, чтобы выровнять последнюю группу до 4-х символов. Таким образом, длина всех корректных base64-строк всегда делится на 4.

Base64 часто используется когда нужно закодировать двоичные данные в XML. PGP-ключи и подписи в "armored"-виде (т.е., в текстовом) кодируются в base64.

Некоторые люди пытаются использовать base64 для обфускации строк: <http://blog.sec-consult.com/2016/01/deliberately-hidden-backdoor-account-in.html>¹⁰.

Существуют утилиты для сканирования бинарных файлов и нахождения в них base64-строк. Одна из них это base64scanner¹¹.

Еще одна система кодирования, которая была более популярна в UseNet и FidoNet это Uuencoding. Двоичные файлы до сих пор кодируются при помощи Uuencode в журнале Phrack. Ее возможности почти такие же, но разница с base64 в том, что имя файла также передавалось в заголовке.

Кстати, у base64 есть близкий родственник - base32, алфавит которого стоит из 10 цифр и 26 латинских букв. Известное многим использование, это onion-адрес¹², например: <http://3g2upl4pq6kufc4m.onion/>. URL не может содержать и строчные и заглавные латинские буквы, очевидно, по этой причине разработчики Tor использовали base32.

5.4.2. Поиск строк в бинарном файле

Actually, the best form of Unix documentation is frequently running the **strings** command over a program's object code. Using **strings**, you can get a complete list of the program's hard-coded file name, environment variables, undocumented options, obscure error messages, and so forth.

The Unix-Haters Handbook

Стандартная утилита в UNIX *strings* это самый простой способ увидеть строки в файле. Например, это строки найденные в исполняемом файле sshd из OpenSSH 7.2:

```
...
0123
0123456789
0123456789abcdefABCDEF.:/
%02x
...
%.100s, line %lu: Bad permitopen specification <%.100s>
%.100s, line %lu: invalid criteria
%.100s, line %lu: invalid tun device
...
%.200s/.ssh/environment
...
2886173b9c9b6fdbdeda7a247cd636db38deaa.debug
$2a$06$r3.juUaHZDlIbQa02dS9FuYxL1W9M81R1Tc92PoSNmzvpEqLkLGrK
...
3des-cbc
...
Bind to port %s on %s.
Bind to port %s on %s failed: %.200s.
/bin/login
/bin/sh
```

¹⁰<http://archive.is/nDCas>

¹¹<https://github.com/DennisYurichev/base64scanner>

¹²<https://trac.torproject.org/projects/tor/wiki/doc/HiddenServiceNames>

5.4. СТРОКИ

```
/bin/sh /etc/ssh/sshr
...
D$4PQWR1
D$4PUj
D$4PV
D$4PVj
D$4PW
D$4PWj
D$4X
D$4XZj
D$4Y
...
diffie-hellman-group-exchange-sha1
diffie-hellman-group-exchange-sha256
digests
D$iPV
direct-streamlocal
direct-streamlocal@openssh.com
...
FFFFFFFFFFFFFFFFC90FDAA22168C234C4C6628B80DC1CD129024E088A6...
...
```

Тут опции, сообщения об ошибках, пути к файлам, импортируемые модули, функции, и еще какие-то странные строки (ключи?) Присутствует также нечитаемый шум—иногда в x86-коде бывают целые куски состоящие из печатаемых ASCII-символов, вплоть до 8 символов.

Конечно, OpenSSH это опенсорсная программа. Но изучение читаемых строк внутри некоторого неизвестного бинарного файла это зачастую самый первый шаг в анализе.

Также можно использовать *grep*.

В Hiew есть такая же возможность (Alt-F6), также как и в Sysinternals ProcessMonitor.

5.4.3. Сообщения об ошибках и отладочные сообщения

Очень сильно помогают отладочные сообщения, если они имеются. В некотором смысле, отладочные сообщения, это отчет о том, что сейчас происходит в программе. Зачастую, это `printf()`-подобные функции, которые пишут куда-нибудь в лог, а бывает так что и не пишут ничего, но вызовы остались, так как эта сборка — не отладочная, а *release*.

Если в отладочных сообщениях дампятся значения некоторых локальных или глобальных переменных, это тоже может помочь, как минимум, узнать их имена. Например, в Oracle RDBMS одна из таких функций: `ksdwrtr()`.

Осмысленные текстовые строки вообще очень сильно могут помочь. Дизассемблер [IDA](#) может сразу указать, из какой функции и из какого её места используется эта строка. Встречаются и смешные случаи ¹³.

Сообщения об ошибках также могут помочь найти то что нужно. В Oracle RDBMS сигнализация об ошибках проходит при помощи вызова некоторой группы функций.

Тут еще немного об этом: blog.yurichev.com.

Можно довольно быстро найти, какие функции сообщают о каких ошибках, и при каких условиях.

Это, кстати, одна из причин, почему в защите софта от копирования, бывает так, что сообщение об ошибке заменяется невнятным кодом или номером ошибки. Мало кому приятно, если взломщик быстро поймет, из-за чего именно срабатывает защита от копирования, просто по сообщению об ошибке.

Один из примеров шифрования сообщений об ошибке, здесь: [8.5.2](#) (стр. 800).

5.4.4. Подозрительные магические строки

Некоторые магические строки, используемые в бэкдорах выглядят очень подозрительно. Например, в домашних роутерах TP-Link WR740 был бэкдор ¹⁴. Бэкдор активировался при посещении

¹³blog.yurichev.com

¹⁴<http://sekurak.pl/tp-link-httpftp-backdoor/>, на русском: <http://m.habrahabr.ru/post/172799/>

5.5. ВЫЗОВЫ ASSERT()

следующего URL:

http://192.168.0.1/userRpmNatDebugRpm26525557/start_art.html.

Действительно, строка «userRpmNatDebugRpm26525557» присутствует в прошивке.

Эту строку нельзя было наугадить до распространения информации о бэкдоре.

Вы не найдете ничего такого ни в одном RFC¹⁵.

Вы не найдете ни одного алгоритма, который бы использовал такие странные последовательности байт.

И это не выглядит как сообщение об ошибке, или отладочное сообщение.

Так что проверить использование подобных странных строк — это всегда хорошая идея.

Иногда такие строки кодируются при помощи base64¹⁶. Так что неплохая идея их всех декодировать и затем просмотреть глазами, пусть даже бегло.

Более точно, такой метод сокрытия бэкдоров называется «security through obscurity» (безопасность через запутанность).

5.5. Вызовы assert()

Может также помочь наличие assert() в коде: обычно этот макрос оставляет название файла-исходника, номер строки, и условие.

Наиболее полезная информация содержится в assert-условии, по нему можно судить по именам переменных или именам полей структур. Другая полезная информация — это имена файлов, по их именам можно попытаться предположить, что там за код. Также, по именам файлов можно опознать какую-либо очень известную open-сорсную библиотеку.

Листинг 5.2: Пример информативных вызовов assert()

```
.text:107D4B29 mov dx, [ecx+42h]
.text:107D4B2D cmp edx, 1
.text:107D4B30 jz short loc_107D4B4A
.text:107D4B32 push 1ECh
.text:107D4B37 push offset aWrite_c ; "write.c"
.text:107D4B3C push offset aTdTd_planarcon ; "td->td_planarconfig == PLANARCONFIG_CON"...
.text:107D4B41 call ds:_assert

...

.text:107D52CA mov edx, [ebp-4]
.text:107D52CD and edx, 3
.text:107D52D0 test edx, edx
.text:107D52D2 jz short loc_107D52E9
.text:107D52D4 push 58h
.text:107D52D6 push offset aDumpmode_c ; "dumpmode.c"
.text:107D52DB push offset aN30 ; "(n & 3) == 0"
.text:107D52E0 call ds:_assert

...

.text:107D6759 mov cx, [eax+6]
.text:107D675D cmp ecx, 0Ch
.text:107D6760 jle short loc_107D677A
.text:107D6762 push 2D8h
.text:107D6767 push offset aLzw_c ; "lzw.c"
.text:107D676C push offset aSpLzw_nbitsBit ; "sp->lzw_nbits <= BITS_MAX"
.text:107D6771 call ds:_assert
```

Полезно «гуглить» и условия и имена файлов, это может вывести вас к open-сорсной библиотеке. Например, если «погуглить» «sp->lzw_nbits <= BITS_MAX», это вполне предсказуемо выводит на openсорсный код, что-то связанное с LZW-компрессией.

¹⁵Request for Comments

¹⁶Например, бэкдор в кабельном модеме Arris: <http://www.securitylab.ru/analytics/461497.php>

5.6. Константы

Люди, включая программистов, часто используют круглые числа вроде 10, 100, 1000, в т.ч. и в коде.

Практикующие реверсеры, обычно, хорошо знают их в шестнадцатеричном представлении: 10=0xA, 100=0x64, 1000=0x3E8, 10000=0x2710.

Иногда попадают константы 0xAAAAAAAA

(0b10101010101010101010101010101010) и 0x55555555 (0b010101010101010101010101010101) — это чередующиеся биты. Это помогает отличить некоторый сигнал от сигнала где все биты включены (0b1111 ...) или выключены (0b0000 ...).

Например, константа 0x55AA используется как минимум в бут-секторе, [MBR¹⁷](#), и в [ПЗУ](#) плат-расширений IBM-компьютеров.

Некоторые алгоритмы, особенно криптографические, используют хорошо различимые константы, которые при помощи [IDA](#) легко находить в коде.

Например, алгоритм MD5¹⁸ инициализирует свои внутренние переменные так:

```
var int h0 := 0x67452301
var int h1 := 0xEFCDAB89
var int h2 := 0x98BADCFE
var int h3 := 0x10325476
```

Если в коде найти использование этих четырех констант подряд — очень высокая вероятность что эта функция имеет отношение к MD5.

Еще такой пример это алгоритмы CRC16/CRC32, часто, алгоритмы вычисления контрольной суммы по CRC используют заранее заполненные таблицы, вроде:

Листинг 5.3: linux/lib/crc16.c

```
/** CRC table for the CRC-16. The poly is 0x8005 (x^16 + x^15 + x^2 + 1) */
u16 const crc16_table[256] = {
    0x0000, 0xC0C1, 0xC181, 0x0140, 0xC301, 0x03C0, 0x0280, 0xC241,
    0xC601, 0x06C0, 0x0780, 0xC741, 0x0500, 0xC5C1, 0xC481, 0x0440,
    0xCC01, 0x0CC0, 0x0D80, 0xCD41, 0x0F00, 0xCFC1, 0xCE81, 0x0E40,
    ...
}
```

См. также таблицу CRC32: [3.5](#) (стр. 472).

В бестабличных алгоритмах CRC используются хорошо известные полиномы, например 0xEDB88320 для CRC32.

5.6.1. Магические числа

Немало форматов файлов определяет стандартный заголовок файла где используются *магическое число* (magic number)¹⁹, один или даже несколько.

Скажем, все исполняемые файлы для Win32 и MS-DOS начинаются с двух символов «MZ»²⁰.

В начале MIDI-файла должно быть «MThd». Если у нас есть использующая для чего-нибудь MIDI-файлы программа, наверняка она будет проверять MIDI-файлы на правильность хотя бы проверяя первые 4 байта.

Это можно сделать при помощи: (*buf* указывает на начало загруженного в память файла)

```
cmp [buf], 0x6468544D ; "MThd"
jnz _error_not_a_MIDI_file
```

...либо вызвав функцию сравнения блоков памяти `memcmp()` или любой аналогичный код, вплоть до инструкции `CMPSB` ([1.6](#) (стр. 1007)).

¹⁷Master Boot Record

¹⁸[wikipedia](#)

¹⁹[wikipedia](#)

²⁰[wikipedia](#)

5.6. КОНСТАНТЫ

Найдя такое место мы получаем как минимум информацию о том, где начинается загрузка MIDI-файла, во-вторых, мы можем увидеть где располагается буфер с содержимым файла, и что еще оттуда берется, и как используется.

Даты

Часто, можно встретить число вроде 0x19870116, которое явно выглядит как дата (1987-й год, 1-й месяц (январь), 16-й день). Это может быть чей-то день рождения (программиста, его/её родственника, ребенка), либо какая-то другая важная дата. Дата может быть записана и в другом порядке, например 0x16011987. Даты в американском стиле также популярны, например 0x01161987.

Известный пример это 0x19540119 (магическое число используемое в структуре суперблока UFS2), это день рождения Маршала Кирка МакКузика, видного разработчика FreeBSD.

В Stuxnet используется число "19790509" (хотя и не как 32-битное число, а как строка), и это привело к догадкам, что этот зловард связан с Израелем²¹.

Также, числа вроде таких очень популярны в любительской криптографии, например, это отрывок из внутренностей секретной функции донглы HASP3²²:

```
void xor_pwd(void)
{
    int i;

    pwd^=0x09071966;
    for(i=0;i<8;i++)
    {
        al_buf[i]= pwd & 7; pwd = pwd >> 3;
    }
};

void emulate_func2(unsigned short seed)
{
    int i, j;
    for(i=0;i<8;i++)
    {
        ch[i] = 0;

        for(j=0;j<8;j++)
        {
            seed *= 0x1989;
            seed += 5;
            ch[i] |= (tab[(seed>>9)&0x3f]) << (7-j);
        }
    }
}
```

DHCP

Это касается также и сетевых протоколов. Например, сетевые пакеты протокола DHCP содержат так называемую *magic cookie*: 0x63538263. Какой-либо код, генерирующий пакеты по протоколу DHCP где-то и как-то должен внедрять в пакет также и эту константу. Найдя её в коде мы сможем найти место где происходит это и не только это. Любая программа, получающая DHCP-пакеты, должна где-то как-то проверять *magic cookie*, сравнивая это поле пакета с константой.

Например, берем файл dhcpcore.dll из Windows 7 x64 и ищем эту константу. И находим, два раза: оказывается, эта константа используется в функциях с красноречивыми названиями DhcpExtractOptionsForValidation() и DhcpExtractFullOptions():

Листинг 5.4: dhcpcore.dll (Windows 7 x64)

```
.rdata:000007FF6483CBE8 dword_7FF6483CBE8 dd 63538263h ; DATA XREF: ↗
↳ DhcpExtractOptionsForValidation+79
.rdata:000007FF6483CBEC dword_7FF6483CBEC dd 63538263h ; DATA XREF: ↗
↳ DhcpExtractFullOptions+97
```

²¹Это дата казни персидского еврея Habib Elghanian-a

²²<https://web.archive.org/web/20160311231616/http://www.woodmann.com/fravia/bayu3.htm>

5.7. ПОИСК НУЖНЫХ ИНСТРУКЦИЙ

А вот те места в функциях где происходит обращение к константам:

Листинг 5.5: dhcpcore.dll (Windows 7 x64)

```
.text:000007FF6480875F  mov     eax, [rsi]
.text:000007FF64808761  cmp     eax, cs:dword_7FF6483CBE8
.text:000007FF64808767  jnz     loc_7FF64817179
```

И:

Листинг 5.6: dhcpcore.dll (Windows 7 x64)

```
.text:000007FF648082C7  mov     eax, [r12]
.text:000007FF648082CB  cmp     eax, cs:dword_7FF6483CBEC
.text:000007FF648082D1  jnz     loc_7FF648173AF
```

5.6.2. Специфические константы

Иногда, бывают какие-то специфические константы для некоторого типа кода. Например, однажды автор сих строк пытался разобраться с кодом, где подозрительно часто встречалось число 12. Размеры многих массивов также были 12, или кратные 12 (24, итд). Оказалось, этот код брал на вход 12-канальный аудиофайл и обрабатывал его.

И наоборот: например, если программа работает с текстовым полем длиной 120 байт, значит где-то в коде должна быть константа 120, или 119. Если используется UTF-16, то тогда $2 \cdot 120$. Если код работает с сетевыми пакетами фиксированной длины, то хорошо бы и такую константу поискать в коде.

Это также справедливо для любительской криптографии (ключи с лицензией, итд). Если зашифрованный блок имеет размер в n байт, вы можете попробовать поискать это число в коде. Также, если вы видите фрагмент кода, который при исполнении, повторяется n раз в цикле, это может быть ф-ция шифрования/дешифрования.

5.6.3. Поиск констант

В [IDA](#) это очень просто, Alt-B или Alt-I.

А для поиска константы в большом количестве файлов, либо для поиска их в неисполняемых файлах, имеется небольшая утилита *binary grep*²³.

5.7. Поиск нужных инструкций

Если программа использует инструкции сопроцессора, и их не очень много, то можно попробовать вручную проверить отладчиком какую-то из них.

К примеру, нас может заинтересовать, при помощи чего Microsoft Excel считает результаты формул, введенных пользователем. Например, операция деления.

Если загрузить excel.exe (из Office 2010) версии 14.0.4756.1000 в [IDA](#), затем сделать полный листинг и найти все инструкции FDIV (но кроме тех, которые в качестве второго операнда используют константы — они, очевидно, не подходят нам):

```
cat EXCEL.lst | grep fdiv | grep -v dbl_ > EXCEL.fdiv
```

...то окажется, что их всего 144.

Мы можем вводить в Excel строку вроде $=(1/3)$ и проверить все эти инструкции.

Проверяя каждую инструкцию в отладчике или [tracer](#) (проверять эти инструкции можно по 4 за раз), окажется, что нам везет и срабатывает всего лишь 14-я по счету:

```
.text:3011E919 DC 33          fdiv     qword ptr [ebx]
```

²³[GitHub](#)

5.7. ПОИСК НУЖНЫХ ИНСТРУКЦИЙ

```
PID=13944|TID=28744|(0) 0x2f64e919 (Excel.exe!BASE+0x11e919)
EAX=0x02088006 EBX=0x02088018 ECX=0x00000001 EDX=0x00000001
ESI=0x02088000 EDI=0x00544804 EBP=0x0274FA3C ESP=0x0274F9F8
EIP=0x2F64E919
FLAGS=PF IF
FPU ControlWord=IC RC=NEAR PC=64bits PM UM OM ZM DM IM
FPU StatusWord=
FPU ST(0): 1.000000
```

В ST(0) содержится первый аргумент (1), второй содержится в [EBX].

Следующая за FDIV инструкция (FSTP) записывает результат в память:

```
.text:3011E91B DD 1E          fstp     qword ptr [esi]
```

Если поставить breakpoint на ней, то мы можем видеть результат:

```
PID=32852|TID=36488|(0) 0x2f40e91b (Excel.exe!BASE+0x11e91b)
EAX=0x00598006 EBX=0x00598018 ECX=0x00000001 EDX=0x00000001
ESI=0x00598000 EDI=0x00294804 EBP=0x026CF93C ESP=0x026CF8F8
EIP=0x2F40E91B
FLAGS=PF IF
FPU ControlWord=IC RC=NEAR PC=64bits PM UM OM ZM DM IM
FPU StatusWord=C1 P
FPU ST(0): 0.333333
```

А также, в рамках пранка²⁴, модифицировать его на лету:

```
tracer -l:excel.exe bpx=excel.exe!BASE+0x11E91B,set(st0,666)
```

```
PID=36540|TID=24056|(0) 0x2f40e91b (Excel.exe!BASE+0x11e91b)
EAX=0x00680006 EBX=0x00680018 ECX=0x00000001 EDX=0x00000001
ESI=0x00680000 EDI=0x00395404 EBP=0x0290FD9C ESP=0x0290FD58
EIP=0x2F40E91B
FLAGS=PF IF
FPU ControlWord=IC RC=NEAR PC=64bits PM UM OM ZM DM IM
FPU StatusWord=C1 P
FPU ST(0): 0.333333
Set ST0 register to 666.000000
```

Excel показывает в этой ячейке 666, что окончательно убеждает нас в том, что мы нашли нужное место.

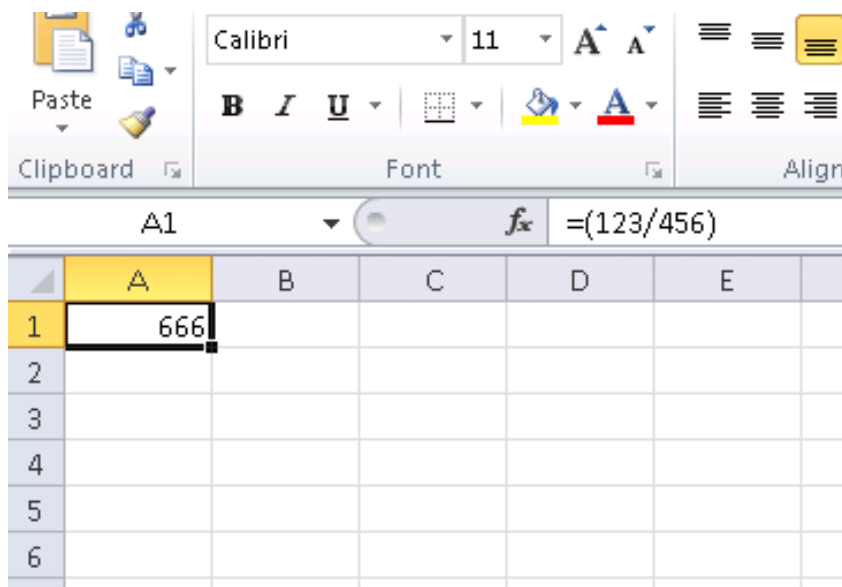


Рис. 5.7: Пранк сработал

²⁴practical joke

5.8. ПОДОЗРИТЕЛЬНЫЕ ПАТТЕРНЫ КОДА

Если попробовать ту же версию Excel, только x64, то окажется что там инструкций FDIV всего 12, причем нужная нам — третья по счету.

```
tracer.exe -l:excel.exe bpx=excel.exe!BASE+0x1B7FCC,set(st0,666)
```

Видимо, все дело в том, что много операций деления переменных типов *float* и *double* компилятор заменил на SSE-инструкции вроде DIVSD, коих здесь теперь действительно много (DIVSD присутствует в количестве 268 инструкций).

5.8. Подозрительные паттерны кода

5.8.1. Инструкции XOR

Инструкции вроде XOR op, op (например, XOR EAX, EAX) обычно используются для обнуления регистра, однако, если операнды разные, то применяется операция именно «исключающего или». Эта операция очень редко применяется в обычном программировании, но применяется очень часто в криптографии, включая любительскую.

Особенно подозрительно, если второй операнд — это большое число. Это может указывать на шифрование, вычисление контрольной суммы, итд.

Одно из исключений из этого наблюдения о котором стоит сказать, то, что генерация и проверка значения «канарейки» (1.20.3 (стр. 273)) часто происходит, используя инструкцию XOR.

Этот AWK-скрипт можно использовать для обработки листингов (.lst) созданных IDA:

```
gawk -e '$2=="xor" { tmp=substr($3, 0, length($3)-1); if (tmp!=$4) if ($4!="esp") if ($4!="ebp") ↵  
    { print $1, $2, tmp, ",", $4 } }' filename.lst
```

Нельзя также забывать, что если использовать подобный скрипт, то, возможно, он захватит и неверно дизассемблированный код (5.11.1 (стр. 704)).

5.8.2. Вручную написанный код на ассемблере

Современные компиляторы не генерируют инструкции LOOP и RCL. С другой стороны, эти инструкции хорошо знакомы кодерам, предпочитающим писать прямо на ассемблере. Подобные инструкции отмечены как (M) в списке инструкций в приложении: 1.6 (стр. 1001). Если такие инструкции встретились, можно сказать с какой-то вероятностью, что этот фрагмент кода написан вручную.

Также, пролог/эпилог функции обычно не встречается в ассемблерном коде, написанном вручную.

Как правило, во вручную написанном коде, нет никакого четкого метода передачи аргументов в функцию.

Пример из ядра Windows 2003 (файл ntoskrnl.exe):

```
MultiplyTest proc near ; CODE XREF: Get386Stepping  
    xor     cx, cx  
loc_620555: ; CODE XREF: MultiplyTest+E  
    push    cx  
    call    Multiply  
    pop     cx  
    jb      short locret_620563  
    loop    loc_620555  
    cld  
locret_620563: ; CODE XREF: MultiplyTest+C  
    retn  
MultiplyTest endp  
  
Multiply proc near ; CODE XREF: MultiplyTest+5  
    mov     ecx, 81h  
    mov     eax, 417A000h  
    mul     ecx  
    cmp     edx, 2  
    stc
```


5.9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MAGIC NUMBERS ДЛЯ ТРАССИРОВКИ

```
jnz     short locret_62057F
cmp     eax, 0FE7A000h
stc
jnz     short locret_62057F
clc
locret_62057F:                ; CODE XREF: Multiply+10
                                ; Multiply+18
                                retn
Multiply endp
```

Действительно, если заглянуть в исходные коды [WRK²⁵](#) v1.2, данный код можно найти в файле `WRK-v1.2\base\ntos\ke\i386\cpu.asm`.

5.9. Использование magic numbers для трассировки

Нередко бывает нужно узнать, как используется то или иное значение, прочитанное из файла либо взятое из пакета, принятого по сети. Часто, ручное слежение за нужной переменной это трудный процесс. Один из простых методов (хотя и не полностью надежный на 100%) это использование вашей собственной *magic number*.

Это чем-то напоминает компьютерную томографию: пациенту перед сканированием вводят в кровь рентгеноконтрастный препарат, хорошо отсвечивающий в рентгеновских лучах. Известно, как кровь нормального человека расходится, например, по почкам, и если в этой крови будет препарат, то при томографии будет хорошо видно, достаточно ли хорошо кровь расходится по почкам и нет ли там камней, например, и прочих образований.

Мы можем взять 32-битное число вроде `0x0badf00d`, либо чью-то дату рождения вроде `0x11101979` и записать это, занимающее 4 байта число, в какое-либо место файла используемого исследуемой нами программой.

Затем, при трассировке этой программы, в том числе, при помощи [tracer](#) в режиме *code coverage*, а затем при помощи *grep* или простого поиска по текстовому файлу с результатами трассировки, мы можем легко увидеть, в каких местах кода использовалось это значение, и как.

Пример результата работы [tracer](#) в режиме *ss*, к которому легко применить утилиту *grep*:

```
0x150bf66 (_kziaia+0x14), e=      1 [MOV EBX, [EBP+8]] [EBP+8]=0xf59c934
0x150bf69 (_kziaia+0x17), e=      1 [MOV EDX, [69AEB08h]] [69AEB08h]=0
0x150bf6f (_kziaia+0x1d), e=      1 [FS: MOV EAX, [2Ch]]
0x150bf75 (_kziaia+0x23), e=      1 [MOV ECX, [EAX+EDX*4]] [EAX+EDX*4]=0xf1ac360
0x150bf78 (_kziaia+0x26), e=      1 [MOV [EBP-4], ECX] ECX=0xf1ac360
```

Это справедливо также и для сетевых пакетов. Важно только, чтобы наш *magic number* был как можно более уникален и не присутствовал в самом коде.

Помимо [tracer](#), такой эмулятор MS-DOS как DosBox, в режиме *heavydebug*, может писать в отчет информацию обо всех состояниях регистра на каждом шаге исполнения программы²⁶, так что этот метод может пригодиться и для исследования программ под DOS.

5.10. Циклы

Когда ваша программа работает с некоторым файлом, или буфером некоторой длины, внутри кода где-то должен быть цикл с дешифровкой/обработкой.

Вот реальный пример выхода инструмента [tracer](#). Был код, загружающий некоторый зашифрованный файл размером 258 байт. Я могу запустить его с целью подсчета исполнения каждой инструкции (в наше время [DBI](#) послужила бы куда лучше). И я могу быстро найти место в коде, которое было исполнено 259/258 раз:

```
...
0x45a6b5 e=      1 [FS: MOV [0], EAX] EAX=0x218fb08
```

²⁵Windows Research Kernel

²⁶См. также мой пост в блоге об этой возможности в DosBox: blog.yurichev.com

5.10. ЦИКЛЫ

```
0x45a6bb e= 1 [MOV [EBP-254h], ECX] ECX=0x218fbd8
0x45a6c1 e= 1 [MOV EAX, [EBP-254h]] [EBP-254h]=0x218fbd8
0x45a6c7 e= 1 [CMP [EAX+14h], 0] [EAX+14h]=0x102
0x45a6cb e= 1 [JZ 45A9F2h] ZF=false
0x45a6d1 e= 1 [MOV [EBP-0Dh], 1]
0x45a6d5 e= 1 [XOR ECX, ECX] ECX=0x218fbd8
0x45a6d7 e= 1 [MOV [EBP-14h], CX] CX=0
0x45a6db e= 1 [MOV [EBP-18h], 0]
0x45a6e2 e= 1 [JMP 45A6EDh]
0x45a6e4 e= 258 [MOV EDX, [EBP-18h]] [EBP-18h]=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a6e7 e= 258 [ADD EDX, 1] EDX=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a6ea e= 258 [MOV [EBP-18h], EDX] EDX=1..6 (248 items skipped) 0xfe..0x102
0x45a6ed e= 259 [MOV EAX, [EBP-254h]] [EBP-254h]=0x218fbd8
0x45a6f3 e= 259 [MOV ECX, [EBP-18h]] [EBP-18h]=0..5 (249 items skipped) 0xfe..0x102
0x45a6f6 e= 259 [CMP ECX, [EAX+14h]] ECX=0..5 (249 items skipped) 0xfe..0x102 [EAX+14h]=0x102
0x45a6f9 e= 259 [JNB 45A727h] CF=false,true
0x45a6fb e= 258 [MOV EDX, [EBP-254h]] [EBP-254h]=0x218fbd8
0x45a701 e= 258 [MOV EAX, [EDX+10h]] [EDX+10h]=0x21ee4c8
0x45a704 e= 258 [MOV ECX, [EBP-18h]] [EBP-18h]=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a707 e= 258 [ADD ECX, 1] ECX=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a70a e= 258 [IMUL ECX, ECX, 1Fh] ECX=1..6 (248 items skipped) 0xfe..0x102
0x45a70d e= 258 [MOV EDX, [EBP-18h]] [EBP-18h]=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a710 e= 258 [MOVZX EAX, [EAX+EDX]] [EAX+EDX]=1..6 (156 items skipped) 0xf3, 0xf8, 0xf9, 0xfc, 0xfd
0x45a714 e= 258 [XOR EAX, ECX] EAX=1..6 (156 items skipped) 0xf3, 0xf8, 0xf9, 0xfc, 0xfd ECX=0..6 (156 items skipped) 0xf3, 0xf8, 0xf9, 0xfc, 0xfd
0x45a716 e= 258 [MOV ECX, [EBP-254h]] [EBP-254h]=0x218fbd8
0x45a71c e= 258 [MOV EDX, [ECX+10h]] [ECX+10h]=0x21ee4c8
0x45a71f e= 258 [MOV ECX, [EBP-18h]] [EBP-18h]=0..5 (248 items skipped) 0xfd..0x101
0x45a722 e= 258 [MOV [EDX+ECX], AL] AL=0..5 (77 items skipped) 0xe2, 0xee, 0xef, 0xf7, 0xfc
0x45a725 e= 258 [JMP 45A6E4h]
0x45a727 e= 1 [PUSH 5]
0x45a729 e= 1 [MOV ECX, [EBP-254h]] [EBP-254h]=0x218fbd8
0x45a72f e= 1 [CALL 45B500h]
0x45a734 e= 1 [MOV ECX, EAX] EAX=0x218fbd8
0x45a736 e= 1 [CALL 45B710h]
0x45a73b e= 1 [CMP EAX, 5] EAX=5
...
```

Как потом оказалось, это цикл дешифрования.

5.10.1. Некоторые паттерны в бинарных файлах

Все примеры здесь были подготовлены в Windows с активной кодовой страницей 437 ²⁷ в консоли. Двоичные файлы внутри могут визуально выглядеть иначе если установлена другая кодовая страница.

²⁷<https://ru.wikipedia.org/wiki/CP437>

Массивы

Иногда мы можем легко заметить массив 16/32/64-битных значений визуально, в шестнадцатеричном редакторе.

Вот пример массива 16-битных значений. Мы видим, что каждый первый байт в паре всегда равен 7 или 8, а второй выглядит случайным:

E:\...\3affacde09fe21c28f1543db51145b.dat h 1252 2175000 Col 0 23% 21:25																
000007CA70:	EF	07	C6	07	D6	07	26	08	0C	08	CE	07	24	07	60	07
000007CA80:	CC	07	AA	07	A2	07	AC	07	E9	07	BF	07	D6	07	2C	08
000007CA90:	09	08	CA	07	31	07	5E	07	BC	07	9A	07	93	07	9E	07
000007CAA0:	E6	07	BD	07	D8	07	2F	08	06	08	CB	07	3E	07	5E	07
000007CAB0:	B3	07	91	07	8B	07	97	07	E1	07	BB	07	DB	07	32	08
000007CAC0:	03	08	CB	07	4C	07	61	07	AA	07	89	07	84	07	91	07
000007CAD0:	E0	07	BB	07	DC	07	33	08	01	08	CC	07	57	07	64	07
000007CAE0:	A4	07	84	07	81	07	90	07	DE	07	BB	07	DE	07	34	08
000007CAF0:	FF	07	CD	07	65	07	69	07	A0	07	81	07	7F	07	90	07
000007CB00:	DE	07	BC	07	DF	07	33	08	FF	07	CE	07	70	07	6F	07
000007CB10:	9F	07	82	07	81	07	93	07	DD	07	BC	07	E0	07	34	08
000007CB20:	FE	07	CE	07	7E	07	78	07	9F	07	84	07	84	07	96	07
000007CB30:	DE	07	BD	07	DF	07	32	08	FF	07	CE	07	87	07	7F	07
000007CB40:	A1	07	87	07	88	07	9B	07	E2	07	BF	07	DE	07	2F	08
000007CB50:	02	08	CF	07	93	07	89	07	A4	07	8C	07	8D	07	9F	07
000007CB60:	E4	07	C0	07	DD	07	2D	08	03	08	CF	07	9C	07	92	07
000007CB70:	A9	07	90	07	91	07	A3	07	E6	07	C3	07	DD	07	2B	08
000007CB80:	04	08	D0	07	A7	07	9C	07	AE	07	96	07	96	07	A7	07
000007CB90:	E8	07	C7	07	DF	07	29	08	04	08	D3	07	B1	07	A7	07
000007CBA0:	B4	07	9B	07	9B	07	AB	07	E8	07	CA	07	E1	07	27	08
000007CBB0:	03	08	D5	07	BB	07	B3	07	BB	07	A1	07	A0	07	AF	07
000007CBC0:	EA	07	CD	07	E3	07	25	08	03	08	D8	07	C4	07	BD	07
000007CBD0:	C1	07	A6	07	A5	07	B3	07	EA	07	D1	07	E6	07	22	08
000007CBE0:	01	08	DC	07	CE	07	C8	07	C8	07	AD	07	AA	07	B7	07
i.Æ.Ö.&¶¶Î.\$.`. Ï.ª.¢.¬.é.¿.Ö., oÊ.1.^.%.\$.“.ž. æ.%ø./¶¶Ê.>.^. ³.`.<.—.á.».Û.2 ♥¶Ê.L.a.ª.‰.,,.`. à.».Û.3¶@¶Ï.W.d. ¤.,,¶.¶.¶.».».4 ÿ.Î.e.i. .¶.△.¶. b.%ß.3ÿ.Î.p.o. Ÿ.,.¶.“.Ÿ.%à.4 b.Î.~.x.Ÿ.,,.,.— b.%ß.2ÿ.Î.†.△. i.†.^.>â.¿.b./ @¶Ï.“.‰.¤.¶.Ÿ. ä.À.Ÿ.-¶¶Ï.æ.’. @.¶.`.f.æ.Ã.Ÿ.+ ♦.¶.§.æ.®.—.—.§. è.Ç.ß.)♦¶Ó.±.§. ´.>.>«è.Ê.á.’ ♥¶Õ.».»³.».»j. -. ê.Î.ã.%¶¶ø.Ä.%. Á.¡.¥.³.ê.Ñ.æ.” @Û.Î.È.È.—.ª...																
1Help 2Wrap 3Quit 4Text 5 6Edit 7Search 8OEM 9 10Quit																

Рис. 5.8: FAR: массив 16-битных значений

Для примера я использовал файл содержащий 12-канальный сигнал оцифрованный при помощи 16-битного [ADC](#)²⁸.

²⁸Analog-to-Digital Converter

А вот пример очень типичного MIPS-кода.

Глядя на этот скриншот, можно увидеть некий узор. Вертикальные красные линии добавлены для ясности:

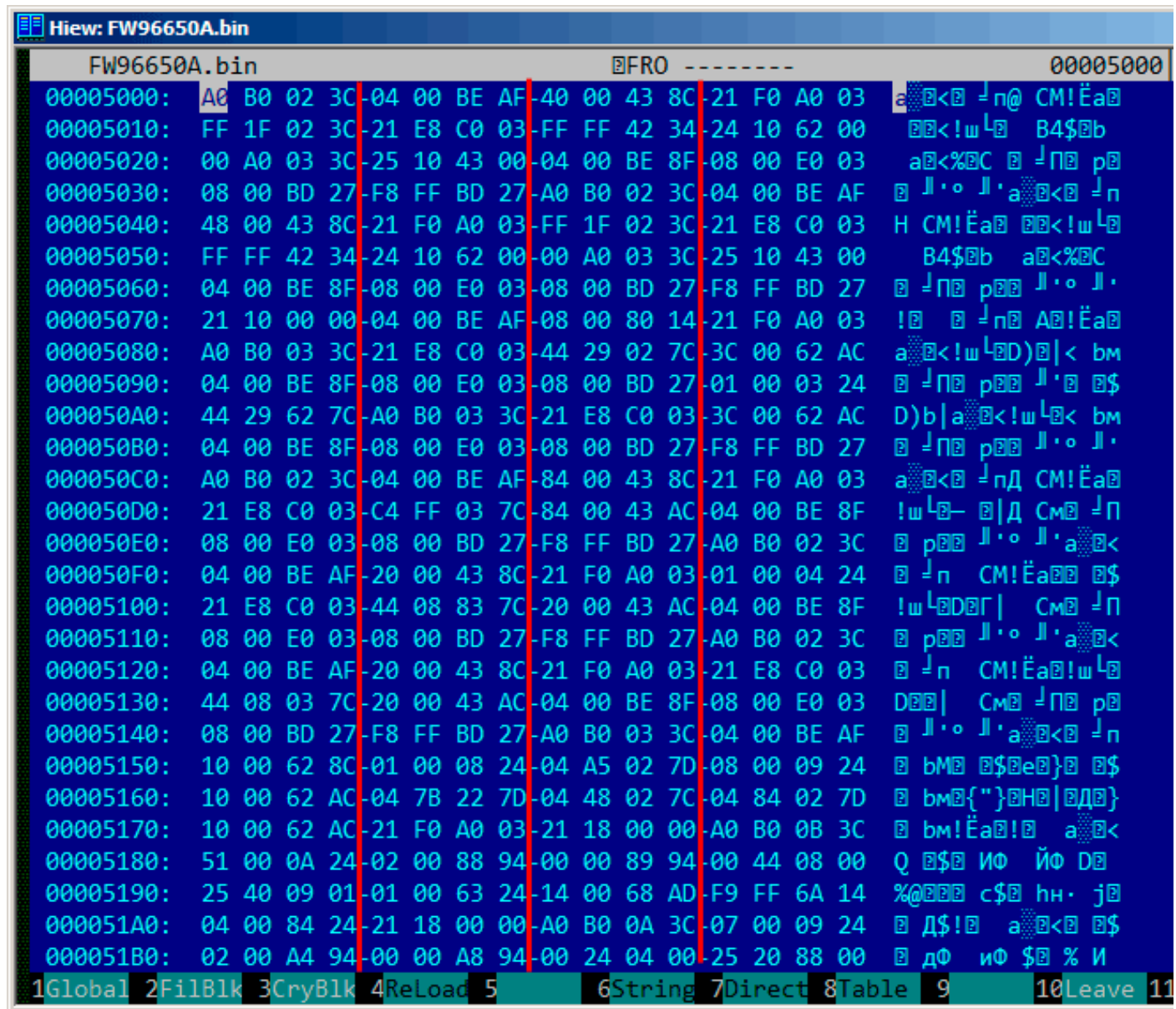


Рис. 5.9: Hiew: очень типичный код для MIPS

Еще пример таких файлов в этой книге: [9.5](#) (стр. [956](#)).

Разреженные файлы

Это разреженный файл, в котором данные разбросаны посреди почти пустого файла. Каждый символ пробела здесь на самом деле нулевой байт (который выглядит как пробел). Это файл для программирования FPGA (чип Altera Stratix GX). Конечно, такие файлы легко сжимаются, но подобные форматы очень популярны в научном и инженерном ПО, где быстрый доступ важен, а компактность — не очень.

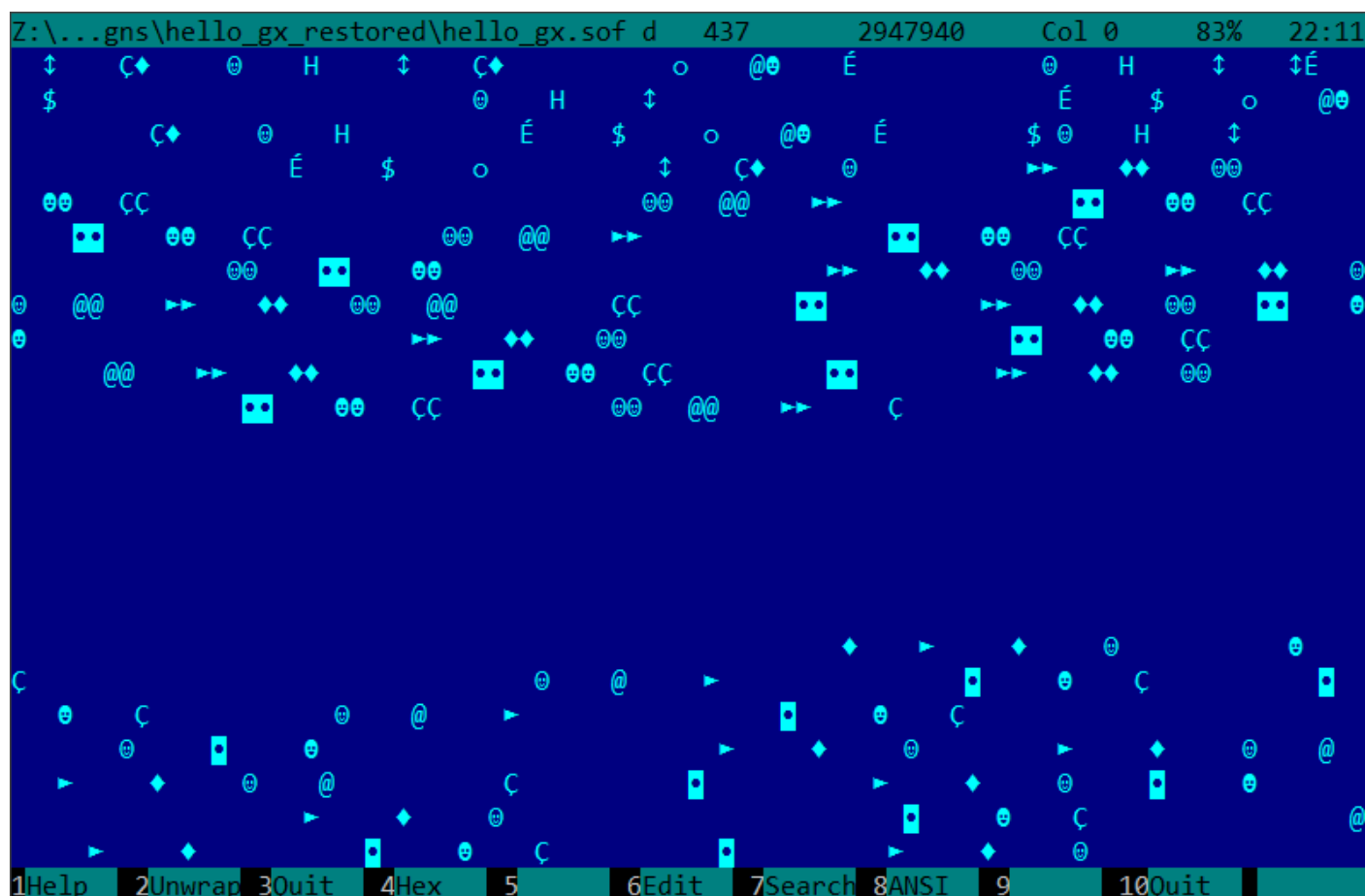


Рис. 5.10: FAR: Разреженный файл

Сжатый файл

Этот файл это просто некий сжатый архив. Он имеет довольно высокую энтропию и визуально выглядит просто хаотичным. Так выглядят сжатые и/или зашифрованные файлы.



Рис. 5.11: FAR: Сжатый файл

Инсталляции **ОС** обычно распространяются в ISO-файлах, которые суть копии CD/DVD-дисков. Используемая файловая система называется **CDFS**, здесь видны имена файлов и какие-то дополнительные данные. Это могут быть длины файлов, указатели на другие директории, атрибуты файлов, итд. Так может выглядеть типичная файловая система внутри.

```
Z:\...untu\ubuntu-15.10-desktop-i386.iso d 437 1226964992 Col 0 0% 21:59

ä # # s>↑; @ @ SP•n
PX$@mA Am@ TF→@s>↑, s>↑, s>↑, CEL@ $ φ
φ ` # # s>↑; @ @ @PX$@mA Am@ TF→@s>↑, s>↑,
s>↑, s>↑, n % % s>↑; @ @ @.DISKPX$@mA Am@ TF
→@s>↑% s>↑, s>↑% NM@ .diskn & & s>↑; @ @ @BOOT PX$@mA Am@
@ TF→@s>↑( s>↑, s>↑( NM@ boot r ( ( s>↑; @ @ @
↑CASPER PX$@mA Am@ TF→@s>↑( s>↑, s>↑( NM@ casper n )
) s>↑; @ @ @DISTSPX$@mA Am@ TF→@s>↑→ s>↑ s
s>↑→ NM@ distsr 1 1 s>↑; @ @ @INSTALLPX$@mA Am@
TF→@s>↑( s>↑, s>↑( NM@ installv 2 2 H H s>↑; @ @ @ISOLINUX PX$@
mA Am@ TF→@s>↑( s>↑( s>↑( NM@ isolinux z p@ p`
s>↑; @ @MD5SUM.TXT PX$@ü ü$@ TF→@s>↑: s>↑; s>↑
: NM@ md5sum.txt n ; ; s>↑; @ @ @PICS PX$@mA Am@
TF→@s>↑→ s>↑→ s>↑→ NM@ pics n < < s>↑; @ @ @POOL PX$@mA
Am@ TF→@s>↑→ s>↑ s>↑→ NM@ pool r W W s>↑; @
@ @PRESEEDPX$@mA Am@ TF→@s>↑→ s>↑→ s>↑→ NM@ preseed
è S@ @Sα αs>↑; @ @↑README.DISKDEFINES PX$@ü ü$@
TF→@s>↑→ s>↑: s>↑→ NM@ README.diskdefines x ≤ ≤ s>↑; @ @UBUNT
U.PX$@mí ím@ TF→@s>↑→ s>↑→ s>↑→ NM@ ubuntuSL•@ @

1Help 2Unwrap 3Quit 4Hex 5 6Edit 7Search 8ANSI 9 10Quit
```

Рис. 5.12: FAR: ISO-файл: инсталляционный **CD**³⁰ Ubuntu 15

²⁹Compact Disc File System

32-битный x86 исполняемый код

Так выглядит 32-битный x86 исполняемый код. У него не очень высокая энтропия, потому что некоторые байты встречаются чаще других.



Рис. 5.13: FAR: Исполняемый 32-битных x86 код

Графические BMP-файлы

BMP-файлы не сжаты, так что каждый байт (или группа байт) описывают каждый пиксель. Я нашел эту картинку где-то внутри установленной Windows 8.1:



Рис. 5.14: Пример картинки

Вы видите, что эта картинка имеет пиксели, которые вряд ли могут быть хорошо сжаты (в районе центра), но здесь есть длинные одноцветные линии вверху и внизу. Действительно, линии вроде этих выглядят как линии при просмотре этого файла:

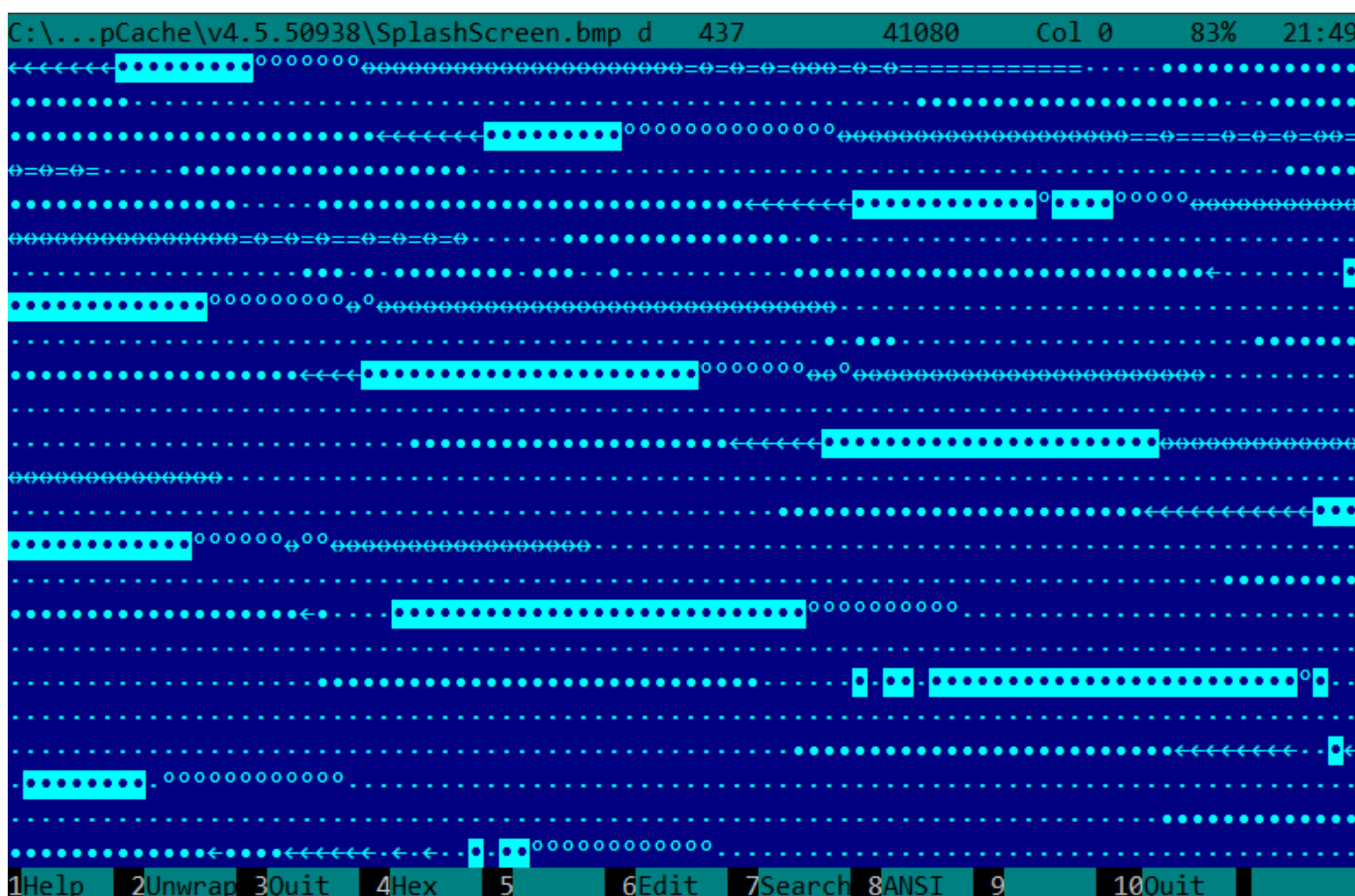


Рис. 5.15: Фрагмент BMP-файла

5.10.2. Сравнение «снимков» памяти

Метод простого сравнения двух снимков памяти для поиска изменений часто применялся для взлома игр на 8-битных компьютерах и взлома файлов с записанными рекордными очками.

5.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ISA

К примеру, если вы имеете загруженную игру на 8-битном компьютере (где самой памяти не очень много, но игра занимает еще меньше), и вы знаете что сейчас у вас, условно, 100 пуль, вы можете сделать «снимок» всей памяти и сохранить где-то. Затем просто стреляете куда угодно, у вас станет 99 пуль, сделать второй «снимок», и затем сравнить эти два снимка: где-то наверняка должен быть байт, который в начале был 100, а затем стал 99.

Если учесть, что игры на тех маломощных домашних компьютерах обычно были написаны на ассемблере и подобные переменные там были глобальные, то можно с уверенностью сказать, какой адрес в памяти всегда отвечает за количество пуль. Если поискать в дизассемблированном коде игры все обращения по этому адресу, несложно найти код, отвечающий за уменьшение пуль и записать туда инструкцию **NOP** или несколько **NOP**-в, так мы получим игру в которой у игрока всегда будет 100 пуль, например.

А так как игры на тех домашних 8-битных компьютерах всегда загружались по одним и тем же адресам, и версий одной игры редко когда было больше одной продолжительное время, то геймеры-энтузиасты знали, по какому адресу (используя инструкцию языка BASIC **POKE**) что записать после загрузки игры, чтобы хакнуть её. Это привело к появлению списков «читов» состоящих из инструкций **POKE**, публикуемых в журналах посвященным 8-битным играм. См. также: wikipedia.

Точно так же легко модифицировать файлы с сохраненными рекордами (кто сколько очков набрал), впрочем, это может сработать не только с 8-битными играми. Нужно заметить, какой у вас сейчас рекорд и где-то сохранить файл с очками. Затем, когда очков станет другое количество, просто сравнить два файла, можно даже DOS-утилитой **FC**³¹ (файлы рекордов, часто, бинарные).

Где-то будут отличаться несколько байт, и легко будет увидеть, какие именно отвечают за количество очков. Впрочем, разработчики игр полностью осведомлены о таких хитростях и могут защититься от этого.

В каком-то смысле похожий пример в этой книге здесь: [9.3](#) (стр. [943](#)).

Реестр Windows

А еще можно вспомнить сравнение реестра Windows до инсталляции программы и после. Это также популярный метод поиска, какие элементы реестра программа использует.

Наверное это причина, почему так популярны shareware-программы для очистки реестра в Windows.

Блинк-компаратор

Сравнение файлов или слепков памяти вообще, немного напоминает блинк-компаратор³²: устройство, которое раньше использовали астрономы для поиска движущихся небесных объектов.

Блинк-компаратор позволял быстро переключаться между двух отснятых в разное время кадров, и астроном мог увидеть разницу визуально.

Кстати, при помощи блинк-компаратора, в 1930 был открыт Плутон.

5.11. Определение ISA

Часто, вы можете иметь дело с бинарным файлом для неизвестной ISA. Вероятно, простейший способ определить ISA это пробовать разные в IDA, objdump или другом дизассемблере.

Чтобы этого достичь, нужно понимать разницу между некорректно дизассемблированным кодом, и корректно дизассемблированным.

5.11.1. Неверно дизассемблированный код

Практикующие reverse engineer-ы часто сталкиваются с неверно дизассемблированным кодом.

³¹утилита MS-DOS для сравнения двух файлов побайтово

³²<http://go.yurichev.com/17349>

Дизассемблирование началось в неверном месте (x86)

В отличие от ARM и MIPS (где у каждой инструкции длина или 2 или 4 байта), x86-инструкции имеют переменную длину, так что, любой дизассемблер, начиная работу с середины x86-инструкции, может выдать неверные результаты.

Как пример:

```
add    [ebp-31F7Bh], cl
dec    dword ptr [ecx-3277Bh]
dec    dword ptr [ebp-2CF7Bh]
inc    dword ptr [ebx-7A76F33Ch]
fddiv  st(4), st
db 0FFh
dec    dword ptr [ecx-21F7Bh]
dec    dword ptr [ecx-22373h]
dec    dword ptr [ecx-2276Bh]
dec    dword ptr [ecx-22B63h]
dec    dword ptr [ecx-22F4Bh]
dec    dword ptr [ecx-23343h]
jmp    dword ptr [esi-74h]
xchg   eax, ebp
clc
std
db 0FFh
db 0FFh
mov     word ptr [ebp-214h], cs ; <- дизассемблер наконец нашел здесь правильный старт
mov     word ptr [ebp-238h], ds
mov     word ptr [ebp-23Ch], es
mov     word ptr [ebp-240h], fs
mov     word ptr [ebp-244h], gs
pushf
pop     dword ptr [ebp-210h]
mov     eax, [ebp+4]
mov     [ebp-218h], eax
lea     eax, [ebp+4]
mov     [ebp-20Ch], eax
mov     dword ptr [ebp-2D0h], 10001h
mov     eax, [eax-4]
mov     [ebp-21Ch], eax
mov     eax, [ebp+0Ch]
mov     [ebp-320h], eax
mov     eax, [ebp+10h]
mov     [ebp-31Ch], eax
mov     eax, [ebp+4]
mov     [ebp-314h], eax
call    ds:IsDebuggerPresent
mov     edi, eax
lea     eax, [ebp-328h]
push    eax
call    sub_407663
pop     ecx
test    eax, eax
jnz     short loc_402D7B
```

В начале мы видим неверно дизассемблированные инструкции, но потом, так или иначе, дизассемблер находит верный след.

Как выглядят случайные данные в дизассемблированном виде?

Общее, что можно сразу заметить, это:

- Необычно большой разброс инструкций. Самые частые x86-инструкции это PUSH, MOV, CALL, но здесь мы видим инструкции из любых групп: FPU-инструкции, инструкции IN/OUT, редкие и системные инструкции, всё друг с другом смешано в одном месте.
- Большие и случайные значения, смещения, immediates.

5.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ISA

- Переходы с неверными смещениями часто имеют адрес перехода в середину другой инструкции.

Листинг 5.7: случайный шум (x86)

```
mov     bl, 0Ch
mov     ecx, 0D38558Dh
mov     eax, ds:2C869A86h
db      67h
mov     dl, 0CCh
insb
movsb
push    eax
xor     [edx-53h], ah
fcom    qword ptr [edi-45A0EF72h]
pop     esp
pop     ss
in      eax, dx
dec     ebx
push    esp
lds     esp, [esi-41h]
retf
rcl     dword ptr [eax], cl
mov     cl, 9Ch
mov     ch, 0DFh
push    cs
insb
mov     esi, 0D9C65E4Dh
imul    ebp, [ecx], 66h
pushf
sal     dword ptr [ebp-64h], cl
sub     eax, 0AC433D64h
out     8Ch, eax
pop     ss
sbb     [eax], ebx
aas
xchg    cl, [ebx+ebx*4+14B31Eh]
jecxz   short near ptr loc_58+1
xor     al, 0C6h
inc     edx
db      36h
pusha
stosb
test    [ebx], ebx
sub     al, 0D3h ; 'L'
pop     eax
stosb

loc_58: ; CODE XREF: seg000:0000004A
test    [esi], eax
inc     ebp
das
db      64h
pop     ecx
das
hlt

pop     edx
out     0B0h, al
lodsb
push    ebx
cdq
out     dx, al
sub     al, 0Ah
sti
outsd
add     dword ptr [edx], 96FCBE4Bh
and     eax, 0E537EE4Fh
inc     esp
stosd
cdq
```

5.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ISA

```
push    ecx
in      al, 0CBh
mov     ds:0D114C45Ch, al
mov     esi, 659D1985h
```

Листинг 5.8: случайный шум (x86-64)

```
lea     esi, [rax+rdx*4+43558D29h]
loc_AF3: ; CODE XREF: seg000:00000000000000B46
rcl     byte ptr [rsi+rax*8+29BB423Ah], 1
lea     ecx, cs:0FFFFFFFB2A6780Fh
mov     al, 96h
mov     ah, 0CEh
push    rsp
lods    byte ptr [esi]

db 2Fh ; /

pop     rsp
db 64h
retf    0E993h

cmp     ah, [rax+4Ah]
movzx   rsi, dword ptr [rbp-25h]
push    4Ah
movzx   rdi, dword ptr [rdi+rdx*8]

db 9Ah

rcr     byte ptr [rax+1Dh], cl
lodsd
xor     [rbp+6CF20173h], edx
xor     [rbp+66F8B593h], edx
push    rbx
sbb     ch, [rbx-0Fh]
stosd
int     87h
db 46h, 4Ch
out     33h, rax
xchg    eax, ebp
test    ecx, ebp
movsd
leave
push    rsp

db 16h

xchg    eax, esi
pop     rdi
loc_B3D: ; CODE XREF: seg000:00000000000000B5F
mov     ds:93CA685DF98A90F9h, eax
jnz     short near ptr loc_AF3+6
out     dx, eax
cwde
mov     bh, 5Dh ; ']'
movsb
pop     rbp
```

Листинг 5.9: случайный шум (ARM (Режим ARM))

```
BLNE    0xFE16A9D8
BGE     0x1634D0C
SVCCS   0x450685
STRNVT  R5, [PC], #-0x964
LDCGE   p6, c14, [R0], #0x168
STCCSL  p9, c9, [LR], #0x14C
CMNHIP  PC, R10, LSL#22
FLDMIADNV LR!, {D4}
```

5.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ISA

```

MCR      p5, 2, R2, c15, c6, 4
BLGE     0x1139558
BLGT     0xFF9146E4
STRNEB   R5, [R4], #0xCA2
STMNEIB  R5, {R0, R4, R6, R7, R9-SP, PC}
STMIA    R8, {R0, R2-R4, R7, R8, R10, SP, LR}^
STRB     SP, [R8], PC, ROR#18
LDCCS    p9, c13, [R6, #0x1BC]
LDRGE    R8, [R9, #0x66E]
STRNEB   R5, [R8], #-0x8C3
STCCSL   p15, c9, [R7, #-0x84]
RSBLS    LR, R2, R11, ASR LR
SVCGET   0x9B0362
SVCGET   0xA73173
STMNEDB  R11!, {R0, R1, R4-R6, R8, R10, R11, SP}
STR      R0, [R3], #-0xCE4
LDCGT    p15, c8, [R1, #0x2CC]
LDRCCB   R1, [R11], -R7, ROR#30
BLLT     0xFED9D58C
BL       0x13E60F4
LDMVSIB  R3!, {R1, R4-R7}^
USATNE   R10, #7, SP, LSL#11
LDRGEB   LR, [R1], #0xE56
STRPLT   R9, [LR], #0x567
LDRLT    R11, [R1], #-0x29B
SVCNV    0x12DB29
MVNNVS   R5, SP, LSL#25
LDCL     p8, c14, [R12, #-0x288]
STCNEL   p2, c6, [R6, #-0xBC]!
SVCNV    0x2E5A2F
BLX      0x1A8C97E
TEQGE    R3, #0x1100000
STMLSIA  R6, {R3, R6, R10, R11, SP}
BICPLS   R12, R2, #0x5800
BNE      0x7CC408
TEQGE    R2, R4, LSL#20
SUBS     R1, R11, #0x28C
BICVS    R3, R12, R7, ASR R0
LDRMI    R7, [LR], R3, LSL#21
BLMI     0x1A79234
STMVCDB  R6, {R0-R3, R6, R7, R10, R11}
EORMI    R12, R6, #0xC5
MCRRCs   p1, 0xF, R1, R3, c2

```

Листинг 5.10: случайный шум (ARM (Режим Thumb))

```

LSRS     R3, R6, #0x12
LDRH     R1, [R7, #0x2C]
SUBS     R0, #0x55 ; 'U'
ADR      R1, loc_3C
LDR      R2, [SP, #0x218]
CMP      R4, #0x86
SXTB     R7, R4
LDR      R4, [R1, #0x4C]
STR      R4, [R4, R2]
STR      R0, [R6, #0x20]
BGT      0xFFFFFFFF72
LDRH     R7, [R2, #0x34]
LDRSH    R0, [R2, R4]
LDRB     R2, [R7, R2]

DCB 0x17
DCB 0xED

STRB     R3, [R1, R1]
STR      R5, [R0, #0x6C]
LDMIA    R3, {R0-R5, R7}
ASRS     R3, R2, #3
LDR      R4, [SP, #0x2C4]
SVC      0xB5

```

5.11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ISA

```
LDR    R6, [R1,#0x40]
LDR    R5, =0xB2C5CA32
STMIA  R6, {R1-R4,R6}
LDR    R1, [R3,#0x3C]
STR    R1, [R5,#0x60]
BCC    0xFFFFFFFF70
LDR    R4, [SP,#0x1D4]
STR    R5, [R5,#0x40]
ORRS   R5, R7
```

```
loc_3C ; DATA XREF: ROM:00000006
B      0xFFFFFFFF98
```

Листинг 5.11: случайный шум (MIPS little endian)

```
lw      $t9, 0xCB3($t5)
sb      $t5, 0x3855($t0)
sltiu   $a2, $a0, -0x657A
ldr      $t4, -0x4D99($a2)
daddi    $s0, $s1, 0x50A4
lw      $s7, -0x2353($s4)
bgtzl    $a1, 0x17C5C

.byte 0x17
.byte 0xED
.byte 0x4B # K
.byte 0x54 # T

lwc2     $31, 0x66C5($sp)
lwu      $s1, 0x10D3($a1)
ldr      $t6, -0x204B($zero)
lwc1     $f30, 0x4DBE($s2)
daddiu   $t1, $s1, 0x6BD9
lwu      $s5, -0x2C64($v1)
cop0     0x13D642D
bne      $gp, $t4, 0xFFFF9EF0
lh       $ra, 0x1819($s1)
sdl      $fp, -0x6474($t8)
jal      0x78C0050
ori      $v0, $s2, 0xC634
blez     $gp, 0xFFFEA9D4
swl      $t8, -0x2CD4($s2)
sltiu    $a1, $k0, 0x685
sdc1     $f15, 0x5964($at)
sw       $s0, -0x19A6($a1)
sltiu    $t6, $a3, -0x66AD
lb       $t7, -0x4F6($t3)
sd       $fp, 0x4B02($a1)
```

Также важно помнить, что хитрым образом написанный код для распаковки и дешифровки (включая самомодифицирующийся), также может выглядеть как случайный шум, тем не менее, он исполняется корректно.

5.11.2. Корректно дизассемблированный код

Каждая ISA имеет десяток самых используемых инструкций, остальные используются куда реже.

Интересно знать тот факт, что в x86, инструкции вызовов функций (PUSH/CALL/ADD) и MOV это наиболее часто исполняющиеся инструкции в коде почти во всем ПО что мы используем. Другими словами, CPU очень занят передачей информации между уровнями абстракции, или, можно сказать, очень занят переключением между этими уровнями. Вне зависимости от ISA. Это цена расслоения программ на разные уровни абстракций (чтобы человеку было легче с ними управляться).

5.12. Текстовые строки прямо посреди сжатых данных

Вы можете скачать ядра Linux и найти английские слова прямо посреди сжатых данных:

```
% wget https://www.kernel.org/pub/linux/kernel/v4.x/linux-4.10.2.tar.gz

% xxd -g 1 -seek 0x515c550 -l 0x30 linux-4.10.2.tar.gz

0515c550: c5 59 43 cf 41 27 85 54 35 4a 57 90 73 89 b7 6a  .YC.A'.T5JW.s..j
0515c560: 15 af 03 db 20 df 6a 51 f9 56 49 52 55 53 3d da  .... .jQ.VIRUS=.
0515c570: 0e b9 29 24 cc 6a 38 e2 78 66 09 33 72 aa 88 df  ..)$j8.xf.3r...
```

```
% wget https://cdn.kernel.org/pub/linux/kernel/v2.3/linux-2.3.3.tar.bz2

% xxd -g 1 -seek 0xa93086 -l 0x30 linux-2.3.3.tar.bz2

00a93086: 4d 45 54 41 4c cd 44 45 2d 2c 41 41 54 94 8b a1  METAL.DE-,AAT...
00a93096: 5d 2b d8 d0 bd d8 06 91 74 ab 41 a0 0a 8a 94 68  ]+.....t.A....h
00a930a6: 66 56 86 81 68 0d 0e 25 6b b6 80 a4 28 1a 00 a4  fV..h..%k...(...
```

Один из патчей к ядру Linux в сжатой форме имеет само слово “Linux”:

```
% wget https://cdn.kernel.org/pub/linux/kernel/v4.x/testing/patch-4.6-rc4.gz

% xxd -g 1 -seek 0x4d03f -l 0x30 patch-4.6-rc4.gz

0004d03f: c7 40 24 bd ae ef ee 03 2c 95 dc 65 eb 31 d3 f1  .@$.....,..e.1..
0004d04f: 4c 69 6e 75 78 f2 f3 70 3c 3a bd 3e bd f8 59 7e  Linux..p<:.>..Y~
0004d05f: cd 76 55 74 2b cb d5 af 7a 35 56 d7 5e 07 5a 67  .vUt+...z5V.^Zg
```

Другие английские слова, которые я нашел в других сжатых исходных кодах ядра Linux:

```
linux-4.6.2.tar.gz: [maybe] at 0x68e78ec
linux-4.10.14.tar.xz: [OCEAN] at 0x6bf0a8
linux-4.7.8.tar.gz: [FUNNY] at 0x29e6e20
linux-4.6.4.tar.gz: [DRINK] at 0x68dc314
linux-2.6.11.8.tar.bz2: [LUCKY] at 0x1ab5be7
linux-3.0.68.tar.gz: [BOOST] at 0x11238c7
linux-3.0.16.tar.bz2: [APPLE] at 0x34c091
linux-3.0.26.tar.xz: [magic] at 0x296f7d9
linux-3.11.8.tar.bz2: [TRUTH] at 0xf635ba
linux-3.10.11.tar.bz2: [logic] at 0x4a7f794
```

В Луркморе есть неплохая иллюстрация апофении и парейдолии (способность человеческого разума видеть лица в облаках, итд). Как они пишут в статье об электронном голосовом феномене³³, вы можете открыть любой достаточно большой файл в шестнадцатеричном редакторе и найти одно хорошо известное русское матерное слово из трех букв, и вы найдете их много: но это ничего не значит, просто совпадение.

И мне было интересно посчитать, насколько большой должен быть сжатый файл, чтобы в нем можно было найти все возможные слова из трех букв, четырех, итд? В моих наивных выкладках я дошел до этого: вероятность встретить первый байт посреди потока со сжатыми данными с максимальной энтропией это $\frac{1}{256}$, вероятность второго это тоже $\frac{1}{256}$, и вероятность определенной пары байт это $\frac{1}{256 \cdot 256} = \frac{1}{256^2}$. Вероятность определенной тройки это $\frac{1}{256^3}$. Если у файла максимальная энтропия (что почти недостижимо, но ...), и мы живем в идеальном мире, вам нужен файл размером всего $256^3 = 16777216$, а это 16-17MB. Можете проверить: возьмите любой сжатый файл, и используя *rafind2* найдите любое слово из трех букв (не только это русское матерное).

Мне понадобилось $\approx 8-9$ GB скачанных фильмов и сериалов чтобы найти там слово “beer” (в том же регистре). Вероятно, эти фильмы не так хорошо сжаты? Это также справедливо и для хорошо известного четырехбуквенного английского матерного слова.

Мой подход наивный, так что я погуглил математически обоснованный, и нашел этот вопрос: “Time until a consecutive sequence of ones in a random bit sequence”³⁴. Ответ это: $(p^{-n}-1)/(1-p)$, где p это

³³<http://archive.is/gYnFL>

³⁴<http://math.stackexchange.com/questions/27989/time-until-a-consecutive-sequence-of-ones-in-a-random-bit-sequence/27991#27991>

5.13. ПРОЧЕЕ

вероятность каждого события и n это количество последовательных событий. Используйте $\frac{1}{256}$ и 3 и получите почти то же что получил и я в своих наивных выкладках.

Так что любое трехбуквенное слово можно найти в сжатом файле (с идеальной энтропией) длиной $256^3 \approx 17MB$, любое четырехбуквенное слово — $256^4 = 4.7GB$ (размер DVD). Любое пятибуквенное слово — $256^5 \approx 1TB$.

Ради фрагмента текста, который вы сейчас читаете, я скачал весь сайт kernel.org (надеюсь, сисадмины простят меня), и он содержит $\approx 430GB$ сжатых исходных кодов разных версий ядер Linux. Там есть достаточно сжатых данных, чтобы содержать все эти слова, хотя, я немного сжульничал: я искал строки в обоих регистрах, таким образом, необходимый набор сжатых данных стал в половину меньше.

На самом деле, это очень интересная тема для размышлений: 1TB сжатых данных с максимальной энтропией содержит все возможные цепочки из пяти байт, но данные кодируются не в самих цепочках, а в их последовательности (вне зависимости от алгоритма сжатия, итд).

Теперь информация для игроков: нужно бросить кость ≈ 42 раза, чтобы получить один раз пару из шести, но никто вам не скажет, когда именно это случится. Я не помню, сколько раз подбрасывалась моента в фильме “Розенкранц и Гильденстерн мертвы”, но её нужно подбросить ≈ 2048 раз, и в какой-то момент, вы увидите 10 решек подряд, а в другой момент, 10 орлов подряд. Опять же, вам никто не скажет, когда именно это случится.

Сжатые данные также можно считать потоком случайной информации, так что мы можем использовать ту же математику, что и для теории вероятности, итд.

Если вам сгодятся строки с символами в смешанном регистре, как “bEeR”, вероятности и объемы сжатых данных намного меньше: $128^3 = 2MB$ для всех слов из трех букв в смешанном регистре, $128^4 = 268MB$ для всех слов из 4-х букв, $128^5 = 34GB$ для всех слов из 5-и букв, итд.

Мораль сей истории: когда вы ищете что-то и находите это прямо посреди большого сжатого блока, это может быть просто совпадение. В философском смысле, это selection/confirmation bias (систематическая ошибка отбора/склонность к подтверждению своей точки зрения): вы находите то, что ищете в “Вавилонской библиотеке”³⁵.

5.13. Прочее

5.13.1. Общая идея

Нужно стараться как можно чаще ставить себя на место программиста и задавать себе вопрос, как бы вы сделали ту или иную вещь в этом случае и в этой программе.

5.13.2. Порядок функций в бинарном коде

Все функции расположенные в одном .c или .cpp файле компилируются в соответствующий объектный (.o) файл. Линкер впоследствии складывает все нужные объектные файлы вместе, не меняя порядок ф-ций в них. Как следствие, если вы видите в коде две или более идущих подряд ф-ций, то это означает, что и в исходном коде они были расположены в одном и том же файле (если только вы не на границе двух объектных файлов, конечно). Это может означать, что эти ф-ции имеют что-то общее между собой, что они из одного слоя API, из одной библиотеки, итд.

5.13.3. Крохотные функции

Крохотные ф-ции, такие как пустые ф-ции (1.3 (стр. 5)) или ф-ции возвращающие только “true” (1) или “false” (0) (1.4 (стр. 7)) очень часто встречаются, и почти все современные компиляторы, как правило, помещают только одну такую ф-цию в исполняемый код, даже если в исходном их было много одинаковых. Так что если вы видите ф-цию состоящую только из `mov eax, 1 / ret`, которая может вызываться из разных мест, которые, судя по всему, друг с другом никак не связаны, это может быть результат подобной оптимизации.

³⁵Рассказ Хорхе Луиса Борхеса

5.13.4. Си++

[RTTI \(3.18.1 \(стр. 549\)\)](#)-информация также может быть полезна для идентификации классов в Си++.

Глава 6

Специфичное для ОС

6.1. Способы передачи аргументов при вызове функций

6.1.1. cdecl

Этот способ передачи аргументов через стек чаще всего используется в языках Си/Си++.

Вызывающая функция заталкивает в стек аргументы в обратном порядке: сначала последний аргумент в стек, затем предпоследний, и в самом конце — первый аргумент. Вызывающая функция должна также затем вернуть [указатель стека](#) в нормальное состояние, после возврата вызываемой функции.

Листинг 6.1: cdecl

```
push arg3
push arg2
push arg1
call function
add esp, 12 ; returns ESP
```

6.1.2. stdcall

Это почти то же что и *cdecl*, за исключением того, что вызываемая функция сама возвращает ESP в нормальное состояние, выполнив инструкцию `RET x` вместо `RET`, где $x = \text{количество_аргументов} * \text{sizeof(int)}$ ¹. Вызывающая функция не будет корректировать [указатель стека](#), там нет инструкции `add esp, x`.

Листинг 6.2: stdcall

```
push arg3
push arg2
push arg1
call function

function:
... do something ...
ret 12
```

Этот способ используется почти везде в системных библиотеках win32, но не в win64 (о win64 смотрите ниже).

Например, мы можем взять функцию из [1.86](#) (стр. 98) и изменить её немного добавив модификатор `__stdcall`:

```
int __stdcall f2 (int a, int b, int c)
{
    return a*b+c;
};
```

¹Размер переменной типа *int* --- 4 в x86-системах и 8 в x64-системах

6.1. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ АРГУМЕНТОВ ПРИ ВЫЗОВЕ ФУНКЦИЙ

Он будет скомпилирован почти так же как и 1.87 (стр. 98), но вы увидите RET 12 вместо RET. SP не будет корректироваться в [вызывающей функции](#).

Как следствие, количество аргументов функции легко узнать из инструкции RETN n просто разделите n на 4.

Листинг 6.3: MSVC 2010

```
_a$ = 8      ; size = 4
_b$ = 12     ; size = 4
_c$ = 16     ; size = 4
_f2@12 PROC
    push     ebp
    mov      ebp, esp
    mov      eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    imul     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    add      eax, DWORD PTR _c$[ebp]
    pop      ebp
    ret      12
_f2@12 ENDP

; ...
    push     3
    push     2
    push     1
    call     _f2@12
    push     eax
    push     OFFSET $SG81369
    call     _printf
    add      esp, 8
```

Функции с переменным количеством аргументов

Функции вроде `printf()`, должно быть, единственный случай функций в Си/Си++ с переменным количеством аргументов, но с их помощью можно легко проследить очень важную разницу между *cdecl* и *stdcall*. Начнем с того, что компилятор знает сколько аргументов было у `printf()`.

Однако, вызываемая функция `printf()`, которая уже давно скомпилирована и находится в системной библиотеке MSVCRT.DLL (если говорить о Windows), не знает сколько аргументов ей передали, хотя может установить их количество по строке формата.

Таким образом, если бы `printf()` была *stdcall*-функцией и возвращала [указатель стека](#) в первоначальное состояние подсчитав количество аргументов в строке формата, это была бы потенциально опасная ситуация, когда одна опечатка программиста могла бы вызывать неожиданные падения программы. Таким образом, для таких функций *stdcall* явно не подходит, а подходит *cdecl*.

6.1.3. fastcall

Это общее название для передачи некоторых аргументов через регистры, а всех остальных — через стек. На более старых процессорах, это работало потенциально быстрее чем *cdecl/stdcall* (ведь стек в памяти использовался меньше). Впрочем, на современных (намного более сложных) CPU, существенного выигрыша может и не быть.

Это не стандартизированный способ, поэтому разные компиляторы делают это по-своему. Разумеется, если у вас есть, скажем, две DLL, одна использует другую, и обе они собраны с *fastcall* но разными компиляторами, очень вероятно, будут проблемы.

MSVC и GCC передает первый и второй аргумент через ECX и EDX а остальные аргументы через стек.

[Указатель стека](#) должен быть возвращен в первоначальное состояние вызываемой функцией, как в случае *stdcall*.

Листинг 6.4: fastcall

```
push arg3
mov edx, arg2
mov ecx, arg1
```

6.1. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ АРГУМЕНТОВ ПРИ ВЫЗОВЕ ФУНКЦИЙ

```
call function

function:
.. do something ..
ret 4
```

Например, мы можем взять функцию из 1.86 (стр. 98) и изменить её немного добавив модификатор `__fastcall`:

```
int __fastcall f3 (int a, int b, int c)
{
    return a*b+c;
};
```

Вот как он будет скомпилирован:

Листинг 6.5: Оптимизирующий MSVC 2010 /Ob0

```
_c$ = 8          ; size = 4
@f3@12 PROC
; _a$ = ecx
; _b$ = edx
    mov     eax, ecx
    imul    eax, edx
    add     eax, DWORD PTR _c$[esp-4]
    ret     4
@f3@12 ENDP

; ...

    mov     edx, 2
    push    3
    lea     ecx, DWORD PTR [edx-1]
    call    @f3@12
    push    eax
    push    OFFSET $SG81390
    call    _printf
    add     esp, 8
```

Видно, что **вызываемая функция** сама возвращает **SP** при помощи инструкции `RETN` с операндом. Так что и здесь можно легко вычислять количество аргументов.

GCC regparm

Это в некотором роде, развитие *fastcall*². Опцией `-mregparm=x` можно указывать, сколько аргументов компилятор будет передавать через регистры. Максимально 3. В этом случае будут задействованы регистры `EAX`, `EDX` и `ECX`.

Разумеется, если аргументов у функции меньше трех, то будет задействована только часть регистров.

Вызывающая функция возвращает **указатель стека** в первоначальное состояние.

Для примера, см. (1.22.1 (стр. 297)).

Watcom/OpenWatcom

Здесь это называется «register calling convention». Первые 4 аргумента передаются через регистры `EAX`, `EDX`, `EBX` and `ECX`. Все остальные — через стек. Эти функции имеют символ подчеркивания, добавленный к концу имени функции, для отличия их от тех, которые имеют другой способ передачи аргументов.

²<http://go.yurichev.com/17040>

6.1.4. thiscall

В Си++, это передача в функцию-метод указателя *this* на объект.

В MSVC указатель *this* обычно передается в регистре ECX.

В GCC указатель *this* обычно передается как самый первый аргумент. Таким образом, в коде на ассемблере будет видно: у всех функций-методов на один аргумент больше, чем в исходном коде.

Для примера, см. (3.18.1 (стр. 534)).

6.1.5. x86-64

Windows x64

В win64 метод передачи всех параметров немного похож на *fastcall*. Первые 4 аргумента записываются в регистры RCX, RDX, R8, R9, а остальные — в стек. Вызывающая функция также должна подготовить место из 32 байт или для четырех 64-битных значений, чтобы вызываемая функция могла сохранить там первые 4 аргумента. Короткие функции могут использовать переменные прямо из регистров, но большие могут сохранять их значения на будущее.

Вызывающая функция должна вернуть [указатель стека](#) в первоначальное состояние.

Это же соглашение используется и в системных библиотеках Windows x86-64 (вместо *stdcall* в win32).

Пример:

```
#include <stdio.h>

void f1(int a, int b, int c, int d, int e, int f, int g)
{
    printf ("%d %d %d %d %d %d %d\n", a, b, c, d, e, f, g);
};

int main()
{
    f1(1,2,3,4,5,6,7);
};
```

Листинг 6.6: MSVC 2012 /Ob

```
$SG2937 DB      '%d %d %d %d %d %d %d', 0aH, 00H

main          PROC
              sub     rsp, 72

              mov     DWORD PTR [rsp+48], 7
              mov     DWORD PTR [rsp+40], 6
              mov     DWORD PTR [rsp+32], 5
              mov     r9d, 4
              mov     r8d, 3
              mov     edx, 2
              mov     ecx, 1
              call    f1

              xor     eax, eax
              add     rsp, 72
              ret     0
main          ENDP

a$ = 80
b$ = 88
c$ = 96
d$ = 104
e$ = 112
f$ = 120
g$ = 128
f1          PROC
```

6.1. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ АРГУМЕНТОВ ПРИ ВЫЗОВЕ ФУНКЦИЙ

```
$LN3:
    mov     DWORD PTR [rsp+32], r9d
    mov     DWORD PTR [rsp+24], r8d
    mov     DWORD PTR [rsp+16], edx
    mov     DWORD PTR [rsp+8], ecx
    sub     rsp, 72

    mov     eax, DWORD PTR g$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+56], eax
    mov     eax, DWORD PTR f$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+48], eax
    mov     eax, DWORD PTR e$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+40], eax
    mov     eax, DWORD PTR d$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+32], eax
    mov     r9d, DWORD PTR c$[rsp]
    mov     r8d, DWORD PTR b$[rsp]
    mov     edx, DWORD PTR a$[rsp]
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2937
    call    printf

    add     rsp, 72
    ret     0
f1      ENDP
```

Здесь мы легко видим, как 7 аргументов передаются: 4 через регистры и остальные 3 через стек. Код пролога функции f1() сохраняет аргументы в «scratch space» — место в стеке предназначенное именно для этого. Это делается потому что компилятор может быть не уверен, достаточно ли ему будет остальных регистров для работы исключая эти 4, которые иначе будут заняты аргументами до конца исполнения функции. Выделение «scratch space» в стеке лежит на ответственности вызывающей функции.

Листинг 6.7: Оптимизирующий MSVC 2012 /0b

```
$SG2777 DB      '%d %d %d %d %d %d %d', 0aH, 00H

a$ = 80
b$ = 88
c$ = 96
d$ = 104
e$ = 112
f$ = 120
g$ = 128
f1      PROC
$LN3:
    sub     rsp, 72

    mov     eax, DWORD PTR g$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+56], eax
    mov     eax, DWORD PTR f$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+48], eax
    mov     eax, DWORD PTR e$[rsp]
    mov     DWORD PTR [rsp+40], eax
    mov     DWORD PTR [rsp+32], r9d
    mov     r9d, r8d
    mov     r8d, edx
    mov     edx, ecx
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2777
    call    printf

    add     rsp, 72
    ret     0
f1      ENDP

main    PROC
    sub     rsp, 72

    mov     edx, 2
    mov     DWORD PTR [rsp+48], 7
    mov     DWORD PTR [rsp+40], 6
```

6.1. СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ АРГУМЕНТОВ ПРИ ВЫЗОВЕ ФУНКЦИЙ

```
lea    r9d, QWORD PTR [rdx+2]
lea    r8d, QWORD PTR [rdx+1]
lea    ecx, QWORD PTR [rdx-1]
mov     DWORD PTR [rsp+32], 5
call    f1

xor     eax, eax
add     rsp, 72
ret     0
main    ENDP
```

Если компилировать этот пример с оптимизацией, то выйдет почти то же самое, только «scratch space» не используется, потому что незначим.

Обратите также внимание на то как MSVC 2012 оптимизирует примитивную загрузку значений в регистры используя LEA ([1.6](#) (стр. [1003](#))). MOV здесь был бы на 1 байт длиннее (5 вместо 4).

Еще один пример подобного: [8.1.1](#) (стр. [775](#)).

Windows x64: Передача *this* (Си/Си++)

Указатель *this* передается через RCX, первый аргумент метода через RDX, итд. Для примера, см. также: [3.18.1](#) (стр. [536](#)).

Linux x64

Метод передачи аргументов в Linux для x86-64 почти такой же, как и в Windows, но 6 регистров используется вместо 4 (RDI, RSI, RDX, RCX, R8, R9), и здесь нет «scratch space», но [callee](#) может сохранять значения регистров в стеке, если ему это нужно.

Листинг 6.8: Оптимизирующий GCC 4.7.3

```
.LC0:
.string "%d %d %d %d %d %d %d\n"
f1:
    sub     rsp, 40
    mov     eax, DWORD PTR [rsp+48]
    mov     DWORD PTR [rsp+8], r9d
    mov     r9d, ecx
    mov     DWORD PTR [rsp], r8d
    mov     ecx, esi
    mov     r8d, edx
    mov     esi, OFFSET FLAT:.LC0
    mov     edx, edi
    mov     edi, 1
    mov     DWORD PTR [rsp+16], eax
    xor     eax, eax
    call    __printf_chk
    add     rsp, 40
    ret
main:
    sub     rsp, 24
    mov     r9d, 6
    mov     r8d, 5
    mov     DWORD PTR [rsp], 7
    mov     ecx, 4
    mov     edx, 3
    mov     esi, 2
    mov     edi, 1
    call    f1
    add     rsp, 24
    ret
```

N.B.: здесь значения записываются в 32-битные части регистров (например EAX) а не в весь 64-битный регистр (RAX). Это связано с тем что в x86-64, запись в младшую 32-битную часть 64-битного регистра автоматически обнуляет старшие 32 бита. Должно быть, это так решили в AMD для упрощения портирования кода под x86-64.

6.1.6. Возвращение переменных типа *float*, *double*

Во всех соглашениях кроме Win64, переменная типа *float* или *double* возвращается через регистр FPU ST(0).

В Win64 переменные типа *float* и *double* возвращаются в младших 16-и или 32-х битах регистра XMM0.

6.1.7. Модификация аргументов

Иногда программисты на Си/Си++ (и не только этих ЯП) задаются вопросом, что может случиться, если модифицировать аргументы?

Ответ прост: аргументы хранятся в стеке, именно там и будет происходить модификация.

А вызывающие функции не используют их после вызова функции (автор этих строк никогда не видел в своей практике обратного случая).

```
#include <stdio.h>

void f(int a, int b)
{
    a=a+b;
    printf ("%d\n", a);
};
```

Листинг 6.9: MSVC 2012

```
_a$ = 8 ; size = 4
_b$ = 12 ; size = 4
_f PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _a$[ebp]
    add     eax, DWORD PTR _b$[ebp]
    mov     DWORD PTR _a$[ebp], eax
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[ebp]
    push    ecx
    push    OFFSET $SG2938 ; '%d', 0aH
    call    _printf
    add     esp, 8
    pop     ebp
    ret     0
_f ENDP
```

Следовательно, модифицировать аргументы функции можно запросто. Разумеется, если это не *references* в Си++ (3.18.3 (стр. 550)), и если вы не модифицируете данные по указателю, то эффект не будет распространяться за пределами текущей функции.

Теоретически, после возврата из *callee*, функция-*caller* могла бы получить модифицированный аргумент и использовать его как-то. Может быть, если бы она была написана на языке ассемблера.

Например, такой код генерирует обычный компилятор Си/Си++:

```
push    456 ; will be b
push    123 ; will be a
call    f ; f() modifies its first argument
add     esp, 2*4
```

Мы можем переписать так:

```
push    456 ; will be b
push    123 ; will be a
call    f ; f() modifies its first argument
pop     eax
add     esp, 4
; EAX=1st argument of f() modified in f()
```

Трудно представить, кому может это понадобиться, но на практике это возможно. Так или иначе, стандарты языков Си/Си++ не предлагают никакого способа это сделать.

6.1.8. Указатель на аргумент функции

...и даже более того, можно взять указатель на аргумент функции и передать его в другую функцию:

```
#include <stdio.h>

// located in some other file
void modify_a (int *a);

void f (int a)
{
    modify_a (&a);
    printf ("%d\n", a);
};
```

Трудно понять, как это работает, пока мы не посмотрим на код:

Листинг 6.10: Оптимизирующий MSVC 2010

```
$SG2796 DB      '%d', 0aH, 00H

_a$ = 8
_f      PROC
        lea     eax, DWORD PTR _a$[esp-4] ; just get the address of value in local stack
        push    eax                       ; and pass it to modify_a()
        call    _modify_a
        mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp]   ; reload it from the local stack
        push    ecx                       ; and pass it to printf()
        push    OFFSET $SG2796 ; '%d'
        call    _printf
        add     esp, 12
        ret     0
_f      ENDP
```

Адрес места в стеке где была передана *a* просто передается в другую функцию. Она модифицирует переменную по этому адресу, и затем `printf()` выведет модифицированное значение.

Наблюдательный читатель может спросить, а что насчет тех соглашений о вызовах, где аргументы функции передаются в регистрах?

Это та ситуация где используется *Shadow Space*.

Так что входящее значение копируется из регистра в *Shadow Space* в локальном стеке и затем этот адрес передается в другую функцию:

Листинг 6.11: Оптимизирующий MSVC 2012 x64

```
$SG2994 DB      '%d', 0aH, 00H

a$ = 48
f      PROC
        mov     DWORD PTR [rsp+8], ecx    ; save input value in Shadow Space
        sub     rsp, 40
        lea     rcx, QWORD PTR a$[rsp]    ; get address of value and pass it to modify_a()
        call    modify_a
        mov     edx, DWORD PTR a$[rsp]    ; reload value from Shadow Space and pass it to printf
        ↪ ( )
        lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG2994 ; '%d'
        call    printf
        add     rsp, 40
        ret     0
f      ENDP
```

GCC также записывает входное значение в локальный стек:

Листинг 6.12: Оптимизирующий GCC 4.9.1 x64

```
.LC0:
        .string "%d\n"
f:
        sub     rsp, 24
```

6.2. THREAD LOCAL STORAGE

```
    mov     DWORD PTR [rsp+12], edi ; store input value to the local stack
    lea     rdi, [rsp+12]           ; take an address of the value and pass it to modify_a
↳ ( )
    call    modify_a
    mov     edx, DWORD PTR [rsp+12] ; reload value from the local stack and pass it to
↳ printf()
    mov     esi, OFFSET FLAT:.LC0   ; '%d'
    mov     edi, 1
    xor     eax, eax
    call    __printf_chk
    add     rsp, 24
    ret
```

GCC для ARM64 делает то же самое, но это пространство здесь называется *Register Save Area*:

Листинг 6.13: Оптимизирующий GCC 4.9.1 ARM64

```
f:
    stp     x29, x30, [sp, -32]!
    add     x29, sp, 0              ; setup FP
    add     x1, x29, 32             ; calculate address of variable in Register Save Area
    str     w0, [x1, -4]!           ; store input value there
    mov     x0, x1                  ; pass address of variable to the modify_a()
    bl      modify_a
    ldr     w1, [x29, 28]           ; load value from the variable and pass it to printf()
    adrp    x0, .LC0 ; '%d'
    add     x0, x0, :lo12:.LC0
    bl      printf                  ; call printf()
    ldp     x29, x30, [sp], 32
    ret
.LC0:
    .string "%d\n"
```

Кстати, похожее использование *Shadow Space* разбирается здесь: [3.14.1](#) (стр. [512](#)).

6.2. Thread Local Storage

Это область данных, отдельная для каждого треда. Каждый тред может хранить там то, что ему нужно. Один из известных примеров, это стандартная глобальная переменная в Си *errno*. Несколько тредов одновременно могут вызывать функции возвращающие код ошибки в *errno*, поэтому глобальная переменная здесь не будет работать корректно, для мультитредовых программ *errno* нужно хранить в в [TLS](#).

В C++11 ввели модификатор *thread_local*, показывающий, что каждый тред будет иметь свою версию этой переменной, и её можно инициализировать, и она расположена в [TLS](#)³:

Листинг 6.14: C++11

```
#include <iostream>
#include <thread>

thread_local int tmp=3;

int main()
{
    std::cout << tmp << std::endl;
};
```

Компилируется в MinGW GCC 4.8.1, но не в MSVC 2012.

Если говорить о PE-файлах, то в исполняемом файле значение *tmp* будет размещено именно в секции отведенной [TLS](#).

³ В C11 также есть поддержка тредов, хотя и опциональная

6.2.1. Вернемся к линейному конгруэнтному генератору

Рассмотренный ранее 1.23 (стр. 329) генератор псевдослучайных чисел имеет недостаток: он не пригоден для многопоточной среды, потому что переменная его внутреннего состояния может быть прочитана и/или модифицирована в разных потоках одновременно.

Win32**Неинициализированные данные в TLS**

Одно из решений — это добавить модификатор `__declspec(thread)` к глобальной переменной, и теперь она будет выделена в TLS (строка 9):

```

1 #include <stdint.h>
2 #include <windows.h>
3 #include <winnt.h>
4
5 // from the Numerical Recipes book:
6 #define RNG_a 1664525
7 #define RNG_c 1013904223
8
9 __declspec( thread ) uint32_t rand_state;
10
11 void my_srand (uint32_t init)
12 {
13     rand_state=init;
14 }
15
16 int my_rand ()
17 {
18     rand_state=rand_state*RNG_a;
19     rand_state=rand_state+RNG_c;
20     return rand_state & 0x7fff;
21 }
22
23 int main()
24 {
25     my_srand(0x12345678);
26     printf ("%d\n", my_rand());
27 };

```

Hiew показывает что в исполняемом файле теперь есть новая PE-секция: `.tls`.

Листинг 6.15: Оптимизирующий MSVC 2013 x86

```

_TLS    SEGMENT
_rand_state DD    01H DUP (?)
_TLS    ENDS

_DATA    SEGMENT
$SG84851 DB    '%d', 0aH, 00H
_DATA    ENDS
_TEXT    SEGMENT

_init$ = 8        ; size = 4
_my_srand PROC
; FS:0=address of TIB
    mov     eax, DWORD PTR fs:__tls_array ; displayed in IDA as FS:2Ch
; EAX=address of TLS of process
    mov     ecx, DWORD PTR __tls_index
    mov     ecx, DWORD PTR [eax+ecx*4]
; ECX=current TLS segment
    mov     eax, DWORD PTR _init$[esp-4]
    mov     DWORD PTR _rand_state[ecx], eax
    ret     0
_my_srand ENDP

_my_rand PROC

```

6.2. THREAD LOCAL STORAGE

```
; FS:0=address of TIB
    mov     eax, DWORD PTR fs:__tls_array ; displayed in IDA as FS:2Ch
; EAX=address of TLS of process
    mov     ecx, DWORD PTR __tls_index
    mov     ecx, DWORD PTR [eax+ecx*4]
; ECX=current TLS segment
    imul    eax, DWORD PTR _rand_state[ecx], 1664525
    add     eax, 1013904223 ; 3c6ef35fH
    mov     DWORD PTR _rand_state[ecx], eax
    and     eax, 32767 ; 00007fffH
    ret     0
_my_rand ENDP

_TEXT    ENDS
```

rand_state теперь в TLS-сегменте и у каждого потока есть своя версия этой переменной.

Вот как к ней обращаться: загрузить адрес TIB из FS:2Ch, затем прибавить дополнительный индекс (если нужно), затем вычислить адрес TLS-сегмента.

Затем можно обращаться к переменной rand_state через регистр ECX, который указывает на свою область в каждом потоке.

Селектор FS: знаком любому reverse engineer-у, он всегда указывает на TIB, чтобы всегда можно было загружать данные специфичные для текущего потока.

В Win64 используется селектор GS: и адрес TLS теперь 0x58:

Листинг 6.16: Оптимизирующий MSVC 2013 x64

```
_TLS    SEGMENT
rand_state DD    01H DUP (?)
_TLS    ENDS

_DATA   SEGMENT
$SG85451 DB    '%d', 0aH, 00H
_DATA   ENDS

_TEXT   SEGMENT

init$ = 8
my_srand PROC
    mov     edx, DWORD PTR _tls_index
    mov     rax, QWORD PTR gs:88 ; 58h
    mov     r8d, OFFSET FLAT:rand_state
    mov     rax, QWORD PTR [rax+rdx*8]
    mov     DWORD PTR [r8+rax], ecx
    ret     0
my_srand ENDP

my_rand PROC
    mov     rax, QWORD PTR gs:88 ; 58h
    mov     ecx, DWORD PTR _tls_index
    mov     edx, OFFSET FLAT:rand_state
    mov     rcx, QWORD PTR [rax+rcx*8]
    imul    eax, DWORD PTR [rcx+rdx], 1664525 ; 0019660dH
    add     eax, 1013904223 ; 3c6ef35fH
    mov     DWORD PTR [rcx+rdx], eax
    and     eax, 32767 ; 00007fffH
    ret     0
my_rand ENDP

_TEXT   ENDS
```

Инициализированные данные в TLS

Скажем, мы хотим, чтобы в переменной rand_state в самом начале было какое-то значение, и если программист забудет инициализировать генератор, то rand_state все же будет инициализирована какой-то константой (строка 9):

6.2. THREAD LOCAL STORAGE

```
1 #include <stdint.h>
2 #include <windows.h>
3 #include <winnt.h>
4
5 // from the Numerical Recipes book:
6 #define RNG_a 1664525
7 #define RNG_c 1013904223
8
9 __declspec( thread ) uint32_t rand_state=1234;
10
11 void my_srand (uint32_t init)
12 {
13     rand_state=init;
14 }
15
16 int my_rand ()
17 {
18     rand_state=rand_state*RNG_a;
19     rand_state=rand_state+RNG_c;
20     return rand_state & 0x7fff;
21 }
22
23 int main()
24 {
25     printf ("%d\n", my_rand());
26 };
```

Код ничем не отличается от того, что мы уже видели, но вот что мы видим в IDA:

```
.tls:00404000 ; Segment type: Pure data
.tls:00404000 ; Segment permissions: Read/Write
.tls:00404000 _tls          segment para public 'DATA' use32
.tls:00404000              assume cs:_tls
.tls:00404000              ;org 404000h
.tls:00404000 TlsStart      db      0          ; DATA XREF: .rdata:TlsDirectory
.tls:00404001              db      0
.tls:00404002              db      0
.tls:00404003              db      0
.tls:00404004              dd 1234
.tls:00404008 TlsEnd        db      0          ; DATA XREF: .rdata:TlsEnd_ptr
...
```

Там 1234 и теперь, во время запуска каждого нового потока, новый TLS будет выделен для нового потока, и все эти данные, включая 1234, будут туда скопированы.

Вот типичный сценарий:

- Запустился поток А. TLS создан для него, 1234 скопировалось в rand_state.
- Функция my_rand() была вызвана несколько раз в потоке А. rand_state теперь содержит что-то неравное 1234.
- Запустился поток Б. TLS создан для него, 1234 скопировалось в rand_state, а в это же время, поток А имеет какое-то другое значение в этой переменной.

TLS-коллбэки

Но что если переменные в TLS должны быть установлены в значения, которые должны быть подготовлены каким-то необычным образом?

Скажем, у нас есть следующая задача: программист может забыть вызвать функцию my_srand() для инициализации ГПСЧ, но генератор должен быть инициализирован на старте чем-то по-настоящему случайным а не 1234.

Вот случай где можно применить TLS-коллбэки.

Нижеследующий код не очень портативный из-за хака, но тем не менее, вы поймете идею.

6.2. THREAD LOCAL STORAGE

Мы здесь добавляем функцию (`tls_callback()`), которая вызывается *перед* стартом процесса и/или потока.

Функция будет инициализировать ГПСЧ значением возвращенным функцией `GetTickCount()`.

```
#include <stdint.h>
#include <windows.h>
#include <winnt.h>

// from the Numerical Recipes book:
#define RNG_a 1664525
#define RNG_c 1013904223

__declspec( thread ) uint32_t rand_state;

void my_srand (uint32_t init)
{
    rand_state=init;
}

void NTAPI tls_callback(PVOID a, DWORD dwReason, PVOID b)
{
    my_srand (GetTickCount());
}

#pragma data_seg(".CRT$XLB")
PIMAGE_TLS_CALLBACK p_thread_callback = tls_callback;
#pragma data_seg()

int my_rand ()
{
    rand_state=rand_state*RNG_a;
    rand_state=rand_state+RNG_c;
    return rand_state & 0x7fff;
}

int main()
{
    // rand_state is already initialized at the moment (using GetTickCount())
    printf ("%d\n", my_rand());
};
```

Посмотрим в IDA:

Листинг 6.17: Оптимизирующий MSVC 2013

```
.text:00401020 TlsCallback_0  proc near          ; DATA XREF: .rdata:TlsCallbacks
.text:00401020              call     ds:GetTickCount
.text:00401026              push    eax
.text:00401027              call     my_srand
.text:0040102C              pop     ecx
.text:0040102D              retn    0Ch
.text:0040102D TlsCallback_0  endp

...

.rdata:004020C0 TlsCallbacks  dd offset TlsCallback_0 ; DATA XREF: .rdata:TlsCallbacks_ptr
...

.rdata:00402118 TlsDirectory  dd offset TlsStart
.rdata:0040211C TlsEnd_ptr    dd offset TlsEnd
.rdata:00402120 TlsIndex_ptr  dd offset TlsIndex
.rdata:00402124 TlsCallbacks_ptr dd offset TlsCallbacks
.rdata:00402128 TlsSizeOfZeroFill dd 0
.rdata:0040212C TlsCharacteristics dd 300000h
```

TLS-коллбэки иногда используются в процедурах распаковки для запутывания их работы.

Некоторые люди могут быть в неведении что какой-то код уже был исполнен прямо перед ОЕР⁴.

⁴Original Entry Point

Linux

Вот как глобальная переменная локальная для потока определяется в GCC:

```
__thread uint32_t rand_state=1234;
```

Этот модификатор не стандартный для Си/Си++, он присутствует только в GCC

⁵.

Селектор GS: также используется для доступа к TLS, но немного иначе:

Листинг 6.18: Оптимизирующий GCC 4.8.1 x86

```
.text:08048460 my_srand      proc near
.text:08048460
.text:08048460 arg_0          = dword ptr 4
.text:08048460
.text:08048460          mov     eax, [esp+arg_0]
.text:08048464          mov     gs:0FFFFFFFh, eax
.text:0804846A          retn
.text:0804846A my_srand      endp

.text:08048470 my_rand      proc near
.text:08048470          imul    eax, gs:0FFFFFFFh, 19660Dh
.text:0804847B          add     eax, 3C6EF35Fh
.text:08048480          mov     gs:0FFFFFFFh, eax
.text:08048486          and     eax, 7FFFh
.text:0804848B          retn
.text:0804848B my_rand      endp
```

Еще об этом: [Ulrich Drepper, *ELF Handling For Thread-Local Storage*, (2013)]⁶.

6.3. Системные вызовы (syscall-ы)

Как известно, все работающие процессы в ОС делятся на две категории: имеющие полный доступ ко всему «железу» («kernel space») и не имеющие («user space»).

В первой категории ядро ОС и, обычно, драйвера.

Во второй категории всё прикладное ПО.

Например, ядро Linux в *kernel space*, но Glibc в *user space*.

Это разделение очень важно для безопасности ОС: очень важно чтобы никакой процесс не мог испортить что-то в других процессах или даже в самом ядре ОС. С другой стороны, падающий драйвер или ошибка внутри ядра ОС обычно приводит к kernel panic или BSOD⁷.

Защита x86-процессора устроена так что возможно разделить всё на 4 слоя защиты (rings), но и в Linux, и в Windows, используются только 2: ring0 («kernel space») и ring3 («user space»).

Системные вызовы (syscall-ы) это точка где соединяются вместе оба эти пространства. Это, можно сказать, самое главное API предоставляемое прикладному ПО.

В Windows NT таблица сисколлов находится в SSDT⁸.

Работа через syscall-ы популярна у авторов шеллкодов и вирусов, потому что там обычно бывает трудно определить адреса нужных функций в системных библиотеках, а syscall-ами проще пользоваться, хотя и придется писать больше кода из-за более низкого уровня абстракции этого API. Также нельзя еще забывать, что номера syscall-ов могут отличаться от версии к версии OS.

⁵<http://go.yurichev.com/17062>

⁶Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17272>

⁷Blue Screen of Death

⁸System Service Dispatch Table

6.3.1. Linux

В Linux вызов syscall-а обычно происходит через `int 0x80`. В регистре EAX передается номер вызова, в остальных регистрах — параметры.

Листинг 6.19: Простой пример использования пары syscall-ов

```
section .text
global _start

_start:
    mov     edx,len ; buffer len
    mov     ecx,msg ; buffer
    mov     ebx,1   ; file descriptor. 1 is for stdout
    mov     eax,4   ; syscall number. 4 is for sys_write
    int     0x80

    mov     eax,1   ; syscall number. 1 is for sys_exit
    int     0x80

section .data

msg      db  'Hello, world!','',0xa
len      equ $ - msg
```

Компиляция:

```
nasm -f elf32 1.s
ld 1.o
```

Полный список syscall-ов в Linux: <http://go.yurichev.com/17319>.

Для перехвата и трассировки системных вызовов в Linux, можно применять `strace`(7.3 (стр. 769)).

6.3.2. Windows

Вызов происходит через `int 0x2e` либо используя специальную x86-инструкцию SYSENTER.

Полный список syscall-ов в Windows: <http://go.yurichev.com/17320>.

Смотрите также:

«Windows Syscall Shellcode» by Piotr Bania: <http://go.yurichev.com/17321>.

6.4. Linux

6.4.1. Адресно-независимый код

Во время анализа динамических библиотек (.so) в Linux, часто можно заметить такой шаблонный код:

Листинг 6.20: libc-2.17.so x86

```
.text:0012D5E3 __x86_get_pc_thunk_bx proc near          ; CODE XREF: sub_17350+3
.text:0012D5E3                                     ; sub_173CC+4 ...
.text:0012D5E3             mov     ebx, [esp+0]
.text:0012D5E6             retn
.text:0012D5E6 __x86_get_pc_thunk_bx endp

...

.text:000576C0 sub_576C0      proc near                ; CODE XREF: tmpfile+73

...

.text:000576C0             push    ebp
.text:000576C1             mov     ecx, large gs:0
```


6.4. LINUX

```
.text:000576C8      push     edi
.text:000576C9      push     esi
.text:000576CA      push     ebx
.text:000576CB      call     __x86_get_pc_thunk_bx
.text:000576D0      add      ebx, 157930h
.text:000576D6      sub      esp, 9Ch

...

.text:000579F0      lea      eax, (a__gen_tempname - 1AF000h)[ebx] ; "__gen_tempname"
.text:000579F6      mov      [esp+0ACh+var_A0], eax
.text:000579FA      lea      eax, (a__SysdepsPosix - 1AF000h)[ebx] ; "../sysdeps/
    ↵ posix/temprname.c"
.text:00057A00      mov      [esp+0ACh+var_A8], eax
.text:00057A04      lea      eax, (aInvalidKindIn_ - 1AF000h)[ebx] ; "! \"invalid ↵
    ↵ KIND in __gen_tempname\""
.text:00057A0A      mov      [esp+0ACh+var_A4], 14Ah
.text:00057A12      mov      [esp+0ACh+var_AC], eax
.text:00057A15      call     __assert_fail
```

Все указатели на строки корректируются при помощи некоторой константы из регистра EBX, которая вычисляется в начале каждой функции.

Это так называемый адресно-независимый код (**PIC**), он предназначен для исполнения будучи расположенным по любому адресу в памяти, вот почему он не содержит никаких абсолютных адресов в памяти.

PIC был очень важен в ранних компьютерных системах и важен сейчас во встраиваемых⁹, не имеющих поддержки виртуальной памяти (все процессы расположены в одном непрерывном блоке памяти). Он до сих пор используется в *NIX системах для динамических библиотек, потому что динамическая библиотека может использоваться одновременно в нескольких процессах, будучи загружена в память только один раз. Но все эти процессы могут загрузить одну и ту же динамическую библиотеку по разным адресам, вот почему динамическая библиотека должна работать корректно, не привязываясь к абсолютным адресам.

Простой эксперимент:

```
#include <stdio.h>

int global_variable=123;

int f1(int var)
{
    int rt=global_variable+var;
    printf ("returning %d\n", rt);
    return rt;
};
```

Скомпилируем в GCC 4.7.3 и посмотрим итоговый файл .so в [IDA](#):

```
gcc -fPIC -shared -O3 -o 1.so 1.c
```

Листинг 6.21: GCC 4.7.3

```
.text:00000440      public __x86_get_pc_thunk_bx
.text:00000440      __x86_get_pc_thunk_bx proc near          ; CODE XREF: _init_proc+4
.text:00000440                                          ; deregister_tm_clones+4 ...
.text:00000440      mov      ebx, [esp+0]
.text:00000443      retn
.text:00000443      __x86_get_pc_thunk_bx endp

.text:00000570      public f1
.text:00000570      f1 proc near
.text:00000570
.text:00000570      var_1C      = dword ptr -1Ch
.text:00000570      var_18      = dword ptr -18h
.text:00000570      var_14      = dword ptr -14h
.text:00000570      var_8       = dword ptr -8
```

⁹embedded

6.4. LINUX

```
.text:00000570 var_4      = dword ptr -4
.text:00000570 arg_0      = dword ptr  4
.text:00000570
.text:00000570      sub     esp, 1Ch
.text:00000573      mov     [esp+1Ch+var_8], ebx
.text:00000577      call    __x86_get_pc_thunk_bx
.text:0000057C      add     ebx, 1A84h
.text:00000582      mov     [esp+1Ch+var_4], esi
.text:00000586      mov     eax, ds:(global_variable_ptr - 2000h)[ebx]
.text:0000058C      mov     esi, [eax]
.text:0000058E      lea     eax, (aReturningD - 2000h)[ebx] ; "returning %d\n"
.text:00000594      add     esi, [esp+1Ch+arg_0]
.text:00000598      mov     [esp+1Ch+var_18], eax
.text:0000059C      mov     [esp+1Ch+var_1C], 1
.text:000005A3      mov     [esp+1Ch+var_14], esi
.text:000005A7      call    __printf_chk
.text:000005AC      mov     eax, esi
.text:000005AE      mov     ebx, [esp+1Ch+var_8]
.text:000005B2      mov     esi, [esp+1Ch+var_4]
.text:000005B6      add     esp, 1Ch
.text:000005B9      retn
.text:000005B9 f1      endp
```

Так и есть: указатели на строку «*returning %d\n*» и переменную *global_variable* корректируются при каждом исполнении функции.

Функция `__x86_get_pc_thunk_bx()` возвращает адрес точки после вызова самой себя (здесь: 0x57C) в EBX. Это очень простой способ получить значение указателя на текущую инструкцию (EIP) в произвольном месте.

Константа 0x1A84 связана с разницей между началом этой функции и так называемой *Global Offset Table Procedure Linkage Table* (GOT PLT), секцией, сразу же за *Global Offset Table* (GOT), где находится указатель на *global_variable*. IDA показывает смещения уже обработанными, чтобы их было проще понимать, но на самом деле код такой:

```
.text:00000577      call    __x86_get_pc_thunk_bx
.text:0000057C      add     ebx, 1A84h
.text:00000582      mov     [esp+1Ch+var_4], esi
.text:00000586      mov     eax, [ebx-0Ch]
.text:0000058C      mov     esi, [eax]
.text:0000058E      lea     eax, [ebx-1A30h]
```

Так что, EBX указывает на секцию GOT PLT и для вычисления указателя на *global_variable*, которая хранится в GOT, нужно вычесть 0xC. А чтобы вычислить указатель на «*returning %d\n*», нужно вычесть 0x1A30.

Кстати, вот зачем в AMD64 появилась поддержка адресации относительно RIP¹⁰, просто для упрощения PIC-кода.

Скомпилируем тот же код на Си при помощи той же версии GCC, но для x64.

IDA упростит код на выходе убирая упоминания RIP, так что будем использовать *objdump* вместо нее:

```
00000000000000720 <f1>:
720:  48 8b 05 b9 08 20 00      mov     rax,QWORD PTR [rip+0x2008b9]      # 200fe0 <_DYNAMIC+0x200fe0>
    ↪ x1d0>
727:  53                        push    rbx
728:  89 fb                     mov     ebx,edi
72a:  48 8d 35 20 00 00 00      lea     rsi,[rip+0x20]      # 751 <_fini+0x9>
731:  bf 01 00 00 00           mov     edi,0x1
736:  03 18                     add     ebx,DWORD PTR [rax]
738:  31 c0                     xor     eax,eax
73a:  89 da                     mov     edx,ebx
73c:  e8 df fe ff ff          call    620 <__printf_chk@plt>
741:  89 d8                     mov     eax,ebx
743:  5b                        pop     rbx
744:  c3                        ret
```

¹⁰указатель инструкций в AMD64

6.4. LINUX

0x2008b9 это разница между адресом инструкции по 0x720 и *global_variable*, а 0x20 это разница между инструкцией по 0x72A и строкой «*returning %d\n*».

Как видно, необходимость очень часто пересчитывать адреса делает исполнение немного медленнее (хотя это и стало лучше в x64). Так что если вы заботитесь о скорости исполнения, то, наверное, нужно задуматься о статической компоновке (static linking) [см. Agner Fog, *Optimizing software in C++* (2015)].

Windows

Такой механизм не используется в Windows DLL. Если загрузчику в Windows приходится загружать DLL в другое место, он «патчит» DLL прямо в памяти (на местах *FIXUP*-ов) чтобы скорректировать все адреса. Это приводит к тому что загруженную один раз DLL нельзя использовать одновременно в разных процессах, желающих расположить её по разным адресам — потому что каждый загруженный в память экземпляр DLL *доводится* до того чтобы работать только по этим адресам.

6.4.2. Трюк с *LD_PRELOAD* в Linux

Это позволяет загружать свои динамические библиотеки перед другими, даже перед системными, такими как *libc.so.6*.

Что в свою очередь, позволяет «подставлять» написанные нами функции перед оригинальными из системных библиотек.

Например, легко перехватывать все вызовы к *time()*, *read()*, *write()*, итд.

Попробуем узнать, сможем ли мы обмануть утилиту *uptime*. Как известно, она сообщает, как долго компьютер работает. При помощи *strace*(7.3 (стр. 769)), можно увидеть, что эту информацию утилита получает из файла */proc/uptime*:

```
$ strace uptime
...
open("/proc/uptime", O_RDONLY)      = 3
lseek(3, 0, SEEK_SET)               = 0
read(3, "416166.86 414629.38\n", 2047) = 20
...
```

Это не реальный файл на диске, это виртуальный файл, содержимое которого генерируется на лету в ядре Linux.

Там просто два числа:

```
$ cat /proc/uptime
416690.91 415152.03
```

Из Wikipedia, можно узнать ¹¹:

The first number is the total number of seconds the system has been up. The second number is how much of that time the machine has spent idle, in seconds.

Попробуем написать свою динамическую библиотеку, в которой будет *open()*, *read()*, *close()* с нужной нам функциональностью.

Во-первых, наш *open()* будет сравнивать имя открываемого файла с тем что нам нужно, и если да, то будет запоминать дескриптор открытого файла.

Во-вторых, *read()*, если будет вызываться для этого дескриптора, будет подменять вывод, а в остальных случаях, будет вызывать настоящий *read()* из *libc.so.6*. А также *close()*, будет следить, закрывается ли файл за которым мы следим.

Для того чтобы найти адреса настоящих функций в *libc.so.6*, используем *dlopen()* и *dlsym()*.

Нам это нужно, потому что нам нужно передавать управление «настоящим» функциями.

¹¹[wikipedia](#)

6.4. LINUX

С другой стороны, если бы мы перехватывали, скажем, `strcmp()`, и следили бы за всеми сравнениями строк в программе, то, наверное, `strcmp()` можно было бы и самому реализовать, не пользуясь настоящей функцией ¹², так было бы проще.

```
#include <stdio.h>
#include <stdarg.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdbool.h>
#include <unistd.h>
#include <dlfcn.h>
#include <string.h>

void *libc_handle = NULL;
int (*open_ptr)(const char *, int) = NULL;
int (*close_ptr)(int) = NULL;
ssize_t (*read_ptr)(int, void*, size_t) = NULL;

bool initied = false;

_Noreturn void die (const char * fmt, ...)
{
    va_list va;
    va_start (va, fmt);

    vprintf (fmt, va);
    exit(0);
};

static void find_original_functions ()
{
    if (initied)
        return;

    libc_handle = dlopen ("libc.so.6", RTLD_LAZY);
    if (libc_handle==NULL)
        die ("can't open libc.so.6\n");

    open_ptr = dlsym (libc_handle, "open");
    if (open_ptr==NULL)
        die ("can't find open()\n");

    close_ptr = dlsym (libc_handle, "close");
    if (close_ptr==NULL)
        die ("can't find close()\n");

    read_ptr = dlsym (libc_handle, "read");
    if (read_ptr==NULL)
        die ("can't find read()\n");

    initied = true;
}

static int opened_fd=0;

int open(const char *pathname, int flags)
{
    find_original_functions();

    int fd=(*open_ptr)(pathname, flags);
    if (strcmp(pathname, "/proc/uptime")==0)
        opened_fd=fd; // that's our file! record its file descriptor
    else
        opened_fd=0;
    return fd;
};

int close(int fd)
{
    find_original_functions();
```

¹²Например, посмотрите как обеспечивается простейший перехват `strcmp()` в статье ¹³ написанной Yong Huang

```

        if (fd==opened_fd)
            opened_fd=0; // the file is not opened anymore
        return (*close_ptr)(fd);
};

ssize_t read(int fd, void *buf, size_t count)
{
    find_original_functions();

    if (opened_fd!=0 && fd==opened_fd)
    {
        // that's our file!
        return sprintf (buf, count, "%d %d", 0x7fffffff, 0x7fffffff)+1;
    };
    // not our file, go to real read() function
    return (*read_ptr)(fd, buf, count);
};

```

([Исходный код на GitHub](#))

Компилируем как динамическую библиотеку:

```
gcc -fPIC -shared -Wall -o fool_uptime.so fool_uptime.c -ldl
```

Запускаем *uptime*, подгружая нашу библиотеку перед остальными:

```
LD_PRELOAD=`pwd`/fool_uptime.so uptime
```

Видим такое:

```
01:23:02 up 24855 days,  3:14,  3 users,  load average: 0.00, 0.01, 0.05
```

Если переменная окружения *LD_PRELOAD* будет всегда указывать на путь и имя файла нашей библиотеки, то она будет загружаться для всех запускаемых программ.

Еще примеры:

- Перехват `time()` в Sun Solaris yurichev.com
- Очень простой перехват `strcmp()` (Yong Huang) <http://go.yurichev.com/17143>
- Kevin Pulo — Fun with LD_PRELOAD. Много примеров и идей. yurichev.com
- Перехват функций работы с файлами для компрессии и декомпрессии файлов на лету (zlibc). <http://go.yurichev.com/17146>

6.5. Windows NT

6.5.1. CRT (win32)

Начинается ли исполнение программы прямо с функции `main()`? Нет, не начинается. Если открыть любой исполняемый файл в [IDA](#) или [Hiew](#), то [OEP](#) указывает на какой-то совсем другой код.

Это код, который делает некоторые приготовления перед тем как запустить ваш код. Он называется стартап-код или CRT-код (C RunTime).

Функция `main()` принимает на вход массив из параметров, переданных в командной строке, а также переменные окружения. Но в реальности в программу передается командная строка в виде простой строки, это именно CRT-код находит там пробелы и разрезает строку на части. CRT-код также готовит массив переменных окружения `envp`. В [GUI](#)¹⁴-приложениях win32, вместо `main()` имеется функция `WinMain` со своими аргументами:

¹⁴Graphical User Interface

```

int CALLBACK WinMain(
    _In_   HINSTANCE hInstance,
    _In_   HINSTANCE hPrevInstance,
    _In_   LPSTR lpCmdLine,
    _In_   int nCmdShow
);

```

CRT-код готовит и их.

А также, число, возвращаемое функцией `main()`, это код ошибки возвращаемый программой. В CRT это значение передается в `ExitProcess()`, принимающей в качестве аргумента код ошибки.

Как правило, каждый компилятор имеет свой CRT-код.

Вот типичный для MSVC 2008 CRT-код.

```

1  __tmainCRTStartup proc near
2
3  var_24 = dword ptr -24h
4  var_20 = dword ptr -20h
5  var_1C = dword ptr -1Ch
6  ms_exc = CPPEH_RECORD ptr -18h
7
8      push    14h
9      push    offset stru_4092D0
10     call    __SEH_prolog4
11     mov     eax, 5A4Dh
12     cmp     ds:400000h, ax
13     jnz     short loc_401096
14     mov     eax, ds:40003Ch
15     cmp     dword ptr [eax+400000h], 4550h
16     jnz     short loc_401096
17     mov     ecx, 10Bh
18     cmp     [eax+400018h], cx
19     jnz     short loc_401096
20     cmp     dword ptr [eax+400074h], 0Eh
21     jbe     short loc_401096
22     xor     ecx, ecx
23     cmp     [eax+4000E8h], ecx
24     setnz   cl
25     mov     [ebp+var_1C], ecx
26     jmp     short loc_40109A
27
28
29 loc_401096: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+18
30             ; __tmainCRTStartup+29 ...
31     and     [ebp+var_1C], 0
32
33 loc_40109A: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+50
34     push    1
35     call    __heap_init
36     pop     ecx
37     test    eax, eax
38     jnz     short loc_4010AE
39     push    1Ch
40     call    _fast_error_exit
41     pop     ecx
42
43 loc_4010AE: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+60
44     call    __mtinit
45     test    eax, eax
46     jnz     short loc_4010BF
47     push    10h
48     call    _fast_error_exit
49     pop     ecx
50
51 loc_4010BF: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+71
52     call    sub_401F2B
53     and     [ebp+ms_exc.disabled], 0

```

6.5. WINDOWS NT

```

54      call    __ioint
55      test    eax, eax
56      jge     short loc_4010D9
57      push    1Bh
58      call    __amsg_exit
59      pop     ecx
60
61 loc_4010D9: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+8B
62      call    ds:GetCommandLineA
63      mov     dword_40B7F8, eax
64      call    __crtGetEnvironmentStringsA
65      mov     dword_40AC60, eax
66      call    __setargv
67      test    eax, eax
68      jge     short loc_4010FF
69      push    8
70      call    __amsg_exit
71      pop     ecx
72
73 loc_4010FF: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+B1
74      call    __setenvp
75      test    eax, eax
76      jge     short loc_401110
77      push    9
78      call    __amsg_exit
79      pop     ecx
80
81 loc_401110: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+C2
82      push    1
83      call    __cinit
84      pop     ecx
85      test    eax, eax
86      jz      short loc_401123
87      push    eax
88      call    __amsg_exit
89      pop     ecx
90
91 loc_401123: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+D6
92      mov     eax, envp
93      mov     dword_40AC80, eax
94      push    eax                ; envp
95      push    argv               ; argv
96      push    argc               ; argc
97      call    _main
98      add     esp, 0Ch
99      mov     [ebp+var_20], eax
100     cmp     [ebp+var_1C], 0
101     jnz     short $LN28
102     push    eax                ; uExitCode
103     call    $LN32
104
105 $LN28:      ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+105
106     call    __cexit
107     jmp     short loc_401186
108
109
110 $LN27:      ; DATA XREF: .rdata:stru_4092D0
111     mov     eax, [ebp+ms_exc.exc_ptr] ; Exception filter 0 for function 401044
112     mov     ecx, [eax]
113     mov     ecx, [ecx]
114     mov     [ebp+var_24], ecx
115     push    eax
116     push    ecx
117     call    __XcptFilter
118     pop     ecx
119     pop     ecx
120
121 $LN24:
122     retn
123

```

6.5. WINDOWS NT

```
124
125 $LN14:      ; DATA XREF: .rdata:stru_4092D0
126      mov     esp, [ebp+ms_exc.old_esp] ; Exception handler 0 for function 401044
127      mov     eax, [ebp+var_24]
128      mov     [ebp+var_20], eax
129      cmp     [ebp+var_1C], 0
130      jnz     short $LN29
131      push    eax                ; int
132      call    __exit
133
134
135 $LN29:      ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+135
136      call    __c_exit
137
138 loc_401186: ; CODE XREF: __tmainCRTStartup+112
139      mov     [ebp+ms_exc.disabled], 0FFFFFFFh
140      mov     eax, [ebp+var_20]
141      call    __SEH_epilog4
142      retn
```

Здесь можно увидеть по крайней мере вызов функции `GetCommandLineA()` (строка 62), затем `setargv()` (строка 66) и `setenvp()` (строка 74), которые, видимо, заполняют глобальные переменные-указатели `argc`, `argv`, `envp`.

В итоге, вызывается `main()` с этими аргументами (строка 97).

Также имеются вызовы функций с говорящими именами вроде `heap_init()` (строка 35), `ioinit()` (строка 54).

Куча действительно инициализируется в **CRT**. Если вы попытаетесь использовать `malloc()` в программе без CRT, программа упадет с такой ошибкой:

```
runtime error R6030
- CRT not initialized
```

Инициализация глобальных объектов в Си++ происходит до вызова `main()`, именно в **CRT**: [3.18.4](#) (стр. 556).

Значение, возвращаемое из `main()` передается или в `_seh_exit()`, или же в `$LN32`, которая далее вызывает `_doexit()`.

Можно ли обойтись без **CRT**? Можно, если вы знаете что делаете.

В линкере от **MSVC** точка входа задается опцией `/ENTRY`.

```
#include <windows.h>

int main()
{
    MessageBox (NULL, "hello, world", "caption", MB_OK);
};
```

Компилируем в MSVC 2008.

```
cl no_crt.c user32.lib /link /entry:main
```

Получаем вполне работающий .exe размером 2560 байт, внутри которого есть только PE-заголовок, инструкции, вызывающие `MessageBox`, две строки в сегменте данных, импортируемая из `user32.dll` функция `MessageBox`, и более ничего.

Это работает, но вы уже не сможете вместо `main()` написать `WinMain` с его четырьмя аргументами. Вернее, если быть точным, написать-то сможете, но доступа к этим аргументам не будет, потому что они не подготовлены на момент исполнения.

Кстати, можно еще короче сделать .exe если уменьшить выравнивание **PE**-секций (которое, по умолчанию, 4096 байт).

```
cl no_crt.c user32.lib /link /entry:main /align:16
```

Линкер скажет:

LINK : warning LNK4108: /ALIGN specified without /DRIVER; image may not run

Получим .exe размером 720 байт. Он запускается в Windows 7 x86, но не x64 (там выдает ошибку при загрузке). При желании, размер можно еще сильнее ужать, но, как видно, возникают проблемы с совместимостью с разными версиями Windows.

6.5.2. Win32 PE

PE это формат исполняемых файлов, принятый в Windows.

Разница между .exe, .dll, и .sys в том, что у .exe и .sys обычно нет экспортов, только импорты.

У DLL¹⁵, как и у всех PE-файлов, есть точка входа (OEP) (там располагается функция DllMain()), но обычно эта функция ничего не делает.

.sys это обычно драйвера устройств.

Для драйверов, Windows требует, чтобы контрольная сумма в PE-файле была проставлена и была верной¹⁶.

А начиная с Windows Vista, файлы драйверов должны быть также подписаны при помощи электронной подписи, иначе они не будут загружаться.

В начале всякого PE-файла есть крохотная DOS-программа, выводящая на консоль сообщение вроде «This program cannot be run in DOS mode.» — если запустить эту программу в DOS либо Windows 3.1 (ОС не знающие о PE-формате), выведется это сообщение.

Терминология

- Модуль — это отдельный файл, .exe или .dll.
- Процесс — это некая загруженная в память и работающая программа. Как правило, состоит из одного .exe-файла и массы .dll-файлов.
- Память процесса — память с которой работает процесс. У каждого процесса — своя. Там обычно имеются загруженные модули, память стека, кучи, итд.
- VA¹⁷ — это адрес, который будет использоваться в самой программе во время исполнения.
- Базовый адрес (модуля) — это адрес, по которому модуль должен быть загружен в пространство процесса.

Загрузчик ОС может его изменить, если этот базовый адрес уже занят другим модулем, загруженным перед ним.

- RVA¹⁸ — это VA-адрес минус базовый адрес. Многие адреса в таблицах PE-файла используют RVA-адреса.
- IAT¹⁹ — массив адресов импортированных символов²⁰.
Иногда, директория IMAGE_DIRECTORY_ENTRY_IAT указывает на IAT. Важно отметить, что IDA (по крайней мере 6.1) может выделить псевдо-секцию с именем .idata для IAT, даже если IAT является частью совсем другой секции!
- INT²¹ — массив имен символов для импортирования²².

¹⁵Dynamic-Link Library

¹⁶Например, Hiew(7.5 (стр. 769)) умеет её подсчитывать

¹⁷Virtual Address

¹⁸Relative Virtual Address

¹⁹Import Address Table

²⁰Matt Pietrek, *An In-Depth Look into the Win32 Portable Executable File Format*, (2002)]

²¹Import Name Table

²²Matt Pietrek, *An In-Depth Look into the Win32 Portable Executable File Format*, (2002)]

Базовый адрес

Дело в том, что несколько авторов модулей могут готовить DLL-файлы для других, и нет возможности договориться о том, какие адреса и кому будут отведены.

Поэтому, если у двух необходимых для загрузки процесса DLL одинаковые базовые адреса, одна из них будет загружена по этому базовому адресу, а вторая — по другому свободному месту в памяти процесса, и все виртуальные адреса во второй DLL будут скорректированы.

Очень часто линкер в [MSVC](#) генерирует .exe-файлы с базовым адресом 0x400000²³, и с секцией кода начинающейся с 0x401000. Это значит, что [RVA](#) начала секции кода — 0x1000. А [DLL](#) часто генерируются MSVC-линкером с базовым адресом 0x10000000²⁴.

Помимо всего прочего, есть еще одна причина намеренно загружать модули по разным адресам, а точнее, по случайным.

Это [ASLR](#)²⁵.

Дело в том, что некий шеллкод, пытающийся исполниться на зараженной системе, должен вызывать какие-то системные функции, а следовательно, знать их адреса.

И в старых [ОС](#) (в линейке [Windows NT](#): до Windows Vista), системные DLL (такие как kernel32.dll, user32.dll) загружались все время по одним и тем же адресам, а если еще и вспомнить, что версии этих DLL редко менялись, то адреса отдельных функций, можно сказать, фиксированы и шеллкод может вызывать их напрямую.

Чтобы избежать этого, методика [ASLR](#) загружает и вашу программу, и все модули ей необходимые, по случайным адресам, разным при каждом запуске.

В PE-файлах, поддержка [ASLR](#) отмечается выставлением флага `IMAGE_DLL_CHARACTERISTICS_DYNAMIC_BASE` [см: Mark Russinovich, *Microsoft Windows Internals*].

Subsystem

Имеется также поле *subsystem*, обычно это:

- [native](#)²⁶ (.sys-драйвер),
- `console` (консольное приложение) или
- [GUI](#) (не консольное).

Версия ОС

В PE-файле также задается минимальный номер версии Windows, необходимый для загрузки модуля.

Соответствие номеров версий в файле и кодовых наименований Windows, можно посмотреть здесь²⁷.

Например, [MSVC](#) 2005 еще компилирует .exe-файлы запускающиеся на Windows NT4 (версия 4.00), а вот [MSVC](#) 2008 уже нет (генерируемые файлы имеют версию 5.00, для запуска необходима как минимум Windows 2000).

[MSVC](#) 2012 по умолчанию генерирует .exe-файлы версии 6.00, для запуска нужна как минимум Windows Vista. Хотя, изменив настройки компиляции²⁸, можно заставить генерировать и под Windows XP.

Секции

Разделение на секции присутствует, по-видимому, во всех форматах исполняемых файлов.

Придумано это для того, чтобы отделить код от данных, а данные — от константных данных.

²³Причина выбора такого адреса описана здесь: [MSDN](#)

²⁴Это можно изменять опцией `/BASE` в линкере

²⁵[wikipedia](#)

²⁶Что означает, что модуль использует Native API а не Win32

²⁷[wikipedia](#)

²⁸[MSDN](#)

6.5. WINDOWS NT

- На секции кода будет стоять флаг *IMAGE_SCN_CNT_CODE* или *IMAGE_SCN_MEM_EXECUTE* — это исполняемый код.
- На секции данных — флаги *IMAGE_SCN_CNT_INITIALIZED_DATA*, *IMAGE_SCN_MEM_READ* и *IMAGE_SCN_MEM_WRITE*.
- На пустой секции с неинициализированными данными — *IMAGE_SCN_CNT_UNINITIALIZED_DATA*, *IMAGE_SCN_MEM_READ* и *IMAGE_SCN_MEM_WRITE*.
- А на секции с константными данными, то есть, защищенными от записи, могут быть флаги *IMAGE_SCN_CNT_INITIALIZED_DATA* и *IMAGE_SCN_MEM_READ* без *IMAGE_SCN_MEM_WRITE*. Если попытаться записать что-то в эту секцию, процесс упадет.

В PE-файле можно задавать название для секции, но это не важно. Часто (но не всегда) секция кода называется *.text*, секция данных — *.data*, константных данных — *.rdata* (*readable data*). Еще популярные имена секций:

- *.idata* — секция импортов. IDA может создавать псевдо-секцию с этим же именем: 6.5.2 (стр. 736).
- *.edata* — секция экспортов (редко встречается)
- *.pdata* — секция содержащая информацию об исключениях в Windows NT для MIPS, IA64 и x64: 6.5.3 (стр. 762)
- *.reloc* — секция релоков
- *.bss* — неинициализированные данные
- *.tls* — thread local storage (TLS)
- *.rsrc* — ресурсы
- *.CRT* — может присутствовать в бинарных файлах, скомпилированных очень старыми версиями MSVC

Запаковщики/зашифровщики PE-файлов часто затирают имена секций, или меняют на свои.

В MSVC можно объявлять данные в произвольно названной секции²⁹.

Некоторые компиляторы и линкеры могут добавлять также секцию с отладочными символами и вообще отладочной информацией (например, MinGW).

Хотя это не так в современных версиях MSVC (там принято отладочную информацию сохранять в отдельных PDB-файлах).

Вот как PE-секция описывается в файле:

```
typedef struct _IMAGE_SECTION_HEADER {
    BYTE  Name[IMAGE_SIZEOF_SHORT_NAME];
    union {
        DWORD PhysicalAddress;
        DWORD VirtualSize;
    } Misc;
    DWORD VirtualAddress;
    DWORD SizeOfRawData;
    DWORD PointerToRawData;
    DWORD PointerToRelocations;
    DWORD PointerToLinenumbers;
    WORD  NumberOfRelocations;
    WORD  NumberOfLinenumbers;
    DWORD Characteristics;
} IMAGE_SECTION_HEADER, *PIMAGE_SECTION_HEADER;
```

30

Еще немного терминологии: *PointerToRawData* называется «Offset» в Hiew и *VirtualAddress* называется «RVA» там же.

²⁹MSDN

³⁰MSDN

Секция данных

Секция данных в файле может быть меньше, чем в памяти. Например, некоторые переменные могут быть инициализированы, а некоторые — нет. Тогда компилятор и линкер объединяют их все в одну секцию, но первая часть секции инициализирована и находится в файле, а вторая отсутствует в файле (конечно, для экономии места). *VirtualSize* будет равен размеру секции в памяти, а *SizeOfRawData* будет равен размеру секции в файле.

IDA будет показывать границу между инициализированной и неинициализированной частями так:

```
...
.data:10017FFA      db      0
.data:10017FFB      db      0
.data:10017FFC      db      0
.data:10017FFD      db      0
.data:10017FFE      db      0
.data:10017FFF      db      0
.data:10018000      db      ? ;
.data:10018001      db      ? ;
.data:10018002      db      ? ;
.data:10018003      db      ? ;
.data:10018004      db      ? ;
.data:10018005      db      ? ;
...
```

Релоки

Также известны как FIXUP-ы (по крайней мере в Hiew).

Это также присутствует почти во всех форматах загружаемых и исполняемых файлов ³¹.

Исключения это динамические библиотеки явно скомпилированные с PIC или любой другой PIC-код.

Зачем они нужны? Как видно, модули могут загружаться по другим базовым адресам, но как же тогда работать с глобальными переменными, например?

Ведь нужно обращаться к ним по адресу. Одно из решений — это адресно-независимый код (6.4.1 (стр. 727)). Но это далеко не всегда удобно.

Поэтому имеется таблица релоков. Там просто перечислены адреса мест в модуле подлежащими коррекции при загрузке по другому базовому адресу.

Например, по 0x410000 лежит некая глобальная переменная, и вот как обеспечивается её чтение:

A1 00 00 41 00	mov	eax, [000410000]
----------------	-----	------------------

Базовый адрес модуля 0x400000, а RVA глобальной переменной 0x10000.

Если загружать модуль по базовому адресу 0x500000, нужно чтобы адрес этой переменной в этой инструкции стал 0x510000.

Как видно, адрес переменной закодирован в самой инструкции MOV, после байта 0xA1.

Поэтому адрес четырех байт, после 0xA1, записывается в таблицу релоков.

Если модуль загружается по другому базовому адресу, загрузчик OC обходит все адреса в таблице, находит каждое 32-битное слово по этому адресу, отнимает от него настоящий, оригинальный базовый адрес (в итоге получается RVA), и прибавляет к нему новый базовый адрес.

А если модуль загружается по своему оригинальному базовому адресу, ничего не происходит.

Так можно обходиться со всеми глобальными переменными.

Релоки могут быть разных типов, однако в Windows для x86-процессоров, тип обычно IMAGE_REL_BASED_HIGHLOW.

Кстати, релоки маркируются темным в Hiew, например: илл. 1.21.

³¹ Даже .exe-файлы в MS-DOS

OllyDbg подчеркивает места в памяти, к которым будут применены релоки, например: илл. 1.44.

Экспорты и импорты

Как известно, любая исполняемая программа должна как-то пользоваться сервисами ОС и прочими DLL-библиотеками.

Можно сказать, что нужно связывать функции из одного модуля (обычно DLL) и места их вызовов в другом модуле (.exe-файл или другая DLL).

Для этого, у каждой DLL есть «экспорты», это таблица функций плюс их адреса в модуле.

А у .exe-файла, либо DLL, есть «импорты», это таблица функций требующихся для исполнения включая список имен DLL-файлов.

Загрузчик ОС, после загрузки основного .exe-файла, проходит по таблице импортов: загружает дополнительные DLL-файлы, находит имена функций среди экспортов в DLL и прописывает их адреса в IAT в головном .exe-модуле.

Как видно, во время загрузки, загрузчику нужно много сравнивать одни имена функций с другими, а сравнение строк — это не очень быстрая процедура, так что, имеется также поддержка «ординалов» или «hint»-ов, это когда в таблице импортов проставлены номера функций вместо их имен.

Так их быстрее находить в загружаемой DLL. В таблице экспортов ординалы присутствуют всегда.

К примеру, программы использующие библиотеки MFC³², обычно загружают mfc*.dll по ординалам, и в таких программах, в INT, нет имен функций MFC.

При загрузке такой программы в IDA, она спросит у вас путь к файлу mfc*.dll, чтобы установить имена функций. Если в IDA не указать путь к этой DLL, то вместо имен функций будет что-то вроде *mfc80_123*.

Секция импортов

Под таблицу импортов и всё что с ней связано иногда отводится отдельная секция (с названием вроде .idata), но это не обязательно.

Импорты — это запутанная тема еще и из-за терминологической путаницы. Попробуем собрать всё в одно место.

³²Microsoft Foundation Classes

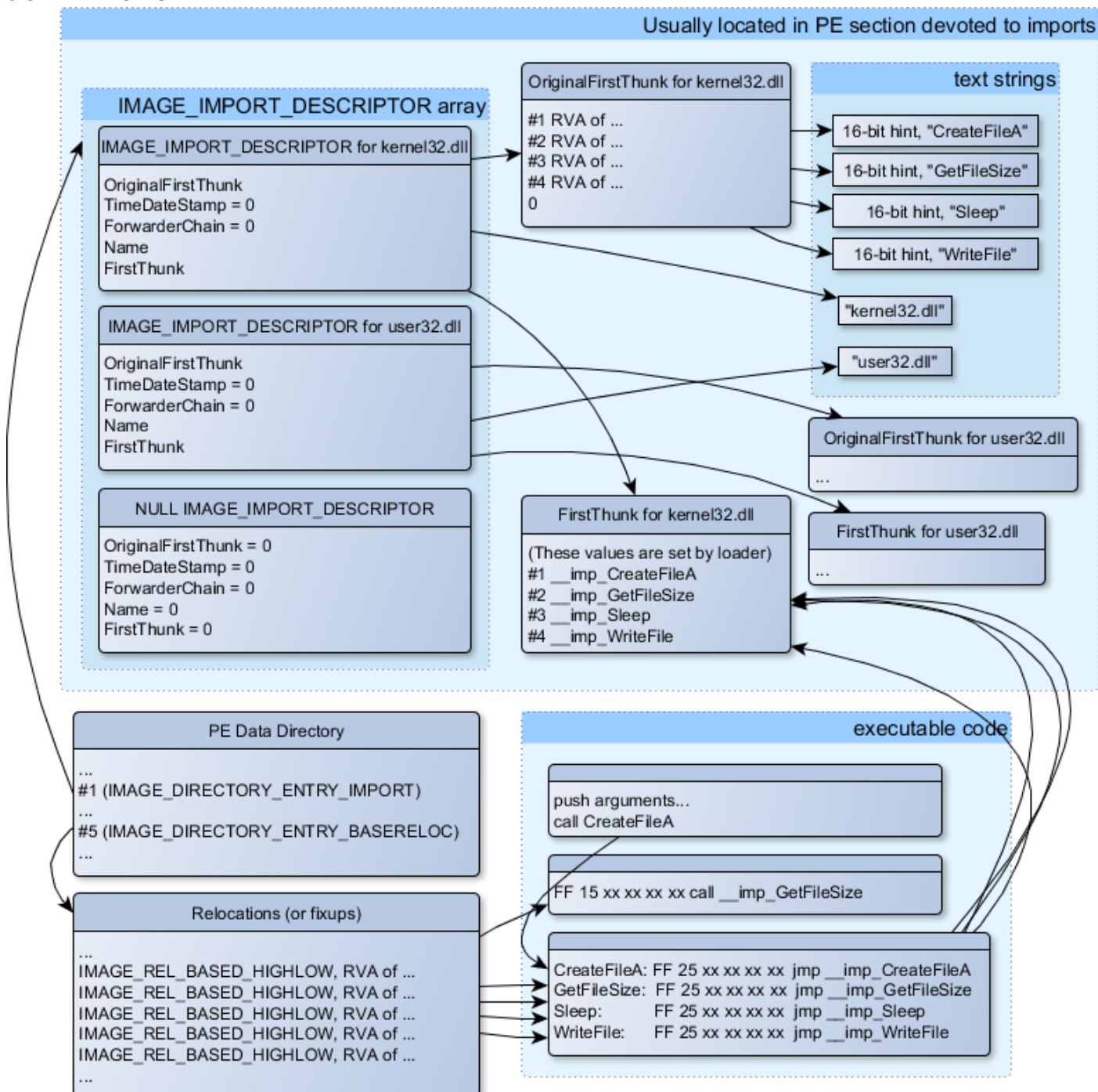


Рис. 6.1: схема, объединяющая все структуры в PE-файлы, связанные с импортами

Самая главная структура — это массив *IMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR*. Каждый элемент на каждую импортируемую DLL.

У каждого элемента есть *RVA*-адрес текстовой строки (имя DLL) (*Name*).

OriginalFirstThunk это *RVA*-адрес таблицы *INT*. Это массив *RVA*-адресов, каждый из которых указывает на текстовую строку где записано имя функции. Каждую строку предваряет 16-битное число («hint») — «ординал» функции.

Если при загрузке удастся найти функцию по ординалу, тогда сравнение текстовых строк не будет происходить. Массив оканчивается нулем.

Есть также указатель на таблицу *IAT* с названием *FirstThunk*, это просто *RVA*-адрес места, где загрузчик будет проставлять адреса найденных функций.

Места где загрузчик проставляет адреса, *IDA* именует их так: *__imp_CreateFileA*, etc.

Есть по крайней мере два способа использовать адреса, проставленные загрузчиком.

6.5. WINDOWS NT

- В коде будут просто инструкции вроде `call __imp_CreateFileA`, а так как, поле с адресом импортируемой функции это как бы глобальная переменная, то в таблице релоков добавляется адрес (плюс 1 или 2) в инструкции `call`, на случай если модуль будет загружен по другому базовому адресу.

Но как видно, это приводит к увеличению таблицы релоков. Ведь вызовов импортируемой функции у вас в модуле может быть очень много. К тому же, чем больше таблица релоков, тем дольше загрузка.

- На каждую импортируемую функцию выделяется только один переход на импортируемую функцию используя инструкцию `JMP` плюс релок на эту инструкцию. Такие места-«переходники» называются также «thunk»-ами. А все вызовы импортируемой функции это просто инструкция `CALL` на соответствующий «thunk». В данном случае, дополнительные релоки не нужны, потому что эти `CALL`-ы имеют относительный адрес, и корректировать их не надо.

Оба этих два метода могут комбинироваться. Надо полагать, линкер создает отдельный «thunk», если вызовов слишком много, но по умолчанию — не создает.

Кстати, массив адресов функций, на который указывает `FirstThunk`, не обязательно может быть в секции [IAT](#). К примеру, автор сих строк написал утилиту `PE_add_import`³³ для добавления импорта в уже существующий .exe-файл. Раньше, в прошлых версиях утилиты, на месте функции, вместо которой вы хотите подставить вызов в другую DLL, моя утилита вписывала такой код:

```
MOV EAX, [yourdll.dll!function]
JMP EAX
```

При этом, `FirstThunk` указывает прямо на первую инструкцию. Иными словами, загрузчик, загружая `yourdll.dll`, прописывает адрес функции `function` прямо в коде.

Надо также отметить что обычно секция кода защищена от записи, так что, моя утилита добавляет флаг

`IMAGE_SCN_MEM_WRITE` для секции кода. Иначе при загрузке такой программы, она упадет с ошибкой 5 (access denied).

Может возникнуть вопрос: а что если я поставлю программу с набором DLL, которые никогда не будут меняться (в т.ч., адреса всех функций в этих DLL), может как-то можно ускорить процесс загрузки?

Да, можно прописать адреса импортируемых функций в массивы `FirstThunk` заранее. Для этого в структуре

`IMAGE_IMPORT_DESCRIPTOR` имеется поле `Timestamp`. И если там присутствует какое-то значение, то загрузчик сверяет это значение с датой-временем DLL-файла. И если они равны, то загрузчик больше ничего не делает, и загрузка может происходить быстрее.

Это называется «old-style binding»³⁴. В Windows SDK для этого имеется утилита `BIND.EXE`. Для ускорения загрузки вашей программы, Matt Pietrek в *Matt Pietrek, An In-Depth Look into the Win32 Portable Executable File Format, (2002)*³⁵, предлагает делать binding сразу после инсталляции вашей программы на компьютере конечного пользователя.

Запаковщики/зашифровщики PE-файлов могут также сжимать/шифровать таблицу импортов. В этом случае, загрузчик Windows, конечно же, не загрузит все нужные DLL. Поэтому распаковщик/расшифровщик делает это сам, при помощи вызовов `LoadLibrary()` и `GetProcAddress()`. Вот почему в запакованных файлах эти две функции часто присутствуют в [IAT](#).

В стандартных DLL входящих в состав Windows, часто, [IAT](#) находится в самом начале PE-файла.

Возможно это для оптимизации. Ведь .exe-файл при загрузке не загружается в память весь (вспомните что инсталляторы огромного размера подозрительно быстро запускаются), он «мапится» (map), и подгружается в память частями по мере обращения к этой памяти.

И возможно в Microsoft решили, что так будет быстрее.

³³yurichev.com

³⁴[MSDN](#). Существует также «new-style binding».

³⁵Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17318>

Ресурсы

Ресурсы в PE-файле — это набор иконок, картинок, текстовых строк, описаний диалогов. Возможно, их в свое время решили отделить от основного кода, чтобы все эти вещи были многоязычными, и было проще выбирать текст или картинку того языка, который установлен в ОС.

В качестве побочного эффекта, их легко редактировать и сохранять обратно в исполняемый файл, даже не обладая специальными знаниями, например, редактором ResHack (6.5.2 (стр. 743)).

.NET

Программы на .NET компилируются не в машинный код, а в свой собственный байткод. Собственно, в .exe-файлы байткод вместо обычного кода, однако, точка входа (OEP) указывает на крохотный фрагмент x86-кода:

```
jmp      mscoree.dll!_CorExeMain
```

А в mscoree.dll и находится .NET-загрузчик, который уже сам будет работать с PE-файлом.

Так было в ОС до Windows XP. Начиная с XP, загрузчик ОС уже сам определяет, что это .NET-файл и запускает его не исполняя этой инструкции JMP³⁶.

TLS

Эта секция содержит в себе инициализированные данные для TLS(6.2 (стр. 721)) (если нужно). При старте нового треда, его TLS-данные инициализируются данными из этой секции.

Помимо всего прочего, спецификация PE-файла предусматривает инициализацию TLS-секции, т.н., TLS callbacks. Если они присутствуют, то они будут вызваны перед тем как передать управление на главную точку входа (OEP). Это широко используется запаковщиками/зашифровщиками PE-файлов.

Инструменты

- objdump (имеется в cygwin) для вывода всех структур PE-файла.
- Hiew(7.5 (стр. 769)) как редактор.
- pefile — Python-библиотека для работы с PE-файлами ³⁷.
- ResHack AKA Resource Hacker — редактор ресурсов ³⁸.
- PE_add_import³⁹ — простая утилита для добавления символа/-ов в таблицу импортов PE-файла.
- PE_patcher⁴⁰ — простая утилита для модификации PE-файлов.
- PE_search_str_refs⁴¹ — простая утилита для поиска функции в PE-файле, где используется некая текстовая строка.

Further reading

- Daniel Pistelli — The .NET File Format ⁴²

³⁶MSDN

³⁷<http://go.yurichev.com/17052>

³⁸<http://go.yurichev.com/17052>

³⁹<http://go.yurichev.com/17049>

⁴⁰yurichev.com

⁴¹yurichev.com

⁴²<http://go.yurichev.com/17056>

6.5.3. Windows SEH

Забудем на время о MSVC

SEH в Windows предназначен для обработки исключений, тем не менее, с Си++ и ООП он никак не связан. Здесь мы рассмотрим SEH изолированно от Си++ и расширений MSVC.

Каждый процесс имеет цепочку SEH-обработчиков, и адрес обработчика, определенного последним, записан в каждом TIB. Когда происходит исключение (деление на ноль, обращение по неверному адресу в памяти, пользовательское исключение, поднятое при помощи RaiseException()), ОС находит последний обработчик в TIB и вызывает его, передав ему тип исключения и всю информацию о состоянии CPU в момент исключения (все значения регистров, итд.). Обработчик выясняет, то ли это исключение, для которого он создавался?

Если да, то он обрабатывает исключение. Если нет, то показывает ОС что он не может его обработать и ОС вызывает следующий обработчик в цепочке, и так до тех пор, пока не найдется обработчик способный обработать исключение.

В самом конце цепочки находится стандартный обработчик, показывающий всем очень известное окно, сообщающее что процесс упал, сообщает также состояние CPU в момент падения и позволяет собрать и отправить информацию обработчикам в Microsoft.

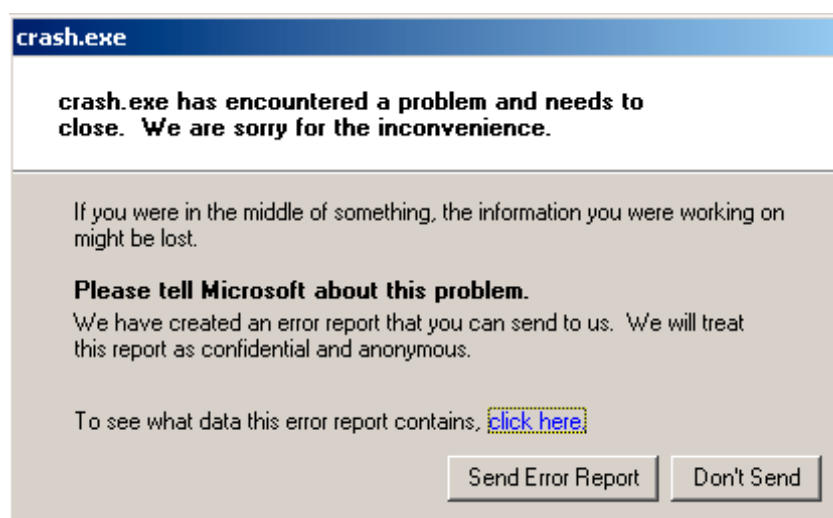


Рис. 6.2: Windows XP

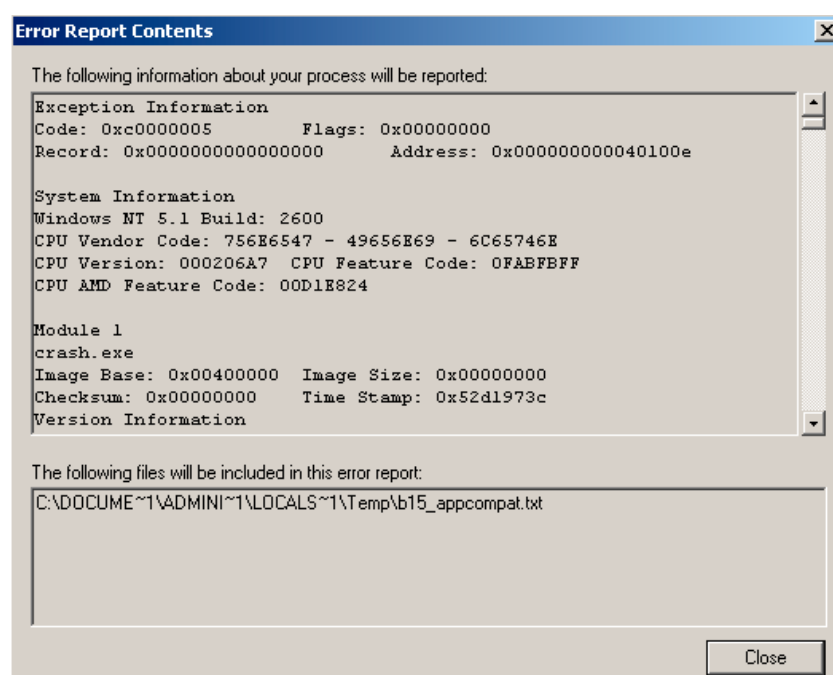


Рис. 6.3: Windows XP

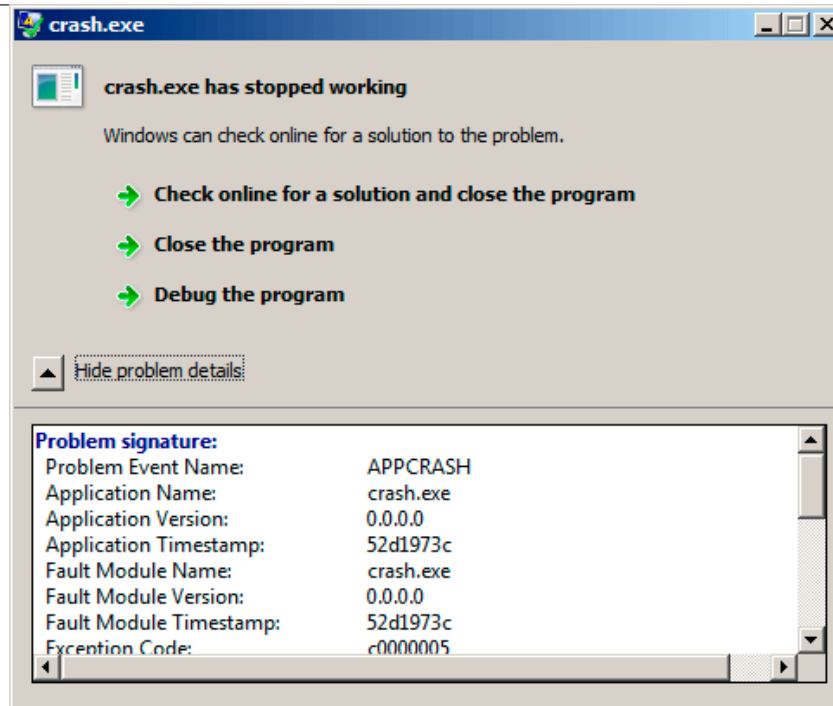


Рис. 6.4: Windows 7

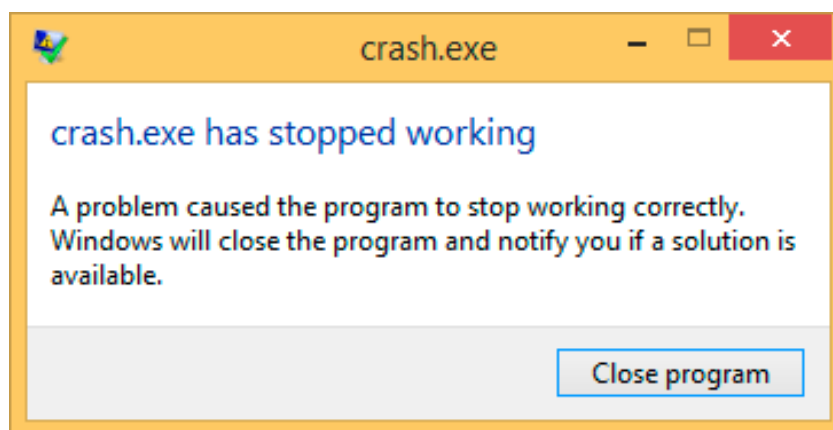


Рис. 6.5: Windows 8.1

Раньше этот обработчик назывался Dr. Watson ⁴³.

Кстати, некоторые разработчики делают свой собственный обработчик, отправляющий информацию о падении программы им самим.

Он регистрируется при помощи функции `SetUnhandledExceptionFilter()` и будет вызван если ОС не знает, как иначе обработать исключение.

А, например, Oracle RDBMS в этом случае генерирует огромные дампы, содержащие всю возможную информацию и состоянии CPU и памяти.

Попробуем написать свой примитивный обработчик исключений. Этот пример основан на примере из [Matt Pietrek, *A Crash Course on the Depths of Win32™ Structured Exception Handling*, (1997)]⁴⁴. Он должен компилироваться с опцией SAFEHSEH: `cl seh1.cpp /link /safeseh:no`. Подробнее об опции SAFEHSEH здесь: MSDN.

```
#include <windows.h>
#include <stdio.h>

DWORD new_value=1234;

EXCEPTION_DISPOSITION __cdecl except_handler(
```

⁴³[wikipedia](#)

⁴⁴Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17293>

6.5. WINDOWS NT

```
        struct _EXCEPTION_RECORD *ExceptionRecord,
        void * EstablisherFrame,
        struct _CONTEXT *ContextRecord,
        void * DispatcherContext )
{
    unsigned i;

    printf ("%s\n", __FUNCTION__);
    printf ("ExceptionRecord->ExceptionCode=0x%p\n", ExceptionRecord->ExceptionCode);
    printf ("ExceptionRecord->ExceptionFlags=0x%p\n", ExceptionRecord->ExceptionFlags);
    printf ("ExceptionRecord->ExceptionAddress=0x%p\n", ExceptionRecord->ExceptionAddress);

    if (ExceptionRecord->ExceptionCode==0xE1223344)
    {
        printf ("That's for us\n");
        // yes, we "handled" the exception
        return ExceptionContinueExecution;
    }
    else if (ExceptionRecord->ExceptionCode==EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION)
    {
        printf ("ContextRecord->Eax=0x%08X\n", ContextRecord->Eax);
        // will it be possible to 'fix' it?
        printf ("Trying to fix wrong pointer address\n");
        ContextRecord->Eax=(DWORD)&new_value;
        // yes, we "handled" the exception
        return ExceptionContinueExecution;
    }
    else
    {
        printf ("We do not handle this\n");
        // someone else's problem
        return ExceptionContinueSearch;
    }
};

int main()
{
    DWORD handler = (DWORD)except_handler; // take a pointer to our handler

    // install exception handler
    __asm
    {
        push    handler           // make EXCEPTION_REGISTRATION record:
        push    FS:[0]           // address of handler function
        mov     FS:[0],ESP       // address of previous handler
        // add new EXCEPTION_REGISTRATION
    }

    RaiseException (0xE1223344, 0, 0, NULL);

    // now do something very bad
    int* ptr=NULL;
    int val=0;
    val=*ptr;
    printf ("val=%d\n", val);

    // deinstall exception handler
    __asm
    {
        mov     eax,[ESP]        // remove our EXCEPTION_REGISTRATION record
        mov     FS:[0], EAX      // get pointer to previous record
        add     esp, 8            // install previous record
        // clean our EXCEPTION_REGISTRATION off stack
    }

    return 0;
}
```

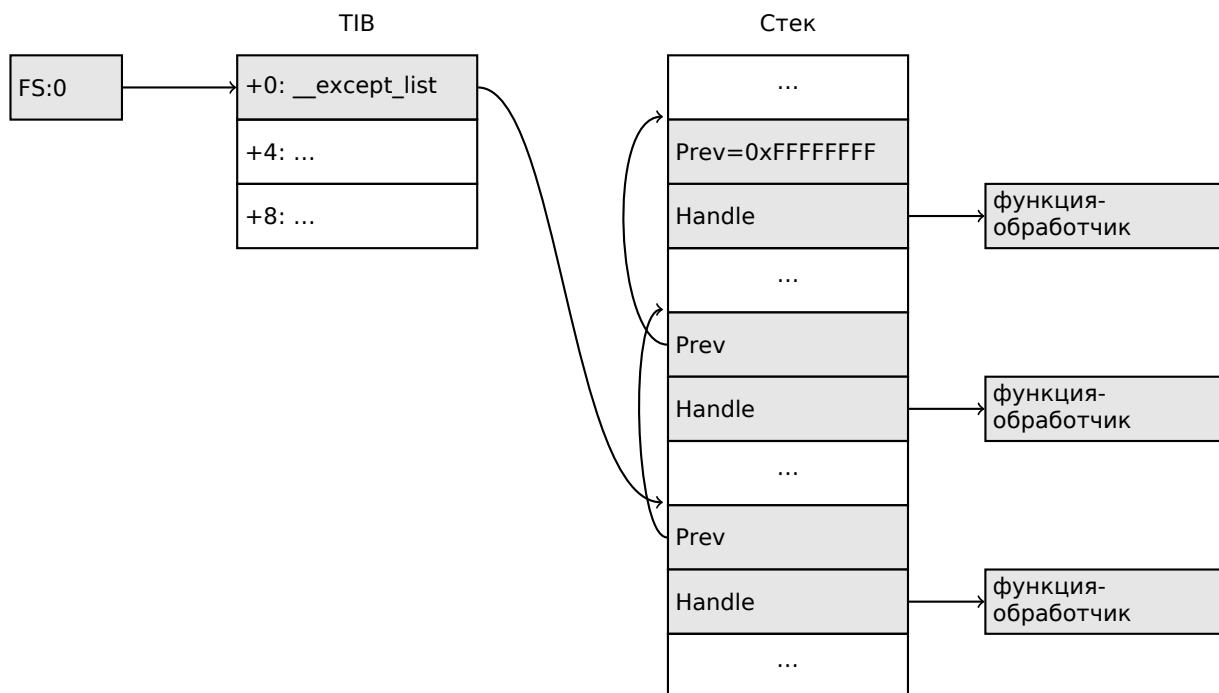
Сегментный регистр FS: в win32 указывает на [TIB](#). Самый первый элемент [TIB](#) это указатель на последний обработчик в цепочке. Мы сохраняем его в стеке и записываем туда адрес своего обработчика. Эта структура называется `_EXCEPTION_REGISTRATION`, это простейший односвязный список, и

эти элементы хранятся прямо в стеке.

Листинг 6.22: MSVC/VC/crt/src/exsup.inc

```
\_EXCEPTION\_REGISTRATION struc
    prev    dd    ?
    handler dd    ?
\_EXCEPTION\_REGISTRATION ends
```

Так что каждое поле «handler» указывает на обработчик, а каждое поле «prev» указывает на предыдущую структуру в цепочке обработчиков. Самая последняя структура имеет 0xFFFFFFFF (-1) в поле «prev».



После инсталляции своего обработчика, вызываем `RaiseException()`⁴⁵. Это пользовательские исключения. Обработчик проверяет код.

Если код 0xE1223344, то он возвращает `ExceptionContinueExecution`, что сигнализирует системе что обработчик скорректировал состояние CPU (обычно это регистры EIP/ESP) и что ОС может возобновить исполнение треда. Если вы немного измените код так что обработчик будет возвращать `ExceptionContinueSearch`, то ОС будет вызывать остальные обработчики в цепочке, и вряд ли найдется тот, кто обработает ваше исключение, ведь информации о нем (вернее, его коде) ни у кого нет. Вы увидите стандартное окно Windows о падении процесса.

Какова разница между системными исключениями и пользовательскими? Вот системные:

⁴⁵[MSDN](#)

6.5. WINDOWS NT

как определен в WinBase.h	как определен в ntstatus.h	численное значение
EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION	STATUS_ACCESS_VIOLATION	0xC0000005
EXCEPTION_DATATYPE_MISALIGNMENT	STATUS_DATATYPE_MISALIGNMENT	0x80000002
EXCEPTION_BREAKPOINT	STATUS_BREAKPOINT	0x80000003
EXCEPTION_SINGLE_STEP	STATUS_SINGLE_STEP	0x80000004
EXCEPTION_ARRAY_BOUNDS_EXCEEDED	STATUS_ARRAY_BOUNDS_EXCEEDED	0xC000008C
EXCEPTION_FLT_DENORMAL_OPERAND	STATUS_FLOAT_DENORMAL_OPERAND	0xC000008D
EXCEPTION_FLT_DIVIDE_BY_ZERO	STATUS_FLOAT_DIVIDE_BY_ZERO	0xC000008E
EXCEPTION_FLT_INEXACT_RESULT	STATUS_FLOAT_INEXACT_RESULT	0xC000008F
EXCEPTION_FLT_INVALID_OPERATION	STATUS_FLOAT_INVALID_OPERATION	0xC0000090
EXCEPTION_FLT_OVERFLOW	STATUS_FLOAT_OVERFLOW	0xC0000091
EXCEPTION_FLT_STACK_CHECK	STATUS_FLOAT_STACK_CHECK	0xC0000092
EXCEPTION_FLT_UNDERFLOW	STATUS_FLOAT_UNDERFLOW	0xC0000093
EXCEPTION_INT_DIVIDE_BY_ZERO	STATUS_INTEGER_DIVIDE_BY_ZERO	0xC0000094
EXCEPTION_INT_OVERFLOW	STATUS_INTEGER_OVERFLOW	0xC0000095
EXCEPTION_PRIV_INSTRUCTION	STATUS_PRIVILEGED_INSTRUCTION	0xC0000096
EXCEPTION_IN_PAGE_ERROR	STATUS_IN_PAGE_ERROR	0xC0000006
EXCEPTION_ILLEGAL_INSTRUCTION	STATUS_ILLEGAL_INSTRUCTION	0xC000001D
EXCEPTION_NONCONTINUABLE_EXCEPTION	STATUS_NONCONTINUABLE_EXCEPTION	0xC0000025
EXCEPTION_STACK_OVERFLOW	STATUS_STACK_OVERFLOW	0xC00000FD
EXCEPTION_INVALID_DISPOSITION	STATUS_INVALID_DISPOSITION	0xC0000026
EXCEPTION_GUARD_PAGE	STATUS_GUARD_PAGE_VIOLATION	0x80000001
EXCEPTION_INVALID_HANDLE	STATUS_INVALID_HANDLE	0xC0000008
EXCEPTION_POSSIBLE_DEADLOCK	STATUS_POSSIBLE_DEADLOCK	0xC0000194
CONTROL_C_EXIT	STATUS_CONTROL_C_EXIT	0xC000013A

Так определяется код:

31	29	28	27	16	15	0
S	U	0	Facility code			Error code

S это код статуса: 11 — ошибка; 10 — предупреждение; 01 — информация; 00 — успех. U — является ли этот код пользовательским, а не системным.

Вот почему мы выбрали 0xE1223344 — E₁₆ (1110₂) 0xE (1110_b) означает, что это 1) пользовательское исключение; 2) ошибка. Хотя, если быть честным, этот пример нормально работает и без этих старших бит.

Далее мы пытаемся прочитать значение из памяти по адресу 0. Конечно, в win32 по этому адресу обычно ничего нет, и сработает исключение. Однако, первый обработчик, который будет заниматься этим делом — ваш, и он узнает об этом первым, проверяя код на соответствие с константной EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION.

А если заглянуть в то что получилось на ассемблере, то можно увидеть, что код читающий из памяти по адресу 0, выглядит так:

Листинг 6.23: MSVC 2010

```

...
xor     eax, eax
mov     eax, DWORD PTR [eax] ; exception will occur here
push    eax
push    OFFSET msg
call    _printf
add     esp, 8
...
```

Возможно ли «на лету» исправить ошибку и предложить программе исполняться далее? Да, наш обработчик может изменить значение в EAX и предложить ОС исполнить эту же инструкцию еще раз. Что мы и делаем. printf() напечатает 1234, потому что после работы нашего обработчика, EAX будет не 0, а будет содержать адрес глобальной переменной new_value. Программа будет исполняться далее.

Собственно, вот что происходит: срабатывает защита менеджера памяти в CPU, он останавливает работу треда, отыскивает в ядре Windows обработчик исключений, тот, в свою очередь, начинает вызывать обработчики из цепочки SEH, по одному.

Мы компилируем это всё в MSVC 2010, но конечно же, нет никакой гарантии что для указателя будет использован именно регистр EAX.

6.5. WINDOWS NT

Этот трюк с подменой адреса эффектно выглядит, и мы рассматриваем его здесь для наглядной иллюстрации работы [SEH](#).

Тем не менее, трудно припомнить, применяется ли где-то подобное на практике для исправления ошибок «на лету».

Почему SEH-записи хранятся именно в стеке а не в каком-то другом месте? Возможно, потому что ОС не нужно заботиться об освобождении этой информации, эти записи просто пропадают как ненужные когда функция заканчивает работу.

Это чем-то похоже на `alloca()`: ([1.7.2](#) (стр. [35](#))).

Теперь вспомним MSVC

Должно быть, программистам Microsoft были нужны исключения в Си, но не в Си++ (для использования в ядре Windows NT, которое написано на Си), так что они добавили нестандартное расширение Си в MSVC ⁴⁶. Оно не связано с исключениями в Си++.

```
__try
{
    ...
}
__except(filter code)
{
    handler code
}
```

Блок «finally» может присутствовать вместо код обработчика:

```
__try
{
    ...
}
__finally
{
    ...
}
```

Код-фильтр — это выражение, отвечающее на вопрос, соответствует ли код этого обработчика к поднятому исключению. Если ваш код слишком большой и не помещается в одно выражение, отдельная функция-фильтр может быть определена.

Таких конструкций много в ядре Windows. Вот несколько примеров оттуда ([WRK](#)):

Листинг 6.24: `WRK-v1.2/base/ntos/ob/obwait.c`

```
try {
    KeReleaseMutant( (PKMUTANT)SignalObject,
                    MUTANT_INCREMENT,
                    FALSE,
                    TRUE );
} except((GetExceptionCode () == STATUS_ABANDONED ||
        GetExceptionCode () == STATUS_MUTANT_NOT_OWNED)?
        EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER :
        EXCEPTION_CONTINUE_SEARCH) {
    Status = GetExceptionCode();

    goto WaitExit;
}
```

Листинг 6.25: `WRK-v1.2/base/ntos/cache/cachesub.c`

```
try {
    RtlCopyBytes( (PVOID)((PCHAR)CacheBuffer + PageOffset),
```

⁴⁶[MSDN](#)

6.5. WINDOWS NT

```
        UserBuffer,
        MorePages ?
        (PAGE_SIZE - PageOffset) :
        (ReceivedLength - PageOffset) );
} except( CcCopyReadExceptionFilter( GetExceptionInformation(),
                                     &Status ) ) {
```

Вот пример кода-фильтра:

Листинг 6.26: WRK-v1.2/base/ntos/cache/copysup.c

```
LONG
CcCopyReadExceptionFilter(
    IN PEXCEPTION_POINTERS ExceptionPointer,
    IN PNTSTATUS ExceptionCode
)

/*++

Routine Description:

    This routine serves as an exception filter and has the special job of
    extracting the "real" I/O error when Mm raises STATUS_IN_PAGE_ERROR
    beneath us.

Arguments:

    ExceptionPointer - A pointer to the exception record that contains
                      the real Io Status.

    ExceptionCode - A pointer to an NTSTATUS that is to receive the real
                   status.

Return Value:

    EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER

--*/

{
    *ExceptionCode = ExceptionPointer->ExceptionRecord->ExceptionCode;

    if ( (*ExceptionCode == STATUS_IN_PAGE_ERROR) &&
        (ExceptionPointer->ExceptionRecord->NumberParameters >= 3) ) {

        *ExceptionCode = (NTSTATUS) ExceptionPointer->ExceptionRecord->ExceptionInformation[2];
    }

    ASSERT( !NT_SUCCESS(*ExceptionCode) );

    return EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER;
}
```

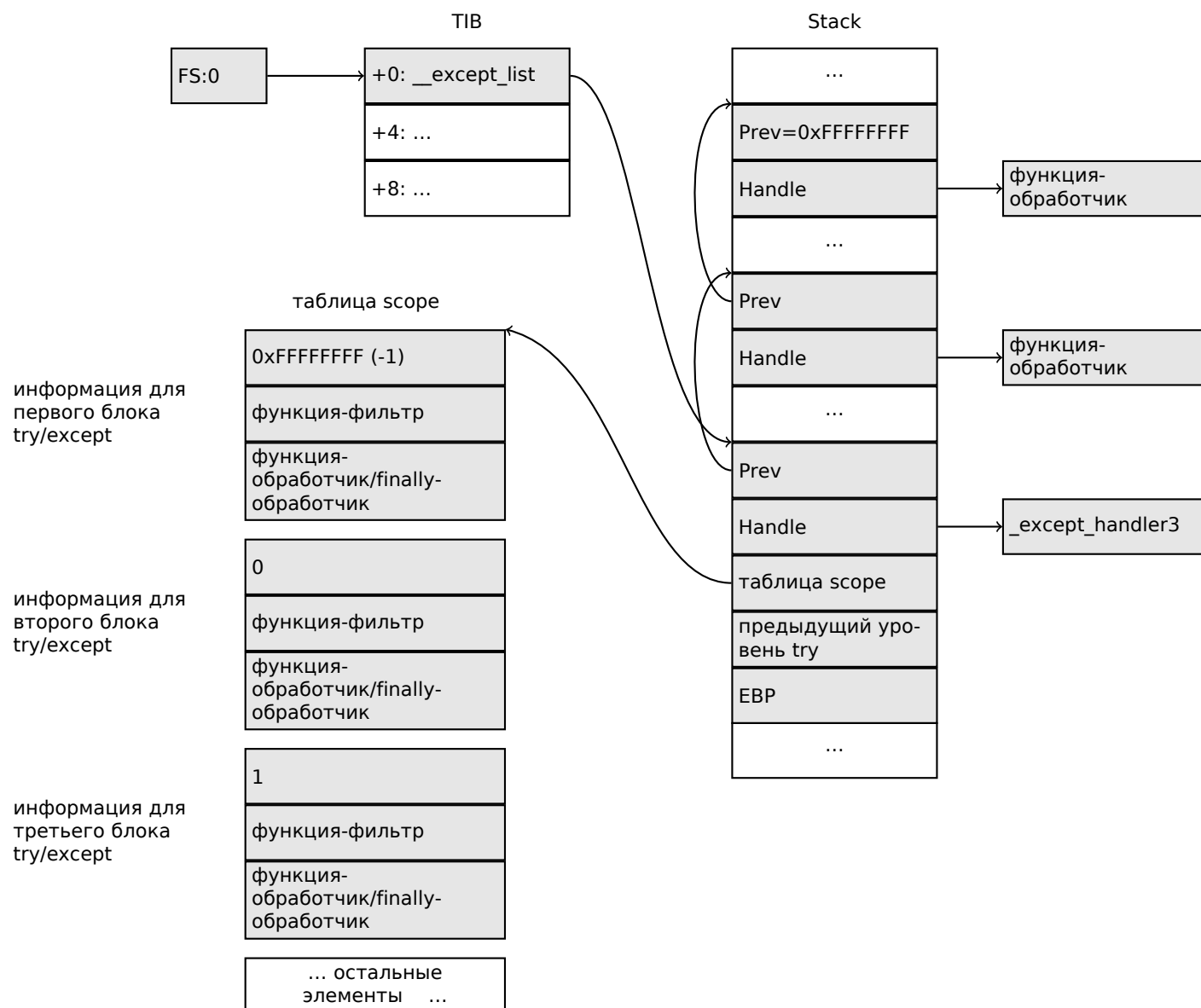
Внутри, SEH это расширение исключений поддерживаемых OS.

Но функция обработчик теперь или `_except_handler3` (для SEH3) или `_except_handler4` (для SEH4). Код обработчика от MSVC, расположен в его библиотеках, или же в `msvcr*.dll`. Очень важно понимать, что SEH это специфичное для MSVC. Другие win32-компиляторы могут предлагать что-то совершенно другое.

SEH3

SEH3 имеет `_except_handler3` как функцию-обработчик, и расширяет структуру `_EXCEPTION_REGISTRATION` добавляя указатель на *scope table* и переменную *previous try level*. SEH4 расширяет *scope table* добавляя еще 4 значения связанных с защитой от переполнения буфера.

scope table это таблица, состоящая из указателей на код фильтра и обработчика, для каждого уровня вложенности *try/except*.



И снова, очень важно понимать, что OS заботится только о полях *prev/handle*, и больше ничего. Это работа функции `_except_handler3` читать другие поля, читать *scope table* и решать, какой обработчик исполнять и когда.

Исходный код функции `_except_handler3` закрыт. Хотя, Sanos OS, имеющая слой совместимости с win32, имеет некоторые функции написанные заново, которые в каком-то смысле эквивалентны тем что в Windows ⁴⁷. Другие попытки реализации имеются в Wine⁴⁸ и ReactOS⁴⁹.

Если указатель *filter* ноль, *handler* указывает на код *finally*.

Во время исполнения, значение *previous try level* в стеке меняется, чтобы функция `_except_handler3` знала о текущем уровне вложенности, чтобы знать, какой элемент таблицы *scope table* использовать.

SEN3: пример с одним блоком *try/except*

```
#include <stdio.h>
#include <windows.h>
#include <excpt.h>
```

⁴⁷<http://go.yurichev.com/17058>

⁴⁸[GitHub](#)

⁴⁹<http://go.yurichev.com/17060>

6.5. WINDOWS NT

```
int main()
{
    int* p = NULL;
    __try
    {
        printf("hello #1!\n");
        *p = 13;    // causes an access violation exception;
        printf("hello #2!\n");
    }
    __except(GetExceptionCode()==EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION ?
        EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER : EXCEPTION_CONTINUE_SEARCH)
    {
        printf("access violation, can't recover\n");
    }
}
```

Листинг 6.27: MSVC 2003

```
$SG74605 DB    'hello #1!', 0aH, 00H
$SG74606 DB    'hello #2!', 0aH, 00H
$SG74608 DB    'access violation, can't recover', 0aH, 00H
_DATA    ENDS

; scope table:
CONST    SEGMENT
$T74622  DD     0fffffffH    ; previous try level
          DD     FLAT:$L74617 ; filter
          DD     FLAT:$L74618 ; handler
CONST    ENDS
_TEXT    SEGMENT
$T74621 = -32 ; size = 4
_p$ = -28    ; size = 4
__$SEHRec$ = -24 ; size = 24
_main    PROC NEAR
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    -1                ; previous try level
    push    OFFSET FLAT:$T74622 ; scope table
    push    OFFSET FLAT:__except_handler3 ; handler
    mov     eax, DWORD PTR fs:__except_list
    push    eax                ; prev
    mov     DWORD PTR fs:__except_list, esp
    add     esp, -16
; 3 registers to be saved:
    push    ebx
    push    esi
    push    edi
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp], esp
    mov     DWORD PTR _p$[ebp], 0
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; previous try level
    push    OFFSET FLAT:$SG74605 ; 'hello #1!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     eax, DWORD PTR _p$[ebp]
    mov     DWORD PTR [eax], 13
    push    OFFSET FLAT:$SG74606 ; 'hello #2!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -1 ; previous try level
    jmp     SHORT $L74616

; filter code:
$L74617:
$L74627:
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR [edx]
    mov     DWORD PTR $T74621[ebp], eax
```

6.5. WINDOWS NT

```
    mov     eax, DWORD PTR $T74621[ebp]
    sub     eax, -1073741819; c0000005H
    neg     eax
    sbb     eax, eax
    inc     eax
$L74619:
$L74626:
    ret     0

; handler code:
$L74618:
    mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
    push    OFFSET FLAT:$SG74608 ; 'access violation, can't recover'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -1 ; setting previous try level back to -1
$L74616:
    xor     eax, eax
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+8]
    mov     DWORD PTR fs:__except_list, ecx
    pop     edi
    pop     esi
    pop     ebx
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP
_TEXT     ENDS
END
```

Здесь мы видим, как структура SEH конструируется в стеке. *Scope table* расположена в сегменте CONST — действительно, эти поля не будут меняться. Интересно, как меняется переменная *previous try level*. Исходное значение 0xFFFFFFFF (−1). Момент, когда тело try открывается, обозначен инструкцией, записывающей 0 в эту переменную. В момент, когда тело try закрывается, −1 возвращается в нее назад. Мы также видим адреса кода фильтра и обработчика. Так мы можем легко увидеть структуру конструкций *try/except* в функции.

Так как код инициализации SEH-структур в прологе функций может быть общим для нескольких функций, иногда компилятор вставляет в прологе вызов функции `SEH_prolog()`, которая всё это делает. А код для деинициализации SEH в функции `SEH_epilog()`.

Запустим этот пример в [tracer](#):

```
tracer.exe -l:2.exe --dump-seh
```

Листинг 6.28: tracer.exe output

```
EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION at 2.exe!main+0x44 (0x401054) ExceptionInformation[0]=1
EAX=0x00000000 EBX=0x7efde000 ECX=0x0040cbc8 EDX=0x0008e3c8
ESI=0x00001db1 EDI=0x00000000 EBP=0x0018feac ESP=0x0018fe80
EIP=0x00401054
FLAGS=AF IF RF
* SEH frame at 0x18fe9c prev=0x18ff78 handler=0x401204 (2.exe!_except_handler3)
SEH3 frame. previous trylevel=0
scopetable entry[0]. previous try level=-1, filter=0x401070 (2.exe!main+0x60) handler=0x401088 ✓
↳ (2.exe!main+0x78)
* SEH frame at 0x18ff78 prev=0x18ffc4 handler=0x401204 (2.exe!_except_handler3)
SEH3 frame. previous trylevel=0
scopetable entry[0]. previous try level=-1, filter=0x401531 (2.exe!mainCRTStartup+0x18d) ✓
↳ handler=0x401545 (2.exe!mainCRTStartup+0x1a1)
* SEH frame at 0x18ffc4 prev=0x18ffe4 handler=0x771f71f5 (ntdll.dll!__except_handler4)
SEH4 frame. previous trylevel=0
SEH4 header:      GSCookieOffset=0xffffffff GSCookieXOROffset=0x0
                  EHCookieOffset=0xffffffff EHCookieXOROffset=0x0
scopetable entry[0]. previous try level=-2, filter=0x771f74d0 (ntdll.dll!✓
↳ __safe_se_handler_table+0x20) handler=0x771f90eb (ntdll.dll!_TppTerminateProcess@4+0x43)
* SEH frame at 0x18ffe4 prev=0xffffffff handler=0x77247428 (ntdll.dll!_FinalExceptionHandler@16✓
↳ )
```

Мы видим, что цепочка SEH состоит из 4-х обработчиков.

Первые два расположены в нашем примере. Два? Но ведь мы же сделали только один? Да, второй был установлен в **CRT**-функции `_mainCRTStartup()`, и судя по всему, он обрабатывает как минимум исключения связанные с **FPU**. Его код можно посмотреть в инсталляции MSVC: `crt/src/winxfldr.c`.

Третий это SEH4 в `ntdll.dll`, и четвертый это обработчик, не имеющий отношения к MSVC, расположенный в `ntdll.dll`, имеющий «говорящее» название функции.

Как видно, в цепочке присутствуют обработчики трех типов: один не связан с MSVC вообще (последний) и два связанных с MSVC: SEH3 и SEH4.

SEH3: пример с двумя блоками try/except

```
#include <stdio.h>
#include <windows.h>
#include <excpt.h>

int filter_user_exceptions (unsigned int code, struct _EXCEPTION_POINTERS *ep)
{
    printf("in filter. code=0x%08X\n", code);
    if (code == 0x112233)
    {
        printf("yes, that is our exception\n");
        return EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER;
    }
    else
    {
        printf("not our exception\n");
        return EXCEPTION_CONTINUE_SEARCH;
    }
};

int main()
{
    int* p = NULL;
    __try
    {
        __try
        {
            printf ("hello!\n");
            RaiseException (0x112233, 0, 0, NULL);
            printf ("0x112233 raised. now let's crash\n");
            *p = 13;    // causes an access violation exception;
        }
        __except(GetExceptionCode()==EXCEPTION_ACCESS_VIOLATION ?
            EXCEPTION_EXECUTE_HANDLER : EXCEPTION_CONTINUE_SEARCH)
        {
            printf("access violation, can't recover\n");
        }
    }
    __except(filter_user_exceptions(GetExceptionCode(), GetExceptionInformation()))
    {
        // the filter_user_exceptions() function answering to the question
        // "is this exception belongs to this block?"
        // if yes, do the follow:
        printf("user exception caught\n");
    }
}
```

Теперь здесь два блока try. Так что *scope table* теперь содержит два элемента, один элемент на каждый блок. *Previous try level* меняется вместе с тем, как исполнение доходит до очередного try-блока, либо выходит из него.

Листинг 6.29: MSVC 2003

```
$SG74606 DB    'in filter. code=0x%08X', 0aH, 00H
$SG74608 DB    'yes, that is our exception', 0aH, 00H
```

6.5. WINDOWS NT

```

$SG74610 DB 'not our exception', 0aH, 00H
$SG74617 DB 'hello!', 0aH, 00H
$SG74619 DB '0x112233 raised. now let's crash', 0aH, 00H
$SG74621 DB 'access violation, can't recover', 0aH, 00H
$SG74623 DB 'user exception caught', 0aH, 00H

_code$ = 8 ; size = 4
_ep$ = 12 ; size = 4
_filter_user_exceptions PROC NEAR
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _code$(ebp)
    push    eax
    push    OFFSET FLAT:$SG74606 ; 'in filter. code=0x%08X'
    call    _printf
    add     esp, 8
    cmp     DWORD PTR _code$(ebp), 1122867; 00112233H
    jne     $L74607
    push    OFFSET FLAT:$SG74608 ; 'yes, that is our exception'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     eax, 1
    jmp     SHORT $L74605
$L74607:
    push    OFFSET FLAT:$SG74610 ; 'not our exception'
    call    _printf
    add     esp, 4
    xor     eax, eax
$L74605:
    pop     ebp
    ret     0
_filter_user_exceptions ENDP

; scope table:
CONST SEGMENT
$T74644 DD 0fffffffH ; previous try level for outer block
        DD FLAT:$L74634 ; outer block filter
        DD FLAT:$L74635 ; outer block handler
        DD 00H ; previous try level for inner block
        DD FLAT:$L74638 ; inner block filter
        DD FLAT:$L74639 ; inner block handler
CONST ENDS

$T74643 = -36 ; size = 4
$T74642 = -32 ; size = 4
_p$ = -28 ; size = 4
__$SEHRec$ = -24 ; size = 24
_main PROC NEAR
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    -1 ; previous try level
    push    OFFSET FLAT:$T74644
    push    OFFSET FLAT:__except_handler3
    mov     eax, DWORD PTR fs:__except_list
    push    eax
    mov     DWORD PTR fs:__except_list, esp
    add     esp, -20
    push    ebx
    push    esi
    push    edi
    mov     DWORD PTR __SEHRec$(ebp), esp
    mov     DWORD PTR _p$(ebp), 0
    mov     DWORD PTR __SEHRec$(ebp+20), 0 ; outer try block entered. set previous try level to
    ↪ 0
    mov     DWORD PTR __SEHRec$(ebp+20), 1 ; inner try block entered. set previous try level to
    ↪ 1
    push    OFFSET FLAT:$SG74617 ; 'hello!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    push    0

```

6.5. WINDOWS NT

```
push    0
push    0
push    1122867      ; 00112233H
call    DWORD PTR __imp_RaiseException@16
push    OFFSET FLAT:$SG74619 ; '0x112233 raised. now let's crash'
call    _printf
add     esp, 4
mov     eax, DWORD PTR _p$[ebp]
mov     DWORD PTR [eax], 13
mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; inner try block exited. set previous try level ↗
↳ back to 0
jmp     SHORT $L74615

; inner block filter:
$L74638:
$L74650:
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR [edx]
    mov     DWORD PTR $T74643[ebp], eax
    mov     eax, DWORD PTR $T74643[ebp]
    sub     eax, -1073741819; c0000005H
    neg     eax
    sbb     eax, eax
    inc     eax
$L74640:
$L74648:
    ret     0

; inner block handler:
$L74639:
    mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
    push    OFFSET FLAT:$SG74621 ; 'access violation, can't recover'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; inner try block exited. set previous try level ↗
    ↳ back to 0

$L74615:
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -1 ; outer try block exited, set previous try level ↗
    ↳ back to -1
    jmp     SHORT $L74633

; outer block filter:
$L74634:
$L74651:
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR [edx]
    mov     DWORD PTR $T74642[ebp], eax
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
    push    ecx
    mov     edx, DWORD PTR $T74642[ebp]
    push    edx
    call    _filter_user_exceptions
    add     esp, 8
$L74636:
$L74649:
    ret     0

; outer block handler:
$L74635:
    mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
    push    OFFSET FLAT:$SG74623 ; 'user exception caught'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -1 ; both try blocks exited. set previous try level ↗
    ↳ back to -1
$L74633:
    xor     eax, eax
```

6.5. WINDOWS NT

```
mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+8]
mov     DWORD PTR fs:__except_list, ecx
pop     edi
pop     esi
pop     ebx
mov     esp, ebp
pop     ebp
ret     0
_main   ENDP
```

Если установить точку останова на функцию `printf()` вызываемую из обработчика, мы можем увидеть, что добавился еще один SEH-обработчик. Наверное, это еще какая-то дополнительная механика, скрытая внутри процесса обработки исключений. Тут мы также видим *scope table* состоящую из двух элементов.

```
tracer.exe -l:3.exe bpx=3.exe!printf --dump-seh
```

Листинг 6.30: tracer.exe output

```
(0) 3.exe!printf
EAX=0x0000001b EBX=0x00000000 ECX=0x0040cc58 EDX=0x0008e3c8
ESI=0x00000000 EDI=0x00000000 EBP=0x0018f840 ESP=0x0018f838
EIP=0x004011b6
FLAGS=PF ZF IF
* SEH frame at 0x18f88c prev=0x18fe9c handler=0x771db4ad (ntdll.dll!ExecuteHandler2@20+0x3a)
* SEH frame at 0x18fe9c prev=0x18ff78 handler=0x4012e0 (3.exe!_except_handler3)
SEH3 frame. previous trylevel=1
scopetable entry[0]. previous try level=-1, filter=0x401120 (3.exe!main+0xb0) handler=0x40113b ↗
↳ (3.exe!main+0xcb)
scopetable entry[1]. previous try level=0, filter=0x4010e8 (3.exe!main+0x78) handler=0x401100 ↗
↳ (3.exe!main+0x90)
* SEH frame at 0x18ff78 prev=0x18ffc4 handler=0x4012e0 (3.exe!_except_handler3)
SEH3 frame. previous trylevel=0
scopetable entry[0]. previous try level=-1, filter=0x40160d (3.exe!mainCRTStartup+0x18d) ↗
↳ handler=0x401621 (3.exe!mainCRTStartup+0x1a1)
* SEH frame at 0x18ffc4 prev=0x18ffe4 handler=0x771f71f5 (ntdll.dll!__except_handler4)
SEH4 frame. previous trylevel=0
SEH4 header:      GSCookieOffset=0xffffffff GSCookieXOROffset=0x0
                  EHCookieOffset=0xffffffff EHCookieXOROffset=0x0
scopetable entry[0]. previous try level=-2, filter=0x771f74d0 (ntdll.dll!↗
↳ __safe_se_handler_table+0x20) handler=0x771f90eb (ntdll.dll!_TppTerminateProcess@4+0x43)
* SEH frame at 0x18ffe4 prev=0xffffffff handler=0x77247428 (ntdll.dll!_FinalExceptionHandler@16↗
↳ )
```

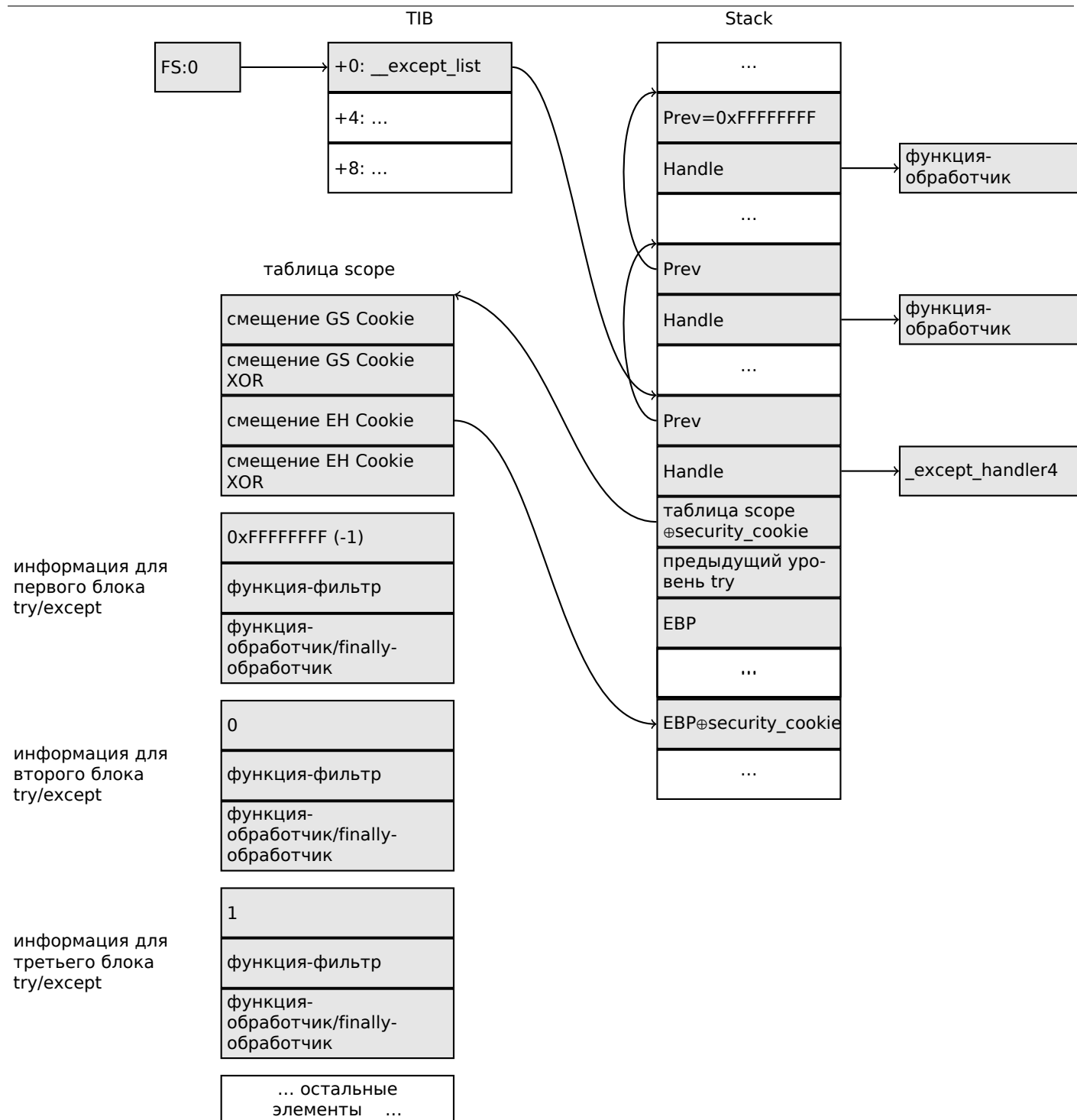
SEH4

Во время атаки переполнения буфера (1.20.2 (стр. 265)) адрес *scope table* может быть перезаписан, так что начиная с MSVC 2005, SEH3 был дополнен защитой от переполнения буфера, до SEH4. Указатель на *scope table* теперь [про-XOR-ен](#) с [security cookie](#).

Scope table расширена, теперь имеет заголовок, содержащий 2 указателя на *security cookies*. Каждый элемент имеет смещение внутри стека на другое значение: это адрес [фрейма](#) (EBP) также [про-XOR-енный](#) с `security_cookie` расположенный в стеке. Это значение будет прочитано во время обработки исключения и проверено на правильность.

Security cookie в стеке случайное каждый раз, так что атакующий, как мы надеемся, не может предсказать его.

Изначальное значение *previous try level* это -2 в SEH4 вместо -1.



Оба примера скомпилированные в MSVC 2012 с SEH4:

Листинг 6.31: MSVC 2012: one try block example

```
$SG85485 DB 'hello #1!', 0aH, 00H
$SG85486 DB 'hello #2!', 0aH, 00H
$SG85488 DB 'access violation, can't recover', 0aH, 00H

; scope table:
xdata$x SEGMENT
__sehtable$__main DD 0fffffffEH ; GS Cookie Offset
DD 00H ; GS Cookie XOR Offset
DD 0fffffffccH ; EH Cookie Offset
DD 00H ; EH Cookie XOR Offset
DD 0fffffffEH ; previous try level
DD FLAT:$LN12@main ; filter
DD FLAT:$LN8@main ; handler
xdata$x ENDS

$T2 = -36 ; size = 4
```

6.5. WINDOWS NT

```
_p$ = -32          ; size = 4
tv68 = -28         ; size = 4
__$SEHRec$ = -24  ; size = 24
_main PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    -2
    push    OFFSET __sehtable$_main
    push    OFFSET __except_handler4
    mov     eax, DWORD PTR fs:0
    push    eax
    add     esp, -20
    push    ebx
    push    esi
    push    edi
    mov     eax, DWORD PTR __security_cookie
    xor     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+16], eax ; xored pointer to scope table
    xor     eax, ebp
    push    eax ; ebp ^ security_cookie
    lea     eax, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+8] ; pointer to VC_EXCEPTION_REGISTRATION_RECORD
    mov     DWORD PTR fs:0, eax
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp], esp
    mov     DWORD PTR _p$[ebp], 0
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; previous try level
    push    OFFSET $SG85485 ; 'hello #1!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     eax, DWORD PTR _p$[ebp]
    mov     DWORD PTR [eax], 13
    push    OFFSET $SG85486 ; 'hello #2!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -2 ; previous try level
    jmp     SHORT $LN6@main

; filter:
$LN7@main:
$LN12@main:
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
    mov     edx, DWORD PTR [ecx]
    mov     eax, DWORD PTR [edx]
    mov     DWORD PTR $T2[ebp], eax
    cmp     DWORD PTR $T2[ebp], -1073741819 ; c0000005H
    jne     SHORT $LN4@main
    mov     DWORD PTR tv68[ebp], 1
    jmp     SHORT $LN5@main
$LN4@main:
    mov     DWORD PTR tv68[ebp], 0
$LN5@main:
    mov     eax, DWORD PTR tv68[ebp]
$LN9@main:
$LN11@main:
    ret     0

; handler:
$LN8@main:
    mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
    push    OFFSET $SG85488 ; 'access violation, can't recover'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -2 ; previous try level
$LN6@main:
    xor     eax, eax
    mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+8]
    mov     DWORD PTR fs:0, ecx
    pop     ecx
    pop     edi
    pop     esi
    pop     ebx
    mov     esp, ebp
```


6.5. WINDOWS NT

```

pop     ebp
ret     0
_main   ENDP

```

Листинг 6.32: MSVC 2012: two try blocks example

```

$SG85486 DB 'in filter. code=0x%08X', 0aH, 00H
$SG85488 DB 'yes, that is our exception', 0aH, 00H
$SG85490 DB 'not our exception', 0aH, 00H
$SG85497 DB 'hello!', 0aH, 00H
$SG85499 DB '0x112233 raised. now let's crash', 0aH, 00H
$SG85501 DB 'access violation, can't recover', 0aH, 00H
$SG85503 DB 'user exception caught', 0aH, 00H

xdata$x    SEGMENT
__sehtable$__main DD 0fffffffEH      ; GS Cookie Offset
                 DD 00H              ; GS Cookie XOR Offset
                 DD 0fffffffC8H      ; EH Cookie Offset
                 DD 00H              ; EH Cookie Offset
                 DD 0fffffffEH      ; previous try level for outer block
                 DD FLAT:$LN19@main ; outer block filter
                 DD FLAT:$LN9@main  ; outer block handler
                 DD 00H              ; previous try level for inner block
                 DD FLAT:$LN18@main ; inner block filter
                 DD FLAT:$LN13@main ; inner block handler

xdata$x    ENDS

$T2 = -40      ; size = 4
$T3 = -36      ; size = 4
_p$ = -32      ; size = 4
tv72 = -28     ; size = 4
__$SEHRec$ = -24 ; size = 24

_main      PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    push    -2 ; initial previous try level
    push    OFFSET __sehtable$__main
    push    OFFSET __except_handler4
    mov     eax, DWORD PTR fs:0
    push    eax ; prev
    add     esp, -24
    push    ebx
    push    esi
    push    edi
    mov     eax, DWORD PTR __security_cookie
    xor     DWORD PTR __SEHRec$[ebp+16], eax ; xored pointer to scope table
    xor     eax, ebp ; ebp ^ security_cookie
    push    eax
    lea     eax, DWORD PTR __SEHRec$[ebp+8] ; pointer to ↵
    ↵ VC_EXCEPTION_REGISTRATION_RECORD
    mov     DWORD PTR fs:0, eax
    mov     DWORD PTR __SEHRec$[ebp], esp
    mov     DWORD PTR _p$[ebp], 0
    mov     DWORD PTR __SEHRec$[ebp+20], 0 ; entering outer try block, setting previous try ↵
    ↵ level=0
    mov     DWORD PTR __SEHRec$[ebp+20], 1 ; entering inner try block, setting previous try ↵
    ↵ level=1
    push    OFFSET $SG85497 ; 'hello!'
    call    _printf
    add     esp, 4
    push    0
    push    0
    push    0
    push    1122867 ; 00112233H
    call    DWORD PTR __imp__RaiseException@16
    push    OFFSET $SG85499 ; '0x112233 raised. now let's crash'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     eax, DWORD PTR _p$[ebp]
    mov     DWORD PTR [eax], 13

```

6.5. WINDOWS NT

```
mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; exiting inner try block, set previous try level ↗
↳ back to 0
jmp     SHORT $LN2@main

; inner block filter:
$LN12@main:
$LN18@main:
mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
mov     edx, DWORD PTR [ecx]
mov     eax, DWORD PTR [edx]
mov     DWORD PTR $T3[ebp], eax
cmp     DWORD PTR $T3[ebp], -1073741819 ; c0000005H
jne     SHORT $LN5@main
mov     DWORD PTR tv72[ebp], 1
jmp     SHORT $LN6@main
$LN5@main:
mov     DWORD PTR tv72[ebp], 0
$LN6@main:
mov     eax, DWORD PTR tv72[ebp]
$LN14@main:
$LN16@main:
ret     0

; inner block handler:
$LN13@main:
mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
push    OFFSET $SG85501 ; 'access violation, can''t recover'
call    _printf
add     esp, 4
mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], 0 ; exiting inner try block, setting previous try ↗
↳ level back to 0
$LN2@main:
mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -2 ; exiting both blocks, setting previous try level ↗
↳ back to -2
jmp     SHORT $LN7@main

; outer block filter:
$LN8@main:
$LN19@main:
mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
mov     edx, DWORD PTR [ecx]
mov     eax, DWORD PTR [edx]
mov     DWORD PTR $T2[ebp], eax
mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+4]
push    ecx
mov     edx, DWORD PTR $T2[ebp]
push    edx
call    _filter_user_exceptions
add     esp, 8
$LN10@main:
$LN17@main:
ret     0

; outer block handler:
$LN9@main:
mov     esp, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp]
push    OFFSET $SG85503 ; 'user exception caught'
call    _printf
add     esp, 4
mov     DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+20], -2 ; exiting both blocks, setting previous try level ↗
↳ back to -2
$LN7@main:
xor     eax, eax
mov     ecx, DWORD PTR __$SEHRec$[ebp+8]
mov     DWORD PTR fs:0, ecx
pop     ecx
pop     edi
pop     esi
pop     ebx
mov     esp, ebp
```

6.5. WINDOWS NT

```
    pop     ebp
    ret     0
_main     ENDP

_code$ = 8 ; size = 4
_ep$ = 12 ; size = 4
_filter_user_exceptions PROC
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, DWORD PTR _code$[ebp]
    push    eax
    push    OFFSET $SG85486 ; 'in filter. code=0x%08X'
    call    _printf
    add     esp, 8
    cmp     DWORD PTR _code$[ebp], 1122867 ; 00112233H
    jne     SHORT $LN2@filter_use
    push    OFFSET $SG85488 ; 'yes, that is our exception'
    call    _printf
    add     esp, 4
    mov     eax, 1
    jmp     SHORT $LN3@filter_use
    jmp     SHORT $LN3@filter_use
$LN2@filter_use:
    push    OFFSET $SG85490 ; 'not our exception'
    call    _printf
    add     esp, 4
    xor     eax, eax
$LN3@filter_use:
    pop     ebp
    ret     0
_filter_user_exceptions ENDP
```

Вот значение *cookies*: *Cookie Offset* это разница между адресом записанного в стеке значения *EBP* и значения *EBP+security_cookie* в стеке. *Cookie XOR Offset* это дополнительная разница между значением *EBP+security_cookie* и тем что записано в стеке. Если это уравнение не верно, то процесс остановится из-за разрушения стека:

$$security_cookie \oplus (CookieXOROffset + address_of_saved_EBP) == stack[address_of_saved_EBP + CookieOffset]$$

Если *Cookie Offset* равно -2, это значит, что оно не присутствует.

Проверка *cookies* также реализована в моем [tracer](#), смотрите [GitHub](#) для деталей.

Возможность переключиться назад на SEH3 все еще присутствует в компиляторах после (и включая) MSVC 2005, нужно включить опцию /GS-, впрочем, CRT-код будет продолжать использовать SEH4.

Windows x64

Как видно, это не самая быстрая штука, устанавливать SEH-структуры в каждом прологе функции. Еще одна проблема производительности — это менять переменную *previous try level* много раз в течении исполнении функции. Так что в x64 всё сильно изменилось, теперь все указатели на try-блоки, функции фильтров и обработчиков, теперь записаны в другом PE-сегменте .pdata, откуда обработчик исключений [OC](#) берет всю информацию.

Вот два примера из предыдущей секции, скомпилированных для x64:

Листинг 6.33: MSVC 2012

```
$SG86276 DB      'hello #1!', 0aH, 00H
$SG86277 DB      'hello #2!', 0aH, 00H
$SG86279 DB      'access violation, can't recover', 0aH, 00H

pdata      SEGMENT
$pdata$main DD    imagerel $LN9
             DD    imagerel $LN9+61
             DD    imagerel $unwind$main
pdata      ENDS
pdata      SEGMENT
```

6.5. WINDOWS NT

```
$pdata$main$filt$0 DD imagerel main$filt$0
                    DD imagerel main$filt$0+32
                    DD imagerel $unwind$main$filt$0
pdata      ENDS
xdata      SEGMENT
$unwind$main DD 020609H
                    DD 030023206H
                    DD imagerel __C_specific_handler
                    DD 01H
                    DD imagerel $LN9+8
                    DD imagerel $LN9+40
                    DD imagerel main$filt$0
                    DD imagerel $LN9+40
$unwind$main$filt$0 DD 020601H
                    DD 050023206H
xdata      ENDS

_TEXT      SEGMENT
main       PROC
$LN9:
    push    rbx
    sub     rsp, 32
    xor     ebx, ebx
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86276 ; 'hello #1!'
    call    printf
    mov     DWORD PTR [rbx], 13
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86277 ; 'hello #2!'
    call    printf
    jmp     SHORT $LN8@main
$LN6@main:
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86279 ; 'access violation, can't recover'
    call    printf
    npad    1 ; align next label
$LN8@main:
    xor     eax, eax
    add     rsp, 32
    pop     rbx
    ret     0
main       ENDP
_TEXT      ENDS

text$x     SEGMENT
main$filt$0 PROC
    push    rbp
    sub     rsp, 32
    mov     rbp, rdx
$LN5@main$filt$:
    mov     rax, QWORD PTR [rcx]
    xor     ecx, ecx
    cmp     DWORD PTR [rax], -1073741819; c0000005H
    sete    cl
    mov     eax, ecx
$LN7@main$filt$:
    add     rsp, 32
    pop     rbp
    ret     0
    int     3
main$filt$0 ENDP
text$x     ENDS
```

Листинг 6.34: MSVC 2012

```
$SG86277 DB 'in filter. code=0x%08X', 0aH, 00H
$SG86279 DB 'yes, that is our exception', 0aH, 00H
$SG86281 DB 'not our exception', 0aH, 00H
$SG86288 DB 'hello!', 0aH, 00H
$SG86290 DB '0x112233 raised. now let's crash', 0aH, 00H
$SG86292 DB 'access violation, can't recover', 0aH, 00H
$SG86294 DB 'user exception caught', 0aH, 00H
```

6.5. WINDOWS NT

```
pdata    SEGMENT
$data$filter_user_exceptions DD imagerel $LN6
        DD      imagerel $LN6+73
        DD      imagerel $unwind$filter_user_exceptions
$data$main DD      imagerel $LN14
        DD      imagerel $LN14+95
        DD      imagerel $unwind$main
pdata    ENDS
pdata    SEGMENT
$data$main$filt$0 DD imagerel main$filt$0
        DD      imagerel main$filt$0+32
        DD      imagerel $unwind$main$filt$0
$data$main$filt$1 DD imagerel main$filt$1
        DD      imagerel main$filt$1+30
        DD      imagerel $unwind$main$filt$1
pdata    ENDS

xdata    SEGMENT
$unwind$filter_user_exceptions DD 020601H
        DD      030023206H
$unwind$main DD 020609H
        DD      030023206H
        DD      imagerel __C_specific_handler
        DD      02H
        DD      imagerel $LN14+8
        DD      imagerel $LN14+59
        DD      imagerel main$filt$0
        DD      imagerel $LN14+59
        DD      imagerel $LN14+8
        DD      imagerel $LN14+74
        DD      imagerel main$filt$1
        DD      imagerel $LN14+74
$unwind$main$filt$0 DD 020601H
        DD      050023206H
$unwind$main$filt$1 DD 020601H
        DD      050023206H
xdata    ENDS

_TEXT    SEGMENT
main     PROC
$LN14:
        push    rbx
        sub     rsp, 32
        xor     ebx, ebx
        lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86288 ; 'hello!'
        call    printf
        xor     r9d, r9d
        xor     r8d, r8d
        xor     edx, edx
        mov     ecx, 1122867 ; 00112233H
        call    QWORD PTR __imp_RaiseException
        lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86290 ; '0x112233 raised. now let's crash'
        call    printf
        mov     DWORD PTR [rbx], 13
        jmp     SHORT $LN13@main
$LN11@main:
        lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86292 ; 'access violation, can't recover'
        call    printf
        npad    1 ; align next label
$LN13@main:
        jmp     SHORT $LN9@main
$LN7@main:
        lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86294 ; 'user exception caught'
        call    printf
        npad    1 ; align next label
$LN9@main:
        xor     eax, eax
        add     rsp, 32
        pop     rbx
        ret     0
```

6.5. WINDOWS NT

```
main      ENDP

text$x    SEGMENT
main$filt$0 PROC
    push    rbp
    sub     rsp, 32
    mov     rbp, rdx
$LN10@main$filt$:
    mov     rax, QWORD PTR [rcx]
    xor     ecx, ecx
    cmp     DWORD PTR [rax], -1073741819; c0000005H
    sete    cl
    mov     eax, ecx
$LN12@main$filt$:
    add     rsp, 32
    pop     rbp
    ret     0
    int     3
main$filt$0 ENDP

main$filt$1 PROC
    push    rbp
    sub     rsp, 32
    mov     rbp, rdx
$LN6@main$filt$:
    mov     rax, QWORD PTR [rcx]
    mov     rdx, rcx
    mov     ecx, DWORD PTR [rax]
    call    filter_user_exceptions
    npad    1 ; align next label
$LN8@main$filt$:
    add     rsp, 32
    pop     rbp
    ret     0
    int     3
main$filt$1 ENDP
text$x    ENDS

_TEXT     SEGMENT
code$ = 48
ep$ = 56
filter_user_exceptions PROC
$LN6:
    push    rbx
    sub     rsp, 32
    mov     ebx, ecx
    mov     edx, ecx
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86277 ; 'in filter. code=0x%08X'
    call    printf
    cmp     ebx, 1122867; 00112233H
    jne     SHORT $LN2@filter_use
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86279 ; 'yes, that is our exception'
    call    printf
    mov     eax, 1
    add     rsp, 32
    pop     rbx
    ret     0
$LN2@filter_use:
    lea     rcx, OFFSET FLAT:$SG86281 ; 'not our exception'
    call    printf
    xor     eax, eax
    add     rsp, 32
    pop     rbx
    ret     0
filter_user_exceptions ENDP
_TEXT     ENDS
```

Смотрите [Igor Skochinsky, *Compiler Internals: Exceptions and RTTI*, (2012)]⁵⁰ для более детального

⁵⁰Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17294>

описания.

Помимо информации об исключениях, секция `.pdata` также содержит начала и концы почти всех функций, так что эту информацию можно использовать в каких-либо утилитах, предназначенных для автоматизации анализа.

Больше о SEH

[Matt Pietrek, *A Crash Course on the Depths of Win32™ Structured Exception Handling*, (1997)]⁵¹, [Igor Skochinsky, *Compiler Internals: Exceptions and RTTI*, (2012)]⁵².

6.5.4. Windows NT: Критические секции

Критические секции в любой ОС очень важны в мультитредовой среде, используются в основном для обеспечения гарантии что только один тред будет иметь доступ к данным в один момент времени, блокируя остальные треды и прерывания.

Вот как объявлена структура `CRITICAL_SECTION` объявлена в линейке OS Windows NT:

Листинг 6.35: (Windows Research Kernel v1.2) `public/sdk/inc/nturtl.h`

```
typedef struct _RTL_CRITICAL_SECTION {
    PRTL_CRITICAL_SECTION_DEBUG DebugInfo;

    //
    // The following three fields control entering and exiting the critical
    // section for the resource
    //

    LONG LockCount;
    LONG RecursionCount;
    HANDLE OwningThread;           // from the thread's ClientId->UniqueThread
    HANDLE LockSemaphore;
    ULONG_PTR SpinCount;          // force size on 64-bit systems when packed
} RTL_CRITICAL_SECTION, *PRTL_CRITICAL_SECTION;
```

Вот как работает функция `EnterCriticalSection()`:

Листинг 6.36: Windows 2008/ntdll.dll/x86 (begin)

```
_RtlEnterCriticalSection@4
var_C          = dword ptr -0Ch
var_8          = dword ptr -8
var_4          = dword ptr -4
arg_0          = dword ptr 8

        mov     edi, edi
        push    ebp
        mov     ebp, esp
        sub     esp, 0Ch
        push    esi
        push    edi
        mov     edi, [ebp+arg_0]
        lea     esi, [edi+4] ; LockCount
        mov     eax, esi
        lock btr dword ptr [eax], 0
        jnb     wait ; jump if CF=0

loc_7DE922DD:
        mov     eax, large fs:18h
        mov     ecx, [eax+24h]
        mov     [edi+0Ch], ecx
        mov     dword ptr [edi+8], 1
        pop     edi
```

⁵¹Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17293>

⁵²Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17294>

6.5. WINDOWS NT

```
xor    eax, eax
pop     esi
mov     esp, ebp
pop     ebp
retn    4
```

... skipped

Самая важная инструкция в этом фрагменте кода — это BTR (с префиксом LOCK): нулевой бит сохраняется в флаге CF и очищается в памяти. Это [атомарная операция](#), блокирующая доступ всех остальных процессоров к этому значению в памяти (обратите внимание на префикс LOCK перед инструкцией BTR).

Если бит в LockCount является 1, хорошо, сбросить его и вернуться из функции: мы в критической секции. Если нет — критическая секция уже занята другим тредом, тогда ждем. Ожидание там сделано через вызов WaitForSingleObject().

А вот как работает функция LeaveCriticalSection():

Листинг 6.37: Windows 2008/ntdll.dll/x86 (begin)

```
_RtlLeaveCriticalSection@4 proc near
```

```
arg_0      = dword ptr 8
```

```
mov     edi, edi
push    ebp
mov     ebp, esp
push    esi
mov     esi, [ebp+arg_0]
add     dword ptr [esi+8], 0FFFFFFFFh ; RecursionCount
jnz     short loc_7DE922B2
push    ebx
push    edi
lea     edi, [esi+4] ; LockCount
mov     dword ptr [esi+0Ch], 0
mov     ebx, 1
mov     eax, edi
lock xadd [eax], ebx
inc     ebx
cmp     ebx, 0FFFFFFFFh
jnz     loc_7DEA8EB7
```

```
loc_7DE922B0:
pop     edi
pop     ebx
```

```
loc_7DE922B2:
xor     eax, eax
pop     esi
pop     ebp
retn    4
```

... skipped

XADD это «обменять и прибавить». В данном случае, это значит прибавить 1 к значению в LockCount, при этом сохранить изначальное значение LockCount в регистре EBX. Впрочем, значение в EBX позже инкрементируется при помощи последующей инструкции INC EBX, и оно также будет равно обновленному значению LockCount.

Эта операция также атомарная, потому что также имеет префикс LOCK, что означает, что другие CPU или ядра CPU в системе не будут иметь доступа к этой ячейке памяти.

Префикс LOCK очень важен: два треда, каждый из которых работает на разных CPU или ядрах CPU, могут попытаться одновременно войти в критическую секцию, одновременно модифицируя значение в памяти, и это может привести к непредсказуемым результатам.

Глава 7

Инструменты

7.1. Дизассемблеры

7.1.1. IDA

Старая бесплатная версия доступна для скачивания ¹.

Краткий справочник горячих клавиш: [.6.1](#) (стр. [1019](#))

7.2. Отладчики

7.2.1. OllyDbg

Очень популярный отладчик пользовательской среды win32: ollydbg.de.

Краткий справочник горячих клавиш: [.6.2](#) (стр. [1020](#))

7.2.2. GDB

Не очень популярный отладчик у реверсеров, тем не менее, крайне удобный.

Некоторые команды: [.6.5](#) (стр. [1021](#)).

7.2.3. tracer

Автор часто использует *tracer* ² вместо отладчика.

Со временем, автор этих строк отказался использовать отладчик, потому что всё что ему нужно от него это иногда посмотреть какие-либо аргументы какой-либо функции во время исполнения или состояние регистров в определенном месте. Каждый раз загружать отладчик для этого это слишком, поэтому родилась очень простая утилита *tracer*. Она консольная, запускается из командной строки, позволяет перехватывать исполнение функций, ставить точки останова на произвольные места, смотреть состояние регистров, модифицировать их, итд.

Но для учебы очень полезно трассировать код руками в отладчике, наблюдать как меняются значения регистров (например, как минимум классический SoftICE, OllyDbg, WinDbg подсвечивают измененные регистры), флагов, данные, менять их самому, смотреть реакцию, итд.

¹hex-rays.com/products/ida/support/download_freeware.shtml

²yurichev.com

7.3. Трассировка системных вызовов

strace / dtruss

Позволяет показать, какие системные вызовы (syscalls(6.3 (стр. 726))) прямо сейчас вызывает процесс.

Например:

```
# strace df -h

...

access("/etc/ld.so.nohwcap", F_OK) = -1 ENOENT (No such file or directory)
open("/lib/i386-linux-gnu/libc.so.6", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
read(3, "\177ELF\1\1\1\0\0\0\0\0\0\0\0\0\3\0\3\0\1\0\0\0\220\232\1\0004\0\0\0"... , 512) = 512
fstat64(3, {st_mode=S_IFREG|0755, st_size=1770984, ...}) = 0
mmap2(NULL, 1780508, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0xb75b3000
```

В Mac OS X для этого же имеется dtruss.

В Cygwin также есть strace, впрочем, насколько известно, он показывает результаты только для .exe-файлов скомпилированных для среды самого cygwin.

7.4. Декомпиляторы

Пока существует только один публично доступный декомпилятор в Си высокого качества: Hex-Rays: hex-rays.com/products/decompiler/

Читайте больше о нем: 10.8 (стр. 980).

7.5. Прочие инструменты

- Microsoft Visual Studio Express³: Усеченная бесплатная версия Visual Studio, пригодная для простых экспериментов. Некоторые полезные опции: .6.3 (стр. 1020).
- Hiew⁴: для мелкой модификации кода в исполняемых файлах.
- binary grep: небольшая утилита для поиска констант (либо просто последовательности байт) в большом количестве файлов, включая неисполняемые: [GitHub](https://github.com/DennisYurichev/progcalc). В rada.re имеется также rafind2 для тех же целей.

7.5.1. Калькуляторы

Хороший калькулятор для нужд реверс-инженера должен поддерживать как минимум десятичную, шестнадцатеричную и двоичную системы счисления, а также многие важные операции как “исключающее ИЛИ” и сдвиги.

- В IDA есть встроенный калькулятор (“?”).
- В rada.re есть *rax2*.
- <https://github.com/DennisYurichev/progcalc>
- Стандартный калькулятор в Windows имеет режим *программистского калькулятора*.

³visualstudio.com/en-US/products/visual-studio-express-vs

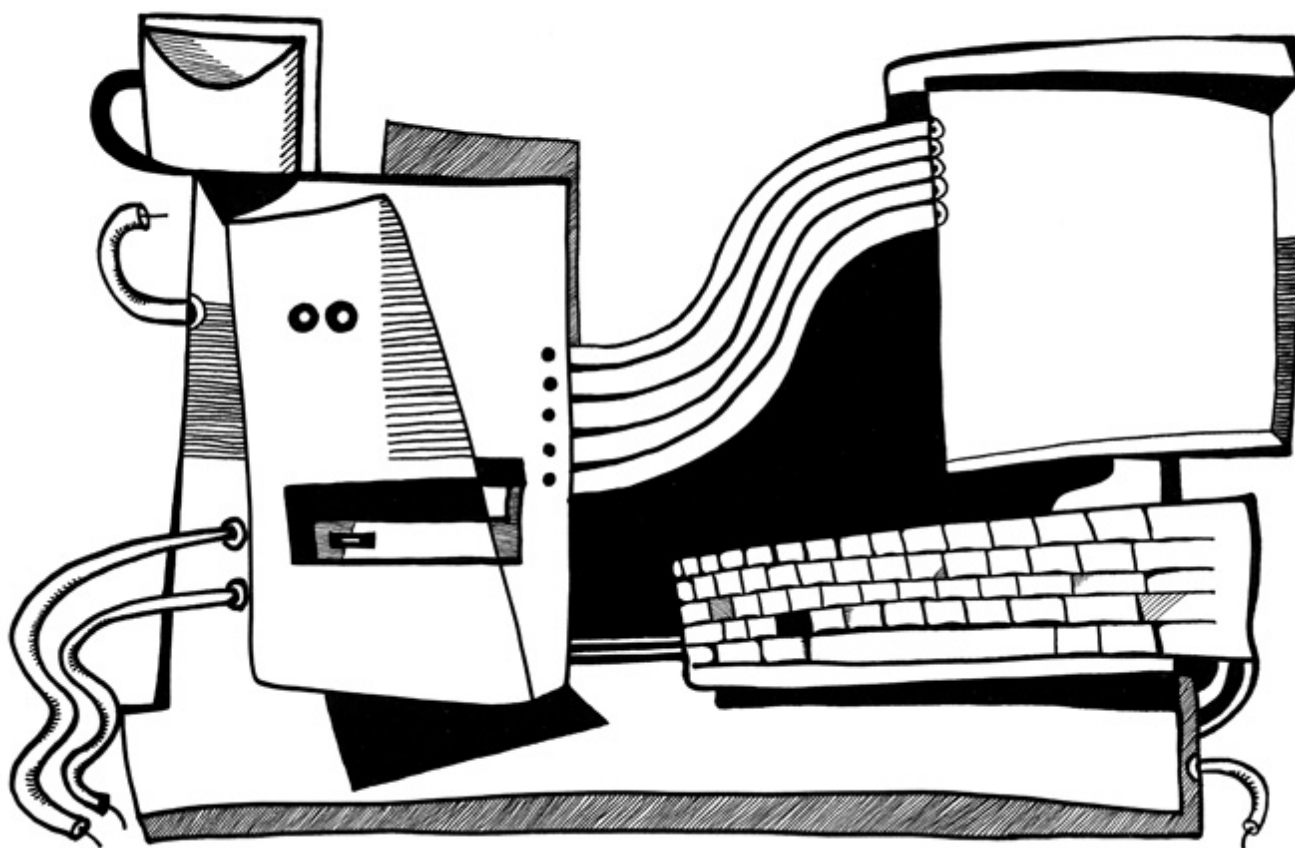
⁴hiew.ru

7.6. Чего-то здесь не хватает?

Если вы знаете о хорошем инструменте, которого не хватает здесь в этом списке, пожалуйста сообщите мне об этом:
dennis@yurichev.com.

Глава 8

Примеры из практики



Вместо эпиграфа:

Сейбел: Как вы читаете исходный код? Ведь непросто читать даже то, что написано на известном вам языке программирования.

Кнут: Но это действительно того стоит, если говорить о том, что выстраивается в вашей голове. Как я читаю код? Когда-то была машина под названием Bunker Ramo 300, и кто-то мне однажды сказал, что компилятор Фортрана для этой машины работает чрезвычайно быстро, но никто не понимает почему. Я заполучил копию его исходного кода. У меня не было руководства по этому компьютеру, поэтому я даже не был уверен, какой это был машинный язык.

Но я взялся за это, посчитав интересной задачей. Я нашел BEGIN и начал разбираться. В кодах операций есть ряд двухбуквенных мнемоник, поэтому я мог начать анализировать: “Возможно, это инструкция загрузки, а это, возможно, инструкция перехода”. Кроме того, я знал, что это компилятор Фортрана, и иногда он обращался к седьмой колонке перфокарты - там он мог определить, комментарий это или нет.

Спустя три часа я кое-что понял об этом компьютере. Затем обнаружил огромные таблицы ветвлений. То есть это была своего рода головоломка, и я продолжал рисовать небольшие схемы, как разведчик, пытающийся разгадать секретный шифр. Но я знал, что программа работает, и знал, что это компилятор Фортрана — это не был шифр, в том смысле что программа не была написана с сознательной целью запутать. Все дело было в коде, поскольку у меня не было руководства по компьютеру.

В конце концов мне удалось выяснить, почему компилятор работал так быстро. К сожалению, дело было не в гениальных алгоритмах - просто там применялись методы неструктурированного программирования и код был максимально оптимизирован вручную.

По большому счету, именно так и должна решаться головоломка: составляются таблицы, схемы, информация извлекается по крупицам, выдвигается гипотеза. В общем, когда я читаю техническую работу, это такая же сложная задача. Я пытаюсь влезть в голову автора, понять, в чем состоял его замысел. Чем больше вы учитесь читать вещи, написанные другими, тем более способны изобретать что-то свое - так мне кажется.

(Сейбел Питер — Кодеры за работой. Размышления о ремесле программиста)

8.1. Шутка с task manager (Windows Vista)

Посмотрим, сможем ли мы немного хакнуть Task Manager, чтобы он находил больше ядер в CPU, чем присутствует.

В начале задумаемся, откуда Task Manager знает количество ядер?

В win32 имеется функция `GetSystemInfo()`, при помощи которой можно узнать.

Но она не импортируется в `taskmgr.exe`. Есть еще одна в [NTAPI](#), `NtQuerySystemInformation()`, которая используется в `taskmgr.exe` в ряде мест.

Чтобы узнать количество ядер, нужно вызвать эту функцию с константной `SystemBasicInformation` в первом аргументе (а это ноль

¹).

Второй аргумент должен указывать на буфер, который примет всю информацию.

Так что нам нужно найти все вызовы функции `NtQuerySystemInformation(0, ?, ?, ?)`.

Откроем `taskmgr.exe` в IDA. Что всегда хорошо с исполняемыми файлами от Microsoft, это то что IDA может скачать соответствующий [PDB](#)-файл именно для этого файла и добавить все имена функций.

Видимо, Task Manager написан на Си++ и некоторые функции и классы имеют говорящие за себя имена.

Тут есть классы `CAdapter`, `CNetPage`, `CPerfPage`, `CProcInfo`, `CProcPage`, `CSvcPage`, `CTaskPage`, `CUserPage`. Должно быть, каждый класс соответствует каждой вкладке в Task Manager.

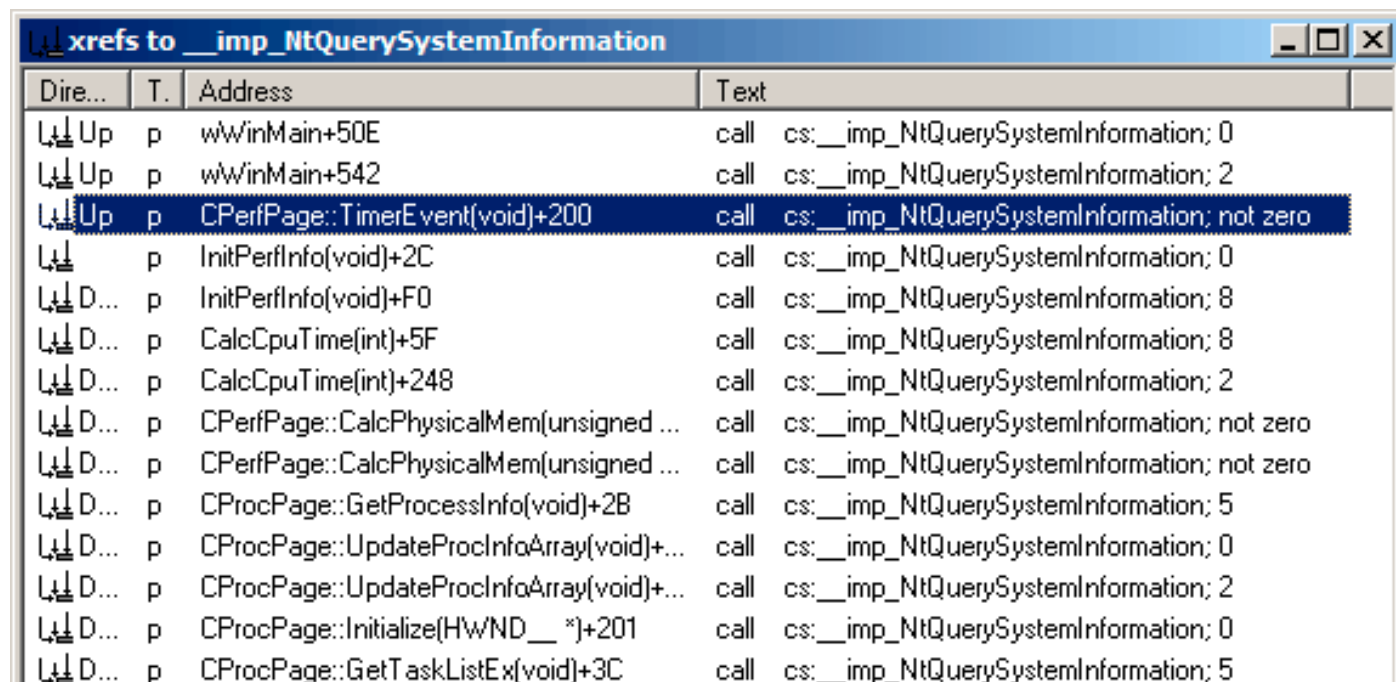
¹[MSDN](#)

8.1. ШУТКА С TASK MANAGER (WINDOWS VISTA)

Пройдемся по всем вызовам и добавим комментарий с числом, передающимся как первый аргумент.

В некоторых местах напишем «not zero», потому что значение в тех местах однозначно не ноль, но что-то другое (больше об этом во второй части главы).

А мы все-таки ищем ноль передаваемый как аргумент.



Dire...	T.	Address	Text
Up	p	wWinMain+50E	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 0
Up	p	wWinMain+542	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 2
Up	p	CPerfPage::TimerEvent(void)+200	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; not zero
	p	InitPerfInfo(void)+2C	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 0
D...	p	InitPerfInfo(void)+F0	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 8
D...	p	CalcCpuTime(int)+5F	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 8
D...	p	CalcCpuTime(int)+248	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 2
D...	p	CPerfPage::CalcPhysicalMem(unsigned ...	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; not zero
D...	p	CPerfPage::CalcPhysicalMem(unsigned ...	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; not zero
D...	p	CProcPage::GetProcessInfo(void)+2B	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 5
D...	p	CProcPage::UpdateProcInfoArray(void)+...	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 0
D...	p	CProcPage::UpdateProcInfoArray(void)+...	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 2
D...	p	CProcPage::Initialize(HWND__*)+201	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 0
D...	p	CProcPage::GetTaskListEx(void)+3C	call cs:__imp_NtQuerySystemInformation; 5

Рис. 8.1: IDA: вызовы функции NtQuerySystemInformation()

Да, имена действительно говорящие сами за себя.

Когда мы внимательно изучим каждое место, где вызывается NtQuerySystemInformation(0, ?, ?, ?), то быстро найдем то что нужно в функции InitPerfInfo():

Листинг 8.1: taskmgr.exe (Windows Vista)

```
.text:10000B4B3      xor     r9d, r9d
.text:10000B4B6      lea     rdx, [rsp+0C78h+var_C58] ; buffer
.text:10000B4BB      xor     ecx, ecx
.text:10000B4BD      lea     ebp, [r9+40h]
.text:10000B4C1      mov     r8d, ebp
.text:10000B4C4      call   cs:__imp_NtQuerySystemInformation ; 0
.text:10000B4CA      xor     ebx, ebx
.text:10000B4CC      cmp     eax, ebx
.text:10000B4CE      jge     short loc_10000B4D7
.text:10000B4D0
.text:10000B4D0 loc_10000B4D0:                                     ; CODE XREF: InitPerfInfo(void)+97
                                                    ; InitPerfInfo(void)+AF
.text:10000B4D0      xor     al, al
.text:10000B4D2      jmp     loc_10000B5EA
.text:10000B4D7 ; -----
.text:10000B4D7 loc_10000B4D7:                                     ; CODE XREF: InitPerfInfo(void)+36
.text:10000B4D7      mov     eax, [rsp+0C78h+var_C50]
.text:10000B4DB      mov     esi, ebx
.text:10000B4DD      mov     r12d, 3E80h
.text:10000B4E3      mov     cs:?g_PageSize@@3KA, eax ; ulong g_PageSize
.text:10000B4E9      shr     eax, 0Ah
.text:10000B4EC      lea     r13, __ImageBase
.text:10000B4F3      imul    eax, [rsp+0C78h+var_C4C]
.text:10000B4F8      cmp     [rsp+0C78h+var_C20], bpl
.text:10000B4FD      mov     cs:?g_MEMMax@@3_JA, rax ; __int64 g_MEMMax
.text:10000B504      movzx   eax, [rsp+0C78h+var_C20] ; number of CPUs
.text:10000B509      cmova   eax, ebp
```

8.1. ШУТКА С TASK MANAGER (WINDOWS VISTA)

```
.text:10000B50C      cmp     al, bl
.text:10000B50E      mov     cs:?g_cProcessors@@3EA, al ; uchar g_cProcessors
```

`g_cProcessors` это глобальная переменная и это имя присвоено IDA в соответствии с PDB-файлом, скачанным с сервера символов Microsoft.

Байт берется из `var_C20`. И `var_C58` передается в `NtQuerySystemInformation()` как указатель на принимающий буфер. Разница между `0xC20` и `0xC58` это `0x38` (56). Посмотрим на формат структуры, который можно найти в MSDN:

```
typedef struct _SYSTEM_BASIC_INFORMATION {
    BYTE Reserved1[24];
    PVOID Reserved2[4];
    CCHAR NumberOfProcessors;
} SYSTEM_BASIC_INFORMATION;
```

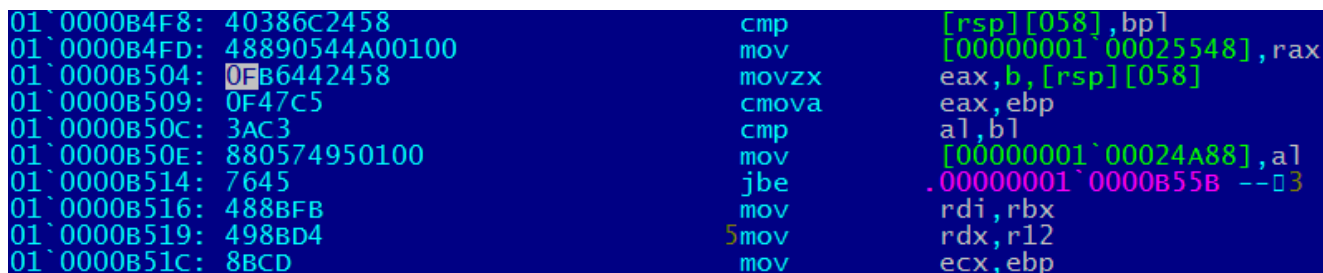
Это система x64, так что каждый `PVOID` занимает здесь 8 байт.

Так что все *reserved*-поля занимают $24 + 4 * 8 = 56$.

О да, это значит, что `var_C20` в локальном стеке это именно поле `NumberOfProcessors` структуры `SYSTEM_BASIC_INFORMATION`.

Проверим нашу догадку. Скопируем `taskmgr.exe` из `C:\Windows\System32` в какую-нибудь другую папку (чтобы *Windows Resource Protection* не пыталась восстанавливать измененный `taskmgr.exe`).

Откроем его в Hiew и найдем это место:

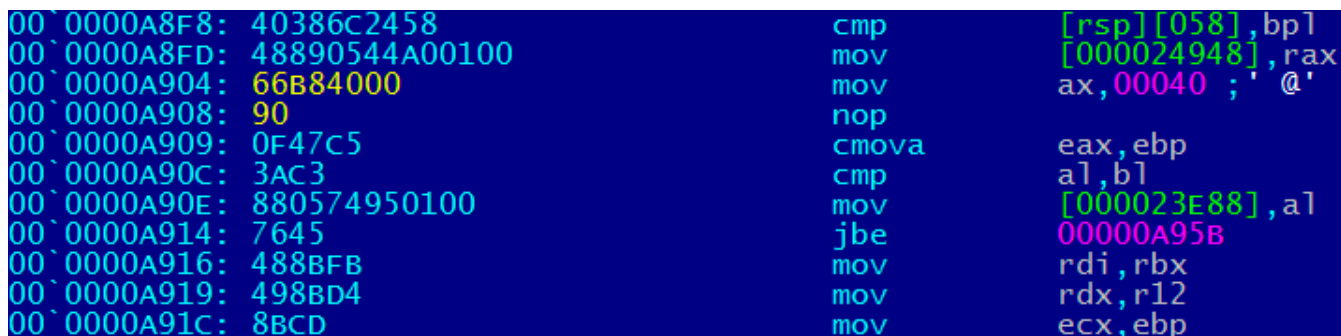


```
01`0000B4F8: 40386C2458      cmp     [rsp][058],bp1
01`0000B4FD: 48890544A00100  mov     [00000001`00025548],rax
01`0000B504: 0FB6442458      movzx   eax,b,[rsp][058]
01`0000B509: 0F47C5          cmova   eax,ebp
01`0000B50C: 3AC3           cmp     al,bl
01`0000B50E: 880574950100    mov     [00000001`00024A88],al
01`0000B514: 7645           jbe     .00000001`0000B55B --□3
01`0000B516: 488BFB         mov     rdi,rbx
01`0000B519: 498BD4         5mov    rdx,r12
01`0000B51C: 8BCD           mov     ecx,ebp
```

Рис. 8.2: Hiew: найдем это место

Заменяем инструкцию `MOVZX` на нашу.

Сделаем вид что у нас 64 ядра процессора. Добавим дополнительную инструкцию `NOP` (потому что наша инструкция короче чем та что там сейчас):



```
00`0000A8F8: 40386C2458      cmp     [rsp][058],bp1
00`0000A8FD: 48890544A00100  mov     [000024948],rax
00`0000A904: 66B84000      mov     ax,00040 ; '@'
00`0000A908: 90             nop
00`0000A909: 0F47C5          cmova   eax,ebp
00`0000A90C: 3AC3           cmp     al,bl
00`0000A90E: 880574950100    mov     [000023E88],al
00`0000A914: 7645           jbe     0000A95B
00`0000A916: 488BFB         mov     rdi,rbx
00`0000A919: 498BD4         mov     rdx,r12
00`0000A91C: 8BCD           mov     ecx,ebp
```

Рис. 8.3: Hiew: меняем инструкцию

И это работает! Конечно же, данные в графиках неправильные. Иногда, Task Manager даже показывает общую загрузку CPU более 100%.

8.1. ШУТКА С TASK MANAGER (WINDOWS VISTA)

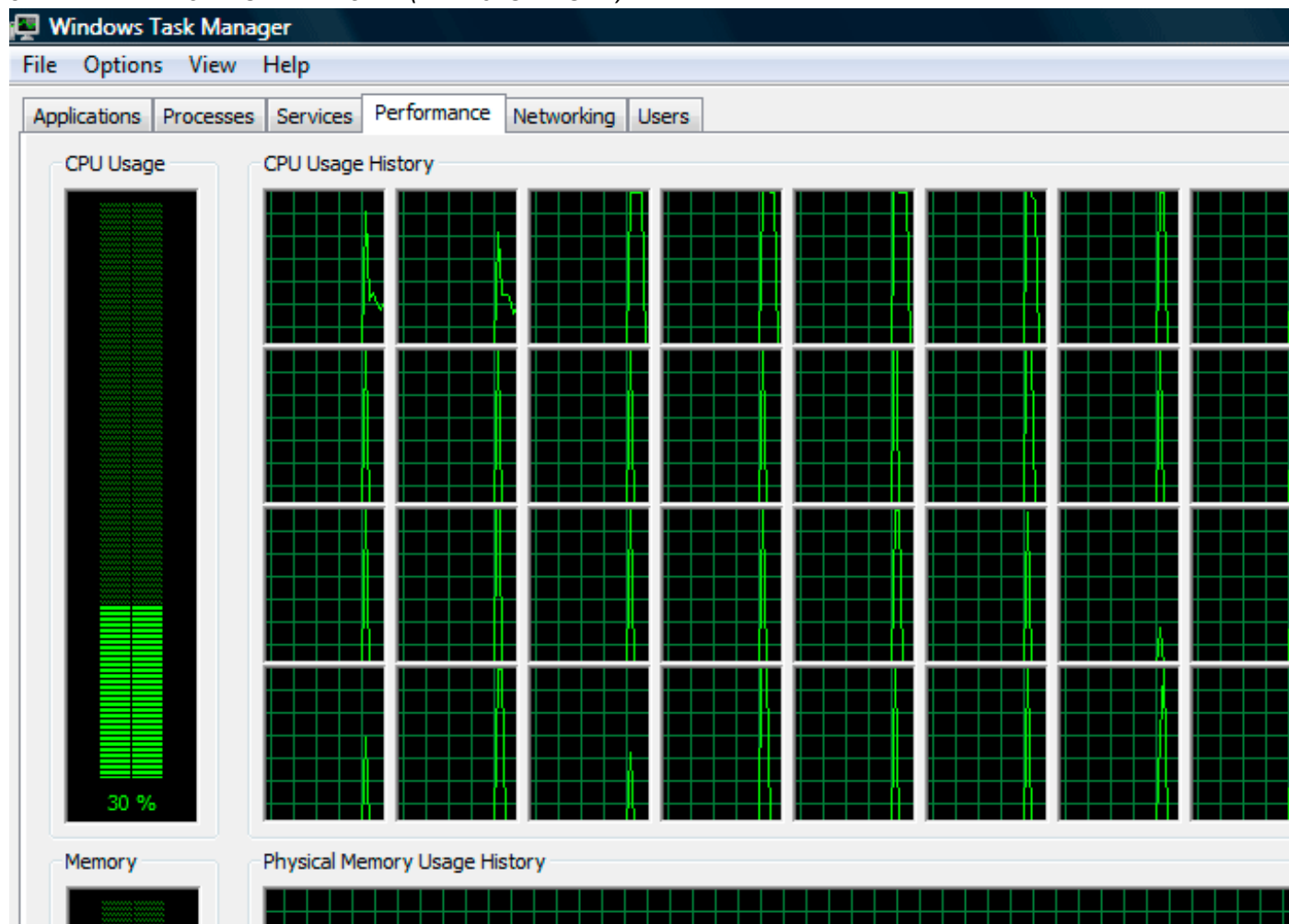


Рис. 8.4: Обманутый Windows Task Manager

Самое большое число, при котором Task Manager не падает, это 64.

Должно быть, Task Manager в Windows Vista не тестировался на компьютерах с большим количеством ядер.

И, наверное, там есть внутри какие-то статичные структуры данных, ограниченные до 64-х ядер.

8.1.1. Использование LEA для загрузки значений

Иногда, LEA используется в taskmgr.exe вместо MOV для установки первого аргумента NtQuerySystemInformation():

Листинг 8.2: taskmgr.exe (Windows Vista)

```
xor     r9d, r9d
div     dword ptr [rsp+4C8h+WndClass.lpfWndProc]
lea     rdx, [rsp+4C8h+VersionInformation]
lea     ecx, [r9+2]      ; put 2 to ECX
mov     r8d, 138h
mov     ebx, eax
; ECX=SystemPerformanceInformation
call    cs:__imp_NtQuerySystemInformation ; 2

...

mov     r8d, 30h
lea     r9, [rsp+298h+var_268]
lea     rdx, [rsp+298h+var_258]
lea     ecx, [r8-2Dh]    ; put 3 to ECX
; ECX=SystemTimeOfDayInformation
```


8.1. ШУТКА С TASK MANAGER (WINDOWS VISTA)

```
call    cs:__imp_NtQuerySystemInformation ; not zero

...

mov     rbp, [rsi+8]
mov     r8d, 20h
lea     r9, [rsp+98h+arg_0]
lea     rdx, [rsp+98h+var_78]
lea     ecx, [r8+2Fh] ; put 0x4F to ECX
mov     [rsp+98h+var_60], ebx
mov     [rsp+98h+var_68], rbp
; ECX=SystemSuperfetchInformation
call    cs:__imp_NtQuerySystemInformation ; not zero
```

Должно быть, [MSVC](#) сделал так, потому что код инструкции LEA короче чем MOV REG, 5 (было бы 5 байт вместо 4).

LEA со смещением в пределах -128..127 (смещение будет занимать 1 байт в опкоде) с 32-битными регистрами даже еще короче (из-за отсутствия REX-префикса) — 3 байта.

Еще один пример подобного: [6.1.5](#) (стр. [718](#)).

8.2. Шутка с игрой Color Lines

Это очень популярная игра с большим количеством реализаций. Возьмем одну из них, с названием BallTriX, от 1997, доступную бесплатно на <http://go.yurichev.com/17311>². Вот как она выглядит:

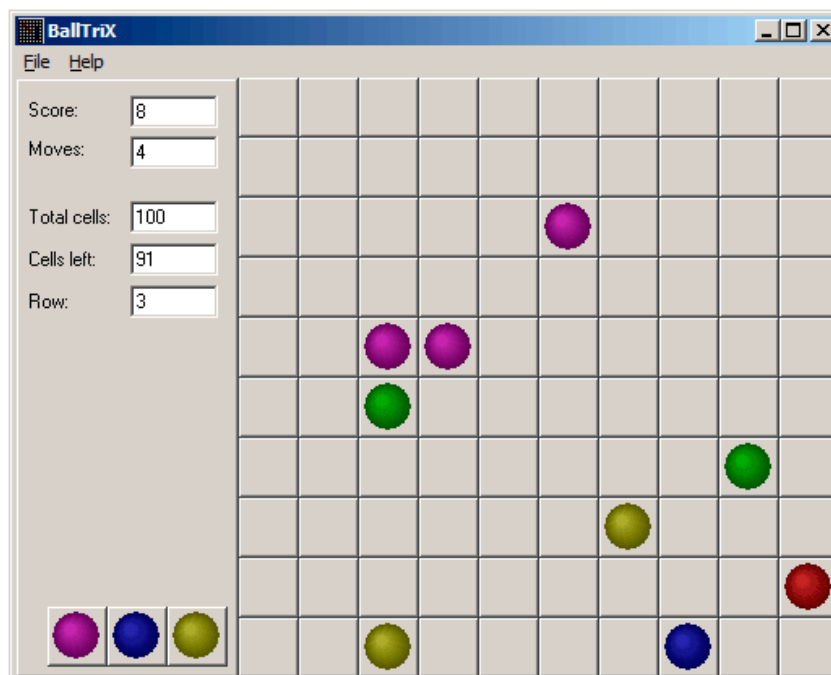


Рис. 8.5: Обычный вид игры

²Или на <http://go.yurichev.com/17365> или <http://go.yurichev.com/17366>.

8.2. ШУТКА С ИГРОЙ COLOR LINES

Посмотрим, сможем ли мы найти генератор псевдослучайных чисел и сделать с ним одну шутку.

IDA быстро распознает стандартную функцию `_rand` в `balltrix.exe` по адресу `0x00403DA0`. IDA также показывает, что она вызывается только из одного места:

```
.text:00402C9C sub_402C9C      proc near          ; CODE XREF: sub_402ACA+52
.text:00402C9C                                     ; sub_402ACA+64 ...
.text:00402C9C
.text:00402C9C arg_0          = dword ptr 8
.text:00402C9C
.text:00402C9C      push    ebp
.text:00402C9D      mov     ebp, esp
.text:00402C9F      push    ebx
.text:00402CA0      push    esi
.text:00402CA1      push    edi
.text:00402CA2      mov     eax, dword_40D430
.text:00402CA7      imul    eax, dword_40D440
.text:00402CAE      add     eax, dword_40D5C8
.text:00402CB4      mov     ecx, 32000
.text:00402CB9      cdq
.text:00402CBA      idiv    ecx
.text:00402CBC      mov     dword_40D440, edx
.text:00402CC2      call    _rand
.text:00402CC7      cdq
.text:00402CC8      idiv    [ebp+arg_0]
.text:00402CCB      mov     dword_40D430, edx
.text:00402CD1      mov     eax, dword_40D430
.text:00402CD6      jmp     $+5
.text:00402CDB      pop     edi
.text:00402CDC      pop     esi
.text:00402CDD      pop     ebx
.text:00402CDE      leave
.text:00402CDF      retn
.text:00402CDF sub_402C9C      endp
```

Назовем её «random». Пока не будем концентрироваться на самом коде функции.

Эта функция вызывается из трех мест.

Вот первые два:

```
.text:00402B16      mov     eax, dword_40C03C ; 10 here
.text:00402B1B      push    eax
.text:00402B1C      call    random
.text:00402B21      add     esp, 4
.text:00402B24      inc     eax
.text:00402B25      mov     [ebp+var_C], eax
.text:00402B28      mov     eax, dword_40C040 ; 10 here
.text:00402B2D      push    eax
.text:00402B2E      call    random
.text:00402B33      add     esp, 4
```

Вот третье:

```
.text:00402BBB      mov     eax, dword_40C058 ; 5 here
.text:00402BC0      push    eax
.text:00402BC1      call    random
.text:00402BC6      add     esp, 4
.text:00402BC9      inc     eax
```

Так что у функции только один аргумент. 10 передается в первых двух случаях и 5 в третьем.

Мы также можем заметить, что размер доски 10*10 и здесь 5 возможных цветов. Это оно! Стандартная функция `rand()` возвращает число в пределах `0..0x7FFF` и это неудобно, так что многие программисты пишут свою функцию, возвращающую случайное число в некоторых заданных пределах. В нашем случае, предел это `0..n - 1` и `n` передается как единственный аргумент в функцию. Мы можем быстро проверить это в отладчике.

Сделаем так, чтобы третий вызов функции всегда возвращал ноль. В начале заменим три инструкции (PUSH/CALL/ADD) на `NOPS`. Затем добавим инструкцию `XOR EAX, EAX`, для очистки регистра EAX.

8.2. ШУТКА С ИГРОЙ COLOR LINES

.00402BB8: 83C410	add	esp,010
.00402BBB: A158C04000	mov	eax,[00040C058]
.00402BC0: 31C0	xor	eax, eax
.00402BC2: 90	nop	
.00402BC3: 90	nop	
.00402BC4: 90	nop	
.00402BC5: 90	nop	
.00402BC6: 90	nop	
.00402BC7: 90	nop	
.00402BC8: 90	nop	
.00402BC9: 40	inc	eax
.00402BCA: 8B4DF8	mov	ecx,[ebp][-8]
.00402BCD: 8D0C49	lea	ecx,[ecx][ecx]*2
.00402BD0: 8B15F4D54000	mov	edx,[00040D5F4]

Что мы сделали, это заменили вызов функции `random()` на код, всегда возвращающий ноль.

Теперь запустим:

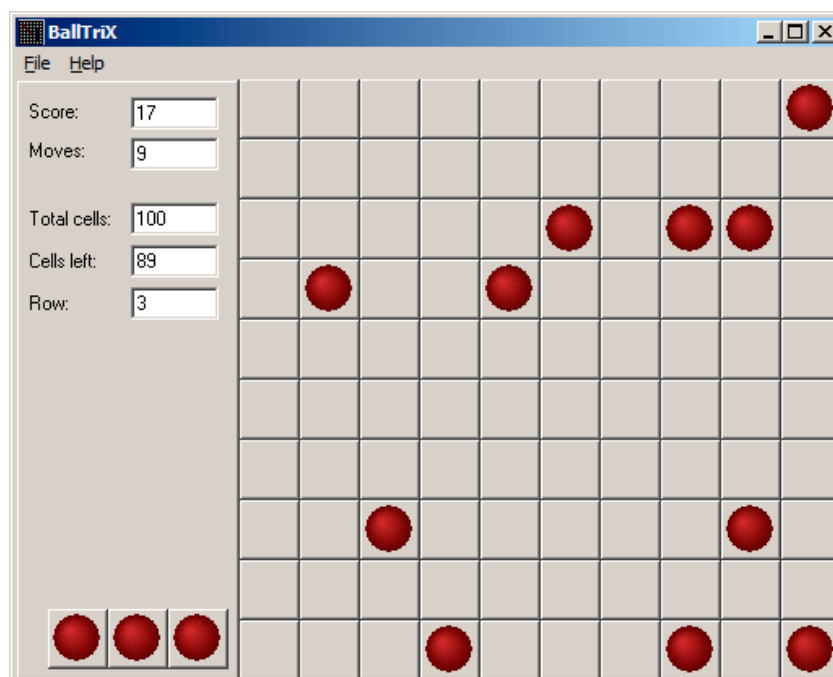


Рис. 8.6: Шутка сработала

О да, это работает³.

Но почему аргументы функции `random()` это глобальные переменные? Это просто потому что в настройках игры можно изменять размер доски, так что эти параметры не фиксированы. 10 и 5 это просто значения по умолчанию.

8.3. Сапёр (Windows XP)

Для тех, кто не очень хорошо играет в Сапёра (Minesweeper), можно попробовать найти все скрытые мины в отладчике.

Как мы знаем, Сапёр располагает мины случайным образом, так что там должен быть генератор случайных чисел или вызов стандартной функции Си `rand()`.

Вот что хорошо в реверсинге продуктов от Microsoft, так это то что часто есть PDB-файл со всеми символами (имена функций, и т.д.).

Когда мы загружаем `winmine.exe` в IDA, она скачивает PDB файл именно для этого исполняемого файла и добавляет все имена.

И вот оно, только один вызов `rand()` в этой функции:

```
.text:01003940 ; __stdcall Rnd(x)
.text:01003940 _Rnd@4      proc near          ; CODE XREF: StartGame()+53
.text:01003940                                     ; StartGame()+61
.text:01003940
.text:01003940 arg_0          = dword ptr 4
.text:01003940
.text:01003940 call     ds:__imp__rand
.text:01003946 cdq
.text:01003947 idiv     [esp+arg_0]
.text:0100394B mov     eax, edx
.text:0100394D retn     4
.text:0100394D _Rnd@4      endp
```

Так её назвала IDA и это было имя данное ей разработчиками Сапёра.

³Автор этой книги однажды сделал это как шутку для его сотрудников, в надежде что они перестанут играть. Надежды не оправдались.

8.3. САПЁР (WINDOWS XP)

Функция очень простая:

```
int Rnd(int limit)
{
    return rand() % limit;
};
```

(В PDB-файле не было имени «limit»; это мы назвали этот аргумент так, вручную.)

Так что она возвращает случайное число в пределах от нуля до заданного предела.

Rnd() вызывается только из одного места, это функция с названием StartGame(), и как видно, это именно тот код, что расставляет мины:

```
.text:010036C7      push    _xBoxMac
.text:010036CD      call    _Rnd@4          ; Rnd(x)
.text:010036D2      push    _yBoxMac
.text:010036D8      mov     esi, eax
.text:010036DA      inc     esi
.text:010036DB      call    _Rnd@4          ; Rnd(x)
.text:010036E0      inc     eax
.text:010036E1      mov     ecx, eax
.text:010036E3      shl     ecx, 5           ; ECX=ECX*32
.text:010036E6      test    _rgBlk[ecx+esi], 80h
.text:010036EE      jnz     short loc_10036C7
.text:010036F0      shl     eax, 5           ; EAX=EAX*32
.text:010036F3      lea     eax, _rgBlk[eax+esi]
.text:010036FA      or      byte ptr [eax], 80h
.text:010036FD      dec     _cBombStart
.text:01003703      jnz     short loc_10036C7
```

Сапёр позволяет задать размеры доски, так что X (xBoxMac) и Y (yBoxMac) это глобальные переменные.

Они передаются в Rnd() и генерируются случайные координаты. Мина устанавливается инструкцией OR на 0x010036FA. И если она уже была установлена до этого (это возможно, если пара функций Rnd() сгенерирует пару, которая уже была сгенерирована), тогда TEST и JNZ на 0x010036E6 перейдет на повторную генерацию пары.

cBombStart это глобальная переменная, содержащая количество мин. Так что это цикл.

Ширина двумерного массива это 32 (мы можем это вывести, глядя на инструкцию SHL, которая умножает одну из координат на 32).

Размер глобального массива rgBlk можно легко узнать по разнице между меткой rgBlk в сегменте данных и следующей известной меткой. Это 0x360 (864):

```
.data:01005340 _rgBlk      db 360h dup(?)          ; DATA XREF: MainWndProc(x,x,x,x)+574
.data:01005340          ; DisplayBlk(x,x)+23
.data:010056A0 _Preferences dd ?                ; DATA XREF: FixMenus()+2
...
```

$864/32 = 27$.

Так что размер массива 27*32? Это близко к тому что мы знаем: если попытаемся установить размер доски в установках Сапёра на 100 * 100, то он установит размер 24 * 30. Так что это максимальный размер доски здесь. И размер массива фиксирован для доски любого размера.

Посмотрим на всё это в OllyDbg. Запустим Сапёр, присоединим (attach) OllyDbg к нему и увидим содержимое памяти по адресу где массив rgBlk (0x01005340)

4.

Так что у нас выходит такой дамп памяти массива:

```
Address  Hex dump
01005340  10 10 10 10|10 10 10 10|10 10 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005350  0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005360  10 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005370  0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005380  10 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
```

⁴Все адреса здесь для Сапёра под Windows XP SP3 English. Они могут отличаться для других сервис-паков.

8.3. САПЁР (WINDOWS XP)

```
01005390 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010053A0 10 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|8F 0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
010053B0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010053C0 10 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
010053D0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010053E0 10 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 10|0F 0F 0F 0F|
010053F0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005400 10 0F 0F 8F|0F 0F 8F 0F|0F 0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005410 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005420 10 8F 0F 0F|8F 0F 0F 0F|0F 0F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005430 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005440 10 8F 0F 0F|0F 0F 8F 0F|0F 8F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005450 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005460 10 0F 0F 0F|0F 8F 0F 0F|0F 8F 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005470 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
01005480 10 10 10 10|10 10 10 10|10 10 10 0F|0F 0F 0F 0F|
01005490 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010054A0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010054B0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
010054C0 0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|0F 0F 0F 0F|
```

OllYDbg, как и любой другой шестнадцатеричный редактор, показывает 16 байт на строку. Так что каждая 32-байтная строка массива занимает ровно 2 строки.

Это уровень для начинающих (доска 9*9).

Тут еще какая-то квадратная структура, заметная визуально (байты 0x10).

Нажмем «Run» в OllYDbg чтобы разморозить процесс Сапёра, потом нажмем в случайное место окна Сапёра, попадаемся на mine, но теперь видны все мины:



Рис. 8.7: Мины

Сравнивая места с минами и дампы, мы можем обнаружить что 0x10 это граница, 0x0F — пустой блок, 0x8F — мина. Вероятно 0x10 это т.н., *sentinel value*.

Теперь добавим комментариев и также заключим все байты 0x8F в квадратные скобки:

```
border:
01005340 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0F 0F 0F 0F 0F
01005350 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #1:
01005360 10 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F
01005370 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #2:
01005380 10 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F
01005390 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #3:
```

8.3. САПЁР (WINDOWS XP)

```
010053A0  10 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F[8F]0F 10 0F 0F 0F 0F 0F
010053B0  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #4:
010053C0  10 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F 0F
010053D0  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #5:
010053E0  10 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F 0F
010053F0  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #6:
01005400  10 0F 0F[8F]0F 0F[8F]0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F 0F
01005410  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #7:
01005420  10[8F]0F 0F[8F]0F 0F 0F 0F 0F 10 0F 0F 0F 0F 0F
01005430  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #8:
01005440  10[8F]0F 0F 0F 0F[8F]0F 0F[8F]10 0F 0F 0F 0F 0F
01005450  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
line #9:
01005460  10 0F 0F 0F 0F[8F]0F 0F 0F[8F]10 0F 0F 0F 0F 0F
01005470  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
border:
01005480  10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 0F 0F 0F 0F 0F
01005490  0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
```

Теперь уберем все байты связанные с границами (0x10) и всё что за ними:

```
0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F[8F]0F
0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F 0F
0F 0F[8F]0F 0F[8F]0F 0F 0F
[8F]0F 0F[8F]0F 0F 0F 0F 0F
[8F]0F 0F 0F 0F[8F]0F 0F[8F]
0F 0F 0F 0F[8F]0F 0F 0F[8F]
```

Да, это всё мины, теперь это очень хорошо видно, в сравнении со скриншотом.

8.3. САПЁР (WINDOWS XP)

Вот что интересно, это то что мы можем модифицировать массив прямо в OllyDbg.

Уберем все мины заменив все байты 0x8F на 0x0F, и вот что получится в Сапёре:

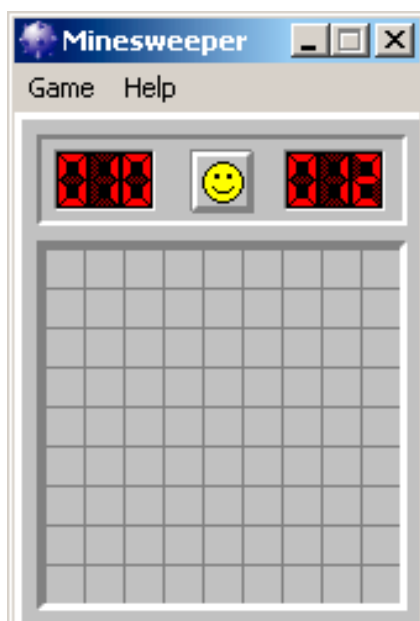


Рис. 8.8: Все мины убраны в отладчике

Также уберем их все и добавим их в первом ряду:

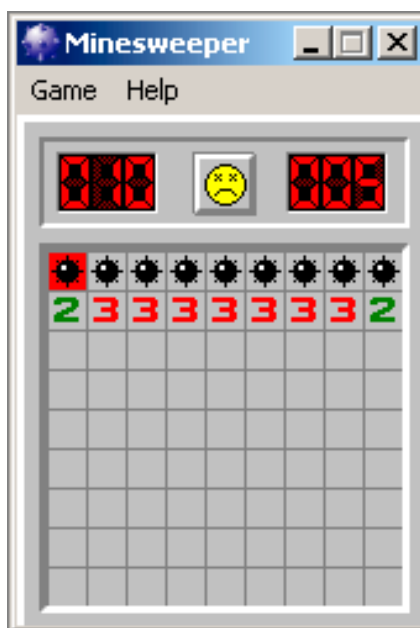


Рис. 8.9: Мины, установленные в отладчике

Отладчик не очень удобен для подсматривания (а это была наша изначальная цель), так что напишем маленькую утилиту для показа содержимого доски:

```
// Windows XP MineSweeper cheater
// written by dennis(a)yurichev.com for http://beginners.re/ book
#include <windows.h>
#include <assert.h>
#include <stdio.h>

int main (int argc, char * argv[])
{
    int i, j;
    HANDLE h;
    DWORD PID, address, rd;
```

8.3. САПЁР (WINDOWS XP)

```
BYTE board[27][32];

if (argc!=3)
{
    printf ("Usage: %s <PID> <address>\n", argv[0]);
    return 0;
};

assert (argv[1]!=NULL);
assert (argv[2]!=NULL);

assert (sscanf (argv[1], "%d", &PID)==1);
assert (sscanf (argv[2], "%x", &address)==1);

h=OpenProcess (PROCESS_VM_OPERATION | PROCESS_VM_READ | PROCESS_VM_WRITE, FALSE, PID);

if (h==NULL)
{
    DWORD e=GetLastError();
    printf ("OpenProcess error: %08X\n", e);
    return 0;
};

if (ReadProcessMemory (h, (LPVOID)address, board, sizeof(board), &rd)!=TRUE)
{
    printf ("ReadProcessMemory() failed\n");
    return 0;
};

for (i=1; i<26; i++)
{
    if (board[i][0]==0x10 && board[i][1]==0x10)
        break; // end of board
    for (j=1; j<31; j++)
    {
        if (board[i][j]==0x10)
            break; // board border
        if (board[i][j]==0x8F)
            printf ("*");
        else
            printf (" ");
    };
    printf ("\n");
};

CloseHandle (h);
};
```

Просто установите [PID](#)⁵ ⁶ и адрес массива (0x01005340 для Windows XP SP3 English) и она покажет его ⁷.

Она подключается к win32-процессу по [PID](#)-у и просто читает из памяти процесса по этому адресу.

8.3.1. Автоматический поиск массива

Задавать адрес каждый раз при запуске нашей утилиты, это неудобно. К тому же, разные версии “Сапёра” могут иметь этот массив по разным адресам. Зная, что всегда есть рамка (байты 0x10), массив легко найти в памяти:

```
// find frame to determine the address
process_mem=(BYTE*)malloc(process_mem_size);
assert (process_mem!=NULL);
```

⁵ID программы/процесса

⁶PID можно увидеть в Task Manager (это можно включить в «View → Select Columns»)

⁷Скомпилированная версия здесь: beginners.re

8.4. ХАКАЕМ ЧАСЫ В WINDOWS

```
if (ReadProcessMemory(h, (LPVOID)start_addr, process_mem, process_mem_size, &rd)!=TRUE↵
{
    printf("ReadProcessMemory() failed\n");
    return 0;
};

// for 9*9 grid.
// FIXME: slow!
for(i=0; i<process_mem_size; i++)
{
    if(memcmp(process_mem+i, "\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x10\\x0F\\x0F↵
\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x0F\\x10", 32)↵
==0)
    {
        // found
        address=start_addr+i;
        break;
    };
};
if(address==0)
{
    printf("Can't determine address of frame (and grid)\n");
    return 0;
}
else
{
    printf("Found frame and grid at 0x%x\n", address);
};
```

Полный исходный код: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/examples/minesweeper/minesweeper_cheater2.c.

8.3.2. Упражнения

- Почему байты описывающие границы (0x10) (или *sentinel value*) присутствуют вообще? Зачем они нужны, если они вообще не видимы в интерфейсе Сапёра? Как можно обойтись без них?
 - Как выясняется, здесь больше возможных значений (для открытых блоков, для тех на которых игрок установил флажок, и т.д.).
- Попробуйте найти значение каждого.
- Измените мою утилиту так, чтобы она в запущенном процессе Сапёра убирала все мины, или расставляла их в соответствии с каким-то заданным шаблоном.

8.4. Хакаем часы в Windows

Иногда я устраиваю первоапрельские пранки для моих сотрудников.

Посмотрим, можем ли мы сделать что-то с часами в Windows? Можем ли мы их заставить идти в обратную сторону?

Прежде всего, когда вы кликаете на часы/время в строке состояния (*status bar*), запускается модуль `C:\WINDOWS\SYSTEM32\TIMEDATE.CPL`, а это обычный [PE-файл](#).

Посмотрим, как отрисовываются стрелки? Когда я открываю этот файл (из Windows 7) в Resource Hacker, здесь есть разные виды циферблата, но нет стрелок:

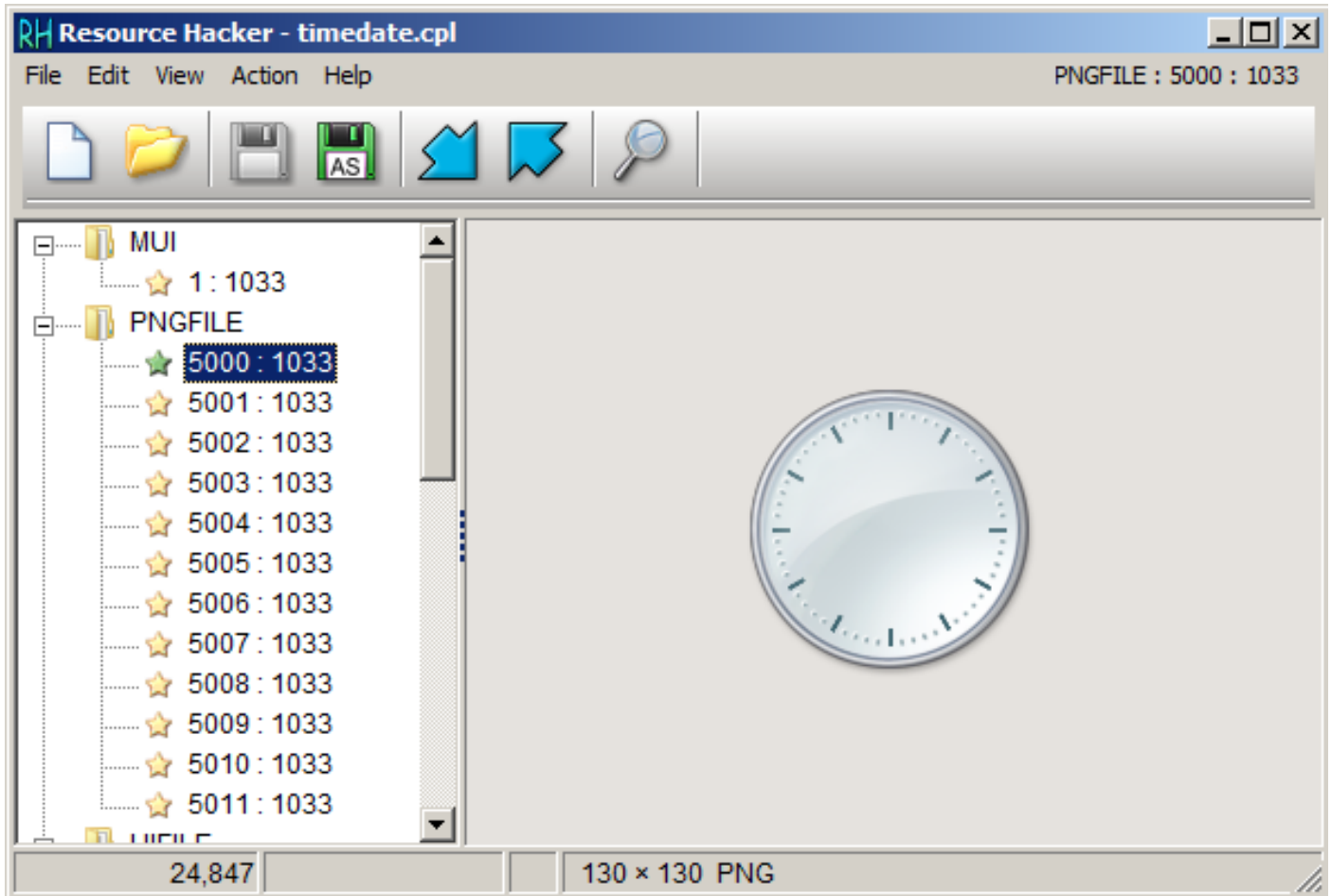


Рис. 8.10: Resource Hacker

ОК, что мы заем? Как рисовать стрелку часов? Они все начинаются в середине круга и заканчиваются на его границе. Следовательно, нам нужно рассчитать координаты точки на границе круга. Из школьной математики мы можем вспомнить, что для рисования круга нужно использовать ф-ции синуса/косинуса, или хотя бы квадратного корня. Такого в *TIMEDATE.CPL* нет, по крайней мере на первый взгляд. Но, благодаря отладочным PDB-файлам от Microsoft, я могу найти ф-цию с названием *CAnalogClock::DrawHand()*, которая вызывает *Gdiplus::Graphics::DrawLine()* минимум дважды.

Вот её код:

```
.text:6EB9DBC7 ; private: enum Gdiplus::Status __thiscall CAnalogClock::_DrawHand(class ↵
    ↵ Gdiplus::Graphics *, int, struct ClockHand const &, class Gdiplus::Pen *)
.text:6EB9DBC7 ?_DrawHand@CAnalogClock@@AAE?↵
    ↵ AW4Status@Gdiplus@@PAVGraphics@3@HABUClockHand@@PAVPen@3@@Z proc near
.text:6EB9DBC7                                     ; CODE XREF: CAnalogClock::_ClockPaint(↵
    ↵ HDC__ *)+163
.text:6EB9DBC7                                     ; CAnalogClock::_ClockPaint(HDC__ *)+18B
.text:6EB9DBC7
.text:6EB9DBC7
.text:6EB9DBC7 var_10                = dword ptr -10h
.text:6EB9DBC7 var_C                = dword ptr -0Ch
.text:6EB9DBC7 var_8                = dword ptr -8
.text:6EB9DBC7 var_4                = dword ptr -4
.text:6EB9DBC7 arg_0                = dword ptr 8
.text:6EB9DBC7 arg_4                = dword ptr 0Ch
.text:6EB9DBC7 arg_8                = dword ptr 10h
.text:6EB9DBC7 arg_C                = dword ptr 14h
.text:6EB9DBC7
.text:6EB9DBC7 mov     edi, edi
.text:6EB9DBC9 push    ebp
.text:6EB9DBCA mov     ebp, esp
.text:6EB9DBCC sub     esp, 10h
.text:6EB9DBCF mov     eax, [ebp+arg_4]
.text:6EB9DBD2 push    ebx
.text:6EB9DBD3 push    esi
```

8.4. XAKAEM ЧАСЫ В WINDOWS

```
.text:6EB9DBD4      push     edi
.text:6EB9DBD5      cdq
.text:6EB9DBD6      push     3Ch
.text:6EB9DBD8      mov     esi, ecx
.text:6EB9DBDA      pop     ecx
.text:6EB9DBDB      idiv    ecx
.text:6EB9DBDD      push     2
.text:6EB9DBDF      lea     ebx, table[edx*8]
.text:6EB9DBE6      lea     eax, [edx+1Eh]
.text:6EB9DBE9      cdq
.text:6EB9DBEA      idiv    ecx
.text:6EB9DBEC      mov     ecx, [ebp+arg_0]
.text:6EB9DBEF      mov     [ebp+var_4], ebx
.text:6EB9DBF2      lea     eax, table[edx*8]
.text:6EB9DBF9      mov     [ebp+arg_4], eax
.text:6EB9DBFC      call    ?SetInterpolationMode@Graphics@Gdiplus@@QAE?
    ↪ Aw4Status@2@W4InterpolationMode@2@@Z ; Gdiplus::Graphics::SetInterpolationMode(Gdiplus::
    ↪ InterpolationMode)
.text:6EB9DC01      mov     eax, [esi+70h]
.text:6EB9DC04      mov     edi, [ebp+arg_8]
.text:6EB9DC07      mov     [ebp+var_10], eax
.text:6EB9DC0A      mov     eax, [esi+74h]
.text:6EB9DC0D      mov     [ebp+var_C], eax
.text:6EB9DC10      mov     eax, [edi]
.text:6EB9DC12      sub     eax, [edi+8]
.text:6EB9DC15      push     8000          ; nDenominator
.text:6EB9DC1A      push     eax           ; nNumerator
.text:6EB9DC1B      push     dword ptr [ebx+4] ; nNumber
.text:6EB9DC1E      mov     ebx, ds:__imp_MulDiv@12 ; MulDiv(x,x,x)
.text:6EB9DC24      call    ebx ; MulDiv(x,x,x) ; MulDiv(x,x,x)
.text:6EB9DC26      add     eax, [esi+74h]
.text:6EB9DC29      push     8000          ; nDenominator
.text:6EB9DC2E      mov     [ebp+arg_8], eax
.text:6EB9DC31      mov     eax, [edi]
.text:6EB9DC33      sub     eax, [edi+8]
.text:6EB9DC36      push     eax           ; nNumerator
.text:6EB9DC37      mov     eax, [ebp+var_4]
.text:6EB9DC3A      push     dword ptr [eax] ; nNumber
.text:6EB9DC3C      call    ebx ; MulDiv(x,x,x) ; MulDiv(x,x,x)
.text:6EB9DC3E      add     eax, [esi+70h]
.text:6EB9DC41      mov     ecx, [ebp+arg_0]
.text:6EB9DC44      mov     [ebp+var_8], eax
.text:6EB9DC47      mov     eax, [ebp+arg_8]
.text:6EB9DC4A      mov     [ebp+var_4], eax
.text:6EB9DC4D      lea     eax, [ebp+var_8]
.text:6EB9DC50      push     eax
.text:6EB9DC51      lea     eax, [ebp+var_10]
.text:6EB9DC54      push     eax
.text:6EB9DC55      push     [ebp+arg_C]
.text:6EB9DC58      call    ?DrawLine@Graphics@Gdiplus@@QAE?
    ↪ Aw4Status@2@PBVPen@2@ABVPoint@2@1@Z ; Gdiplus::Graphics::DrawLine(Gdiplus::Pen const *,
    ↪ Gdiplus::Point const &,Gdiplus::Point const &)
.text:6EB9DC5D      mov     ecx, [edi+8]
.text:6EB9DC60      test    ecx, ecx
.text:6EB9DC62      jbe     short loc_6EB9DCAA
.text:6EB9DC64      test    eax, eax
.text:6EB9DC66      jnz     short loc_6EB9DCAA
.text:6EB9DC68      mov     eax, [ebp+arg_4]
.text:6EB9DC6B      push     8000          ; nDenominator
.text:6EB9DC70      push     ecx           ; nNumerator
.text:6EB9DC71      push     dword ptr [eax+4] ; nNumber
.text:6EB9DC74      call    ebx ; MulDiv(x,x,x) ; MulDiv(x,x,x)
.text:6EB9DC76      add     eax, [esi+74h]
.text:6EB9DC79      push     8000          ; nDenominator
.text:6EB9DC7E      push     dword ptr [edi+8] ; nNumerator
.text:6EB9DC81      mov     [ebp+arg_8], eax
.text:6EB9DC84      mov     eax, [ebp+arg_4]
.text:6EB9DC87      push     dword ptr [eax] ; nNumber
.text:6EB9DC89      call    ebx ; MulDiv(x,x,x) ; MulDiv(x,x,x)
.text:6EB9DC8B      add     eax, [esi+70h]
```

8.4. ХАКАЕМ ЧАСЫ В WINDOWS

```
.text:6EB9DC8E      mov     ecx, [ebp+arg_0]
.text:6EB9DC91      mov     [ebp+var_8], eax
.text:6EB9DC94      mov     eax, [ebp+arg_8]
.text:6EB9DC97      mov     [ebp+var_4], eax
.text:6EB9DC9A      lea     eax, [ebp+var_8]
.text:6EB9DC9D      push    eax
.text:6EB9DC9E      lea     eax, [ebp+var_10]
.text:6EB9DCA1      push    eax
.text:6EB9DCA2      push    [ebp+arg_C]
.text:6EB9DCA5      call    ?DrawLine@Graphics@Gdiplus@@QAE?@
        ↳ AW4Status@2@PBVPen@2@ABVPoint@2@1@Z ; Gdiplus::Graphics::DrawLine(Gdiplus::Pen const *,
        ↳ Gdiplus::Point const &,Gdiplus::Point const &)
.text:6EB9DCAA
.text:6EB9DCAA      loc_6EB9DCAA:                ; CODE XREF: CAnalogClock::_DrawHand(
        ↳ Gdiplus::Graphics *,int,ClockHand const &,Gdiplus::Pen *)+9B
.text:6EB9DCAA      ; CAnalogClock::_DrawHand(Gdiplus::
        ↳ Graphics *,int,ClockHand const &,Gdiplus::Pen *)+9F
.text:6EB9DCAA      pop     edi
.text:6EB9DCAB      pop     esi
.text:6EB9DCAC      pop     ebx
.text:6EB9DCAD      leave
.text:6EB9DCAE      retn    10h
.text:6EB9DCAE      ?_DrawHand@CAnalogClock@@AAE?@
        ↳ AW4Status@Gdiplus@@PAVGraphics@3@HABUClockHand@@PAVPen@3@@@Z endp
.text:6EB9DCAE
```

Мы можем увидеть что аргументы *DrawLine()* зависят от результата ф-ции *MulDiv()* и таблицы *table[]* (название дал я), которая содержит 8-байтные элементы (посмотрите на второй операнд LEA).

Что внутри *table[]*?

```
.text:6EB87890      ; int table[]
.text:6EB87890      table      dd 0
.text:6EB87894      dd 0FFFFFF0C1h
.text:6EB87898      dd 344h
.text:6EB8789C      dd 0FFFFFF0ECh
.text:6EB878A0      dd 67Fh
.text:6EB878A4      dd 0FFFFFF16Fh
.text:6EB878A8      dd 9A8h
.text:6EB878AC      dd 0FFFFFF248h
.text:6EB878B0      dd 0CB5h
.text:6EB878B4      dd 0FFFFFF374h
.text:6EB878B8      dd 0F9Fh
.text:6EB878BC      dd 0FFFFFF4F0h
.text:6EB878C0      dd 125Eh
.text:6EB878C4      dd 0FFFFFF6B8h
.text:6EB878C8      dd 14E9h
```

...

Доступ к ней есть только из ф-ции *DrawHand()*. У ней 120 32-битных слов или 60 32-битных пар ...подождите, 60? Посмотрим ближе на эти значения. Прежде всего, я затру нулями первые 6 пар или 12 32-битных слов, и затем я положу пропатченный *TIMEDATE.CPL* в *C:\WINDOWS\SYSTEM32*. (Вам, возможно, придется установить владельца файла **TIMEDATE.CPL** равным вашей первичной пользовательской учетной записи (вместо *TrustedInstaller*), а также загрузиться в безопасном режиме с командной строкой, чтобы скопировать этот файл, который обычно залоченный.)

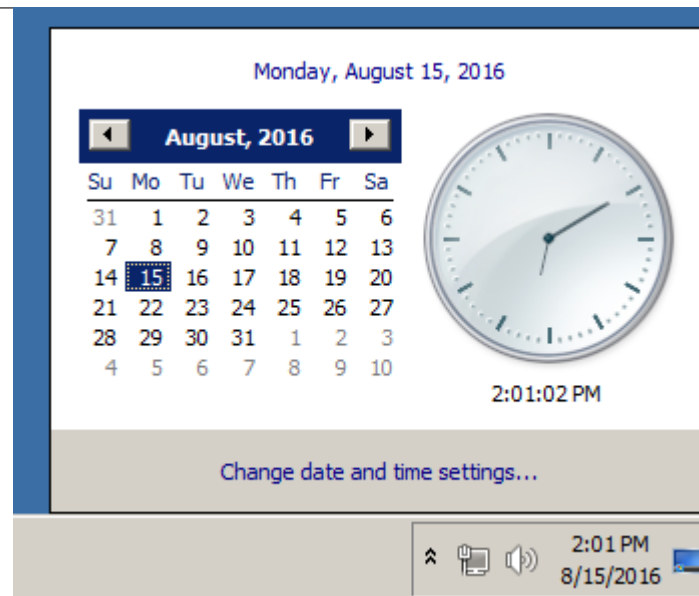


Рис. 8.11: Attempt to run

Теперь, когда стрелка находится на 0..5 секундах/минутах, она невидимая! Хотя, противоположная (короткая) часть секундной стрелки видима, и движется. Когда любая стрелка за пределами этой области, она видима, как обычно.

Посмотрим на эту таблицу при помощи Mathematica. Я скопировал таблицу из *TIMEDATE.CPL* в файл *tbl* (480 байт). Будем считать, что это знаковые значения, потому что половина элементов меньше нуля (0FFFFFFE0C1h, итд.). Если бы эти значения были бы беззнаковыми, они были бы подозрительно большими.

```
In[]:= tbl = BinaryReadList["~/.../tbl", "Integer32"]

Out[]= {0, -7999, 836, -7956, 1663, -7825, 2472, -7608, 3253, -7308, 3999, \
-6928, 4702, -6472, 5353, -5945, 5945, -5353, 6472, -4702, 6928, \
-4000, 7308, -3253, 7608, -2472, 7825, -1663, 7956, -836, 8000, 0, \
7956, 836, 7825, 1663, 7608, 2472, 7308, 3253, 6928, 4000, 6472, \
4702, 5945, 5353, 5353, 5945, 4702, 6472, 3999, 6928, 3253, 7308, \
2472, 7608, 1663, 7825, 836, 7956, 0, 7999, -836, 7956, -1663, 7825, \
-2472, 7608, -3253, 7308, -4000, 6928, -4702, 6472, -5353, 5945, \
-5945, 5353, -6472, 4702, -6928, 3999, -7308, 3253, -7608, 2472, \
-7825, 1663, -7956, 836, -7999, 0, -7956, -836, -7825, -1663, -7608, \
-2472, -7308, -3253, -6928, -4000, -6472, -4702, -5945, -5353, \
-5945, -4702, -6472, -3999, -6928, -3253, -7308, -2472, -7608, -1663, \
-7825, -836, -7956}
```

```
In[]:= Length[tbl]
Out[]= 120
```

Будем считать два последовательно идущих 32-битных значения как пару:

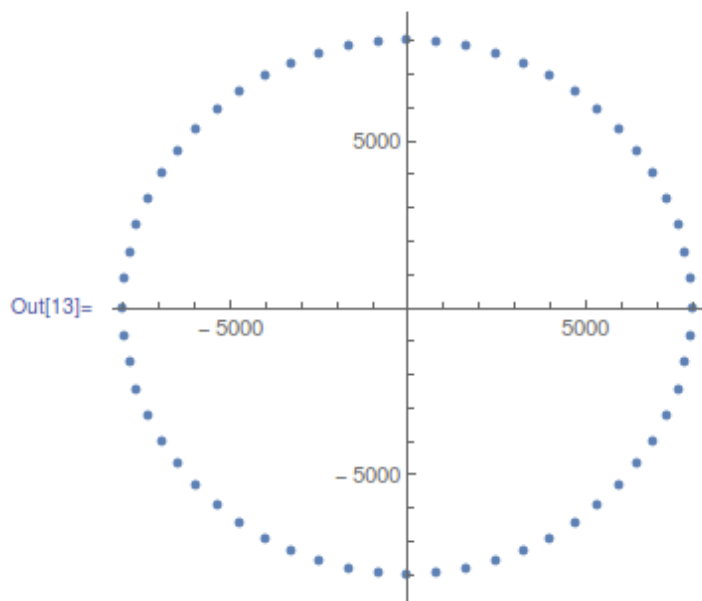
```
In[]:= pairs = Partition[tbl, 2]
Out[]= {{0, -7999}, {836, -7956}, {1663, -7825}, {2472, -7608}, \
{3253, -7308}, {3999, -6928}, {4702, -6472}, {5353, -5945}, {5945, \
-5353}, {6472, -4702}, {6928, -4000}, {7308, -3253}, {7608, -2472}, \
{7825, -1663}, {7956, -836}, {8000, 0}, {7956, 836}, {7825, \
1663}, {7608, 2472}, {7308, 3253}, {6928, 4000}, {6472, \
4702}, {5945, 5353}, {5353, 5945}, {4702, 6472}, {3999, \
6928}, {3253, 7308}, {2472, 7608}, {1663, 7825}, {836, 7956}, {0, \
7999}, {-836, 7956}, {-1663, 7825}, {-2472, 7608}, {-3253, \
7308}, {-4000, 6928}, {-4702, 6472}, {-5353, 5945}, {-5945, \
5353}, {-6472, 4702}, {-6928, 3999}, {-7308, 3253}, {-7608, \
2472}, {-7825, 1663}, {-7956, 836}, {-7999, \
0}, {-7956, -836}, {-7825, -1663}, {-7608, -2472}, {-7308, -3253}, \
{-6928, -4000}, {-6472, -4702}, {-5945, -5353}, {-5353, -5945}, \
{-4702, -6472}, {-3999, -6928}, {-3253, -7308}, {-2472, -7608}, \
{-1663, -7825}, {-836, -7956}}
```

8.4. ХАКАЕМ ЧАСЫ В WINDOWS

```
In[]:= Length[pairs]  
Out[]= 60
```

Попробуем считать каждую пару как координату X/Y и нарисует все 60 пар, а также первые 15 пар:

```
In[13]:= ListPlot[pairs, AspectRatio → Full, ImageSize → {300, 300}]
```



```
In[27]:= ListPlot[pairs[[1 ;; 15]], AspectRatio → Full, ImageSize → {300, 300}]
```

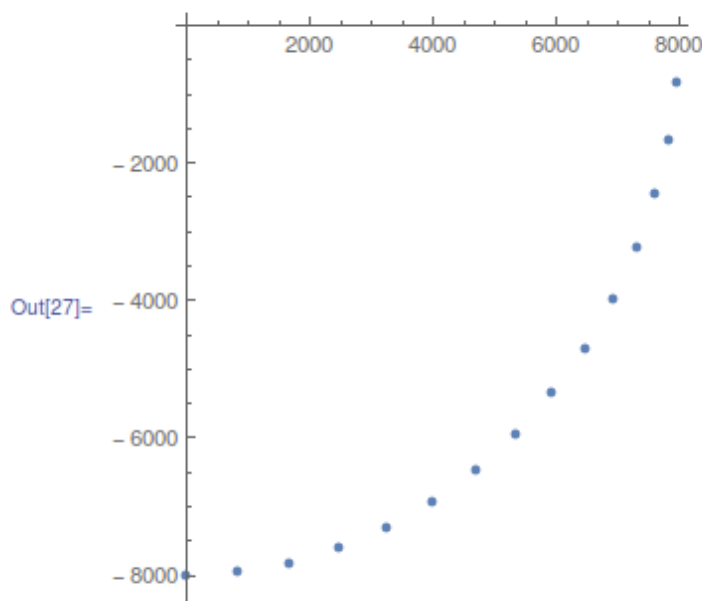


Рис. 8.12: Mathematica

Ну теперь это кое-что! Каждая пара это просто координата. Первые 15 пар это координаты $\frac{1}{4}$ круга. Видимо, разработчики в Microsoft рассчитали все координаты предварительно и сохранили их в таблице.

Теперь понятно, почему когда я затер первые 6 пар, стрелки были невидимы в этой области: на самом деле, стрелки рисовались, просто их длина была нулевой, потому что стрелка начиналась в координатах 0:0, и там же и заканчивалась.

Пранк (шутка)

Учитывая всё это, можем ли мы заставить стрелки идти в обратную сторону? На самом деле, это просто, нужно просто развернуть таблицу, так что каждая стрелка, вместо отображения на месте нулевой секунды, рисовалась бы на месте 59-й секунды.

Когда-то давным давно я сделал патчер, в в самом начале 2000-х, для Windows 2000. Трудно поверить, но он всё еще работает и для Windows 7, видимо, таблица с тех пор не менялась!

Исходник патчера: https://github.com/DennisYurichev/random_notes/blob/master/timedate/time_pt.c.

Теперь видно как стрелки идут назад:

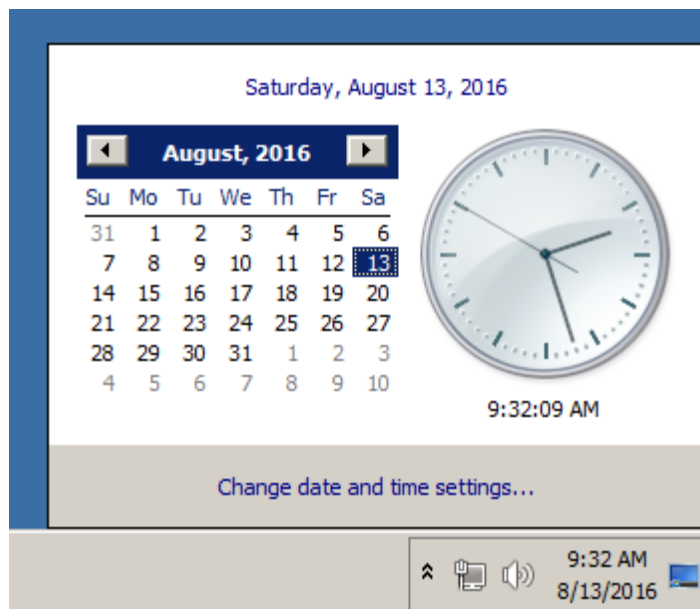


Рис. 8.13: Now it works

В этой книге, конечно, нет анимации, но если присмотритесь, увидите, что на самом деле стрелки показывают корректное время, но весь циферблат повернут вертикально, как если бы мы видели его изнутри часов.

Утекшие исходники Windows 2000

Так что я сделал патчер, потом утекли исходники Windows 2000 (я не могу заставить вас поверить мне, конечно). Посмотрим на исходный код этой ф-ции и таблицы.

Нужный файл это `win2k/private/shell/cpls/utc/clock.c`:

```
//
// Array containing the sine and cosine values for hand positions.
//
POINT rCircleTable[] =
{
    { 0,      -7999},
    { 836,    -7956},
    { 1663,   -7825},
    { 2472,   -7608},
    { 3253,   -7308},
    ...
    { -4702,  -6472},
    { -3999,  -6928},
    { -3253,  -7308},
    { -2472,  -7608},
    { -1663,  -7825},
    { -836,   -7956},
};
////////////////////////////////////
```

8.5. ДОНГЛЫ

```
//
// DrawHand
//
// Draws the hands of the clock.
//
/////////////////////////////////////////////////////////////////

void DrawHand(
    HDC hDC,
    int pos,
    HPEN hPen,
    int scale,
    int patMode,
    PLOCKSTR np)
{
    LPPPOINT lppt;
    int radius;

    MoveTo(hDC, np->clockCenter.x, np->clockCenter.y);
    radius = MulDiv(np->clockRadius, scale, 100);
    lppt = rCircleTable + pos;
    SetROP2(hDC, patMode);
    SelectObject(hDC, hPen);

    LineTo( hDC,
            np->clockCenter.x + MulDiv(lppt->x, radius, 8000),
            np->clockCenter.y + MulDiv(lppt->y, radius, 8000) );
}
```

Теперь всё ясно: координаты были предвычислены, как если бы циферблат был размером $2 \cdot 8000$, а затем он масштабируется до радиуса текущего циферблата используя ф-цию *MulDiv()*.

Структура POINT⁸ это структура из двух 32-битных значений, первое это x, второе это y.

8.5. Донглы

Автор этих строк иногда делал замену **донглам** или «эмуляторы донглов» и здесь немного примеров, как это происходит.

Об одном неопisanном здесь случае с Rockey и Z3 вы также можете прочитать здесь : http://yurichev.com/tmp/SAT_SMT_DRAFT.pdf.

8.5.1. Пример #1: MacOS Classic и PowerPC

Вот пример программы для MacOS Classic ⁹, для PowerPC. Компания, разработавшая этот продукт, давно исчезла, так что (легальный) пользователь боялся того что донгла может сломаться.

Если запустить программу без подключенной донглы, можно увидеть окно с надписью

“Invalid Security Device”. Мне повезло потому что этот текст можно было легко найти внутри исполняемого файла.

Представим, что мы не знакомы ни с Mac OS Classic, ни с PowerPC, но всё-таки попробуем.

IDA открывает исполняемый файл легко, показывая его тип как

“PEF (Mac OS or Be OS executable)” (действительно, это стандартный тип файлов в Mac OS Classic).

В поисках текстовой строки с сообщением об ошибке, мы попадаем на этот фрагмент кода:

```
...
seg000:000C87FC 38 60 00 01  li      %r3, 1
seg000:000C8800 48 03 93 41  bl      check1
seg000:000C8804 60 00 00 00  nop
```

⁸[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd162805\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/dd162805(v=vs.85).aspx)

⁹MacOS перед тем как перейти на UNIX

8.5. ДОНГЛЫ

```
seg000:000C8808 54 60 06 3F  clrlwi. %r0, %r3, 24
seg000:000C880C 40 82 00 40  bne      OK
seg000:000C8810 80 62 9F D8  lwz      %r3, TC_aInvalidSecurityDevice
...

```

Да, это код PowerPC. Это очень типичный процессор для RISC 1990-х. Каждая инструкция занимает 4 байта (как и в MIPS и ARM) и их имена немного похожи на имена инструкций MIPS.

check1() это имя которое мы дадим этой функции немного позже. BL это инструкция *Branch Link* т.е. предназначенная для вызова подпрограмм. Самое важное место — это инструкция **BNE**, срабатывающая, если проверка наличия донглы прошла успешно, либо не срабатывающая в случае ошибки: и тогда адрес текстовой строки с сообщением об ошибке будет загружен в регистр r3 для последующей передачи в функцию отображения диалогового окна.

Из [Steve Zucker, SunSoft and Kari Karhi, IBM, *SYSTEM V APPLICATION BINARY INTERFACE: PowerPC Processor Supplement*, (1995)]¹⁰ мы узнаем, что регистр r3 используется для возврата значений (и еще r4 если значение 64-битное).

Еще одна, пока что неизвестная инструкция CLRLWI. Из [PowerPC(tm) Microprocessor Family: The Programming Environments for 32-Bit Microprocessors, (2000)]¹¹ мы узнаем, что эта инструкция одновременно и очищает и загружает. В нашем случае, она очищает 24 старших бита из значения в r3 и записывает всё это в r0, так что это аналог MOVZX в x86 (1.17.1 (стр. 192)), но также устанавливает флаги, так что **BNE** может проверить их потом.

Посмотрим внутрь check1():

```
seg000:00101B40      check1: # CODE XREF: seg000:00063E7Cp
seg000:00101B40      # sub_64070+160p ...
seg000:00101B40
seg000:00101B40      .set arg_8, 8
seg000:00101B40
seg000:00101B40 7C 08 02 A6      mflr    %r0
seg000:00101B44 90 01 00 08      stw     %r0, arg_8(%sp)
seg000:00101B48 94 21 FF C0      stwu    %sp, -0x40(%sp)
seg000:00101B4C 48 01 6B 39      bl      check2
seg000:00101B50 60 00 00 00      nop
seg000:00101B54 80 01 00 48      lwz     %r0, 0x40+arg_8(%sp)
seg000:00101B58 38 21 00 40      addi    %sp, %sp, 0x40
seg000:00101B5C 7C 08 03 A6      mtlr    %r0
seg000:00101B60 4E 80 00 20      blr
seg000:00101B60      # End of function check1

```

Как можно увидеть в IDA, эта функция вызывается из многих мест в программе, но только значение в регистре r3 проверяется сразу после каждого вызова. Всё что эта функция делает это только вызывает другую функцию, так что это **thunk function**: здесь присутствует и пролог функции и эпилог, но регистр r3 не трогается, так что check1() возвращает то, что возвращает check2().

BLR¹² это похоже возврат из функции, но так как IDA делает всю разметку функций автоматически, наверное, мы можем пока не интересоваться этим. Так как это типичный RISC, похоже, подпрограммы вызываются, используя **link register**, точно как в ARM.

Функция check2() более сложная:

```
seg000:00118684      check2: # CODE XREF: check1+Cp
seg000:00118684
seg000:00118684      .set var_18, -0x18
seg000:00118684      .set var_C, -0xC
seg000:00118684      .set var_8, -8
seg000:00118684      .set var_4, -4
seg000:00118684      .set arg_8, 8
seg000:00118684
seg000:00118684 93 E1 FF FC      stw     %r31, var_4(%sp)
seg000:00118688 7C 08 02 A6      mflr    %r0
seg000:0011868C 83 E2 95 A8      lwz     %r31, off_1485E8 # dword_24B704
seg000:00118690      .using  dword_24B704, %r31
seg000:00118690 93 C1 FF F8      stw     %r30, var_8(%sp)

```

¹⁰Также доступно здесь: http://yurichev.com/mirrors/PowerPC/elfspec_ppc.pdf

¹¹Также доступно здесь: http://yurichev.com/mirrors/PowerPC/6xx_pem.pdf

¹²(PowerPC) Branch to Link Register

8.5. ДОНГЛЫ

```
seg000:00118694 93 A1 FF F4 stw    %r29, var_C(%sp)
seg000:00118698 7C 7D 1B 78 mr      %r29, %r3
seg000:0011869C 90 01 00 08 stw    %r0, arg_8(%sp)
seg000:001186A0 54 60 06 3E clrlwi %r0, %r3, 24
seg000:001186A4 28 00 00 01 cmplwi %r0, 1
seg000:001186A8 94 21 FF B0 stwu   %sp, -0x50(%sp)
seg000:001186AC 40 82 00 0C bne     loc_1186B8
seg000:001186B0 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:001186B4 48 00 00 6C b       exit
seg000:001186B8
seg000:001186B8 loc_1186B8: # CODE XREF: check2+28j
seg000:001186B8 48 00 03 D5 bl      sub_118A8C
seg000:001186BC 60 00 00 00 nop
seg000:001186C0 3B C0 00 00 li      %r30, 0
seg000:001186C4
seg000:001186C4 skip:      # CODE XREF: check2+94j
seg000:001186C4 57 C0 06 3F clrlwi. %r0, %r30, 24
seg000:001186C8 41 82 00 18 beq     loc_1186E0
seg000:001186CC 38 61 00 38 addi    %r3, %sp, 0x50+var_18
seg000:001186D0 80 9F 00 00 lwz     %r4, dword_24B704
seg000:001186D4 48 00 C0 55 bl      .RBEFINDNEXT
seg000:001186D8 60 00 00 00 nop
seg000:001186DC 48 00 00 1C b       loc_1186F8
seg000:001186E0
seg000:001186E0 loc_1186E0: # CODE XREF: check2+44j
seg000:001186E0 80 BF 00 00 lwz     %r5, dword_24B704
seg000:001186E4 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:001186E8 38 60 08 C2 li      %r3, 0x1234
seg000:001186EC 48 00 BF 99 bl      .RBEFINDFIRST
seg000:001186F0 60 00 00 00 nop
seg000:001186F4 3B C0 00 01 li      %r30, 1
seg000:001186F8
seg000:001186F8 loc_1186F8: # CODE XREF: check2+58j
seg000:001186F8 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:001186FC 41 82 00 0C beq     must_jump
seg000:00118700 38 60 00 00 li      %r3, 0          # error
seg000:00118704 48 00 00 1C b       exit
seg000:00118708
seg000:00118708 must_jump: # CODE XREF: check2+78j
seg000:00118708 7F A3 EB 78 mr      %r3, %r29
seg000:0011870C 48 00 00 31 bl      check3
seg000:00118710 60 00 00 00 nop
seg000:00118714 54 60 06 3F clrlwi. %r0, %r3, 24
seg000:00118718 41 82 FF AC beq     skip
seg000:0011871C 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:00118720
seg000:00118720 exit:      # CODE XREF: check2+30j
seg000:00118720 # check2+80j
seg000:00118720 80 01 00 58 lwz     %r0, 0x50+arg_8(%sp)
seg000:00118724 38 21 00 50 addi    %sp, %sp, 0x50
seg000:00118728 83 E1 FF FC lwz     %r31, var_4(%sp)
seg000:0011872C 7C 08 03 A6 mtlr   %r0
seg000:00118730 83 C1 FF F8 lwz     %r30, var_8(%sp)
seg000:00118734 83 A1 FF F4 lwz     %r29, var_C(%sp)
seg000:00118738 4E 80 00 20 blr
seg000:00118738 # End of function check2
```

Снова повезло: имена некоторых функций оставлены в исполняемом файле (в символах в отладочной секции? Трудно сказать до тех пор, пока мы не знакомы с этим форматом файлов, может быть это что-то вроде PE-экспортов (6.5.2 (стр. 740)))? Как например .RBEFINDNEXT() and .RBEFINDFIRST().

В итоге, эти функции вызывают другие функции с именами вроде .GetNextDeviceViaUSB(), .USBSendPKT() так что они явно работают с каким-то USB-устройством.

Тут даже есть функция с названием .GetNextEve3Device() — звучит знакомо, в 1990-х годах была донгла Sentinel Eve3 для ADB-порта (присутствующих на Макинтошах).

В начале посмотрим на то как устанавливается регистр r3 одновременно игнорируя всё остальное. Мы знаем, что «хорошее» значение в r3 должно быть не нулевым, а нулевой r3 приведет к выводу

8.5. ДОНГЛЫ

диалогового окна с сообщением об ошибке.

В функции имеются две инструкции `li %r3, 1` и одна `li %r3, 0` (*Load Immediate*, т.е. загрузить значение в регистр). Самая первая инструкция находится на `0x001186B0` — и честно говоря, трудно заранее понять, что это означает.

А вот то что мы видим дальше понять проще: вызывается `.RBEFINDFIRST()` и в случае ошибки, 0 будет записан в `r3` и мы перейдем на `exit`, а иначе будет вызвана функция `check3()` — если и она будет выполнена с ошибкой, будет вызвана `.RBEFINDNEXT()` вероятно, для поиска другого USB-устройства.

N.B.: `clrlwi. %r0, %r3, 16` это аналог того что мы уже видели, но она очищает 16 старших бит, т.е.,

`.RBEFINDFIRST()` вероятно возвращает 16-битное значение.

`B` (означает *branch*) — безусловный переход.

`BEQ` это обратная инструкция от `BNE`.

Посмотрим на `check3()`:

```
seg000:0011873C      check3: # CODE XREF: check2+88p
seg000:0011873C
seg000:0011873C      .set var_18, -0x18
seg000:0011873C      .set var_C, -0xC
seg000:0011873C      .set var_8, -8
seg000:0011873C      .set var_4, -4
seg000:0011873C      .set arg_8, 8
seg000:0011873C
seg000:0011873C 93 E1 FF FC      stw     %r31, var_4(%sp)
seg000:00118740 7C 08 02 A6      mflr   %r0
seg000:00118744 38 A0 00 00      li     %r5, 0
seg000:00118748 93 C1 FF F8      stw     %r30, var_8(%sp)
seg000:0011874C 83 C2 95 A8      lwz     %r30, off_1485E8 # dword_24B704
seg000:00118750      .using dword_24B704, %r30
seg000:00118750 93 A1 FF F4      stw     %r29, var_C(%sp)
seg000:00118754 3B A3 00 00      addi    %r29, %r3, 0
seg000:00118758 38 60 00 00      li     %r3, 0
seg000:0011875C 90 01 00 08      stw     %r0, arg_8(%sp)
seg000:00118760 94 21 FF B0      stwu    %sp, -0x50(%sp)
seg000:00118764 80 DE 00 00      lwz     %r6, dword_24B704
seg000:00118768 38 81 00 38      addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:0011876C 48 00 C0 5D      bl     .RBEREAD
seg000:00118770 60 00 00 00      nop
seg000:00118774 54 60 04 3F      clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118778 41 82 00 0C      beq     loc_118784
seg000:0011877C 38 60 00 00      li     %r3, 0
seg000:00118780 48 00 02 F0      b      exit
seg000:00118784
seg000:00118784      loc_118784: # CODE XREF: check3+3Cj
seg000:00118784 A0 01 00 38      lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118788 28 00 04 B2      cmplwi  %r0, 0x1100
seg000:0011878C 41 82 00 0C      beq     loc_118798
seg000:00118790 38 60 00 00      li     %r3, 0
seg000:00118794 48 00 02 DC      b      exit
seg000:00118798
seg000:00118798      loc_118798: # CODE XREF: check3+50j
seg000:00118798 80 DE 00 00      lwz     %r6, dword_24B704
seg000:0011879C 38 81 00 38      addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:001187A0 38 60 00 01      li     %r3, 1
seg000:001187A4 38 A0 00 00      li     %r5, 0
seg000:001187A8 48 00 C0 21      bl     .RBEREAD
seg000:001187AC 60 00 00 00      nop
seg000:001187B0 54 60 04 3F      clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:001187B4 41 82 00 0C      beq     loc_1187C0
seg000:001187B8 38 60 00 00      li     %r3, 0
seg000:001187BC 48 00 02 B4      b      exit
seg000:001187C0
seg000:001187C0      loc_1187C0: # CODE XREF: check3+78j
seg000:001187C0 A0 01 00 38      lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:001187C4 28 00 06 4B      cmplwi  %r0, 0x09AB
seg000:001187C8 41 82 00 0C      beq     loc_1187D4
```

8.5. ДОНГЛЫ

```

seg000:001187CC 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:001187D0 48 00 02 A0 b       exit
seg000:001187D4
seg000:001187D4 loc_1187D4: # CODE XREF: check3+8Cj
seg000:001187D4 4B F9 F3 D9 bl      sub_B7BAC
seg000:001187D8 60 00 00 00 nop
seg000:001187DC 54 60 06 3E clrlwi  %r0, %r3, 24
seg000:001187E0 2C 00 00 05 cmpwi   %r0, 5
seg000:001187E4 41 82 01 00 beq     loc_1188E4
seg000:001187E8 40 80 00 10 bge     loc_1187F8
seg000:001187EC 2C 00 00 04 cmpwi   %r0, 4
seg000:001187F0 40 80 00 58 bge     loc_118848
seg000:001187F4 48 00 01 8C b       loc_118980
seg000:001187F8
seg000:001187F8 loc_1187F8: # CODE XREF: check3+ACj
seg000:001187F8 2C 00 00 0B cmpwi   %r0, 0xB
seg000:001187FC 41 82 00 08 beq     loc_118804
seg000:00118800 48 00 01 80 b       loc_118980
seg000:00118804
seg000:00118804 loc_118804: # CODE XREF: check3+C0j
seg000:00118804 80 DE 00 00 lwz     %r6, dword_24B704
seg000:00118808 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:0011880C 38 60 00 08 li      %r3, 8
seg000:00118810 38 A0 00 00 li      %r5, 0
seg000:00118814 48 00 BF B5 bl      .RBREAD
seg000:00118818 60 00 00 00 nop
seg000:0011881C 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118820 41 82 00 0C beq     loc_11882C
seg000:00118824 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:00118828 48 00 02 48 b       exit
seg000:0011882C
seg000:0011882C loc_11882C: # CODE XREF: check3+E4j
seg000:0011882C A0 01 00 38 lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118830 28 00 11 30 cmplwi  %r0, 0xFEA0
seg000:00118834 41 82 00 0C beq     loc_118840
seg000:00118838 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:0011883C 48 00 02 34 b       exit
seg000:00118840
seg000:00118840 loc_118840: # CODE XREF: check3+F8j
seg000:00118840 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:00118844 48 00 02 2C b       exit
seg000:00118848
seg000:00118848 loc_118848: # CODE XREF: check3+B4j
seg000:00118848 80 DE 00 00 lwz     %r6, dword_24B704
seg000:0011884C 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:00118850 38 60 00 0A li      %r3, 0xA
seg000:00118854 38 A0 00 00 li      %r5, 0
seg000:00118858 48 00 BF 71 bl      .RBREAD
seg000:0011885C 60 00 00 00 nop
seg000:00118860 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118864 41 82 00 0C beq     loc_118870
seg000:00118868 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:0011886C 48 00 02 04 b       exit
seg000:00118870
seg000:00118870 loc_118870: # CODE XREF: check3+128j
seg000:00118870 A0 01 00 38 lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118874 28 00 03 F3 cmplwi  %r0, 0xA6E1
seg000:00118878 41 82 00 0C beq     loc_118884
seg000:0011887C 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:00118880 48 00 01 F0 b       exit
seg000:00118884
seg000:00118884 loc_118884: # CODE XREF: check3+13Cj
seg000:00118884 57 BF 06 3E clrlwi  %r31, %r29, 24
seg000:00118888 28 1F 00 02 cmplwi  %r31, 2
seg000:0011888C 40 82 00 0C bne     loc_118898
seg000:00118890 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:00118894 48 00 01 DC b       exit
seg000:00118898
seg000:00118898 loc_118898: # CODE XREF: check3+150j
seg000:00118898 80 DE 00 00 lwz     %r6, dword_24B704

```


8.5. ДОНГЛЫ

```

seg000:0011889C 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:001188A0 38 60 00 0B li      %r3, 0xB
seg000:001188A4 38 A0 00 00 li      %r5, 0
seg000:001188A8 48 00 BF 21 bl      .RBEREAD
seg000:001188AC 60 00 00 00 nop
seg000:001188B0 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:001188B4 41 82 00 0C beq     loc_1188C0
seg000:001188B8 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:001188BC 48 00 01 B4 b       exit
seg000:001188C0
seg000:001188C0          loc_1188C0: # CODE XREF: check3+178j
seg000:001188C0 A0 01 00 38 lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:001188C4 28 00 23 1C cmplwi %r0, 0x1C20
seg000:001188C8 41 82 00 0C beq     loc_1188D4
seg000:001188CC 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:001188D0 48 00 01 A0 b       exit
seg000:001188D4
seg000:001188D4          loc_1188D4: # CODE XREF: check3+18Cj
seg000:001188D4 28 1F 00 03 cmplwi %r31, 3
seg000:001188D8 40 82 01 94 bne     error
seg000:001188DC 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:001188E0 48 00 01 90 b       exit
seg000:001188E4
seg000:001188E4          loc_1188E4: # CODE XREF: check3+A8j
seg000:001188E4 80 DE 00 00 lwz     %r6, dword_24B704
seg000:001188E8 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:001188EC 38 60 00 0C li      %r3, 0xC
seg000:001188F0 38 A0 00 00 li      %r5, 0
seg000:001188F4 48 00 BE D5 bl      .RBEREAD
seg000:001188F8 60 00 00 00 nop
seg000:001188FC 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118900 41 82 00 0C beq     loc_11890C
seg000:00118904 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:00118908 48 00 01 68 b       exit
seg000:0011890C
seg000:0011890C          loc_11890C: # CODE XREF: check3+1C4j
seg000:0011890C A0 01 00 38 lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118910 28 00 1F 40 cmplwi %r0, 0x40FF
seg000:00118914 41 82 00 0C beq     loc_118920
seg000:00118918 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:0011891C 48 00 01 54 b       exit
seg000:00118920
seg000:00118920          loc_118920: # CODE XREF: check3+1D8j
seg000:00118920 57 BF 06 3E clrlwi %r31, %r29, 24
seg000:00118924 28 1F 00 02 cmplwi %r31, 2
seg000:00118928 40 82 00 0C bne     loc_118934
seg000:0011892C 38 60 00 01 li      %r3, 1
seg000:00118930 48 00 01 40 b       exit
seg000:00118934
seg000:00118934          loc_118934: # CODE XREF: check3+1ECj
seg000:00118934 80 DE 00 00 lwz     %r6, dword_24B704
seg000:00118938 38 81 00 38 addi    %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:0011893C 38 60 00 0D li      %r3, 0xD
seg000:00118940 38 A0 00 00 li      %r5, 0
seg000:00118944 48 00 BE 85 bl      .RBEREAD
seg000:00118948 60 00 00 00 nop
seg000:0011894C 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118950 41 82 00 0C beq     loc_11895C
seg000:00118954 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:00118958 48 00 01 18 b       exit
seg000:0011895C
seg000:0011895C          loc_11895C: # CODE XREF: check3+214j
seg000:0011895C A0 01 00 38 lhz     %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118960 28 00 07 CF cmplwi %r0, 0xFC7
seg000:00118964 41 82 00 0C beq     loc_118970
seg000:00118968 38 60 00 00 li      %r3, 0
seg000:0011896C 48 00 01 04 b       exit
seg000:00118970
seg000:00118970          loc_118970: # CODE XREF: check3+228j
seg000:00118970 28 1F 00 03 cmplwi %r31, 3

```

8.5. ДОНГЛЫ

```

seg000:00118974 40 82 00 F8 bne error
seg000:00118978 38 60 00 01 li %r3, 1
seg000:0011897C 48 00 00 F4 b exit
seg000:00118980
seg000:00118980 loc_118980: # CODE XREF: check3+B8j
seg000:00118980 # check3+C4j
seg000:00118980 80 DE 00 00 lwz %r6, dword_24B704
seg000:00118984 38 81 00 38 addi %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:00118988 3B E0 00 00 li %r31, 0
seg000:0011898C 38 60 00 04 li %r3, 4
seg000:00118990 38 A0 00 00 li %r5, 0
seg000:00118994 48 00 BE 35 bl .RBEREAD
seg000:00118998 60 00 00 00 nop
seg000:0011899C 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:001189A0 41 82 00 0C beq loc_1189AC
seg000:001189A4 38 60 00 00 li %r3, 0
seg000:001189A8 48 00 00 C8 b exit
seg000:001189AC
seg000:001189AC loc_1189AC: # CODE XREF: check3+264j
seg000:001189AC A0 01 00 38 lhz %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:001189B0 28 00 1D 6A cmplwi %r0, 0xAED0
seg000:001189B4 40 82 00 0C bne loc_1189C0
seg000:001189B8 3B E0 00 01 li %r31, 1
seg000:001189BC 48 00 00 14 b loc_1189D0
seg000:001189C0
seg000:001189C0 loc_1189C0: # CODE XREF: check3+278j
seg000:001189C0 28 00 18 28 cmplwi %r0, 0x2818
seg000:001189C4 41 82 00 0C beq loc_1189D0
seg000:001189C8 38 60 00 00 li %r3, 0
seg000:001189CC 48 00 00 A4 b exit
seg000:001189D0
seg000:001189D0 loc_1189D0: # CODE XREF: check3+280j
seg000:001189D0 # check3+288j
seg000:001189D0 57 A0 06 3E clrlwi %r0, %r29, 24
seg000:001189D4 28 00 00 02 cmplwi %r0, 2
seg000:001189D8 40 82 00 20 bne loc_1189F8
seg000:001189DC 57 E0 06 3F clrlwi. %r0, %r31, 24
seg000:001189E0 41 82 00 10 beq good2
seg000:001189E4 48 00 4C 69 bl sub_11D64C
seg000:001189E8 60 00 00 00 nop
seg000:001189EC 48 00 00 84 b exit
seg000:001189F0
seg000:001189F0 good2: # CODE XREF: check3+2A4j
seg000:001189F0 38 60 00 01 li %r3, 1
seg000:001189F4 48 00 00 7C b exit
seg000:001189F8
seg000:001189F8 loc_1189F8: # CODE XREF: check3+29Cj
seg000:001189F8 80 DE 00 00 lwz %r6, dword_24B704
seg000:001189FC 38 81 00 38 addi %r4, %sp, 0x50+var_18
seg000:00118A00 38 60 00 05 li %r3, 5
seg000:00118A04 38 A0 00 00 li %r5, 0
seg000:00118A08 48 00 BD C1 bl .RBEREAD
seg000:00118A0C 60 00 00 00 nop
seg000:00118A10 54 60 04 3F clrlwi. %r0, %r3, 16
seg000:00118A14 41 82 00 0C beq loc_118A20
seg000:00118A18 38 60 00 00 li %r3, 0
seg000:00118A1C 48 00 00 54 b exit
seg000:00118A20
seg000:00118A20 loc_118A20: # CODE XREF: check3+2D8j
seg000:00118A20 A0 01 00 38 lhz %r0, 0x50+var_18(%sp)
seg000:00118A24 28 00 11 D3 cmplwi %r0, 0xD300
seg000:00118A28 40 82 00 0C bne loc_118A34
seg000:00118A2C 3B E0 00 01 li %r31, 1
seg000:00118A30 48 00 00 14 b good1
seg000:00118A34
seg000:00118A34 loc_118A34: # CODE XREF: check3+2ECj
seg000:00118A34 28 00 1A EB cmplwi %r0, 0xEBA1
seg000:00118A38 41 82 00 0C beq good1
seg000:00118A3C 38 60 00 00 li %r3, 0
seg000:00118A40 48 00 00 30 b exit

```


8.5. ДОНГЛЫ

```
seg000:00118A44
seg000:00118A44          good1:      # CODE XREF: check3+2F4j
seg000:00118A44          # check3+2FCj
seg000:00118A44 57 A0 06 3E  clrlwi  %r0, %r29, 24
seg000:00118A48 28 00 00 03  cmplwi  %r0, 3
seg000:00118A4C 40 82 00 20  bne     error
seg000:00118A50 57 E0 06 3F  clrlwi. %r0, %r31, 24
seg000:00118A54 41 82 00 10  beq     good
seg000:00118A58 48 00 4B F5  bl      sub_11D64C
seg000:00118A5C 60 00 00 00  nop
seg000:00118A60 48 00 00 10  b       exit
seg000:00118A64
seg000:00118A64          good:      # CODE XREF: check3+318j
seg000:00118A64 38 60 00 01  li      %r3, 1
seg000:00118A68 48 00 00 08  b       exit
seg000:00118A6C
seg000:00118A6C          error:     # CODE XREF: check3+19Cj
seg000:00118A6C          # check3+238j ...
seg000:00118A6C 38 60 00 00  li      %r3, 0
seg000:00118A70
seg000:00118A70          exit:      # CODE XREF: check3+44j
seg000:00118A70          # check3+58j ...
seg000:00118A70 80 01 00 58  lwz     %r0, 0x50+arg_8(%sp)
seg000:00118A74 38 21 00 50  addi    %sp, %sp, 0x50
seg000:00118A78 83 E1 FF FC  lwz     %r31, var_4(%sp)
seg000:00118A7C 7C 08 03 A6  mtlr    %r0
seg000:00118A80 83 C1 FF F8  lwz     %r30, var_8(%sp)
seg000:00118A84 83 A1 FF F4  lwz     %r29, var_C(%sp)
seg000:00118A88 4E 80 00 20  blr
seg000:00118A88          # End of function check3
```

Здесь много вызовов `.RBEREAD()`. Эта функция, должно быть, читает какие-то значения из донглы, которые потом сравниваются здесь при помощи `CMPLWI`.

Мы также видим в регистр `r3` записывается перед каждым вызовом `.RBEREAD()` одно из этих значений: 0, 1, 8, 0xA, 0xB, 0xC, 0xD, 4, 5. Вероятно адрес в памяти или что-то в этом роде?

Да, действительно, если погуглить имена этих функций, можно легко найти документацию к Sentinel Eve3!

Наверное, уже и не нужно изучать остальные инструкции PowerPC: всё что делает эта функция это просто вызывает `.RBEREAD()`, сравнивает его результаты с константами и возвращает 1 если результат сравнения положительный или 0 в другом случае.

Всё ясно: `check1()` должна всегда возвращать 1 или иное ненулевое значение. Но так как мы не очень уверены в своих знаниях инструкций PowerPC, будем осторожны и пропатчим переходы в `check2` на адресах `0x001186FC` и `0x00118718`.

На `0x001186FC` мы записываем байты `0x48` и `0` таким образом превращая инструкцию **BEQ** в инструкцию **B** (безусловный переход): мы можем заметить этот опкод прямо в коде даже без обращения к *[PowerPC(tm) Microprocessor Family: The Programming Environments for 32-Bit Microprocessors, (2000)]*¹³.

На `0x00118718` мы записываем байт `0x60` и еще 3 нулевых байта, таким образом превращая её в инструкцию **NOP**: Этот опкод мы также можем посмотреть прямо в коде.

И всё заработало без подключенной донглы.

Резюмируя, такие простые модификации можно делать в **IDA** даже с минимальными знаниями ассемблера.

8.5.2. Пример #2: SCO OpenServer

Древняя программа для SCO OpenServer от 1997 разработанная давно исчезнувшей компанией.

Специальный драйвер донглы устанавливается в системе, он содержит такие текстовые строки: «Copyright 1989, Rainbow Technologies, Inc., Irvine, CA» и «Sentinel Integrated Driver Ver. 3.0».

После инсталляции драйвера, в `/dev` появляются такие устройства:

¹³Также доступно здесь: http://yurichev.com/mirrors/PowerPC/6xx_pem.pdf

```

/dev/rbsl8
/dev/rbsl9
/dev/rbsl10

```

Без подключенной донглы, программа сообщает об ошибке, но сообщение об ошибке не удается найти в исполняемых файлах.

Еще раз спасибо [IDA](#), она легко загружает исполняемые файлы формата COFF использующиеся в SCO OpenServer.

Попробуем также поискать строку «rbsl», и действительно, её можно найти в таком фрагменте кода:

```

.text:00022AB8      public SSQC
.text:00022AB8 SSQC  proc near ; CODE XREF: SSQC+7p
.text:00022AB8
.text:00022AB8      var_44 = byte ptr -44h
.text:00022AB8      var_29 = byte ptr -29h
.text:00022AB8      arg_0  = dword ptr  8
.text:00022AB8
.text:00022AB8      push    ebp
.text:00022AB8      mov     ebp, esp
.text:00022ABB      sub     esp, 44h
.text:00022ABE      push    edi
.text:00022ABF      mov     edi, offset unk_4035D0
.text:00022AC4      push    esi
.text:00022AC5      mov     esi, [ebp+arg_0]
.text:00022AC8      push    ebx
.text:00022AC9      push    esi
.text:00022ACA      call    strlen
.text:00022ACF      add     esp, 4
.text:00022AD2      cmp     eax, 2
.text:00022AD7      jnz     loc_22BA4
.text:00022ADD      inc     esi
.text:00022ADE      mov     al, [esi-1]
.text:00022AE1      movsx   eax, al
.text:00022AE4      cmp     eax, '3'
.text:00022AE9      jz      loc_22B84
.text:00022AEF      cmp     eax, '4'
.text:00022AF4      jz      loc_22B94
.text:00022AFA      cmp     eax, '5'
.text:00022AFF      jnz     short loc_22B6B
.text:00022B01      movsx   ebx, byte ptr [esi]
.text:00022B04      sub     ebx, '0'
.text:00022B07      mov     eax, 7
.text:00022B0C      add     eax, ebx
.text:00022B0E      push    eax
.text:00022B0F      lea     eax, [ebp+var_44]
.text:00022B12      push    offset aDevSlD ; "/dev/sl%d"
.text:00022B17      push    eax
.text:00022B18      call    nl_sprintf
.text:00022B1D      push    0 ; int
.text:00022B1F      push    offset aDevRbsl8 ; char *
.text:00022B24      call    _access
.text:00022B29      add     esp, 14h
.text:00022B2C      cmp     eax, 0FFFFFFFFh
.text:00022B31      jz      short loc_22B48
.text:00022B33      lea     eax, [ebx+7]
.text:00022B36      push    eax
.text:00022B37      lea     eax, [ebp+var_44]
.text:00022B3A      push    offset aDevRbslD ; "/dev/rbsl%d"
.text:00022B3F      push    eax
.text:00022B40      call    nl_sprintf
.text:00022B45      add     esp, 0Ch
.text:00022B48
.text:00022B48      loc_22B48: ; CODE XREF: SSQC+79j
.text:00022B48      mov     edx, [edi]
.text:00022B4A      test    edx, edx
.text:00022B4C      jle     short loc_22B57
.text:00022B4E      push    edx ; int

```

8.5. ДОНГЛЫ

```
.text:00022B4F      call     _close
.text:00022B54      add      esp, 4
.text:00022B57
.text:00022B57 loc_22B57: ; CODE XREF: SSQC+94j
.text:00022B57      push     2 ; int
.text:00022B59      lea      eax, [ebp+var_44]
.text:00022B5C      push     eax ; char *
.text:00022B5D      call     _open
.text:00022B62      add      esp, 8
.text:00022B65      test     eax, eax
.text:00022B67      mov      [edi], eax
.text:00022B69      jge      short loc_22B78
.text:00022B6B
.text:00022B6B loc_22B6B: ; CODE XREF: SSQC+47j
.text:00022B6B      mov      eax, 0FFFFFFFFh
.text:00022B70      pop      ebx
.text:00022B71      pop      esi
.text:00022B72      pop      edi
.text:00022B73      mov      esp, ebp
.text:00022B75      pop      ebp
.text:00022B76      retn
.text:00022B78
.text:00022B78 loc_22B78: ; CODE XREF: SSQC+B1j
.text:00022B78      pop      ebx
.text:00022B79      pop      esi
.text:00022B7A      pop      edi
.text:00022B7B      xor      eax, eax
.text:00022B7D      mov      esp, ebp
.text:00022B7F      pop      ebp
.text:00022B80      retn
.text:00022B84
.text:00022B84 loc_22B84: ; CODE XREF: SSQC+31j
.text:00022B84      mov      al, [esi]
.text:00022B86      pop      ebx
.text:00022B87      pop      esi
.text:00022B88      pop      edi
.text:00022B89      mov      ds:byte_407224, al
.text:00022B8E      mov      esp, ebp
.text:00022B90      xor      eax, eax
.text:00022B92      pop      ebp
.text:00022B93      retn
.text:00022B94
.text:00022B94 loc_22B94: ; CODE XREF: SSQC+3Cj
.text:00022B94      mov      al, [esi]
.text:00022B96      pop      ebx
.text:00022B97      pop      esi
.text:00022B98      pop      edi
.text:00022B99      mov      ds:byte_407225, al
.text:00022B9E      mov      esp, ebp
.text:00022BA0      xor      eax, eax
.text:00022BA2      pop      ebp
.text:00022BA3      retn
.text:00022BA4
.text:00022BA4 loc_22BA4: ; CODE XREF: SSQC+1Fj
.text:00022BA4      movsx    eax, ds:byte_407225
.text:00022BAB      push     esi
.text:00022BAC      push     eax
.text:00022BAD      movsx    eax, ds:byte_407224
.text:00022BB4      push     eax
.text:00022BB5      lea      eax, [ebp+var_44]
.text:00022BB8      push     offset a46CCS ; "46%c%c%s"
.text:00022BBD      push     eax
.text:00022BBE      call     nl_sprintf
.text:00022BC3      lea      eax, [ebp+var_44]
.text:00022BC6      push     eax
.text:00022BC7      call     strlen
.text:00022BCC      add      esp, 18h
.text:00022BCF      cmp      eax, 1Bh
.text:00022BD4      jle      short loc_22BDA
.text:00022BD6      mov      [ebp+var_29], 0
```

8.5. ДОНГЛЫ

```
.text:00022BDA
.text:00022BDA loc_22BDA: ; CODE XREF: SSQC+11Cj
.text:00022BDA      lea     eax, [ebp+var_44]
.text:00022BDD      push    eax
.text:00022BDE      call   strlen
.text:00022BE3      push    eax          ; unsigned int
.text:00022BE4      lea     eax, [ebp+var_44]
.text:00022BE7      push    eax          ; void *
.text:00022BE8      mov     eax, [edi]
.text:00022BEA      push    eax          ; int
.text:00022BEB      call   _write
.text:00022BF0      add     esp, 10h
.text:00022BF3      pop     ebx
.text:00022BF4      pop     esi
.text:00022BF5      pop     edi
.text:00022BF6      mov     esp, ebp
.text:00022BF8      pop     ebp
.text:00022BF9      retn
.text:00022BFA      db 0Eh dup(90h)
.text:00022BFA SSQC  endp
```

Действительно, должна же как-то программа обмениваться информацией с драйвером.

Единственное место где вызывается функция SSQC () это [thunk function](#):

```
.text:0000DBE8      public SSQ
.text:0000DBE8 SSQ   proc near ; CODE XREF: sys_info+A9p
.text:0000DBE8          ; sys_info+CBp ...
.text:0000DBE8 arg_0 = dword ptr 8
.text:0000DBE8
.text:0000DBE8      push    ebp
.text:0000DBE9      mov     ebp, esp
.text:0000DBEB      mov     edx, [ebp+arg_0]
.text:0000DBEE      push    edx
.text:0000DBEF      call   SSQC
.text:0000DBF4      add     esp, 4
.text:0000DBF7      mov     esp, ebp
.text:0000DBF9      pop     ebp
.text:0000DBFA      retn
.text:0000DBFB SSQ   endp
```

А вот SSQ() может вызываться по крайней мере из двух разных функций.

Одна из них:

```
.data:0040169C _51_52_53      dd offset aPressAnyKeyT_0 ; DATA XREF: init_sys+392r
.data:0040169C          ; sys_info+A1r
.data:0040169C          ; "PRESS ANY KEY TO CONTINUE: "
.data:004016A0          dd offset a51          ; "51"
.data:004016A4          dd offset a52          ; "52"
.data:004016A8          dd offset a53          ; "53"
...
.data:004016B8 _3C_or_3E      dd offset a3c          ; DATA XREF: sys_info:loc_D67Br
.data:004016B8          ; "3C"
.data:004016BC          dd offset a3e          ; "3E"
; these names we gave to the labels:
.data:004016C0 answers1      dd 6B05h          ; DATA XREF: sys_info+E7r
.data:004016C4          dd 3D87h
.data:004016C8 answers2      dd 3Ch          ; DATA XREF: sys_info+F2r
.data:004016CC          dd 832h
.data:004016D0 _C_and_B      db 0Ch          ; DATA XREF: sys_info+BAr
.data:004016D0          ; sys_info:OKr
.data:004016D1 byte_4016D1    db 0Bh          ; DATA XREF: sys_info+FDr
.data:004016D2          db 0
...
```

8.5. ДОНГЛЫ

```
.text:0000D652      xor     eax, eax
.text:0000D654      mov     al, ds:ctl_port
.text:0000D659      mov     ecx, _51_52_53[eax*4]
.text:0000D660      push    ecx
.text:0000D661      call    SSQ
.text:0000D666      add     esp, 4
.text:0000D669      cmp     eax, 0FFFFFFFFh
.text:0000D66E      jz      short loc_D6D1
.text:0000D670      xor     ebx, ebx
.text:0000D672      mov     al, _C_and_B
.text:0000D677      test    al, al
.text:0000D679      jz      short loc_D6C0
.text:0000D67B      loc_D67B: ; CODE XREF: sys_info+106j
.text:0000D67B      mov     eax, _3C_or_3E[ebx*4]
.text:0000D682      push    eax
.text:0000D683      call    SSQ
.text:0000D688      push    offset a4g          ; "4G"
.text:0000D68D      call    SSQ
.text:0000D692      push    offset a0123456789 ; "0123456789"
.text:0000D697      call    SSQ
.text:0000D69C      add     esp, 0Ch
.text:0000D69F      mov     edx, answers1[ebx*4]
.text:0000D6A6      cmp     eax, edx
.text:0000D6A8      jz      short 0K
.text:0000D6AA      mov     ecx, answers2[ebx*4]
.text:0000D6B1      cmp     eax, ecx
.text:0000D6B3      jz      short 0K
.text:0000D6B5      mov     al, byte_4016D1[ebx]
.text:0000D6BB      inc     ebx
.text:0000D6BC      test    al, al
.text:0000D6BE      jnz     short loc_D67B
.text:0000D6C0      loc_D6C0: ; CODE XREF: sys_info+C1j
.text:0000D6C0      inc     ds:ctl_port
.text:0000D6C6      xor     eax, eax
.text:0000D6C8      mov     al, ds:ctl_port
.text:0000D6CD      cmp     eax, edi
.text:0000D6CF      jle     short loc_D652
.text:0000D6D1      loc_D6D1: ; CODE XREF: sys_info+98j
.text:0000D6D1      ; sys_info+B6j
.text:0000D6D1      mov     edx, [ebp+var_8]
.text:0000D6D4      inc     edx
.text:0000D6D5      mov     [ebp+var_8], edx
.text:0000D6D8      cmp     edx, 3
.text:0000D6DB      jle     loc_D641
.text:0000D6E1      loc_D6E1: ; CODE XREF: sys_info+16j
.text:0000D6E1      ; sys_info+51j ...
.text:0000D6E1      pop     ebx
.text:0000D6E2      pop     edi
.text:0000D6E3      mov     esp, ebp
.text:0000D6E5      pop     ebp
.text:0000D6E6      retn
.text:0000D6E8      0K:      ; CODE XREF: sys_info+F0j
.text:0000D6E8      ; sys_info+FBj
.text:0000D6E8      mov     al, _C_and_B[ebx]
.text:0000D6EE      pop     ebx
.text:0000D6EF      pop     edi
.text:0000D6F0      mov     ds:ctl_model, al
.text:0000D6F5      mov     esp, ebp
.text:0000D6F7      pop     ebp
.text:0000D6F8      retn
.text:0000D6F8      sys_info      endp
```

«3С» и «3Е» — это звучит знакомо: когда-то была донгла Sentinel Pro от Rainbow без памяти, предоставляющая только одну секретную крипто-хеширующую функцию.

О том, что такое хэш-функция, было описано здесь: [2.11](#) (стр. 457).

8.5. ДОНГЛЫ

Но вернемся к нашей программе. Так что программа может только проверить подключена ли донгла или нет. Никакой больше информации в такую донглу без памяти записать нельзя. Двух-символьные коды — это команды (можно увидеть, как они обрабатываются в функции `SSQC()`) а все остальные строки хешируются внутри донглы превращаясь в 16-битное число. Алгоритм был секретный, так что нельзя было написать замену драйверу или сделать электронную копию донглы идеально эмулирующую алгоритм. С другой стороны, всегда можно было перехватить все обращения к ней и найти те константы, с которыми сравнивается результат хеширования. Но надо сказать, вполне возможно создать устойчивую защиту от копирования базирующуюся на секретной хеш-функции: пусть она шифрует все файлы с которыми ваша программа работает.

Но вернемся к нашему коду.

Коды 51/52/53 используются для выбора номера принтеровского LPT-порта. 3x/4x используются для выбора «family» так донглы Sentinel Pro можно отличать друг от друга: ведь более одной донглы может быть подключено к LPT-порту.

Единственная строка, передающаяся в хеш-функцию это "0123456789". Затем результат сравнивается с несколькими правильными значениями.

Если результат правилен, 0xC или 0xB будет записано в глобальную переменную `ctl_model`.

Еще одна строка для хеширования: "PRESS ANY KEY TO CONTINUE: ", но результат не проверяется. Трудно сказать, зачем это, может быть по ошибке ¹⁴.

Давайте посмотрим, где проверяется значение глобальной переменной `ctl_mode`.

Одно из таких мест:

```
.text:0000D708 prep_sys proc near ; CODE XREF: init_sys+46Ap
.text:0000D708
.text:0000D708 var_14 = dword ptr -14h
.text:0000D708 var_10 = byte ptr -10h
.text:0000D708 var_8 = dword ptr -8
.text:0000D708 var_2 = word ptr -2
.text:0000D708
.text:0000D708 push ebp
.text:0000D709 mov eax, ds:net_env
.text:0000D70E mov ebp, esp
.text:0000D710 sub esp, 1Ch
.text:0000D713 test eax, eax
.text:0000D715 jnz short loc_D734
.text:0000D717 mov al, ds:ctl_model
.text:0000D71C test al, al
.text:0000D71E jnz short loc_D77E
.text:0000D720 mov [ebp+var_8], offset aIeCvulnvv0kgT_ ; "Ie-cvulnvV\\b0KG]T_"
.text:0000D727 mov edx, 7
.text:0000D72C jmp loc_D7E7
...
.text:0000D7E7 loc_D7E7: ; CODE XREF: prep_sys+24j
.text:0000D7E7 ; prep_sys+33j
.text:0000D7E7 push edx
.text:0000D7E8 mov edx, [ebp+var_8]
.text:0000D7EB push 20h
.text:0000D7ED push edx
.text:0000D7EE push 16h
.text:0000D7F0 call err_warn
.text:0000D7F5 push offset station_sem
.text:0000D7FA call ClosSem
.text:0000D7FF call startup_err
```

Если оно 0, шифрованное сообщение об ошибке будет передано в функцию дешифрования, и оно будет показано.

Функция дешифровки сообщений об ошибке похоже применяет простой [xoring](#):

```
.text:0000A43C err_warn proc near ; CODE XREF: prep_sys+E8p
.text:0000A43C ; prep_sys2+2Fp ...
.text:0000A43C
```

¹⁴Это очень странное чувство: находить ошибки в столь древнем ПО.

8.5. ДОНГЛЫ

```
.text:0000A43C var_55      = byte ptr -55h
.text:0000A43C var_54      = byte ptr -54h
.text:0000A43C arg_0       = dword ptr 8
.text:0000A43C arg_4       = dword ptr 0Ch
.text:0000A43C arg_8       = dword ptr 10h
.text:0000A43C arg_C       = dword ptr 14h
.text:0000A43C
.text:0000A43C      push     ebp
.text:0000A43D      mov      ebp, esp
.text:0000A43F      sub      esp, 54h
.text:0000A442      push     edi
.text:0000A443      mov      ecx, [ebp+arg_8]
.text:0000A446      xor      edi, edi
.text:0000A448      test     ecx, ecx
.text:0000A44A      push     esi
.text:0000A44B      jle      short loc_A466
.text:0000A44D      mov      esi, [ebp+arg_C] ; key
.text:0000A450      mov      edx, [ebp+arg_4] ; string
.text:0000A453
.text:0000A453 loc_A453:                ; CODE XREF: err_warn+28j
.text:0000A453      xor      eax, eax
.text:0000A455      mov      al, [edx+edi]
.text:0000A458      xor      eax, esi
.text:0000A45A      add      esi, 3
.text:0000A45D      inc      edi
.text:0000A45E      cmp      edi, ecx
.text:0000A460      mov      [ebp+edi+var_55], al
.text:0000A464      jl       short loc_A453
.text:0000A466
.text:0000A466 loc_A466:                ; CODE XREF: err_warn+Fj
.text:0000A466      mov      [ebp+edi+var_54], 0
.text:0000A46B      mov      eax, [ebp+arg_0]
.text:0000A46E      cmp      eax, 18h
.text:0000A473      jnz      short loc_A49C
.text:0000A475      lea      eax, [ebp+var_54]
.text:0000A478      push     eax
.text:0000A479      call     status_line
.text:0000A47E      add      esp, 4
.text:0000A481
.text:0000A481 loc_A481:                ; CODE XREF: err_warn+72j
.text:0000A481      push     50h
.text:0000A483      push     0
.text:0000A485      lea      eax, [ebp+var_54]
.text:0000A488      push     eax
.text:0000A489      call     memset
.text:0000A48E      call     pcv_refresh
.text:0000A493      add      esp, 0Ch
.text:0000A496      pop      esi
.text:0000A497      pop      edi
.text:0000A498      mov      esp, ebp
.text:0000A49A      pop      ebp
.text:0000A49B      retn
.text:0000A49C
.text:0000A49C loc_A49C:                ; CODE XREF: err_warn+37j
.text:0000A49C      push     0
.text:0000A49E      lea      eax, [ebp+var_54]
.text:0000A4A1      mov      edx, [ebp+arg_0]
.text:0000A4A4      push     edx
.text:0000A4A5      push     eax
.text:0000A4A6      call     pcv_lputs
.text:0000A4AB      add      esp, 0Ch
.text:0000A4AE      jmp      short loc_A481
.text:0000A4AE err_warn      endp
```

Вот почему не получилось найти сообщение об ошибке в исполняемых файлах, потому что оно было зашифровано, это очень популярная практика.

Еще один вызов хеширующей функции передает строку «offln» и сравнивает результат с константами 0xFE81 и 0x12A9. Если результат не сходится, происходит работа с какой-то функцией timer() (может быть для ожидания плохо подключенной донглы и нового запроса?), затем дешифрует еще

8.5. ДОНГЛЫ

одно сообщение об ошибке и выводит его.

```
.text:0000DA55 loc_DA55:                                ; CODE XREF: sync_sys+24Cj
.text:0000DA55      push      offset a0ffln             ; "offln"
.text:0000DA5A      call      SSQ
.text:0000DA5F      add       esp, 4
.text:0000DA62      mov       dl, [ebx]
.text:0000DA64      mov       esi, eax
.text:0000DA66      cmp       dl, 0Bh
.text:0000DA69      jnz       short loc_DA83
.text:0000DA6B      cmp       esi, 0FE81h
.text:0000DA71      jz        OK
.text:0000DA77      cmp       esi, 0FFFFFF8EFh
.text:0000DA7D      jz        OK
.text:0000DA83 loc_DA83:                                ; CODE XREF: sync_sys+201j
.text:0000DA83      mov       cl, [ebx]
.text:0000DA85      cmp       cl, 0Ch
.text:0000DA88      jnz       short loc_DA9F
.text:0000DA8A      cmp       esi, 12A9h
.text:0000DA90      jz        OK
.text:0000DA96      cmp       esi, 0FFFFFFF5h
.text:0000DA99      jz        OK
.text:0000DA9F loc_DA9F:                                ; CODE XREF: sync_sys+220j
.text:0000DA9F      mov       eax, [ebp+var_18]
.text:0000DAA2      test      eax, eax
.text:0000DAA4      jz        short loc_DAB0
.text:0000DAA6      push      24h
.text:0000DAA8      call      timer
.text:0000DAAD      add       esp, 4
.text:0000DAB0 loc_DAB0:                                ; CODE XREF: sync_sys+23Cj
.text:0000DAB0      inc       edi
.text:0000DAB1      cmp       edi, 3
.text:0000DAB4      jle       short loc_DA55
.text:0000DAB6      mov       eax, ds:net_env
.text:0000DABB      test      eax, eax
.text:0000DABD      jz        short error
...

.text:0000DAF7 error:                                ; CODE XREF: sync_sys+255j
.text:0000DAF7      ; sync_sys+274j ...
.text:0000DAF7      mov       [ebp+var_8], offset encrypted_error_message2
.text:0000DAFE      mov       [ebp+var_C], 17h ; decrypting key
.text:0000DB05      jmp      decrypt_end_print_message
...

; this name we gave to label:
.text:0000D9B6 decrypt_end_print_message:            ; CODE XREF: sync_sys+29Dj
.text:0000D9B6      ; sync_sys+2ABj
.text:0000D9B6      mov       eax, [ebp+var_18]
.text:0000D9B9      test      eax, eax
.text:0000D9BB      jnz       short loc_D9FB
.text:0000D9BD      mov       edx, [ebp+var_C] ; key
.text:0000D9C0      mov       ecx, [ebp+var_8] ; string
.text:0000D9C3      push      edx
.text:0000D9C4      push      20h
.text:0000D9C6      push      ecx
.text:0000D9C7      push      18h
.text:0000D9C9      call      err_warn
.text:0000D9CE      push      0Fh
.text:0000D9D0      push      190h
.text:0000D9D5      call      sound
.text:0000D9DA      mov       [ebp+var_18], 1
.text:0000D9E1      add       esp, 18h
.text:0000D9E4      call      pcv_kbhit
.text:0000D9E9      test      eax, eax
```


8.5. ДОНГЛЫ

```
.text:0000D9EB          jz      short loc_D9FB
...

; this name we gave to label:
.data:00401736 encrypted_error_message2 db 74h, 72h, 78h, 43h, 48h, 6, 5Ah, 49h, 4Ch, 2 dup(47h
    ↵ )
.data:00401736          db 51h, 4Fh, 47h, 61h, 20h, 22h, 3Ch, 24h, 33h, 36h, 76h
.data:00401736          db 3Ah, 33h, 31h, 0Ch, 0, 0Bh, 1Fh, 7, 1Eh, 1Ah
```

Заставить работать программу без донглы довольно просто: просто пропатчить все места после инструкций CMP где происходят соответствующие сравнения.

Еще одна возможность — это написать свой драйвер для SCO OpenServer, содержащий таблицу возможных вопросов и ответов, все те что имеются в программе.

Дешифровка сообщений об ошибке

Кстати, мы также можем дешифровать все сообщения об ошибке. Алгоритм, находящийся в функции `err_warn()` действительно, крайне прост:

Листинг 8.3: Функция дешифровки

```
.text:0000A44D          mov     esi, [ebp+arg_C] ; key
.text:0000A450          mov     edx, [ebp+arg_4] ; string
.text:0000A453 loc_A453:
.text:0000A453          xor     eax, eax
.text:0000A455          mov     al, [edx+edi] ; загружаем байт для дешифровки
.text:0000A458          xor     eax, esi      ; дешифруем его
.text:0000A45A          add     esi, 3        ; изменяем ключ для следующего байта
.text:0000A45D          inc     edi
.text:0000A45E          cmp     edi, ecx
.text:0000A460          mov     [ebp+edi+var_55], al
.text:0000A464          jl     short loc_A453
```

Как видно, не только сама строка поступает на вход, но также и ключ для дешифровки:

```
.text:0000DAF7 error:                                     ; CODE XREF: sync_sys+255j
.text:0000DAF7                                     ; sync_sys+274j ...
.text:0000DAF7          mov     [ebp+var_8], offset encrypted_error_message2
.text:0000DAFE          mov     [ebp+var_C], 17h ; decrypting key
.text:0000DB05          jmp     decrypt_end_print_message
...

; this name we gave to label manually:
.text:0000D9B6 decrypt_end_print_message:                ; CODE XREF: sync_sys+29Dj
.text:0000D9B6                                     ; sync_sys+2ABj
.text:0000D9B6          mov     eax, [ebp+var_18]
.text:0000D9B9          test    eax, eax
.text:0000D9BB          jnz     short loc_D9FB
.text:0000D9BD          mov     edx, [ebp+var_C] ; key
.text:0000D9C0          mov     ecx, [ebp+var_8] ; string
.text:0000D9C3          push    edx
.text:0000D9C4          push    20h
.text:0000D9C6          push    ecx
.text:0000D9C7          push    18h
.text:0000D9C9          call   err_warn
```

Алгоритм это очень простой **xoring**: каждый байт XOR-ится с ключом, но ключ увеличивается на 3 после обработки каждого байта.

Напишем небольшой скрипт на Python для проверки наших догадок:

Листинг 8.4: Python 3.x

```
#!/usr/bin/python
import sys
```

8.5. ДОНГЛЫ

```
msg=[0x74, 0x72, 0x78, 0x43, 0x48, 0x6, 0x5A, 0x49, 0x4C, 0x47, 0x47,  
0x51, 0x4F, 0x47, 0x61, 0x20, 0x22, 0x3C, 0x24, 0x33, 0x36, 0x76,  
0x3A, 0x33, 0x31, 0x0C, 0x0, 0x0B, 0x1F, 0x7, 0x1E, 0x1A]  
  
key=0x17  
tmp=key  
for i in msg:  
    sys.stdout.write ("%c" % (i^tmp))  
    tmp=tmp+3  
sys.stdout.flush()
```

И он выводит: «check security device connection». Так что да, это дешифрованное сообщение.

Здесь есть также и другие сообщения, с соответствующими ключами. Но надо сказать, их можно дешифровать и без ключей. В начале, мы можем заметить, что ключ — это просто байт. Это потому что самая важная часть функции дешифровки (XOR) оперирует байтами. Ключ находится в регистре ESI, но только младшие 8 бит (т.е. байт) регистра используются. Следовательно, ключ может быть больше 255, но его значение будет округляться.

И как следствие, мы можем попробовать обычный перебор всех ключей в диапазоне 0..255. Мы также можем пропускать сообщения содержащие непечатные символы.

Листинг 8.5: Python 3.x

```
#!/usr/bin/python  
import sys, curses.ascii  
  
msgs=[  
[0x74, 0x72, 0x78, 0x43, 0x48, 0x6, 0x5A, 0x49, 0x4C, 0x47, 0x47,  
0x51, 0x4F, 0x47, 0x61, 0x20, 0x22, 0x3C, 0x24, 0x33, 0x36, 0x76,  
0x3A, 0x33, 0x31, 0x0C, 0x0, 0x0B, 0x1F, 0x7, 0x1E, 0x1A],  
  
[0x49, 0x65, 0x2D, 0x63, 0x76, 0x75, 0x6C, 0x6E, 0x76, 0x56, 0x5C,  
8, 0x4F, 0x4B, 0x47, 0x5D, 0x54, 0x5F, 0x1D, 0x26, 0x2C, 0x33,  
0x27, 0x28, 0x6F, 0x72, 0x75, 0x78, 0x7B, 0x7E, 0x41, 0x44],  
  
[0x45, 0x61, 0x31, 0x67, 0x72, 0x79, 0x68, 0x52, 0x4A, 0x52, 0x50,  
0x0C, 0x4B, 0x57, 0x43, 0x51, 0x58, 0x5B, 0x61, 0x37, 0x33, 0x2B,  
0x39, 0x39, 0x3C, 0x38, 0x79, 0x3A, 0x30, 0x17, 0x0B, 0x0C],  
  
[0x40, 0x64, 0x79, 0x75, 0x7F, 0x6F, 0x0, 0x4C, 0x40, 0x9, 0x4D, 0x5A,  
0x46, 0x5D, 0x57, 0x49, 0x57, 0x3B, 0x21, 0x23, 0x6A, 0x38, 0x23,  
0x36, 0x24, 0x2A, 0x7C, 0x3A, 0x1A, 0x6, 0x0D, 0x0E, 0x0A, 0x14,  
0x10],  
  
[0x72, 0x7C, 0x72, 0x79, 0x76, 0x0,  
0x50, 0x43, 0x4A, 0x59, 0x5D, 0x5B, 0x41, 0x41, 0x1B, 0x5A,  
0x24, 0x32, 0x2E, 0x29, 0x28, 0x70, 0x20, 0x22, 0x38, 0x28, 0x36,  
0x0D, 0x0B, 0x48, 0x4B, 0x4E]]  
  
def is_string_printable(s):  
    return all(list(map(lambda x: curses.ascii.isprint(x), s)))  
  
cnt=1  
for msg in msgs:  
    print ("message #%d" % cnt)  
    for key in range(0,256):  
        result=[]  
        tmp=key  
        for i in msg:  
            result.append (i^tmp)  
            tmp=tmp+3  
        if is_string_printable (result):  
            print ("key=", key, "value=", "".join(list(map(chr, result))))  
    cnt=cnt+1
```

И мы получим:

Листинг 8.6: Results

8.5. ДОНГЛЫ

```
message #1
key= 20 value= `eb^h%|``hudw|_af{n~f%ljmSbnwlpk
key= 21 value= ajc|i"}cawtg{^bgto}g"millcmvkqh
key= 22 value= bkd\j#rbbvsfuz!cduh|d#bhomdlujni
key= 23 value= check security device connection
key= 24 value= lifbl!pd|tqhsx#ejwjbbl`nQofbshlo
message #2
key= 7 value= No security device found
key= 8 value= An#rbbvsVuz!cduhld#ghtme?!#`'!#!
message #3
key= 7 value= Bk<waoqNUpu$`yrea\wmpusj,bkIjh
key= 8 value= Mj?vfnr0jqv%gxqd``_vwlstlk/clHii
key= 9 value= Lm>ugasLkvw&fgpgag^uvcrwml.`mwhj
key= 10 value= 0l!td`tmhwx'efwfbf!tubuvnm!anvok
key= 11 value= No security device station found
key= 12 value= In#rjbvsnuz!{duhdd#r{`whho#gPtme
message #4
key= 14 value= Number of authorized users exceeded
key= 15 value= 0vlmdq!hg#`juknuhydk!vrbsp!Zy`dbefe
message #5
key= 17 value= check security device station
key= 18 value= `ijbh!td`tmhwx'efwfbf!tubuVnm`'!
```

Тут есть какой-то мусор, но мы можем быстро отыскать сообщения на английском языке!

Кстати, так как алгоритм использует простой XOR, та же функция может использоваться и для шифрования сообщения. Если нужно, мы можем зашифровать наши собственные сообщения, и пропатчить программу вставив их.

8.5.3. Пример #3: MS-DOS

Еще одна очень старая программа для MS-DOS от 1995 также разработанная давно исчезнувшей компанией.

Во времена перед DOS-экстендерами, всё ПО для MS-DOS рассчитывалось на процессоры 8086 или 80286, так что в своей массе весь код был 16-битным. 16-битный код в основном такой же, какой вы уже видели в этой книге, но все регистры 16-битные, и доступно меньше инструкций.

Среда MS-DOS не могла иметь никаких драйверов, и ПО работало с «голым» железом через порты, так что здесь вы можете увидеть инструкции OUT/IN, которые в наше время присутствуют в основном только в драйверах (в современных OS нельзя обращаться на прямую к портам из [user mode](#)).

Учитывая это, ПО для MS-DOS должно работать с донглой обращаясь к принтерному LPT-порту напрямую. Так что мы можем просто поискать эти инструкции. И да, вот они:

```
seg030:0034          out_port proc far ; CODE XREF: sent_pro+22p
seg030:0034                                     ; sent_pro+2Ap ...
seg030:0034
seg030:0034          arg_0      = byte ptr 6
seg030:0034
seg030:0034 55          push     bp
seg030:0035 8B EC        mov     bp, sp
seg030:0037 8B 16 7E E7    mov     dx, _out_port ; 0x378
seg030:003B 8A 46 06      mov     al, [bp+arg_0]
seg030:003E EE          out      dx, al
seg030:003F 5D          pop      bp
seg030:0040 CB          retf
seg030:0040          out_port endp
```

(Все имена меток в этом примере даны мною).

Функция `out_port()` вызывается только из одной функции:

```
seg030:0041          sent_pro proc far ; CODE XREF: check_dongle+34p
seg030:0041
seg030:0041          var_3      = byte ptr -3
seg030:0041          var_2      = word ptr -2
seg030:0041          arg_0      = dword ptr 6
```

8.5. ДОНГЛЫ

```

seg030:0041
seg030:0041 C8 04 00 00      enter    4, 0
seg030:0045 56              push     si
seg030:0046 57              push     di
seg030:0047 8B 16 82 E7      mov      dx, _in_port_1 ; 0x37A
seg030:004B EC              in       al, dx
seg030:004C 8A D8          mov      bl, al
seg030:004E 80 E3 FE          and      bl, 0FEh
seg030:0051 80 CB 04          or       bl, 4
seg030:0054 8A C3          mov      al, bl
seg030:0056 88 46 FD          mov      [bp+var_3], al
seg030:0059 80 E3 1F          and      bl, 1Fh
seg030:005C 8A C3          mov      al, bl
seg030:005E EE              out      dx, al
seg030:005F 68 FF 00          push     0FFh
seg030:0062 0E              push     cs
seg030:0063 E8 CE FF          call    near ptr out_port
seg030:0066 59              pop      cx
seg030:0067 68 D3 00          push     0D3h
seg030:006A 0E              push     cs
seg030:006B E8 C6 FF          call    near ptr out_port
seg030:006E 59              pop      cx
seg030:006F 33 F6          xor      si, si
seg030:0071 EB 01          jmp      short loc_359D4
seg030:0073
seg030:0073          loc_359D3: ; CODE XREF: sent_pro+37j
seg030:0073 46              inc      si
seg030:0074
seg030:0074          loc_359D4: ; CODE XREF: sent_pro+30j
seg030:0074 81 FE 96 00      cmp      si, 96h
seg030:0078 7C F9          jl       short loc_359D3
seg030:007A 68 C3 00          push     0C3h
seg030:007D 0E              push     cs
seg030:007E E8 B3 FF          call    near ptr out_port
seg030:0081 59              pop      cx
seg030:0082 68 C7 00          push     0C7h
seg030:0085 0E              push     cs
seg030:0086 E8 AB FF          call    near ptr out_port
seg030:0089 59              pop      cx
seg030:008A 68 D3 00          push     0D3h
seg030:008D 0E              push     cs
seg030:008E E8 A3 FF          call    near ptr out_port
seg030:0091 59              pop      cx
seg030:0092 68 C3 00          push     0C3h
seg030:0095 0E              push     cs
seg030:0096 E8 9B FF          call    near ptr out_port
seg030:0099 59              pop      cx
seg030:009A 68 C7 00          push     0C7h
seg030:009D 0E              push     cs
seg030:009E E8 93 FF          call    near ptr out_port
seg030:00A1 59              pop      cx
seg030:00A2 68 D3 00          push     0D3h
seg030:00A5 0E              push     cs
seg030:00A6 E8 8B FF          call    near ptr out_port
seg030:00A9 59              pop      cx
seg030:00AA BF FF FF          mov      di, 0FFFFh
seg030:00AD EB 40          jmp      short loc_35A4F
seg030:00AF
seg030:00AF          loc_35A0F: ; CODE XREF: sent_pro+BDj
seg030:00AF BE 04 00          mov      si, 4
seg030:00B2
seg030:00B2          loc_35A12: ; CODE XREF: sent_pro+ACj
seg030:00B2 D1 E7          shl      di, 1
seg030:00B4 8B 16 80 E7      mov      dx, _in_port_2 ; 0x379
seg030:00B8 EC              in       al, dx
seg030:00B9 A8 80          test     al, 80h
seg030:00BB 75 03          jnz      short loc_35A20
seg030:00BD 83 CF 01          or       di, 1
seg030:00C0
seg030:00C0          loc_35A20: ; CODE XREF: sent_pro+7Aj

```

8.5. ДОНГЛЫ

```

seg030:00C0 F7 46 FE 08+      test    [bp+var_2], 8
seg030:00C5 74 05              jz      short loc_35A2C
seg030:00C7 68 D7 00              push    0D7h ; '+'
seg030:00CA EB 0B              jmp     short loc_35A37
seg030:00CC
seg030:00CC      loc_35A2C: ; CODE XREF: sent_pro+84j
seg030:00CC 68 C3 00              push    0C3h
seg030:00CF 0E              push    cs
seg030:00D0 E8 61 FF              call    near ptr out_port
seg030:00D3 59              pop     cx
seg030:00D4 68 C7 00              push    0C7h
seg030:00D7
seg030:00D7      loc_35A37: ; CODE XREF: sent_pro+89j
seg030:00D7 0E              push    cs
seg030:00D8 E8 59 FF              call    near ptr out_port
seg030:00DB 59              pop     cx
seg030:00DC 68 D3 00              push    0D3h
seg030:00DF 0E              push    cs
seg030:00E0 E8 51 FF              call    near ptr out_port
seg030:00E3 59              pop     cx
seg030:00E4 8B 46 FE              mov     ax, [bp+var_2]
seg030:00E7 D1 E0              shl     ax, 1
seg030:00E9 89 46 FE              mov     [bp+var_2], ax
seg030:00EC 4E              dec     si
seg030:00ED 75 C3              jnz     short loc_35A12
seg030:00EF
seg030:00EF      loc_35A4F: ; CODE XREF: sent_pro+6Cj
seg030:00EF C4 5E 06              les     bx, [bp+arg_0]
seg030:00F2 FF 46 06              inc     word ptr [bp+arg_0]
seg030:00F5 26 8A 07              mov     al, es:[bx]
seg030:00F8 98              cbw
seg030:00F9 89 46 FE              mov     [bp+var_2], ax
seg030:00FC 0B C0              or      ax, ax
seg030:00FE 75 AF              jnz     short loc_35A0F
seg030:0100 68 FF 00              push    0FFh
seg030:0103 0E              push    cs
seg030:0104 E8 2D FF              call    near ptr out_port
seg030:0107 59              pop     cx
seg030:0108 8B 16 82 E7          mov     dx, _in_port_1 ; 0x37A
seg030:010C EC              in      al, dx
seg030:010D 8A C8              mov     cl, al
seg030:010F 80 E1 5F              and     cl, 5Fh
seg030:0112 8A C1              mov     al, cl
seg030:0114 EE              out     dx, al
seg030:0115 EC              in      al, dx
seg030:0116 8A C8              mov     cl, al
seg030:0118 F6 C1 20              test    cl, 20h
seg030:011B 74 08              jz      short loc_35A85
seg030:011D 8A 5E FD              mov     bl, [bp+var_3]
seg030:0120 80 E3 DF              and     bl, 0DFh
seg030:0123 EB 03              jmp     short loc_35A88
seg030:0125
seg030:0125      loc_35A85: ; CODE XREF: sent_pro+DAj
seg030:0125 8A 5E FD              mov     bl, [bp+var_3]
seg030:0128
seg030:0128      loc_35A88: ; CODE XREF: sent_pro+E2j
seg030:0128 F6 C1 80              test    cl, 80h
seg030:012B 74 03              jz      short loc_35A90
seg030:012D 80 E3 7F              and     bl, 7Fh
seg030:0130
seg030:0130      loc_35A90: ; CODE XREF: sent_pro+EAj
seg030:0130 8B 16 82 E7          mov     dx, _in_port_1 ; 0x37A
seg030:0134 8A C3              mov     al, bl
seg030:0136 EE              out     dx, al
seg030:0137 8B C7              mov     ax, di
seg030:0139 5F              pop     di
seg030:013A 5E              pop     si
seg030:013B C9              leave
seg030:013C CB              retf
seg030:013C      sent_pro endp

```

8.5. ДОНГЛЫ

Это также «хеширующая» донгла Sentinel Pro как и в предыдущем примере. Это заметно по тому что текстовые строки передаются и здесь, 16-битные значения также возвращаются и сравниваются с другими.

Так вот как происходит работа с Sentinel Pro через порты. Адрес выходного порта обычно 0x378, т.е. принтерного порта, данные для него во времена перед USB отправлялись прямо сюда. Порт односторонний, потому что когда его разрабатывали, никто не мог предположить, что кому-то понадобится получать информацию из принтера ¹⁵. Единственный способ получить информацию из принтера это регистр статуса на порту 0x379, он содержит такие биты как «paper out», «ack», «busy» — так принтер может сигнализировать о том, что он готов или нет, и о том, есть ли в нем бумага. Так что донгла возвращает информацию через какой-то из этих бит, по одному биту на каждой итерации.

_in_port_2 содержит адрес статуса (0x379) и _in_port_1 содержит адрес управляющего регистра (0x37A).

Судя по всему, донгла возвращает информацию только через флаг «busy» на seg030:00B9: каждый бит записывается в регистре DI позже возвращаемый в самом конце функции.

Что означают все эти отсылаемые в выходной порт байты? Трудно сказать. Возможно, команды донглы. Но честно говоря, нам и не обязательно знать: нашу задачу можно легко решить и без этих знаний.

Вот функция проверки донглы:

```
00000000 struct_0      struc ; (sizeof=0x1B)
00000000 field_0       db 25 dup(?)          ; string(C)
00000019 _A           dw ?
0000001B struct_0      ends

dseg:3CBC 61 63 72 75+_Q struct_0 <'hello', 01122h>
dseg:3CBC 6E 00 00 00+   ; DATA XREF: check_dongle+2Eo

... skipped ...

dseg:3E00 63 6F 66 66+   struct_0 <'coffee', 7EB7h>
dseg:3E1B 64 6F 67 00+   struct_0 <'dog', 0FFADh>
dseg:3E36 63 61 74 00+   struct_0 <'cat', 0FF5Fh>
dseg:3E51 70 61 70 65+   struct_0 <'paper', 0FFDFh>
dseg:3E6C 63 6F 6B 65+   struct_0 <'coke', 0F568h>
dseg:3E87 63 6C 6F 63+   struct_0 <'clock', 55EAh>
dseg:3EA2 64 69 72 00+   struct_0 <'dir', 0FFAEh>
dseg:3EBD 63 6F 70 79+   struct_0 <'copy', 0F557h>

seg030:0145             check_dongle proc far ; CODE XREF: sub_3771D+3EP
seg030:0145
seg030:0145             var_6 = dword ptr -6
seg030:0145             var_2 = word ptr -2
seg030:0145
seg030:0145 C8 06 00 00      enter     6, 0
seg030:0149 56          push     si
seg030:014A 66 6A 00      push     large 0          ; newtime
seg030:014D 6A 00      push     0              ; cmd
seg030:014F 9A C1 18 00+   call     _biostime
seg030:0154 52          push     dx
seg030:0155 50          push     ax
seg030:0156 66 58      pop      eax
seg030:0158 83 C4 06      add      sp, 6
seg030:015B 66 89 46 FA      mov      [bp+var_6], eax
seg030:015F 66 3B 06 D8+   cmp      eax, _expiration
seg030:0164 7E 44      jle      short loc_35B0A
seg030:0166 6A 14      push     14h
seg030:0168 90          nop
seg030:0169 0E          push     cs
seg030:016A E8 52 00      call     near ptr get_rand
seg030:016D 59          pop      cx
seg030:016E 8B F0      mov      si, ax
```

¹⁵Если учитывать только Centronics и не учитывать последующий стандарт IEEE 1284 — в нем из принтера можно получать информацию.

8.5. ДОНГЛЫ

```
seg030:0170 6B C0 1B      imul    ax, 1Bh
seg030:0173 05 BC 3C      add     ax, offset _Q
seg030:0176 1E          push    ds
seg030:0177 50          push    ax
seg030:0178 0E          push    cs
seg030:0179 E8 C5 FE      call    near ptr sent_pro
seg030:017C 83 C4 04      add     sp, 4
seg030:017F 89 46 FE      mov     [bp+var_2], ax
seg030:0182 8B C6      mov     ax, si
seg030:0184 6B C0 12      imul    ax, 18
seg030:0187 66 0F BF C0    movsx   eax, ax
seg030:018B 66 8B 56 FA    mov     edx, [bp+var_6]
seg030:018F 66 03 D0      add     edx, eax
seg030:0192 66 89 16 D8+    mov     _expiration, edx
seg030:0197 8B DE      mov     bx, si
seg030:0199 6B DB 1B      imul    bx, 27
seg030:019C 8B 87 D5 3C    mov     ax, _Q._A[bx]
seg030:01A0 3B 46 FE      cmp     ax, [bp+var_2]
seg030:01A3 74 05      jz      short loc_35B0A
seg030:01A5 B8 01 00      mov     ax, 1
seg030:01A8 EB 02      jmp     short loc_35B0C
seg030:01AA
seg030:01AA      loc_35B0A: ; CODE XREF: check_dongle+1Fj
seg030:01AA      ; check_dongle+5Ej
seg030:01AA 33 C0      xor     ax, ax
seg030:01AC
seg030:01AC      loc_35B0C: ; CODE XREF: check_dongle+63j
seg030:01AC 5E      pop     si
seg030:01AD C9      leave
seg030:01AE CB      retf
seg030:01AE      check_dongle endp
```

А так как эта функция может вызываться слишком часто, например, перед выполнением каждой важной возможности ПО, а обращение к донгле вообще-то медленное (и из-за медленного принтерного порта, и из-за медленного **MCU** в донгле), так что они, наверное, добавили возможность пропускать проверку донглы слишком часто, используя текущее время в функции `biostime()`.

Функция `get_rand()` использует стандартную функцию Си:

```
seg030:01BF      get_rand proc far ; CODE XREF: check_dongle+25p
seg030:01BF
seg030:01BF      arg_0      = word ptr 6
seg030:01BF
seg030:01BF 55      push    bp
seg030:01C0 8B EC      mov     bp, sp
seg030:01C2 9A 3D 21 00+    call    _rand
seg030:01C7 66 0F BF C0    movsx   eax, ax
seg030:01CB 66 0F BF 56+    movsx   edx, [bp+arg_0]
seg030:01D0 66 0F AF C2      imul    eax, edx
seg030:01D4 66 BB 00 80+    mov     ebx, 8000h
seg030:01DA 66 99      cdq
seg030:01DC 66 F7 FB      idiv    ebx
seg030:01DF 5D      pop     bp
seg030:01E0 CB      retf
seg030:01E0      get_rand endp
```

Так что текстовая строка выбирается случайно, отправляется в донглу и результат хеширования сверяется с корректным значением.

Текстовые строки, похоже, составлялись так же случайно, во время разработки ПО.

И вот как вызывается главная процедура проверки донглы:

```
seg033:087B 9A 45 01 96+    call    check_dongle
seg033:0880 0B C0      or      ax, ax
seg033:0882 74 62      jz      short OK
seg033:0884 83 3E 60 42+    cmp     word_620E0, 0
seg033:0889 75 5B      jnz     short OK
seg033:088B FF 06 60 42      inc     word_620E0
seg033:088F 1E      push    ds
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
seg033:0890 68 22 44      push    offset aTrupcRequiresA ; "This Software Requires a Software ↵
    ↳ Lock\n"
seg033:0893 1E          push    ds
seg033:0894 68 60 E9      push    offset byte_6C7E0 ; dest
seg033:0897 9A 79 65 00+  call    _strcpy
seg033:089C 83 C4 08      add     sp, 8
seg033:089F 1E          push    ds
seg033:08A0 68 42 44      push    offset aPleaseContactA ; "Please Contact ..."
seg033:08A3 1E          push    ds
seg033:08A4 68 60 E9      push    offset byte_6C7E0 ; dest
seg033:08A7 9A CD 64 00+  call    _strcat
```

Заставить работать программу без донглы очень просто: просто заставить функцию `check_dongle()` возвращать всегда 0.

Например, вставив такой код в самом её начале:

```
mov ax,0
retf
```

Наблюдательный читатель может заметить, что функция Си `strcpy()` имеет 2 аргумента, но здесь мы видим, что передается 4:

```
seg033:088F 1E          push    ds
seg033:0890 68 22 44      push    offset aTrupcRequiresA ; "This Software ↵
    ↳ Requires a Software Lock\n"
seg033:0893 1E          push    ds
seg033:0894 68 60 E9      push    offset byte_6C7E0 ; dest
seg033:0897 9A 79 65 00+  call    _strcpy
seg033:089C 83 C4 08      add     sp, 8
```

Это связано с моделью памяти в MS-DOS. Об этом больше читайте здесь: [10.6](#) (стр. 978).

Так что, `strcpy()`, как и любая другая функция принимающая указатель (-и) в аргументах, работает с 16-битными парами.

Вернемся к нашему примеру. DS сейчас указывает на сегмент данных размещенный в исполняемом файле, там, где хранится текстовая строка.

В функции `sent_pro()` каждый байт строки загружается на `seg030:00EF`: инструкция `LES` загружает из переданного аргумента пару `ES:BX` одновременно. `MOV` на `seg030:00F5` загружает байт из памяти, на который указывает пара `ES:BX`.

8.6. «QR9»: Любительская криптосистема, вдохновленная кубиком Рубика

Любительские криптосистемы иногда встречаются довольно странные.

Однажды автора сих строк попросили разобраться с одним таким любительским криптоалгоритмом встроенным в утилиту для шифрования, исходный код которой был утерян¹⁶.

Вот листинг этой утилиты для шифрования, полученный при помощи [IDA](#):

```
.text:00541000 set_bit      proc near ; CODE XREF: rotate1+42
.text:00541000                      ; rotate2+42 ...
.text:00541000
.text:00541000 arg_0       = dword ptr 4
.text:00541000 arg_4       = dword ptr 8
.text:00541000 arg_8       = dword ptr 0Ch
.text:00541000 arg_C       = byte ptr 10h
.text:00541000
.text:00541000 mov     al, [esp+arg_C]
.text:00541004 mov     ecx, [esp+arg_8]
.text:00541008 push    esi
.text:00541009 mov     esi, [esp+4+arg_0]
.text:0054100D test    al, al
```

¹⁶Он также получил разрешение от клиента на публикацию деталей алгоритма

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:0054100F      mov     eax, [esp+4+arg_4]
.text:00541013      mov     dl, 1
.text:00541015      jz      short loc_54102B
.text:00541017      shl     dl, cl
.text:00541019      mov     cl, cube64[eax+esi*8]
.text:00541020      or      cl, dl
.text:00541022      mov     cube64[eax+esi*8], cl
.text:00541029      pop     esi
.text:0054102A      retn
.text:0054102B
.text:0054102B loc_54102B:      ; CODE XREF: set_bit+15
.text:0054102B      shl     dl, cl
.text:0054102D      mov     cl, cube64[eax+esi*8]
.text:00541034      not     dl
.text:00541036      and     cl, dl
.text:00541038      mov     cube64[eax+esi*8], cl
.text:0054103F      pop     esi
.text:00541040      retn
.text:00541040 set_bit      endp
.text:00541040
.text:00541041      align 10h
.text:00541050
.text:00541050 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541050
.text:00541050
.text:00541050 get_bit      proc near ; CODE XREF: rotate1+16
.text:00541050      ; rotate2+16 ...
.text:00541050
.text:00541050 arg_0      = dword ptr 4
.text:00541050 arg_4      = dword ptr 8
.text:00541050 arg_8      = byte ptr 0Ch
.text:00541050
.text:00541050      mov     eax, [esp+arg_4]
.text:00541054      mov     ecx, [esp+arg_0]
.text:00541058      mov     al, cube64[eax+ecx*8]
.text:0054105F      mov     cl, [esp+arg_8]
.text:00541063      shr     al, cl
.text:00541065      and     al, 1
.text:00541067      retn
.text:00541067 get_bit      endp
.text:00541067
.text:00541068      align 10h
.text:00541070
.text:00541070 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541070
.text:00541070
.text:00541070 rotate1      proc near ; CODE XREF: rotate_all_with_password+8E
.text:00541070
.text:00541070 internal_array_64= byte ptr -40h
.text:00541070 arg_0      = dword ptr 4
.text:00541070
.text:00541070      sub     esp, 40h
.text:00541073      push    ebx
.text:00541074      push    ebp
.text:00541075      mov     ebp, [esp+48h+arg_0]
.text:00541079      push    esi
.text:0054107A      push    edi
.text:0054107B      xor     edi, edi ; EDI is loop1 counter
.text:0054107D      lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:00541081
.text:00541081 first_loop1_begin:      ; CODE XREF: rotate1+2E
.text:00541081      xor     esi, esi ; ESI is loop2 counter
.text:00541083
.text:00541083 first_loop2_begin:      ; CODE XREF: rotate1+25
.text:00541083      push    ebp ; arg_0
.text:00541084      push    esi
.text:00541085      push    edi
.text:00541086      call   get_bit
.text:0054108B      add     esp, 0Ch
.text:0054108E      mov     [ebx+esi], al ; store to internal array
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541091      inc     esi
.text:00541092      cmp     esi, 8
.text:00541095      jl      short first_loop2_begin
.text:00541097      inc     edi
.text:00541098      add     ebx, 8
.text:0054109B      cmp     edi, 8
.text:0054109E      jl      short first_loop1_begin
.text:005410A0      lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:005410A4      mov     edi, 7      ; EDI is loop1 counter, initial state is 7
.text:005410A9      second_loop1_begin:      ; CODE XREF: rotate1+57
.text:005410A9      xor     esi, esi      ; ESI is loop2 counter
.text:005410AB      second_loop2_begin:      ; CODE XREF: rotate1+4E
.text:005410AB      mov     al, [ebx+esi] ; value from internal array
.text:005410AE      push    eax
.text:005410AF      push    ebp      ; arg_0
.text:005410B0      push    edi
.text:005410B1      push    esi
.text:005410B2      call    set_bit
.text:005410B7      add     esp, 10h
.text:005410BA      inc     esi      ; increment loop2 counter
.text:005410BB      cmp     esi, 8
.text:005410BE      jl      short second_loop2_begin
.text:005410C0      dec     edi      ; decrement loop2 counter
.text:005410C1      add     ebx, 8
.text:005410C4      cmp     edi, 0FFFFFFFh
.text:005410C7      jg      short second_loop1_begin
.text:005410C9      pop     edi
.text:005410CA      pop     esi
.text:005410CB      pop     ebp
.text:005410CC      pop     ebx
.text:005410CD      add     esp, 40h
.text:005410D0      retn
.text:005410D0      rotate1      endp
.text:005410D0
.text:005410D1      align 10h
.text:005410E0      ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:005410E0
.text:005410E0      rotate2      proc near      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+7A
.text:005410E0      internal_array_64= byte ptr -40h
.text:005410E0      arg_0      = dword ptr 4
.text:005410E0
.text:005410E0      sub     esp, 40h
.text:005410E3      push    ebx
.text:005410E4      push    ebp
.text:005410E5      mov     ebp, [esp+48h+arg_0]
.text:005410E9      push    esi
.text:005410EA      push    edi
.text:005410EB      xor     edi, edi      ; loop1 counter
.text:005410ED      lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:005410F1      loc_5410F1:      ; CODE XREF: rotate2+2E
.text:005410F1      xor     esi, esi      ; loop2 counter
.text:005410F3      loc_5410F3:      ; CODE XREF: rotate2+25
.text:005410F3      push    esi      ; loop2
.text:005410F4      push    edi      ; loop1
.text:005410F5      push    ebp      ; arg_0
.text:005410F6      call    get_bit
.text:005410FB      add     esp, 0Ch
.text:005410FE      mov     [ebx+esi], al ; store to internal array
.text:00541101      inc     esi      ; increment loop1 counter
.text:00541102      cmp     esi, 8
.text:00541105      jl      short loc_5410F3
.text:00541107      inc     edi      ; increment loop2 counter
.text:00541108      add     ebx, 8
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:0054110B      cmp     edi, 8
.text:0054110E      jl      short loc_5410F1
.text:00541110      lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:00541114      mov     edi, 7      ; loop1 counter is initial state 7
.text:00541119      loc_541119:                ; CODE XREF: rotate2+57
.text:00541119      xor     esi, esi    ; loop2 counter
.text:0054111B      loc_54111B:                ; CODE XREF: rotate2+4E
.text:0054111B      mov     al, [ebx+esi] ; get byte from internal array
.text:0054111E      push    eax
.text:0054111F      push    edi          ; loop1 counter
.text:00541120      push    esi          ; loop2 counter
.text:00541121      push    ebp          ; arg_0
.text:00541122      call    set_bit
.text:00541127      add     esp, 10h
.text:0054112A      inc     esi          ; increment loop2 counter
.text:0054112B      cmp     esi, 8
.text:0054112E      jl      short loc_54111B
.text:00541130      dec     edi          ; decrement loop2 counter
.text:00541131      add     ebx, 8
.text:00541134      cmp     edi, 0FFFFFFFh
.text:00541137      jg      short loc_541119
.text:00541139      pop     edi
.text:0054113A      pop     esi
.text:0054113B      pop     ebp
.text:0054113C      pop     ebx
.text:0054113D      add     esp, 40h
.text:00541140      retn
.text:00541140      rotate2      endp
.text:00541140
.text:00541141      align 10h
.text:00541150
.text:00541150      ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541150
.text:00541150      rotate3      proc near      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+66
.text:00541150
.text:00541150      var_40      = byte ptr -40h
.text:00541150      arg_0      = dword ptr 4
.text:00541150
.text:00541150      sub     esp, 40h
.text:00541153      push    ebx
.text:00541154      push    ebp
.text:00541155      mov     ebp, [esp+48h+arg_0]
.text:00541159      push    esi
.text:0054115A      push    edi
.text:0054115B      xor     edi, edi
.text:0054115D      lea     ebx, [esp+50h+var_40]
.text:00541161      loc_541161:                ; CODE XREF: rotate3+2E
.text:00541161      xor     esi, esi
.text:00541163      loc_541163:                ; CODE XREF: rotate3+25
.text:00541163      push    esi
.text:00541164      push    ebp
.text:00541165      push    edi
.text:00541166      call    get_bit
.text:0054116B      add     esp, 0Ch
.text:0054116E      mov     [ebx+esi], al
.text:00541171      inc     esi
.text:00541172      cmp     esi, 8
.text:00541175      jl      short loc_541163
.text:00541177      inc     edi
.text:00541178      add     ebx, 8
.text:0054117B      cmp     edi, 8
.text:0054117E      jl      short loc_541161
.text:00541180      xor     ebx, ebx
.text:00541182      lea     edi, [esp+50h+var_40]
.text:00541186
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541186 loc_541186:                ; CODE XREF: rotate3+54
.text:00541186                mov     esi, 7
.text:0054118B loc_54118B:                ; CODE XREF: rotate3+4E
.text:0054118B                mov     al, [edi]
.text:0054118D                push    eax
.text:0054118E                push    ebx
.text:0054118F                push    ebp
.text:00541190                push    esi
.text:00541191                call   set_bit
.text:00541196                add     esp, 10h
.text:00541199                inc     edi
.text:0054119A                dec     esi
.text:0054119B                cmp     esi, 0FFFFFFFh
.text:0054119E                jg     short loc_54118B
.text:005411A0                inc     ebx
.text:005411A1                cmp     ebx, 8
.text:005411A4                jl     short loc_541186
.text:005411A6                pop     edi
.text:005411A7                pop     esi
.text:005411A8                pop     ebp
.text:005411A9                pop     ebx
.text:005411AA                add     esp, 40h
.text:005411AD                retn
.text:005411AD rotate3                endp
.text:005411AD                align 10h
.text:005411AE
.text:005411B0 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:005411B0
.text:005411B0 rotate_all_with_password proc near ; CODE XREF: crypt+1F
.text:005411B0                ; decrypt+36
.text:005411B0 arg_0                = dword ptr 4
.text:005411B0 arg_4                = dword ptr 8
.text:005411B0
.text:005411B0                mov     eax, [esp+arg_0]
.text:005411B4                push    ebp
.text:005411B5                mov     ebp, eax
.text:005411B7                cmp     byte ptr [eax], 0
.text:005411BA                jz     exit
.text:005411C0                push    ebx
.text:005411C1                mov     ebx, [esp+8+arg_4]
.text:005411C5                push    esi
.text:005411C6                push    edi
.text:005411C7 loop_begin:                ; CODE XREF: rotate_all_with_password+9F
.text:005411C7                movsx   eax, byte ptr [ebp+0]
.text:005411CB                push    eax                ; C
.text:005411CC                call   _tolower
.text:005411D1                add     esp, 4
.text:005411D4                cmp     al, 'a'
.text:005411D6                jl     short next_character_in_password
.text:005411D8                cmp     al, 'z'
.text:005411DA                jg     short next_character_in_password
.text:005411DC                movsx   ecx, al
.text:005411DF                sub     ecx, 'a'
.text:005411E2                cmp     ecx, 24
.text:005411E5                jle     short skip_subtracting
.text:005411E7                sub     ecx, 24
.text:005411EA skip_subtracting:                ; CODE XREF: rotate_all_with_password+35
.text:005411EA                mov     eax, 55555556h
.text:005411EF                imul    ecx
.text:005411F1                mov     eax, edx
.text:005411F3                shr     eax, 1Fh
.text:005411F6                add     edx, eax
.text:005411F8                mov     eax, ecx
.text:005411FA                mov     esi, edx
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:005411FC      mov     ecx, 3
.text:00541201      cdq
.text:00541202      idiv    ecx
.text:00541204      sub     edx, 0
.text:00541207      jz      short call_rotate1
.text:00541209      dec     edx
.text:0054120A      jz      short call_rotate2
.text:0054120C      dec     edx
.text:0054120D      jnz     short next_character_in_password
.text:0054120F      test    ebx, ebx
.text:00541211      jle     short next_character_in_password
.text:00541213      mov     edi, ebx
.text:00541215
.text:00541215 call_rotate3:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+6F
.text:00541215      push    esi
.text:00541216      call    rotate3
.text:0054121B      add     esp, 4
.text:0054121E      dec     edi
.text:0054121F      jnz     short call_rotate3
.text:00541221      jmp     short next_character_in_password
.text:00541223
.text:00541223 call_rotate2:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+5A
.text:00541223      test    ebx, ebx
.text:00541225      jle     short next_character_in_password
.text:00541227      mov     edi, ebx
.text:00541229
.text:00541229 loc_541229:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+83
.text:00541229      push    esi
.text:0054122A      call    rotate2
.text:0054122F      add     esp, 4
.text:00541232      dec     edi
.text:00541233      jnz     short loc_541229
.text:00541235      jmp     short next_character_in_password
.text:00541237
.text:00541237 call_rotate1:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+57
.text:00541237      test    ebx, ebx
.text:00541239      jle     short next_character_in_password
.text:0054123B      mov     edi, ebx
.text:0054123D
.text:0054123D loc_54123D:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+97
.text:0054123D      push    esi
.text:0054123E      call    rotate1
.text:00541243      add     esp, 4
.text:00541246      dec     edi
.text:00541247      jnz     short loc_54123D
.text:00541249
.text:00541249 next_character_in_password: ; CODE XREF: rotate_all_with_password+26
.text:00541249      ; rotate_all_with_password+2A ...
.text:00541249      mov     al, [ebp+1]
.text:0054124C      inc     ebp
.text:0054124D      test    al, al
.text:0054124F      jnz     loop_begin
.text:00541255      pop     edi
.text:00541256      pop     esi
.text:00541257      pop     ebx
.text:00541258
.text:00541258 exit:      ; CODE XREF: rotate_all_with_password+A
.text:00541258      pop     ebp
.text:00541259      retn
.text:00541259 rotate_all_with_password endp
.text:00541259
.text:0054125A      align 10h
.text:00541260
.text:00541260 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541260
.text:00541260
.text:00541260 crypt      proc near      ; CODE XREF: crypt_file+8A
.text:00541260
.text:00541260 arg_0      = dword ptr 4
.text:00541260 arg_4      = dword ptr 8
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541260 arg_8          = dword ptr  0Ch
.text:00541260
.text:00541260          push     ebx
.text:00541261          mov      ebx, [esp+4+arg_0]
.text:00541265          push     ebp
.text:00541266          push     esi
.text:00541267          push     edi
.text:00541268          xor      ebp, ebp
.text:0054126A
.text:0054126A loc_54126A:          ; CODE XREF: crypt+41
.text:0054126A          mov      eax, [esp+10h+arg_8]
.text:0054126E          mov      ecx, 10h
.text:00541273          mov      esi, ebx
.text:00541275          mov      edi, offset cube64
.text:0054127A          push     1
.text:0054127C          push     eax
.text:0054127D          rep movsd
.text:0054127F          call    rotate_all_with_password
.text:00541284          mov      eax, [esp+18h+arg_4]
.text:00541288          mov      edi, ebx
.text:0054128A          add      ebp, 40h
.text:0054128D          add      esp, 8
.text:00541290          mov      ecx, 10h
.text:00541295          mov      esi, offset cube64
.text:0054129A          add      ebx, 40h
.text:0054129D          cmp      ebp, eax
.text:0054129F          rep movsd
.text:005412A1          jl       short loc_54126A
.text:005412A3          pop      edi
.text:005412A4          pop      esi
.text:005412A5          pop      ebp
.text:005412A6          pop      ebx
.text:005412A7          retn
.text:005412A7 crypt          endp
.text:005412A7
.text:005412A8          align 10h
.text:005412B0
.text:005412B0 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:005412B0
.text:005412B0
.text:005412B0 ; int __cdecl decrypt(int, int, void *Src)
.text:005412B0 decrypt      proc near      ; CODE XREF: decrypt_file+99
.text:005412B0
.text:005412B0 arg_0          = dword ptr  4
.text:005412B0 arg_4          = dword ptr  8
.text:005412B0 Src          = dword ptr  0Ch
.text:005412B0
.text:005412B0          mov      eax, [esp+Src]
.text:005412B4          push     ebx
.text:005412B5          push     ebp
.text:005412B6          push     esi
.text:005412B7          push     edi
.text:005412B8          push     eax          ; Src
.text:005412B9          call    __strdup
.text:005412BE          push     eax          ; Str
.text:005412BF          mov      [esp+18h+Src], eax
.text:005412C3          call    __strrev
.text:005412C8          mov      ebx, [esp+18h+arg_0]
.text:005412CC          add      esp, 8
.text:005412CF          xor      ebp, ebp
.text:005412D1
.text:005412D1 loc_5412D1:          ; CODE XREF: decrypt+58
.text:005412D1          mov      ecx, 10h
.text:005412D6          mov      esi, ebx
.text:005412D8          mov      edi, offset cube64
.text:005412DD          push     3
.text:005412DF          rep movsd
.text:005412E1          mov      ecx, [esp+14h+Src]
.text:005412E5          push     ecx
.text:005412E6          call    rotate_all_with_password
```


8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:005412EB      mov     eax, [esp+18h+arg_4]
.text:005412EF      mov     edi, ebx
.text:005412F1      add     ebp, 40h
.text:005412F4      add     esp, 8
.text:005412F7      mov     ecx, 10h
.text:005412FC      mov     esi, offset cube64
.text:00541301      add     ebx, 40h
.text:00541304      cmp     ebp, eax
.text:00541306      rep movsd
.text:00541308      jl      short loc_5412D1
.text:0054130A      mov     edx, [esp+10h+Src]
.text:0054130E      push    edx ; Memory
.text:0054130F      call    _free
.text:00541314      add     esp, 4
.text:00541317      pop     edi
.text:00541318      pop     esi
.text:00541319      pop     ebp
.text:0054131A      pop     ebx
.text:0054131B      retn
.text:0054131B decrypt      endp
.text:0054131B
.text:0054131C      align 10h
.text:00541320
.text:00541320 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541320
.text:00541320
.text:00541320 ; int __cdecl crypt_file(int Str, char *Filename, int password)
.text:00541320 crypt_file      proc near ; CODE XREF: _main+42
.text:00541320
.text:00541320 Str          = dword ptr 4
.text:00541320 Filename      = dword ptr 8
.text:00541320 password      = dword ptr 0Ch
.text:00541320
.text:00541320      mov     eax, [esp+Str]
.text:00541324      push    ebp
.text:00541325      push    offset Mode ; "rb"
.text:0054132A      push    eax ; Filename
.text:0054132B      call    _fopen ; open file
.text:00541330      mov     ebp, eax
.text:00541332      add     esp, 8
.text:00541335      test    ebp, ebp
.text:00541337      jnz     short loc_541348
.text:00541339      push    offset Format ; "Cannot open input file!\n"
.text:0054133E      call    _printf
.text:00541343      add     esp, 4
.text:00541346      pop     ebp
.text:00541347      retn
.text:00541348
.text:00541348 loc_541348: ; CODE XREF: crypt_file+17
.text:00541348      push    ebx
.text:00541349      push    esi
.text:0054134A      push    edi
.text:0054134B      push    2 ; Origin
.text:0054134D      push    0 ; Offset
.text:0054134F      push    ebp ; File
.text:00541350      call    _fseek
.text:00541355      push    ebp ; File
.text:00541356      call    _ftell ; get file size
.text:0054135B      push    0 ; Origin
.text:0054135D      push    0 ; Offset
.text:0054135F      push    ebp ; File
.text:00541360      mov     [esp+2Ch+Str], eax
.text:00541364      call    _fseek ; rewind to start
.text:00541369      mov     esi, [esp+2Ch+Str]
.text:0054136D      and     esi, 0FFFFFFC0h ; reset all lowest 6 bits
.text:00541370      add     esi, 40h ; align size to 64-byte border
.text:00541373      push    esi ; Size
.text:00541374      call    _malloc
.text:00541379      mov     ecx, esi
.text:0054137B      mov     ebx, eax ; allocated buffer pointer -> to EBX
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:0054137D      mov     edx, ecx
.text:0054137F      xor     eax, eax
.text:00541381      mov     edi, ebx
.text:00541383      push    ebp           ; File
.text:00541384      shr     ecx, 2
.text:00541387      rep stosd
.text:00541389      mov     ecx, edx
.text:0054138B      push    1             ; Count
.text:0054138D      and     ecx, 3
.text:00541390      rep stosb           ; memset (buffer, 0, aligned_size)
.text:00541392      mov     eax, [esp+38h+Str]
.text:00541396      push    eax           ; ElementSize
.text:00541397      push    ebx           ; DstBuf
.text:00541398      call    _fread        ; read file
.text:0054139D      push    ebp           ; File
.text:0054139E      call    _fclose
.text:005413A3      mov     ecx, [esp+44h+password]
.text:005413A7      push    ecx           ; password
.text:005413A8      push    esi           ; aligned size
.text:005413A9      push    ebx           ; buffer
.text:005413AA      call    crypt          ; do crypt
.text:005413AF      mov     edx, [esp+50h+Filename]
.text:005413B3      add     esp, 40h
.text:005413B6      push    offset aWb     ; "wb"
.text:005413BB      push    edx           ; Filename
.text:005413BC      call    _fopen
.text:005413C1      mov     edi, eax
.text:005413C3      push    edi           ; File
.text:005413C4      push    1             ; Count
.text:005413C6      push    3             ; Size
.text:005413C8      push    offset aQr9    ; "QR9"
.text:005413CD      call    _fwrite        ; write file signature
.text:005413D2      push    edi           ; File
.text:005413D3      push    1             ; Count
.text:005413D5      lea     eax, [esp+30h+Str]
.text:005413D9      push    4             ; Size
.text:005413DB      push    eax           ; Str
.text:005413DC      call    _fwrite        ; write original file size
.text:005413E1      push    edi           ; File
.text:005413E2      push    1             ; Count
.text:005413E4      push    esi           ; Size
.text:005413E5      push    ebx           ; Str
.text:005413E6      call    _fwrite        ; write encrypted file
.text:005413EB      push    edi           ; File
.text:005413EC      call    _fclose
.text:005413F1      push    ebx           ; Memory
.text:005413F2      call    _free
.text:005413F7      add     esp, 40h
.text:005413FA      pop     edi
.text:005413FB      pop     esi
.text:005413FC      pop     ebx
.text:005413FD      pop     ebp
.text:005413FE      retn
.text:005413FE      crypt_file      endp
.text:005413FE
.text:005413FF      align 10h
.text:00541400
.text:00541400 ; ===== S U B R O U T I N E =====
.text:00541400
.text:00541400 ; int __cdecl decrypt_file(char *Filename, int, void *Src)
.text:00541400 decrypt_file      proc near           ; CODE XREF: _main+6E
.text:00541400
.text:00541400 Filename      = dword ptr 4
.text:00541400 arg_4        = dword ptr 8
.text:00541400 Src          = dword ptr 0Ch
.text:00541400
.text:00541400      mov     eax, [esp+Filename]
.text:00541404      push    ebx
.text:00541405      push    ebp
```


8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541406      push     esi
.text:00541407      push     edi
.text:00541408      push     offset aRb ; "rb"
.text:0054140D      push     eax          ; Filename
.text:0054140E      call     _fopen
.text:00541413      mov      esi, eax
.text:00541415      add      esp, 8
.text:00541418      test     esi, esi
.text:0054141A      jnz      short loc_54142E
.text:0054141C      push     offset aCannotOpenIn_0 ; "Cannot open input file!\n"
.text:00541421      call     _printf
.text:00541426      add      esp, 4
.text:00541429      pop      edi
.text:0054142A      pop      esi
.text:0054142B      pop      ebp
.text:0054142C      pop      ebx
.text:0054142D      retn
.text:0054142E
.text:0054142E loc_54142E:      ; CODE XREF: decrypt_file+1A
.text:0054142E      push     2            ; Origin
.text:00541430      push     0            ; Offset
.text:00541432      push     esi          ; File
.text:00541433      call     _fseek
.text:00541438      push     esi          ; File
.text:00541439      call     _ftell
.text:0054143E      push     0            ; Origin
.text:00541440      push     0            ; Offset
.text:00541442      push     esi          ; File
.text:00541443      mov      ebp, eax
.text:00541445      call     _fseek
.text:0054144A      push     ebp          ; Size
.text:0054144B      call     _malloc
.text:00541450      push     esi          ; File
.text:00541451      mov      ebx, eax
.text:00541453      push     1            ; Count
.text:00541455      push     ebp          ; ElementSize
.text:00541456      push     ebx          ; DstBuf
.text:00541457      call     _fread
.text:0054145C      push     esi          ; File
.text:0054145D      call     _fclose
.text:00541462      add      esp, 34h
.text:00541465      mov      ecx, 3
.text:0054146A      mov      edi, offset aQr9_0 ; "QR9"
.text:0054146F      mov      esi, ebx
.text:00541471      xor      edx, edx
.text:00541473      repe     cmpsb
.text:00541475      jz       short loc_541489
.text:00541477      push     offset aFileIsNotCrypt ; "File is not encrypted!\n"
.text:0054147C      call     _printf
.text:00541481      add      esp, 4
.text:00541484      pop      edi
.text:00541485      pop      esi
.text:00541486      pop      ebp
.text:00541487      pop      ebx
.text:00541488      retn
.text:00541489
.text:00541489 loc_541489:      ; CODE XREF: decrypt_file+75
.text:00541489      mov      eax, [esp+10h+Src]
.text:0054148D      mov      edi, [ebx+3]
.text:00541490      add      ebp, 0FFFFFFF9h
.text:00541493      lea      esi, [ebx+7]
.text:00541496      push     eax          ; Src
.text:00541497      push     ebp          ; int
.text:00541498      push     esi          ; int
.text:00541499      call     decrypt
.text:0054149E      mov      ecx, [esp+1Ch+arg_4]
.text:005414A2      push     offset aWb_0 ; "wb"
.text:005414A7      push     ecx          ; Filename
.text:005414A8      call     _fopen
.text:005414AD      mov      ebp, eax
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:005414AF      push     ebp           ; File
.text:005414B0      push     1             ; Count
.text:005414B2      push     edi           ; Size
.text:005414B3      push     esi           ; Str
.text:005414B4      call     _fwrite
.text:005414B9      push     ebp           ; File
.text:005414BA      call     _fclose
.text:005414BF      push     ebx           ; Memory
.text:005414C0      call     _free
.text:005414C5      add      esp, 2Ch
.text:005414C8      pop      edi
.text:005414C9      pop      esi
.text:005414CA      pop      ebp
.text:005414CB      pop      ebx
.text:005414CC      retn
.text:005414CC      decrypt_file      endp
```

Все имена функций и меток даны мною в процессе анализа.

Начнем с самого верха. Вот функция, берущая на вход два имени файла и пароль.

```
.text:00541320 ; int __cdecl crypt_file(int Str, char *Filename, int password)
.text:00541320 crypt_file      proc near
.text:00541320
.text:00541320 Str                = dword ptr 4
.text:00541320 Filename          = dword ptr 8
.text:00541320 password          = dword ptr 0Ch
.text:00541320
```

Открыть файл и сообщить об ошибке в случае ошибки:

```
.text:00541320      mov      eax, [esp+Str]
.text:00541324      push     ebp
.text:00541325      push     offset Mode      ; "rb"
.text:0054132A      push     eax              ; Filename
.text:0054132B      call     _fopen           ; open file
.text:00541330      mov      ebp, eax
.text:00541332      add      esp, 8
.text:00541335      test     ebp, ebp
.text:00541337      jnz      short loc_541348
.text:00541339      push     offset Format     ; "Cannot open input file!\n"
.text:0054133E      call     _printf
.text:00541343      add      esp, 4
.text:00541346      pop      ebp
.text:00541347      retn
.text:00541348
.text:00541348      loc_541348:
```

Узнать размер файла используя fseek()/ftell():

```
.text:00541348      push     ebx
.text:00541349      push     esi
.text:0054134A      push     edi
.text:0054134B      push     2              ; Origin
.text:0054134D      push     0              ; Offset
.text:0054134F      push     ebp           ; File

; переместить текущую позицию файла на конец
.text:00541350      call     _fseek
.text:00541355      push     ebp           ; File
.text:00541356      call     _ftell        ; узнать текущую позицию
.text:0054135B      push     0              ; Origin
.text:0054135D      push     0              ; Offset
.text:0054135F      push     ebp           ; File
.text:00541360      mov      [esp+2Ch+Str], eax

; переместить текущую позицию файла на начало
.text:00541364      call     _fseek
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

Этот фрагмент кода вычисляет длину файла, выровненную по 64-байтной границе. Это потому что этот алгоритм шифрования работает только с блоками размерами 64 байта. Работает очень просто: разделить длину файла на 64, забыть об остатке, прибавить 1, умножить на 64. Следующий код удаляет остаток от деления, как если бы это значение уже было разделено на 64 и добавляет 64. Это почти то же самое.

```
.text:00541369 mov     esi, [esp+2Ch+Str]
; сбросить в ноль младшие 6 бит
.text:0054136D and     esi, 0FFFFFFC0h
; выровнять размер по 64-байтной границе
.text:00541370 add     esi, 40h
```

Выделить буфер с выровненным размером:

```
.text:00541373          push     esi          ; Size
.text:00541374          call     _malloc
```

Вызвать `memset()`, т.е. очистить выделенный буфер¹⁷.

```
.text:00541379 mov     ecx, esi
.text:0054137B mov     ebx, eax      ; указатель на выделенный буфер -> в EBX
.text:0054137D mov     edx, ecx
.text:0054137F xor     eax, eax
.text:00541381 mov     edi, ebx
.text:00541383 push    ebp      ; File
.text:00541384 shr     ecx, 2
.text:00541387 rep stosd
.text:00541389 mov     ecx, edx
.text:0054138B push    1      ; Count
.text:0054138D and     ecx, 3
.text:00541390 rep stosb      ; memset (buffer, 0, выровненный_размер)
```

Чтение файла используя стандартную функцию Си `fread()`.

```
.text:00541392          mov     eax, [esp+38h+Str]
.text:00541396          push    eax          ; ElementSize
.text:00541397          push    ebx          ; DstBuf
.text:00541398          call    _fread          ; read file
.text:0054139D          push    ebp          ; File
.text:0054139E          call    _fclose
```

Вызов `crypt()`. Эта функция берет на вход буфер, длину буфера (выровненную) и строку пароля.

```
.text:005413A3          mov     ecx, [esp+44h+password]
.text:005413A7          push    ecx          ; password
.text:005413A8          push    esi          ; aligned size
.text:005413A9          push    ebx          ; buffer
.text:005413AA          call    crypt          ; do crypt
```

Создать выходной файл. Кстати, разработчик забыл вставить проверку, создался ли файл успешно! Результат открытия файла, впрочем, проверяется.

```
.text:005413AF          mov     edx, [esp+50h+Filename]
.text:005413B3          add     esp, 40h
.text:005413B6          push    offset aWb      ; "wb"
.text:005413BB          push    edx          ; Filename
.text:005413BC          call    _fopen
.text:005413C1          mov     edi, eax
```

Теперь хэндл созданного файла в регистре EDI. Записываем сигнатуру «QR9».

```
.text:005413C3          push    edi          ; File
.text:005413C4          push    1          ; Count
.text:005413C6          push    3          ; Size
.text:005413C8          push    offset aQr9    ; "QR9"
.text:005413CD          call    _fwrite      ; write file signature
```

Записываем настоящую длину файла (не выровненную):

¹⁷ `malloc()` + `memset()` можно было бы заменить на `calloc()`

```
.text:005413D2      push     edi                ; File
.text:005413D3      push     1                  ; Count
.text:005413D5      lea      eax, [esp+30h+Str]
.text:005413D9      push     4                  ; Size
.text:005413DB      push     eax                ; Str
.text:005413DC      call    _fwrite            ; write original file size
```

Записываем зашифрованный буфер:

```
.text:005413E1      push     edi                ; File
.text:005413E2      push     1                  ; Count
.text:005413E4      push     esi                ; Size
.text:005413E5      push     ebx                ; Str
.text:005413E6      call    _fwrite            ; write encrypted file
```

Закрывать файл и освободить выделенный буфер:

```
.text:005413EB      push     edi                ; File
.text:005413EC      call    _fclose
.text:005413F1      push     ebx                ; Memory
.text:005413F2      call    _free
.text:005413F7      add      esp, 40h
.text:005413FA      pop      edi
.text:005413FB      pop      esi
.text:005413FC      pop      ebx
.text:005413FD      pop      ebp
.text:005413FE      retn
.text:005413FE crypt_file      endp
```

Переписанный на Си код:

```
void crypt_file(char *fin, char* fout, char *pw)
{
    FILE *f;
    int flen, flen_aligned;
    BYTE *buf;

    f=fopen(fin, "rb");

    if (f==NULL)
    {
        printf ("Cannot open input file!\n");
        return;
    };

    fseek (f, 0, SEEK_END);
    flen=ftell (f);
    fseek (f, 0, SEEK_SET);

    flen_aligned=(flen&0xFFFFFC0)+0x40;

    buf=(BYTE*)malloc (flen_aligned);
    memset (buf, 0, flen_aligned);

    fread (buf, flen, 1, f);

    fclose (f);

    crypt (buf, flen_aligned, pw);

    f=fopen(fout, "wb");

    fwrite ("QR9", 3, 1, f);
    fwrite (&flen, 4, 1, f);
    fwrite (buf, flen_aligned, 1, f);

    fclose (f);

    free (buf);
}
```

};

Процедура дешифрования почти такая же:

```
.text:00541400 ; int __cdecl decrypt_file(char *Filename, int, void *Src)
.text:00541400 decrypt_file      proc near
.text:00541400
.text:00541400 Filename          = dword ptr 4
.text:00541400 arg_4             = dword ptr 8
.text:00541400 Src               = dword ptr 0Ch
.text:00541400
.text:00541400      mov         eax, [esp+Filename]
.text:00541404      push        ebx
.text:00541405      push        ebp
.text:00541406      push        esi
.text:00541407      push        edi
.text:00541408      push        offset aRb          ; "rb"
.text:0054140D      push        eax              ; Filename
.text:0054140E      call       _fopen
.text:00541413      mov         esi, eax
.text:00541415      add         esp, 8
.text:00541418      test        esi, esi
.text:0054141A      jnz         short loc_54142E
.text:0054141C      push        offset aCannotOpenIn_0 ; "Cannot open input file!\n"
.text:00541421      call       _printf
.text:00541426      add         esp, 4
.text:00541429      pop         edi
.text:0054142A      pop         esi
.text:0054142B      pop         ebp
.text:0054142C      pop         ebx
.text:0054142D      retn
.text:0054142E
.text:0054142E loc_54142E:
.text:0054142E      push        2                ; Origin
.text:00541430      push        0                ; Offset
.text:00541432      push        esi              ; File
.text:00541433      call       _fseek
.text:00541438      push        esi              ; File
.text:00541439      call       _ftell
.text:0054143E      push        0                ; Origin
.text:00541440      push        0                ; Offset
.text:00541442      push        esi              ; File
.text:00541443      mov         ebp, eax
.text:00541445      call       _fseek
.text:0054144A      push        ebp              ; Size
.text:0054144B      call       _malloc
.text:00541450      push        esi              ; File
.text:00541451      mov         ebx, eax
.text:00541453      push        1                ; Count
.text:00541455      push        ebp              ; ElementSize
.text:00541456      push        ebx              ; DstBuf
.text:00541457      call       _fread
.text:0054145C      push        esi              ; File
.text:0054145D      call       _fclose
```

Проверяем сигнатуру (первые 3 байта):

```
.text:00541462      add         esp, 34h
.text:00541465      mov         ecx, 3
.text:0054146A      mov         edi, offset aQr9_0 ; "QR9"
.text:0054146F      mov         esi, ebx
.text:00541471      xor         edx, edx
.text:00541473      repe cmpsb
.text:00541475      jz          short loc_541489
```

Сообщить об ошибке если сигнатура отсутствует:

```
.text:00541477      push        offset aFileIsNotCrypt ; "File is not encrypted!\n"
.text:0054147C      call       _printf
.text:00541481      add         esp, 4
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541484      pop     edi
.text:00541485      pop     esi
.text:00541486      pop     ebp
.text:00541487      pop     ebx
.text:00541488      retn
.text:00541489      loc_541489:
```

Вызвать decrypt().

```
.text:00541489      mov     eax, [esp+10h+Src]
.text:0054148D      mov     edi, [ebx+3]
.text:00541490      add     ebp, 0FFFFFFF9h
.text:00541493      lea     esi, [ebx+7]
.text:00541496      push    eax                ; Src
.text:00541497      push    ebp                ; int
.text:00541498      push    esi                ; int
.text:00541499      call    decrypt
.text:0054149E      mov     ecx, [esp+1Ch+arg_4]
.text:005414A2      push    offset aWb_0       ; "wb"
.text:005414A7      push    ecx                ; Filename
.text:005414A8      call    _fopen
.text:005414AD      mov     ebp, eax
.text:005414AF      push    ebp                ; File
.text:005414B0      push    1                  ; Count
.text:005414B2      push    edi                ; Size
.text:005414B3      push    esi                ; Str
.text:005414B4      call    _fwrite
.text:005414B9      push    ebp                ; File
.text:005414BA      call    _fclose
.text:005414BF      push    ebx                ; Memory
.text:005414C0      call    _free
.text:005414C5      add     esp, 2Ch
.text:005414C8      pop     edi
.text:005414C9      pop     esi
.text:005414CA      pop     ebp
.text:005414CB      pop     ebx
.text:005414CC      retn
.text:005414CC      decrypt_file      endp
```

Переписанный на Си код:

```
void decrypt_file(char *fin, char* fout, char *pw)
{
    FILE *f;
    int real_flen, flen;
    BYTE *buf;

    f=fopen(fin, "rb");

    if (f==NULL)
    {
        printf ("Cannot open input file!\n");
        return;
    };

    fseek (f, 0, SEEK_END);
    flen=ftell (f);
    fseek (f, 0, SEEK_SET);

    buf=(BYTE*)malloc (flen);

    fread (buf, flen, 1, f);

    fclose (f);

    if (memcmp (buf, "QR9", 3)!=0)
    {
        printf ("File is not encrypted!\n");
        return;
    }
}
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
};  
  
memcpy (&real_flen, buf+3, 4);  
  
decrypt (buf+(3+4), flen-(3+4), pw);  
  
f=fopen(fout, "wb");  
  
fwrite (buf+(3+4), real_flen, 1, f);  
  
fclose (f);  
  
free (buf);  
  
};
```

ОК, посмотрим глубже.

Функция crypt():

```
.text:00541260 crypt      proc near  
.text:00541260  
.text:00541260 arg_0      = dword ptr 4  
.text:00541260 arg_4      = dword ptr 8  
.text:00541260 arg_8      = dword ptr 0Ch  
.text:00541260  
.text:00541260          push    ebx  
.text:00541261          mov     ebx, [esp+4+arg_0]  
.text:00541265          push    ebp  
.text:00541266          push    esi  
.text:00541267          push    edi  
.text:00541268          xor     ebp, ebp  
.text:0054126A  
.text:0054126A loc_54126A:
```

Этот фрагмент кода копирует часть входного буфера во внутренний буфер, который мы позже назовем «cube64».

Длина в регистре ECX. MOVSD означает *скопировать 32-битное слово*, так что, 16 32-битных слов это как раз 64 байта.

```
.text:0054126A          mov     eax, [esp+10h+arg_8]  
.text:0054126E          mov     ecx, 10h  
.text:00541273          mov     esi, ebx    ; EBX is pointer within input buffer  
.text:00541275          mov     edi, offset cube64  
.text:0054127A          push    1  
.text:0054127C          push    eax  
.text:0054127D          rep movsd
```

Вызвать rotate_all_with_password():

```
.text:0054127F          call    rotate_all_with_password
```

Скопировать зашифрованное содержимое из «cube64» назад в буфер:

```
.text:00541284          mov     eax, [esp+18h+arg_4]  
.text:00541288          mov     edi, ebx  
.text:0054128A          add     ebp, 40h  
.text:0054128D          add     esp, 8  
.text:00541290          mov     ecx, 10h  
.text:00541295          mov     esi, offset cube64  
.text:0054129A          add     ebx, 40h    ; add 64 to input buffer pointer  
.text:0054129D          cmp     ebp, eax    ; EBP = amount of encrypted data.  
.text:0054129F          rep movsd
```

Если EBP не больше чем длина во входном аргументе, тогда переходим к следующему блоку.

```
.text:005412A1          jl     short loc_54126A  
.text:005412A3          pop     edi  
.text:005412A4          pop     esi  
.text:005412A5          pop     ebp
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:005412A6      pop     ebx
.text:005412A7      retn
.text:005412A7 crypt      endp
```

Реконструированная функция crypt():

```
void crypt (BYTE *buf, int sz, char *pw)
{
    int i=0;

    do
    {
        memcpy (cube, buf+i, 8*8);
        rotate_all (pw, 1);
        memcpy (buf+i, cube, 8*8);
        i+=64;
    }
    while (i<sz);
};
```

ОК, углубимся в функцию rotate_all_with_password(). Она берет на вход два аргумента: строку пароля и число. В функции crypt(), число 1 используется и в decrypt() (где rotate_all_with_password() функция вызывается также), число 3.

```
.text:005411B0 rotate_all_with_password proc near
.text:005411B0
.text:005411B0 arg_0      = dword ptr 4
.text:005411B0 arg_4      = dword ptr 8
.text:005411B0
.text:005411B0      mov     eax, [esp+arg_0]
.text:005411B4      push    ebp
.text:005411B5      mov     ebp, eax
```

Проверяем символы в пароле. Если это ноль, выходим:

```
.text:005411B7      cmp     byte ptr [eax], 0
.text:005411BA      jz      exit
.text:005411C0      push    ebx
.text:005411C1      mov     ebx, [esp+8+arg_4]
.text:005411C5      push    esi
.text:005411C6      push    edi
.text:005411C7
.text:005411C7 loop_begin:
```

Вызываем tolower(), стандартную функцию Си.

```
.text:005411C7      movsx   eax, byte ptr [ebp+0]
.text:005411CB      push    eax                ; C
.text:005411CC      call    _tolower
.text:005411D1      add     esp, 4
```

Хмм, если пароль содержит символ не из латинского алфавита, он пропускается! Действительно, если мы запускаем утилиту для шифрования используя символы не латинского алфавита, похоже, они просто игнорируются.

```
.text:005411D4      cmp     al, 'a'
.text:005411D6      jl      short next_character_in_password
.text:005411D8      cmp     al, 'z'
.text:005411DA      jg      short next_character_in_password
.text:005411DC      movsx   ecx, al
```

Отнимем значение «а» (97) от символа.

```
.text:005411DF      sub     ecx, 'a' ; 97
```

После вычитания, тут будет 0 для «а», 1 для «b», и так далее. И 25 для «z».

```
.text:005411E2      cmp     ecx, 24
.text:005411E5      jle     short skip_subtracting
.text:005411E7      sub     ecx, 24
```


8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

Похоже, символы «у» и «z» также исключительные. После этого фрагмента кода, «у» становится 0, а «z» — 1. Это значит, что 26 латинских букв становятся значениями в интервале 0..23, (всего 24).

```
.text:005411EA  
.text:005411EA skip_subtracting: ; CODE XREF: rotate_all_with_password+35
```

Это, на самом деле, деление через умножение. Читайте об этом больше в секции «Деление используя умножение» (3.9 (стр. 487)).

Это код, на самом деле, делит значение символа пароля на 3.

```
.text:005411EA      mov     eax, 55555556h  
.text:005411EF      imul    ecx  
.text:005411F1      mov     eax, edx  
.text:005411F3      shr     eax, 1Fh  
.text:005411F6      add     edx, eax  
.text:005411F8      mov     eax, ecx  
.text:005411FA      mov     esi, edx  
.text:005411FC      mov     ecx, 3  
.text:00541201      cdq  
.text:00541202      idiv    ecx
```

EDX— остаток от деления.

```
.text:00541204 sub     edx, 0  
.text:00541207 jz      short call_rotate1 ; если остаток 0, перейти к rotate1  
.text:00541209 dec     edx  
.text:0054120A jz      short call_rotate2 ; .. если он 1, перейти к rotate2  
.text:0054120C dec     edx  
.text:0054120D jnz     short next_character_in_password  
.text:0054120F test    ebx, ebx  
.text:00541211 jle     short next_character_in_password  
.text:00541213 mov     edi, ebx
```

Если остаток 2, вызываем rotate3(). EDX это второй аргумент функции rotate_all_with_password(). Как мы уже заметили, 1 это для шифрования, 3 для дешифрования. Так что здесь цикл, функции rotate1/2/3 будут вызываться столько же раз, сколько значение переменной в первом аргументе.

```
.text:00541215 call_rotate3:  
.text:00541215      push    esi  
.text:00541216      call    rotate3  
.text:0054121B      add     esp, 4  
.text:0054121E      dec     edi  
.text:0054121F      jnz     short call_rotate3  
.text:00541221      jmp     short next_character_in_password  
.text:00541223  
.text:00541223 call_rotate2:  
.text:00541223      test    ebx, ebx  
.text:00541225      jle     short next_character_in_password  
.text:00541227      mov     edi, ebx  
.text:00541229  
.text:00541229 loc_541229:  
.text:00541229      push    esi  
.text:0054122A      call    rotate2  
.text:0054122F      add     esp, 4  
.text:00541232      dec     edi  
.text:00541233      jnz     short loc_541229  
.text:00541235      jmp     short next_character_in_password  
.text:00541237  
.text:00541237 call_rotate1:  
.text:00541237      test    ebx, ebx  
.text:00541239      jle     short next_character_in_password  
.text:0054123B      mov     edi, ebx  
.text:0054123D  
.text:0054123D loc_54123D:  
.text:0054123D      push    esi  
.text:0054123E      call    rotate1  
.text:00541243      add     esp, 4  
.text:00541246      dec     edi
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:00541247          jnz      short loc_54123D
.text:00541249
```

Достать следующий символ из строки пароля.

```
.text:00541249 next_character_in_password:
.text:00541249          mov     al, [ebp+1]
```

Инкремент указателя на символ в строке пароля:

```
.text:0054124C          inc     ebp
.text:0054124D          test   al, al
.text:0054124F          jnz     loop_begin
.text:00541255          pop     edi
.text:00541256          pop     esi
.text:00541257          pop     ebx
.text:00541258
.text:00541258 exit:
.text:00541258          pop     ebp
.text:00541259          retn
.text:00541259 rotate_all_with_password endp
```

Реконструированный код на Си:

```
void rotate_all (char *pwd, int v)
{
    char *p=pwd;

    while (*p)
    {
        char c=*p;
        int q;

        c=tolower (c);

        if (c>='a' && c<='z')
        {
            q=c-'a';
            if (q>24)
                q-=24;

            int quotient=q/3;
            int remainder=q % 3;

            switch (remainder)
            {
                case 0: for (int i=0; i<v; i++) rotate1 (quotient); break;
                case 1: for (int i=0; i<v; i++) rotate2 (quotient); break;
                case 2: for (int i=0; i<v; i++) rotate3 (quotient); break;
            };
        };

        p++;
    };
};
```

Углубимся еще дальше и исследуем функции rotate1/2/3. Каждая функция вызывает еще две. В итоге мы назовем их set_bit() и get_bit().

Начнем с get_bit():

```
.text:00541050 get_bit      proc near
.text:00541050
.text:00541050 arg_0        = dword ptr  4
.text:00541050 arg_4        = dword ptr  8
.text:00541050 arg_8        = byte ptr  0Ch
.text:00541050
.text:00541050          mov     eax, [esp+arg_4]
.text:00541054          mov     ecx, [esp+arg_0]
.text:00541058          mov     al, cube64[ecx*8]
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:0054105F      mov     cl, [esp+arg_8]
.text:00541063      shr     al, cl
.text:00541065      and     al, 1
.text:00541067      retn
.text:00541067 get_bit      endp
```

...иными словами: подсчитать индекс в массиве cube64: $arg_4 + arg_0 * 8$. Затем сдвинуть байт из массива вправо на количество бит заданных в arg_8. Изолировать самый младший бит и вернуть его

Посмотрим другую функцию, set_bit():

```
.text:00541000 set_bit      proc near
.text:00541000
.text:00541000 arg_0      = dword ptr 4
.text:00541000 arg_4      = dword ptr 8
.text:00541000 arg_8      = dword ptr 0Ch
.text:00541000 arg_C      = byte ptr 10h
.text:00541000
.text:00541000      mov     al, [esp+arg_C]
.text:00541004      mov     ecx, [esp+arg_8]
.text:00541008      push    esi
.text:00541009      mov     esi, [esp+4+arg_0]
.text:0054100D      test    al, al
.text:0054100F      mov     eax, [esp+4+arg_4]
.text:00541013      mov     dl, 1
.text:00541015      jz      short loc_54102B
```

DL тут равно 1. Сдвигаем эту единицу на количество, указанное в arg_8. Например, если в arg_8 число 4, тогда значение в DL станет 0x10 или 1000b в двоичной системе счисления.

```
.text:00541017      shl     dl, cl
.text:00541019      mov     cl, cube64[eax+esi*8]
```

Вытащить бит из массива и явно выставить его.

```
.text:00541020      or      cl, dl
```

Сохранить его назад:

```
.text:00541022      mov     cube64[eax+esi*8], cl
.text:00541029      pop     esi
.text:0054102A      retn
.text:0054102B
.text:0054102B loc_54102B:
.text:0054102B      shl     dl, cl
```

Если arg_C не ноль...

```
.text:0054102D      mov     cl, cube64[eax+esi*8]
```

...инвертировать DL. Например, если состояние DL после сдвига 0x10 или 1000b в двоичной системе, здесь будет 0xEF после инструкции NOT или 11101111b в двоичной системе.

```
.text:00541034      not     dl
```

Эта инструкция сбрасывает бит, иными словами, она сохраняет все биты в CL которые также выставлены в DL кроме тех в DL, что были сброшены. Это значит, что если в DL, например, 11101111b в двоичной системе, все биты будут сохранены кроме пятого (считая с младшего бита).

```
.text:00541036      and     cl, dl
```

Сохранить его назад

```
.text:00541038      mov     cube64[eax+esi*8], cl
.text:0054103F      pop     esi
.text:00541040      retn
.text:00541040 set_bit      endp
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

Это почти то же самое что и `get_bit()`, кроме того, что если `arg_C` ноль, тогда функция сбрасывает указанный бит в массиве, либо же, в противном случае, выставляет его в 1.

Мы также знаем что размер массива 64. Первые два аргумента и у `set_bit()` и у `get_bit()` могут быть представлены как двумерные координаты. Таким образом, массив — это матрица 8*8.

Представление на Си всего того, что мы уже знаем:

```
#define IS_SET(flag, bit)      ((flag) & (bit))
#define SET_BIT(var, bit)     ((var) |= (bit))
#define REMOVE_BIT(var, bit)  ((var) &= ~(bit))

static BYTE cube[8][8];

void set_bit (int x, int y, int shift, int bit)
{
    if (bit)
        SET_BIT (cube[x][y], 1<<shift);
    else
        REMOVE_BIT (cube[x][y], 1<<shift);
};

bool get_bit (int x, int y, int shift)
{
    if ((cube[x][y]>>shift)&1==1)
        return 1;
    return 0;
};
```

Теперь вернемся к функциям `rotate1/2/3`.

```
.text:00541070 rotate1      proc near
.text:00541070
```

Выделение внутреннего массива размером 64 байта в локальном стеке:

```
.text:00541070 internal_array_64= byte ptr -40h
.text:00541070 arg_0          = dword ptr  4
.text:00541070
.text:00541070             sub     esp, 40h
.text:00541073             push    ebx
.text:00541074             push    ebp
.text:00541075             mov     ebp, [esp+48h+arg_0]
.text:00541079             push    esi
.text:0054107A             push    edi
.text:0054107B             xor     edi, edi          ; EDI is loop1 counter
```

EBX указывает на внутренний массив

```
.text:0054107D             lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:00541081
```

Здесь два вложенных цикла:

```
.text:00541081 first_loop1_begin:
.text:00541081     xor     esi, esi          ; ESI это счетчик второго цикла
.text:00541083
.text:00541083 first_loop2_begin:
.text:00541083     push    ebp                ; arg_0
.text:00541084     push    esi                ; счетчик первого цикла
.text:00541085     push    edi                ; счетчик второго цикла
.text:00541086     call   get_bit
.text:0054108B     add     esp, 0Ch
.text:0054108E     mov     [ebx+esi], al      ; записываем во внутренний массив
.text:00541091     inc     esi                ; инкремент счетчика первого цикла
.text:00541092     cmp     esi, 8
.text:00541095     jl      short first_loop2_begin
.text:00541097     inc     edi                ; инкремент счетчика второго цикла

; инкремент указателя во внутреннем массиве на 8 на каждой итерации первого цикла
.text:00541098     add     ebx, 8
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВОДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:0054109B    cmp     edi, 8
.text:0054109E    jl      short first_loop1_begin
```

Мы видим, что оба счетчика циклов в интервале 0..7. Также, они используются как первый и второй аргумент `get_bit()`. Третий аргумент `get_bit()` это единственный аргумент `rotate1()`. То что возвращает `get_bit()` будет сохранено во внутреннем массиве.

Снова приготовить указатель на внутренний массив:

```
.text:005410A0    lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:005410A4    mov     edi, 7      ; EDI здесь счетчик первого цикла, значение на старте – 7
.text:005410A9
.text:005410A9 second_loop1_begin:
.text:005410A9    xor     esi, esi    ; ESI – счетчик второго цикла
.text:005410AB
.text:005410AB second_loop2_begin:
.text:005410AB    mov     al, [ebx+esi] ; значение из внутреннего массива
.text:005410AE    push    eax
.text:005410AF    push    ebp         ; arg_0
.text:005410B0    push    edi         ; счетчик первого цикла
.text:005410B1    push    esi         ; счетчик второго цикла
.text:005410B2    call    set_bit
.text:005410B7    add     esp, 10h
.text:005410BA    inc     esi         ; инкремент счетчика второго цикла
.text:005410BB    cmp     esi, 8
.text:005410BE    jl      short second_loop2_begin
.text:005410C0    dec     edi         ; декремент счетчика первого цикла
.text:005410C1    add     ebx, 8      ; инкремент указателя во внутреннем массиве
.text:005410C4    cmp     edi, 0FFFFFFFh
.text:005410C7    jg      short second_loop1_begin
.text:005410C9    pop     edi
.text:005410CA    pop     esi
.text:005410CB    pop     ebp
.text:005410CC    pop     ebx
.text:005410CD    add     esp, 40h
.text:005410D0    retn
.text:005410D0 rotate1      endp
```

...этот код помещает содержимое из внутреннего массива в глобальный массив `cube` используя функцию `set_bit()`, но, в обратном порядке! Теперь счетчик первого цикла в интервале 7 до 0, уменьшается на 1 на каждой итерации!

Представление кода на Си выглядит так:

```
void rotate1 (int v)
{
    bool tmp[8][8]; // internal array
    int i, j;

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            tmp[i][j]=get_bit (i, j, v);

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            set_bit (j, 7-i, v, tmp[x][y]);
};
```

Не очень понятно, но если мы посмотрим в функцию `rotate2()`:

```
.text:005410E0 rotate2 proc near
.text:005410E0
.text:005410E0 internal_array_64 = byte ptr -40h
.text:005410E0 arg_0 = dword ptr 4
.text:005410E0
.text:005410E0    sub     esp, 40h
.text:005410E3    push    ebx
.text:005410E4    push    ebp
.text:005410E5    mov     ebp, [esp+48h+arg_0]
.text:005410E9    push    esi
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
.text:005410EA    push    edi
.text:005410EB    xor     edi, edi ; счетчик первого цикла
.text:005410ED    lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:005410F1
.text:005410F1 loc_5410F1:
.text:005410F1    xor     esi, esi ; счетчик второго цикла
.text:005410F3
.text:005410F3 loc_5410F3:
.text:005410F3    push    esi      ; счетчик второго цикла
.text:005410F4    push    edi      ; счетчик первого цикла
.text:005410F5    push    ebp      ; arg_0
.text:005410F6    call   get_bit
.text:005410FB    add     esp, 0Ch
.text:005410FE    mov     [ebx+esi], al ; записать во внутренний массив
.text:00541101    inc     esi      ; инкремент счетчика первого цикла
.text:00541102    cmp     esi, 8
.text:00541105    jl      short loc_5410F3
.text:00541107    inc     edi      ; инкремент счетчика второго цикла
.text:00541108    add     ebx, 8
.text:0054110B    cmp     edi, 8
.text:0054110E    jl      short loc_5410F1
.text:00541110    lea     ebx, [esp+50h+internal_array_64]
.text:00541114    mov     edi, 7   ; первоначальное значение счетчика первого цикла – 7
.text:00541119
.text:00541119 loc_541119:
.text:00541119    xor     esi, esi ; счетчик второго цикла
.text:0054111B
.text:0054111B loc_54111B:
.text:0054111B    mov     al, [ebx+esi] ; взять байт из внутреннего массива
.text:0054111E    push    eax
.text:0054111F    push    edi      ; счетчик первого цикла
.text:00541120    push    esi      ; счетчик второго цикла
.text:00541121    push    ebp      ; arg_0
.text:00541122    call   set_bit
.text:00541127    add     esp, 10h
.text:0054112A    inc     esi      ; инкремент второго счетчика
.text:0054112B    cmp     esi, 8
.text:0054112E    jl      short loc_54111B
.text:00541130    dec     edi      ; декремент второго счетчика
.text:00541131    add     ebx, 8
.text:00541134    cmp     edi, 0FFFFFFFh
.text:00541137    jg      short loc_541119
.text:00541139    pop     edi
.text:0054113A    pop     esi
.text:0054113B    pop     ebp
.text:0054113C    pop     ebx
.text:0054113D    add     esp, 40h
.text:00541140    retn
.text:00541140 rotate2 endp
```

Почти то же самое, за исключением иного порядка аргументов в `get_bit()` и `set_bit()`. Перепишем это на Си-подобный код:

```
void rotate2 (int v)
{
    bool tmp[8][8]; // internal array
    int i, j;

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            tmp[i][j]=get_bit (v, i, j);

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            set_bit (v, j, 7-i, tmp[i][j]);
};
```

Перепишем так же функцию `rotate3()`:

```
void rotate3 (int v)
```

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
{
    bool tmp[8][8];
    int i, j;

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            tmp[i][j]=get_bit (i, v, j);

    for (i=0; i<8; i++)
        for (j=0; j<8; j++)
            set_bit (7-j, v, i, tmp[i][j]);
};
```

Теперь всё проще. Если мы представим cube64 как трехмерный куб 8*8*8, где каждый элемент это бит, то get_bit() и set_bit() просто берут на вход координаты бита.

Функции rotate1/2/3 просто поворачивают все биты на определенной плоскости. Три функции, каждая на каждую сторону куба и аргумент v выставляет плоскость в интервале 0..7

Может быть, автор алгоритма думал о кубике Рубика 8*8*8

18?!

Да, действительно.

Рассмотрим функцию decrypt(), вот её переписанная версия:

```
void decrypt (BYTE *buf, int sz, char *pw)
{
    char *p=strdup (pw);
    strrev (p);
    int i=0;

    do
    {
        memcpy (cube, buf+i, 8*8);
        rotate_all (p, 3);
        memcpy (buf+i, cube, 8*8);
        i+=64;
    }
    while (i<sz);

    free (p);
};
```

Почти то же самое что и crypt(), но строка пароля разворачивается стандартной функцией Си strrev() ¹⁹ и rotate_all() вызывается с аргументом 3.

Это значит, что, в случае дешифровки, rotate1/2/3 будут вызываться трижды.

Это почти кубик Рубика! Если вы хотите вернуть его состояние назад, делайте то же самое в обратном порядке и направлении! Чтобы вернуть эффект от поворота плоскости по часовой стрелке, нужно повернуть её же против часовой стрелки, либо же трижды по часовой стрелке.

rotate1(), вероятно, поворот «лицевой» плоскости. rotate2(), вероятно, поворот «верхней» плоскости. rotate3(), вероятно, поворот «левой» плоскости.

Вернемся к ядру функции rotate_all()

```
q=c-'a';
if (q>24)
    q-=24;

int quotient=q/3; // in range 0..7
int remainder=q % 3;

switch (remainder)
{
    case 0: for (int i=0; i<v; i++) rotate1 (quotient); break; // front
    case 1: for (int i=0; i<v; i++) rotate2 (quotient); break; // top
```

¹⁸[wikipedia](#)

¹⁹[MSDN](#)

8.6. «QR9»: ЛЮБИТЕЛЬСКАЯ КРИПТОСИСТЕМА, ВДОХНОВЛЕННАЯ КУБИКОМ РУБИКА

```
case 2: for (int i=0; i<v; i++) rotate3 (quotient); break; // left
};
```

Так понять проще: каждый символ пароля определяет сторону (одну из трех) и плоскость (одну из восьми). $3 \cdot 8 = 24$, вот почему два последних символа латинского алфавита переопределяются так чтобы алфавит состоял из 24-х элементов.

Алгоритм очевидно слаб: в случае коротких паролей, в бинарном редакторе файлов можно будет увидеть, что в зашифрованных файлах остались незашифрованные символы.

Весь исходный код в реконструированном виде:

```
#include <windows.h>

#include <stdio.h>
#include <assert.h>

#define IS_SET(flag, bit)      ((flag) & (bit))
#define SET_BIT(var, bit)      ((var) |= (bit))
#define REMOVE_BIT(var, bit)   ((var) &= ~(bit))

static BYTE cube[8][8];

void set_bit (int x, int y, int z, bool bit)
{
    if (bit)
        SET_BIT (cube[x][y], 1<<z);
    else
        REMOVE_BIT (cube[x][y], 1<<z);
};

bool get_bit (int x, int y, int z)
{
    if ((cube[x][y]>>z)&1==1)
        return true;
    return false;
};

void rotate_f (int row)
{
    bool tmp[8][8];
    int x, y;

    for (x=0; x<8; x++)
        for (y=0; y<8; y++)
            tmp[x][y]=get_bit (x, y, row);

    for (x=0; x<8; x++)
        for (y=0; y<8; y++)
            set_bit (y, 7-x, row, tmp[x][y]);
};

void rotate_t (int row)
{
    bool tmp[8][8];
    int y, z;

    for (y=0; y<8; y++)
        for (z=0; z<8; z++)
            tmp[y][z]=get_bit (row, y, z);

    for (y=0; y<8; y++)
        for (z=0; z<8; z++)
            set_bit (row, z, 7-y, tmp[y][z]);
};

void rotate_l (int row)
{
    bool tmp[8][8];
    int x, z;
```



```

    for (x=0; x<8; x++)
        for (z=0; z<8; z++)
            tmp[x][z]=get_bit (x, row, z);

    for (x=0; x<8; x++)
        for (z=0; z<8; z++)
            set_bit (7-z, row, x, tmp[x][z]);
};

void rotate_all (char *pwd, int v)
{
    char *p=pwd;

    while (*p)
    {
        char c=*p;
        int q;

        c=tolower (c);

        if (c>='a' && c<='z')
        {
            q=c-'a';
            if (q>24)
                q-=24;

            int quotient=q/3;
            int remainder=q % 3;

            switch (remainder)
            {
                case 0: for (int i=0; i<v; i++) rotate_f (quotient); break;
                case 1: for (int i=0; i<v; i++) rotate_t (quotient); break;
                case 2: for (int i=0; i<v; i++) rotate_l (quotient); break;
            };
        };

        p++;
    };
};

void crypt (BYTE *buf, int sz, char *pw)
{
    int i=0;

    do
    {
        memcpy (cube, buf+i, 8*8);
        rotate_all (pw, 1);
        memcpy (buf+i, cube, 8*8);
        i+=64;
    }
    while (i<sz);
};

void decrypt (BYTE *buf, int sz, char *pw)
{
    char *p=strdup (pw);
    strrev (p);
    int i=0;

    do
    {
        memcpy (cube, buf+i, 8*8);
        rotate_all (p, 3);
        memcpy (buf+i, cube, 8*8);
        i+=64;
    }
    while (i<sz);
};

```

```

        free (p);
};

void crypt_file(char *fin, char* fout, char *pw)
{
    FILE *f;
    int flen, flen_aligned;
    BYTE *buf;

    f=fopen(fin, "rb");

    if (f==NULL)
    {
        printf ("Cannot open input file!\n");
        return;
    };

    fseek (f, 0, SEEK_END);
    flen=ftell (f);
    fseek (f, 0, SEEK_SET);

    flen_aligned=(flen&0xFFFFFC0)+0x40;

    buf=(BYTE*)malloc (flen_aligned);
    memset (buf, 0, flen_aligned);

    fread (buf, flen, 1, f);

    fclose (f);

    crypt (buf, flen_aligned, pw);

    f=fopen(fout, "wb");

    fwrite ("QR9", 3, 1, f);
    fwrite (&flen, 4, 1, f);
    fwrite (buf, flen_aligned, 1, f);

    fclose (f);

    free (buf);
};

void decrypt_file(char *fin, char* fout, char *pw)
{
    FILE *f;
    int real_flen, flen;
    BYTE *buf;

    f=fopen(fin, "rb");

    if (f==NULL)
    {
        printf ("Cannot open input file!\n");
        return;
    };

    fseek (f, 0, SEEK_END);
    flen=ftell (f);
    fseek (f, 0, SEEK_SET);

    buf=(BYTE*)malloc (flen);

    fread (buf, flen, 1, f);

    fclose (f);

    if (memcmp (buf, "QR9", 3)!=0)

```

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
{
    printf ("File is not encrypted!\n");
    return;
};

memcpy (&real_flen, buf+3, 4);

decrypt (buf+(3+4), flen-(3+4), pw);

f=fopen(fout, "wb");

fwrite (buf+(3+4), real_flen, 1, f);

fclose (f);

free (buf);
};

// run: input output 0/1 password
// 0 for encrypt, 1 for decrypt

int main(int argc, char *argv[])
{
    if (argc!=5)
    {
        printf ("Incorrect parameters!\n");
        return 1;
    };

    if (strcmp (argv[3], "0")==0)
        crypt_file (argv[1], argv[2], argv[4]);
    else
        if (strcmp (argv[3], "1")==0)
            decrypt_file (argv[1], argv[2], argv[4]);
        else
            printf ("Wrong param %s\n", argv[3]);

    return 0;
};
```

8.7. Случай с зашифрованной БД #1

(Эта часть впервые появилась в моем блоге 26-Aug-2015. Обсуждение: <https://news.ycombinator.com/item?id=10128684>.)

8.7.1. Base64 и энтропия

Мне достался XML-файл, содержащий некоторые зашифрованные данные. Вероятно, что-то связанное с заказами и/или с информацией о клиентах.

```
<?xml version = "1.0" encoding = "UTF-8"?>
<Orders>
  <Order>
    <OrderID>1</OrderID>
    <Data>yjmxhXUbhB/5MV45chPsXZWAJwIh1S0aD9lFn3XuJMSxJ3/E+UE3hsnH</Data>
  </Order>
  <Order>
    <OrderID>2</OrderID>
    <Data>0KGe/wnypFBjsy+U0C2P9fC5nDZP3XDZLMPCRaiBw90jIk6Tu5U=</Data>
  </Order>
  <Order>
    <OrderID>3</OrderID>
    <Data>mqkXfdzvQKvEArdzh+zD9oETVGBFvcTBLs2ph1b5bYddExzp</Data>
  </Order>
</Orders>
```

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
<OrderID>4</OrderID>
<Data>FCx6JhIDqnESyT3HAepyE1BJ3cJd7wCk+APCRUeuNtZdpCvQ2MR/7kLXtfUHuA==</Data>
</Order>
...
```

Файл доступен [здесь](#).

Это явно данные закодированные в base64, потому что все строки состоят из латинских символов, цифр, и символов плюс (+) и слэш (/). Могут быть еще два выравнивающих символа (=), но они никогда не встречаются в середине строки. Зная эти свойства base64, такие строки легко распознать.

Попробуем декодировать эти блоки и вычислить их энтропии (9.2 (стр. 930)) при помощи Wolfram Mathematica:

```
In[ ]:= ListOfBase64Strings =
  Map[First[#[[3]]] &, Cases[Import["encrypted.xml"], XMLElement["Data", _, _], Infinity]];

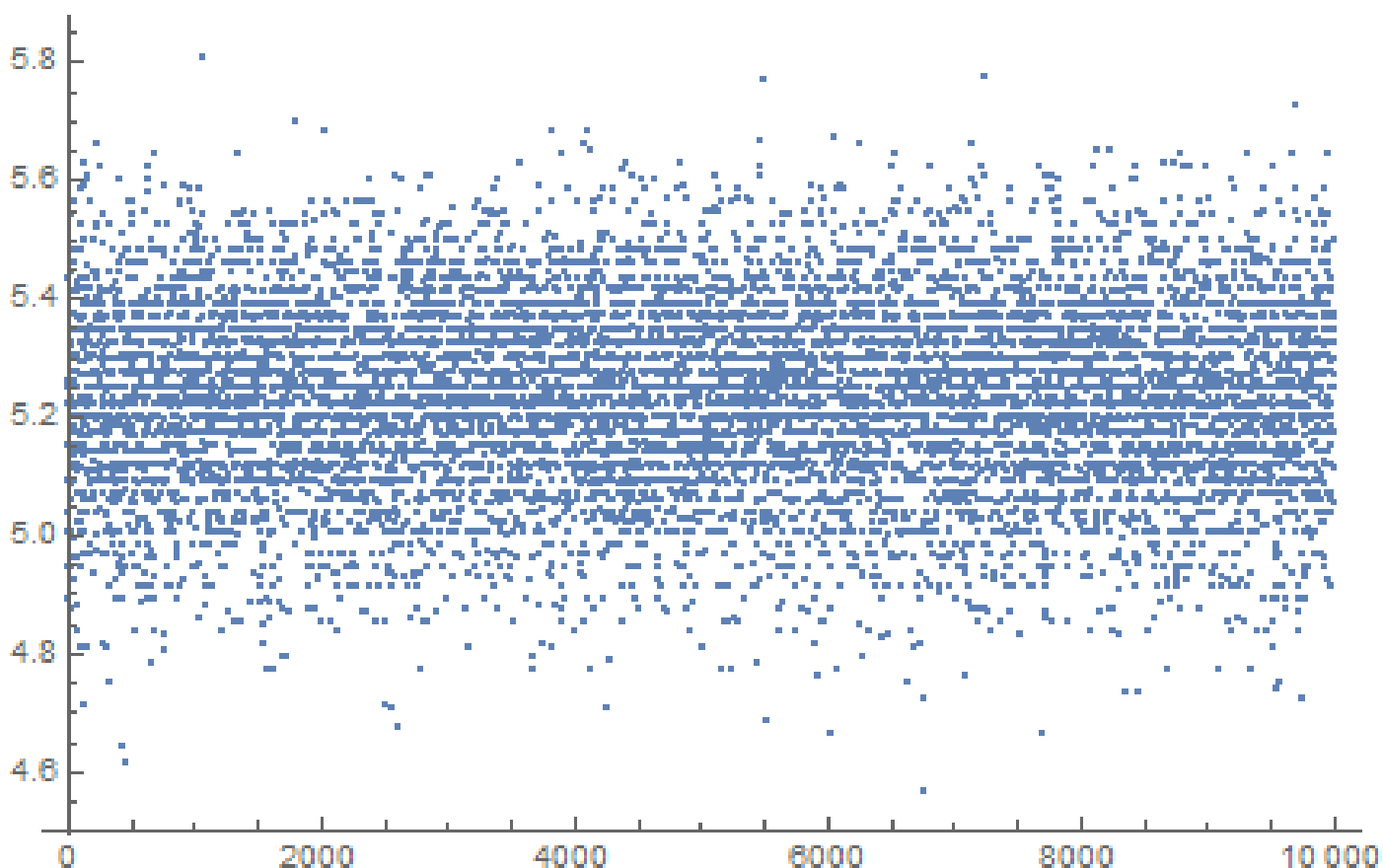
In[ ]:= BinaryStrings =
  Map[ImportString[#, {"Base64", "String"}] &, ListOfBase64Strings];

In[ ]:= Entropies = Map[N[Entropy[2, #]] &, BinaryStrings];

In[ ]:= Variance[Entropies]
Out[ ]= 0.0238614
```

Разброс (variance) низкий. Это означает, что значения энтропии не очень отличаются друг от друга. Это видно на графике:

```
In[ ]:= ListPlot[Entropies]
```



Большинство значений между 5.0 и 5.4. Это свидетельство того что данные сжаты и/или зашифрованы.

Чтобы понять разброс (variance), подсчитаем энтропии всех строк в книге Конана Дойля *The Hound of the Baskervilles*:

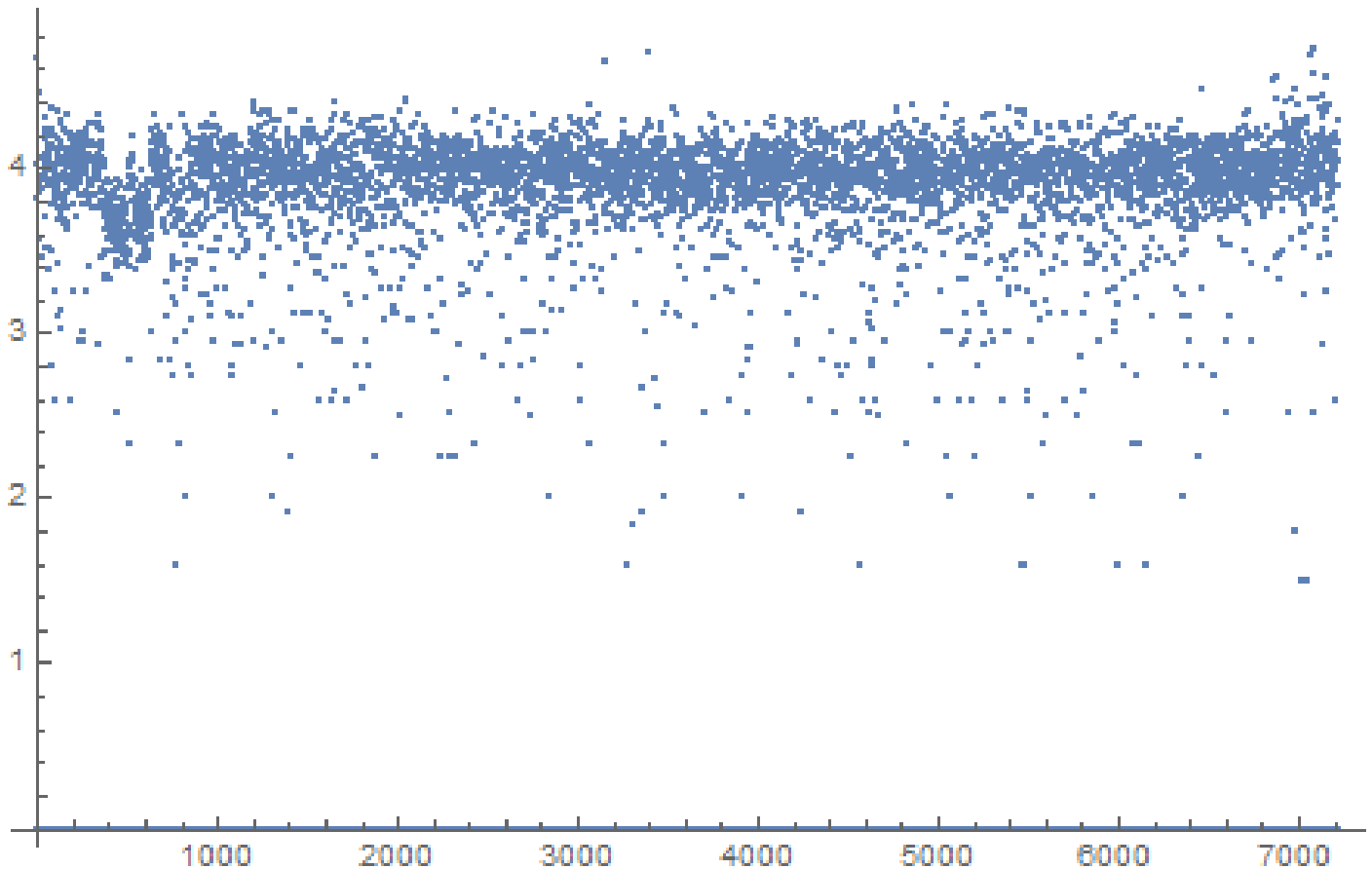
8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
In[]:= BaskervillesLines = Import["http://www.gutenberg.org/cache/epub/2852/pg2852.txt", "List↵"];

In[]:= EntropiesT = Map[N[Entropy[2, #]] &, BaskervillesLines];

In[]:= Variance[EntropiesT]
Out[]:= 2.73883

In[]:= ListPlot[EntropiesT]
```



Большинство значений находится вокруг 4, но есть также меньшие значения, и они повлияли на конечное значение разброса.

Вероятно, самые короткие строки имеют меньшую энтропию, попробуем короткую строку из книги Конан Дойля:

```
In[]:= Entropy[2, "Yes, sir."] // N
Out[]:= 2.9477
```

Попробуем еще меньшую:

```
In[]:= Entropy[2, "Yes"] // N
Out[]:= 1.58496
```

```
In[]:= Entropy[2, "No"] // N
Out[]:= 1.
```

8.7.2. Данные сжаты?

ОК, наши данные сжаты и/или зашифрованы. Сжаты ли? Почти все компрессоры данных помещают некоторый заголовок в начале, сигнатуру или что-то вроде этого. Как видим, здесь ничего такого нет в начале каждого блока. Все еще возможно что это какой-то самодельный компрессор, но они очень редки. С другой стороны, самодельные криптоалгоритмы попадают часто, потому что их

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

куда легче заставить работать. Даже примитивные криптосистемы без ключей, как *memfrob()*²⁰ и ROT13 нормально работают без ошибок. А чтобы написать свой компрессор с нуля, используя только фантазию и воображение, так что он будет работать без ошибок, это серьезная задача. Некоторые программисты реализуют ф-ции сжатия данных по учебникам, но это также редкость. Наиболее популярные способы это: 1) просто взять опен-сорсную библиотеку вроде zlib; 2) скопипастить что-то откуда-то. Опен-сорсные алгоритмы сжатия данных обычно добавляют какой-то заголовок, и точно так же делают алгоритмы с сайтов вроде <http://www.codeproject.com/>.

8.7.3. Данные зашифрованы?

Основные алгоритмы шифрования обрабатывают данные блоками. DES — по 8 байт, AES — по 16 байт. Если входной буфер не делится без остатка на длину блока, он дополняется нулями (или еще чем-то), так что зашифрованные данные будут выровнены по размеру блока этого алгоритма шифрования. Это не наш случай.

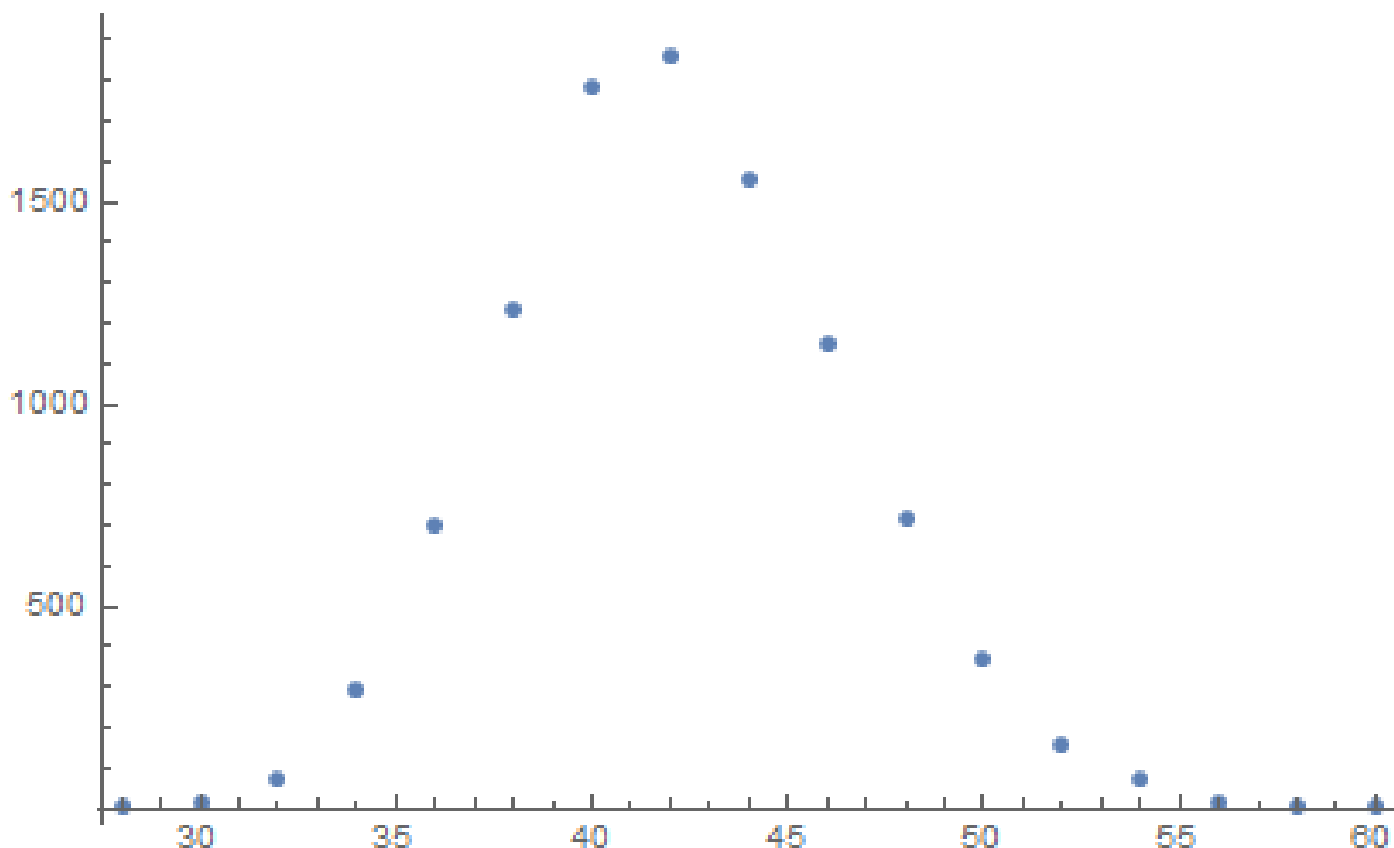
Используя Wolfram Mathematica, я проанализировал длины блоков:

```
In[]:= Counts[Map[StringLength[#] &, BinaryStrings]]
Out[]= <|42 -> 1858, 38 -> 1235, 36 -> 699, 46 -> 1151, 40 -> 1784,
      44 -> 1558, 50 -> 366, 34 -> 291, 32 -> 74, 56 -> 15, 48 -> 716,
      30 -> 13, 52 -> 156, 54 -> 71, 60 -> 3, 58 -> 6, 28 -> 4|>
```

1858 блоков имеют длину 42 байта, 1235 блоков имеют длину 38 байт, итд.

Я сделал график:

```
ListPlot[Counts[Map[StringLength[#] &, BinaryStrings]]]
```



Так что большинство блоков имеют размер между ~36 и ~48. Вот еще что стоит отметить: длины всех блоков четные. Нет ни одного блока с нечетной длиной.

Хотя, существуют потоковые шифры, которые работают на уровне байт, или даже на уровне бит.

²⁰<http://linux.die.net/man/3/memfrob>

8.7.4. CryptoPP

Программа, при помощи которой можно листать зашифрованную базу написана на C# и код на .NET сильно обфусцирован. Тем не менее, имеется DLL с кодом для x86, который, после краткого рассмотрения, имеет части из популярной опен-сорсной библиотеки CryptoPP! (Я просто нашел внутри строки «CryptoPP».) Теперь легко найти все ф-ции внутри DLL, потому что библиотека CryptoPP опен-сорсная.

Библиотека CryptoPP имеет множество ф-ций шифрования, включая AES (AKA Rijndael). Современные x86-процессоры имеют AES-инструкции вроде AESENC, AESDEC и AESKEYGENASSIST ²¹. Они не производят полного шифрования/дешифрования, но они делают большую часть работы. И новые версии CryptoPP используют их. Например, здесь: [1](#), [2](#). К моему удивлению, во время дешифрования, инструкция, AESENC исполняется, а AESDEC — нет (я это проверил при помощи моей утилиты tracer, но можно использовать любой отладчик). Я проверил, поддерживает ли мой процессор AES-инструкции. Некоторые процессоры Intel i3 не поддерживают. И если нет, библиотека CryptoPP применяет ф-ции AES реализованные старым способом ²². Но мой процессор поддерживает их. Почему AESDEC не исполняется? Почему программа использует шифрование AES чтобы дешифровать БД?

ОК, найти ф-цию шифрования блока это не проблема. Она называется *CryptoPP::Rijndael::Enc::ProcessAndXorBlock()* <https://github.com/mmoss/cryptopp/blob/2772f7b57182b31a41659b48d5f35a7b6cedd34d/src/rijndael.cpp#L349>, и она может вызывать другую ф-цию: *Rijndael::Enc::AdvancedProcessBlocks()* <https://github.com/mmoss/cryptopp/blob/2772f7b57182b31a41659b48d5f35a7b6cedd34d/src/rijndael.cpp#L1179>, которая, в свою очередь, может вызывать две ф-ции (*AESNI_Enc_Block* and *AESNI_Enc_4_Blocks*) которые имеют инструкции AESENC.

Так что, судя по внутренностям CryptoPP, *CryptoPP::Rijndael::Enc::ProcessAndXorBlock()* шифрует один 16-байтный блок. Попробуем установить брякпоинт на ней и посмотрим, что происходит во время дешифрования. Я снова использую мою простую утилиту tracer. Сейчас программа должна дешифровать первый блок. О, и кстати, вот первый блок сконвертированный из кодировки base64 в шестнадцатеричный вид, будем держать его под рукой:

```
00000000: CA 39 B1 85 75 1B 84 1F F9 31 5E 39 72 13 EC 5D .9..u....1^9r..]
00000010: 95 80 27 02 21 D5 2D 1A 0F D9 45 9F 75 EE 24 C4 ..'!.-...E.u.$
00000020: B1 27 7F 84 FE 41 37 86 C9 C0                .'...A7...
```

А еще вот аргументы ф-ции из исходных файлов CryptoPP:

```
size_t Rijndael::Enc::AdvancedProcessBlocks(const byte *inBlocks, const byte *xorBlocks, byte *
↳ outBlocks, size_t length, word32 flags);
```

Так что у него 5 аргументов. Возможные флаги это:

```
enum {BT_InBlockIsCounter=1, BT_DontIncrementInOutPointers=2, BT_XorInput=4,
↳ BT_ReverseDirection=8, BT_AllowParallel=16} FlagsForAdvancedProcessBlocks;
```

ОК, запускаем tracer на ф-ции *ProcessAndXorBlock()*:

```
... tracer.exe -l:filename.exe bpf=filename.exe!0x4339a0,args:5,dump_args:0x10

Warning: no tracer.cfg file.
PID=1984|New process software.exe
no module registered with image base 0x77320000
no module registered with image base 0x76e20000
no module registered with image base 0x77320000
no module registered with image base 0x77220000
Warning: unknown (to us) INT3 breakpoint at ntdll.dll!LdrVerifyImageMatchesChecksum+0x96c (0
↳ x776c103b)
(0) software.exe!0x4339a0(0x38b920, 0x0, 0x38b978, 0x10, 0x0) (called from software.exe!.text+0
↳ x33c0d (0x13e4c0d))
Argument 1/5
0038B920: 01 00 00 00 FF FF FF FF-79 C1 69 0B 67 C1 04 7D ".....y.i.g..}"
Argument 3/5
0038B978: CD CD CD CD CD CD CD CD-CD CD CD CD CD CD CD "....."
(0) software.exe!0x4339a0() -> 0x0
```

²¹https://en.wikipedia.org/wiki/AES_instruction_set

²²<https://github.com/mmoss/cryptopp/blob/2772f7b57182b31a41659b48d5f35a7b6cedd34d/src/rijndael.cpp#L355>

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
Argument 3/5 difference
00000000: C7 39 4E 7B 33 1B D6 1F-B8 31 10 39 39 13 A5 5D ".9N{3....1.99..}"
(0) software.exe!0x4339a0(0x38a828, 0x38a838, 0x38bb40, 0x0, 0x8) (called from software.exe!..↵
↳ text+0x3a407 (0x13eb407))
Argument 1/5
0038A828: 95 80 27 02 21 D5 2D 1A-0F D9 45 9F 75 EE 24 C4 "...'.!.-...E.u.$."
Argument 2/5
0038A838: B1 27 7F 84 FE 41 37 86-C9 C0 00 CD CD CD CD CD "...A7....."
Argument 3/5
0038BB40: CD CD CD CD CD CD CD CD-CD CD CD CD CD CD CD CD "....."
(0) software.exe!0x4339a0() -> 0x0
(0) software.exe!0x4339a0(0x38b920, 0x38a828, 0x38bb30, 0x10, 0x0) (called from software.exe!..↵
↳ text+0x33c0d (0x13e4c0d))
Argument 1/5
0038B920: CA 39 B1 85 75 1B 84 1F-F9 31 5E 39 72 13 EC 5D ".9..u....1^9r..]"
Argument 2/5
0038A828: 95 80 27 02 21 D5 2D 1A-0F D9 45 9F 75 EE 24 C4 "...'.!.-...E.u.$."
Argument 3/5
0038BB30: CD CD CD CD CD CD CD CD-CD CD CD CD CD CD CD CD "....."
(0) software.exe!0x4339a0() -> 0x0
Argument 3/5 difference
00000000: 45 00 20 00 4A 00 4F 00-48 00 4E 00 53 00 00 00 "E. .J.O.H.N.S..."
(0) software.exe!0x4339a0(0x38b920, 0x0, 0x38b978, 0x10, 0x0) (called from software.exe!.text+0↵
↳ x33c0d (0x13e4c0d))
Argument 1/5
0038B920: 95 80 27 02 21 D5 2D 1A-0F D9 45 9F 75 EE 24 C4 "...'.!.-...E.u.$."
Argument 3/5
0038B978: 95 80 27 02 21 D5 2D 1A-0F D9 45 9F 75 EE 24 C4 "...'.!.-...E.u.$."
(0) software.exe!0x4339a0() -> 0x0
Argument 3/5 difference
00000000: B1 27 7F E4 9F 01 E3 81-CF C6 12 FB B9 7C F1 BC "...'.|.."
PID=1984|Process software.exe exited. ExitCode=0 (0x0)
```

Тут мы можем увидеть входы в ф-цию *ProcessAndXorBlock()*, и выходы из нее.

Это вывод из ф-ции во время первого вызова:

```
00000000: C7 39 4E 7B 33 1B D6 1F-B8 31 10 39 39 13 A5 5D ".9N{3....1.99..}"
```

Затем ф-ция *ProcessAndXorBlock()* вызывается с блоком нулевого размера, но с флагом 8 (*BT_ReverseDirecti*

Второй вызов:

```
00000000: 45 00 20 00 4A 00 4F 00-48 00 4E 00 53 00 00 00 "E. .J.O.H.N.S..."
```

Ох, тут есть знакомая нам строка!

Третий вызов:

```
00000000: B1 27 7F E4 9F 01 E3 81-CF C6 12 FB B9 7C F1 BC "...'.|.."
```

Первый вывод очень похож на первые 16 байт зашифрованного буфера.

Вывод первого вызова *ProcessAndXorBlock()*:

```
00000000: C7 39 4E 7B 33 1B D6 1F-B8 31 10 39 39 13 A5 5D ".9N{3....1.99..}"
```

Первые 16 байт зашифрованного буфера:

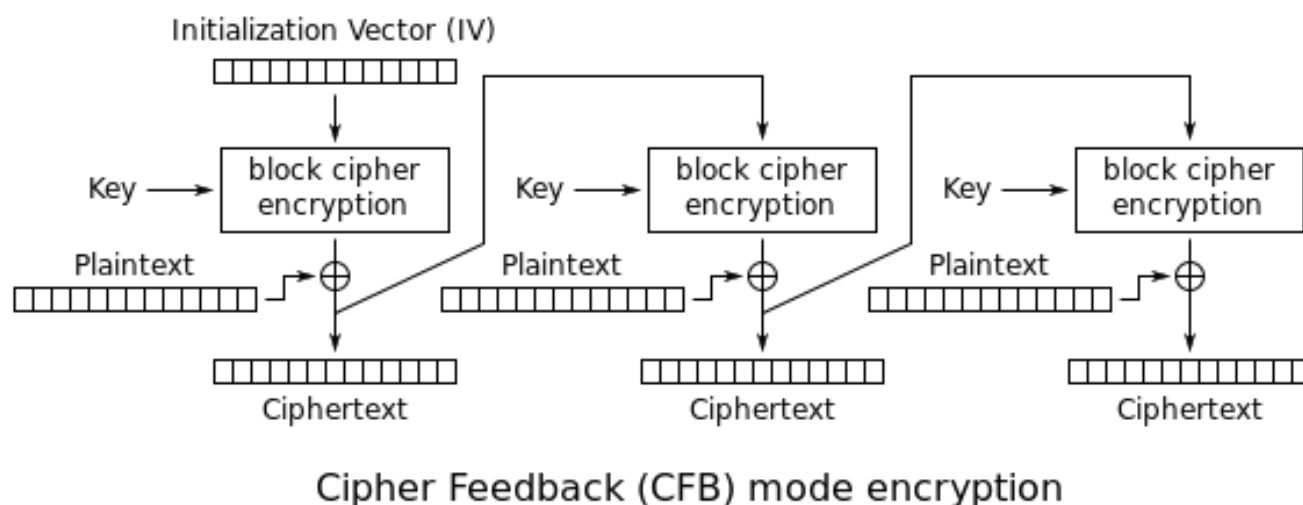
```
00000000: CA 39 B1 85 75 1B 84 1F F9 31 5E 39 72 13 EC 5D ".9..u....1^9r..]"
```

Тут слишком много одинаковых байт! Как так получается, что результат шифрования AES может быть очень похож на зашифрованный буфер в то время как это не шифрование, а скорее дешифрование?

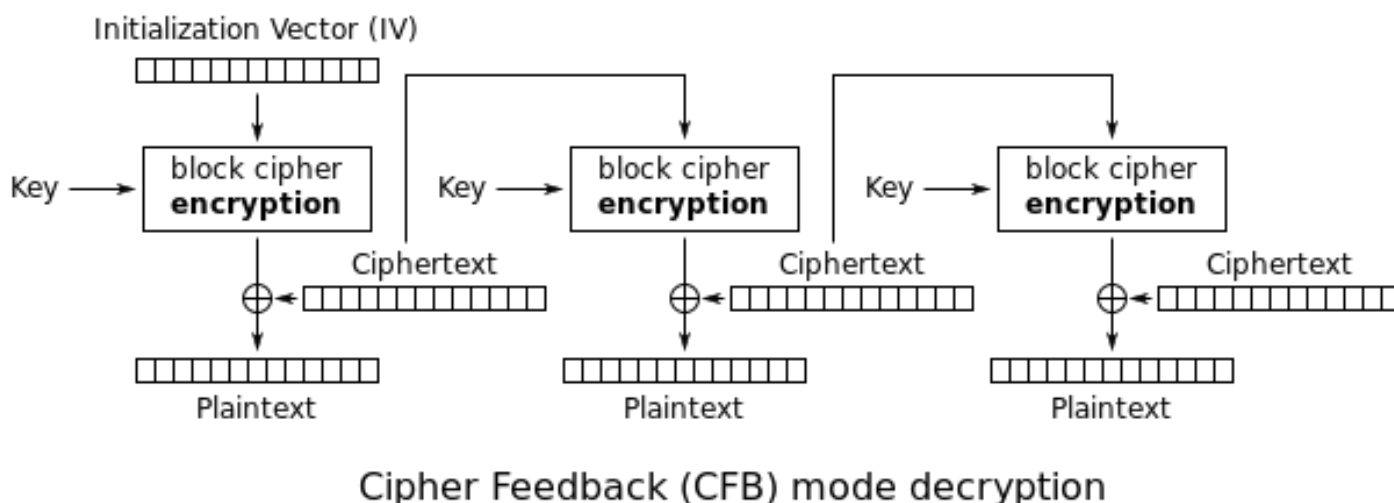
8.7.5. Режим обратной связи по шифротексту

Ответ это [CFB](#)²³: в этом режиме, алгоритм AES используются не как алгоритм шифрования, а как устройство для генерации случайных данных с криптографической стойкостью. Само шифрование производится используя простую операцию XOR.

Вот алгоритм шифрования (иллюстрации взяты из Wikipedia):



И дешифрования:



Посмотрим: операция шифрования в AES генерирует 16 байт (или 128 бит) *случайных* данных, которые можно использовать во время применения операции XOR, но кто заставляет нас использовать все 16 байт? Если на последней итерации у нас 1 байт данных, давайте про-XOR-им 1 байт данных с 1 байтом сгенерированных *случайных* данных? Это приводит к важному свойству режима [CFB](#): данные не нужно выравнивать, данные произвольного размера могут быть зашифрованы и дешифрованы.

О, и вот почему все зашифрованные блоки не выровнены. И вот почему инструкция AESDEC никогда не вызывается.

Давайте попробуем дешифровать первый блок вручную, используя Питон. Режим [CFB](#) также использует [IV](#), как *seed* для [CSPRNG](#)²⁴. В нашем случае, [IV](#) это блок, который шифруется на первой итерации:

²³Режим обратной связи по шифротексту (Cipher Feedback)

²⁴Криптографически стойкий генератор псевдослучайных чисел (cryptographically secure pseudorandom number generator)

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
0038B920: 01 00 00 00 FF FF FF FF-79 C1 69 0B 67 C1 04 7D ".....y.i.g..}"
```

О, и нам нужно также восстановить ключ шифрования. В DLL есть AESKEYGENASSIST, и она вызывается, и используется в ф-ции

Rijndael::Base::UncheckedSetKey():

<https://github.com/mmoss/cryptopp/blob/2772f7b57182b31a41659b48d5f35a7b6cedd34d/src/rijndael.cpp#L198> Её легко найти в IDA и установить брякпойнт. Посмотрим:

```
... tracer.exe -l:filename.exe bpf=filename.exe!0x435c30,args:3,dump_args:0x10

Warning: no tracer.cfg file.
PID=2068|New process software.exe
no module registered with image base 0x77320000
no module registered with image base 0x76e20000
no module registered with image base 0x77320000
no module registered with image base 0x77220000
Warning: unknown (to us) INT3 breakpoint at ntdll.dll!LdrVerifyImageMatchesChecksum+0x96c (0x776c103b)
(0) software.exe!0x435c30(0x15e8000, 0x10, 0x14f808) (called from software.exe!.text+0x22fa1 (0x13d3fa1))
Argument 1/3
015E8000: CD C5 7E AD 28 5F 6D E1-CE 8F CC 29 B1 21 88 8E "...~.(_m....)!..."
Argument 3/3
0014F808: 38 82 58 01 C8 B9 46 00-01 D1 3C 01 00 F8 14 00 "8.X...F...<....."
Argument 3/3 +0x0: software.exe!.rdata+0x5238
Argument 3/3 +0x8: software.exe!.text+0x1c101
(0) software.exe!0x435c30() -> 0x13c2801
PID=2068|Process software.exe exited. ExitCode=0 (0x0)
```

Так вот это ключ: *CD C5 7E AD 28 5F 6D E1-CE 8F CC 29 B1 21 88 8E*.

Во время ручного дешифрования мы получаем это:

```
00000000: 0D 00 FF FE 46 00 52 00 41 00 4E 00 4B 00 49 00 ....F.R.A.N.K.I.
00000010: 45 00 20 00 4A 00 4F 00 48 00 4E 00 53 00 66 66 E. .J.O.H.N.S.ff
00000020: 66 66 66 9E 61 40 D4 07 06 01 fff.a@....
```

Теперь это что-то читаемое! И теперь мы видим, почему было так много одинаковых байт во время первой итерации дешифрования: потому что в оригинальном тексте так много нулевых байт!

Дешифруем второй блок:

```
00000000: 17 98 D0 84 3A E9 72 4F DB 82 3F AD E9 3E 2A A8 .....r0...?..>*.
00000010: 41 00 52 00 52 00 4F 00 4E 00 CD CC CC CC CC CC A.R.R.O.N.....
00000020: 1B 40 D4 07 06 01 .@....
```

Третий, четвертый и пятый:

```
00000000: 5D 90 59 06 EF F4 96 B4 7C 33 A7 4A BE FF 66 AB ].Y.....|3.J..f.
00000010: 49 00 47 00 47 00 53 00 00 00 00 00 00 C0 65 40 I.G.G.S.....e@
00000020: D4 07 06 01 ....
```

```
00000000: D3 15 34 5D 21 18 7C 6E AA F8 2D FE 38 F9 D7 4E ..4]!.|n...-.8..N
00000010: 41 00 20 00 44 00 4F 00 48 00 45 00 52 00 54 00 A. .D.O.H.E.R.T.
00000020: 59 00 48 E1 7A 14 AE FF 68 40 D4 07 06 02 Y.H.z...h@....
```

```
00000000: 1E 8B 90 0A 17 7B C5 52 31 6C 4E 2F DE 1B 27 19 .....{.R1lN...'.
00000010: 41 00 52 00 43 00 55 00 53 00 00 00 00 00 60 A.R.C.U.S.....
00000020: 66 40 D4 07 06 03 f@....
```

Все блоки, похоже, дешифруются корректно, но не первые 16 байт.

8.7.6. Инициализирующий вектор

Что влияет на первые 16 байт?

Вернемся снова к алгоритму дешифрования [CFB: 8.7.5](#) (стр. 848).

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

Мы видим что **IV** может влиять на первую операцию дешифрования, но не на вторую, потому что во время второй итерации используется шифротекст от первой итерации, и в случае дешифрования, он такой же, не важно, какой был **IV**!

Так что, вероятно, **IV** каждый раз разный. Используя мой tracer, я буду смотреть на первый вход во время дешифрования второго блока **XML**-файла:

```
0038B920: 02 00 00 00 FE FF FF FF-79 C1 69 0B 67 C1 04 7D ".....y.i.g..}"
```

...third:

```
0038B920: 03 00 00 00 FD FF FF FF-79 C1 69 0B 67 C1 04 7D ".....y.i.g..}"
```

Похоже, первый и пятый байт каждый раз меняется. Я в итоге разобрался, что первое 32-битное число это просто OrderID из **XML**-файла, и второе 32-битное число это тоже OrderID, но с отрицательным знаком. Остальные 8 байт не меняются. И вот я расшифровал всю БД: https://raw.githubusercontent.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/master/examples/encrypted_DB1/decrypted_full.txt.

Питоновский скрипт, который я использовал: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/examples/encrypted_DB1/decrypt_blocks.py.

Вероятно, автор хотел чтобы каждый блок шифровался немного иначе, так что он/она использовал OrderID как часть ключа. А еще можно было бы делать разный ключ для AES вместо **IV**.

Так что теперь мы знаем, что **IV** влияет только на первый блок во время дешифрования в режиме **CFB**, это его особенность. Остальные блоки можно дешифровать не зная **IV**, но используя ключ.

ОК, но почему режим **CFB**? Очевидно, потому что самый первый пример на AES в CryptoPP wiki использует режим **CFB**: http://www.cryptopp.com/wiki/Advanced_Encryption_Standard#Encrypting_and_Decrypting_Using_AES. Вероятно, разработчик выбрал его из-за простоты: пример может шифровать/дешифровать текстовые строки произвольной длины, без выравнивания.

Очень похоже что автор этой программы просто скопипастил пример из старницы в CryptoPP wiki. Многие программисты так и делают.

Разница только в том что в примере в CryptoPP wiki **IV** выбирается случайно, в то время как подобный индетерминизм не был допустимым для автора программы, которую мы сейчас разбираем, так что они решили инициализировать **IV** используя ID заказа.

Теперь мы можем идти дальше, анализировать значение каждого байта дешифрованного блока.

8.7.7. Структура буфера

Возьмем первые 4 байта дешифрованных блоков:

```
00000000: 0D 00 FF FE 46 00 52 00 41 00 4E 00 4B 00 49 00 ....F.R.A.N.K.I.
00000010: 45 00 20 00 4A 00 4F 00 48 00 4E 00 53 00 66 66 E. .J.O.H.N.S.ff
00000020: 66 66 66 9E 61 40 D4 07 06 01 fff.a@....

00000000: 0B 00 FF FE 4C 00 4F 00 52 00 49 00 20 00 42 00 ....L.O.R.I. .B.
00000010: 41 00 52 00 52 00 4F 00 4E 00 CD CC CC CC CC CC A.R.R.O.N.....
00000020: 1B 40 D4 07 06 01 .@....

00000000: 0A 00 FF FE 47 00 41 00 52 00 59 00 20 00 42 00 ....G.A.R.Y. .B.
00000010: 49 00 47 00 47 00 53 00 00 00 00 00 00 C0 65 40 I.G.G.S.....e@
00000020: D4 07 06 01 ....

00000000: 0F 00 FF FE 4D 00 45 00 4C 00 49 00 4E 00 44 00 ....M.E.L.I.N.D.
00000010: 41 00 20 00 44 00 4F 00 48 00 45 00 52 00 54 00 A. .D.O.H.E.R.T.
00000020: 59 00 48 E1 7A 14 AE FF 68 40 D4 07 06 02 Y.H.z...h@....
```

Легко увидеть строки закодированные в UTF-16, это имена и фамилии. Первый байт (или 16-битное слово) похоже это просто длина строки, мы можем проверить это визуально. **FF FE** это, похоже, **BOM** в Уникоде.

После каждой строки есть еще 12 байт.

Используя этот скрипт (https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/examples/encrypted_DB1/dump_buffer_rest.py) я получил случайную выборку из хвостов:

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
dennis@...:~$ python decrypt.py encrypted.xml | shuf | head -20
00000000: 48 E1 7A 14 AE 5F 62 40 DD 07 05 08 H.z..._b@....
00000000: 00 00 00 00 00 40 5A 40 DC 07 08 18 .....@Z@....
00000000: 00 00 00 00 00 80 56 40 D7 07 0B 04 .....V@....
00000000: 00 00 00 00 00 60 61 40 D7 07 0C 1C .....a@....
00000000: 00 00 00 00 00 20 63 40 D9 07 05 18 .....c@....
00000000: 3D 0A D7 A3 70 FD 34 40 D7 07 07 11 =...p.4@....
00000000: 00 00 00 00 00 A0 63 40 D5 07 05 19 .....c@....
00000000: CD CC CC CC CC 3C 5C 40 D7 07 08 11 .....@....
00000000: 66 66 66 66 66 FE 62 40 D4 07 06 05 fffff.b@....
00000000: 1F 85 EB 51 B8 FE 40 40 D6 07 09 1E ...Q..@@....
00000000: 00 00 00 00 00 40 5F 40 DC 07 02 18 .....@_@....
00000000: 48 E1 7A 14 AE 9F 67 40 D8 07 05 12 H.z...g@....
00000000: CD CC CC CC CC 3C 5E 40 DC 07 01 07 .....^@....
00000000: 00 00 00 00 00 00 67 40 D4 07 0B 0E .....g@....
00000000: 00 00 00 00 00 40 51 40 DC 07 04 0B .....@Q@....
00000000: 00 00 00 00 00 40 56 40 D7 07 07 0A .....@V@....
00000000: 8F C2 F5 28 5C 7F 55 40 DB 07 01 16 ...(.U@....
00000000: 00 00 00 00 00 00 32 40 DB 07 06 09 .....2@....
00000000: 66 66 66 66 66 7E 66 40 D9 07 0A 06 fffff~f@....
00000000: 48 E1 7A 14 AE DF 68 40 D5 07 07 16 H.z...h@....
```

Видим что байты 0x40 и 0x07 присутствуют в каждом *хвосте*. Самый последний байт всегда в пределах 1..0x1F (1..31), я проверил. Предпоследний байт всегда в пределах 1..0xC (1..12). Ух, это выглядит как дата! Год может быть представлен как 16-битное значение, и может быть последние 4 байта это дата (16 бит для года, 8 бит для месяца и еще 8 для дня)? 0x7DD это 2013, 0x7D5 это 2005, итд. Похоже нормально. Это дата. Там есть еще 8 байт. Судя по тому факту что БД называется *orders* (заказы), может быть здесь присутствует сумма? Я сделал попытку интерпретировать их как числа с плавающей точкой двойной точности в формате IEEE 754, и вывести все значения!

Некоторые:

```
71.0
134.0
51.95
53.0
121.99
96.95
98.95
15.95
85.95
184.99
94.95
29.95
85.0
36.0
130.99
115.95
87.99
127.95
114.0
150.95
```

Похоже на правду!

Теперь мы можем вывести имена, суммы и даты.

```
plain:
00000000: 0D 00 FF FE 46 00 52 00 41 00 4E 00 4B 00 49 00 ....F.R.A.N.K.I.
00000010: 45 00 20 00 4A 00 4F 00 48 00 4E 00 53 00 66 66 E. .J.O.H.N.S.ff
00000020: 66 66 66 9E 61 40 D4 07 06 01 fff.a@....
OrderID= 1 name= FRANKIE JOHNS sum= 140.95 date= 2004 / 6 / 1

plain:
00000000: 0B 00 FF FE 4C 00 4F 00 52 00 49 00 20 00 42 00 ....L.O.R.I. .B.
00000010: 41 00 52 00 52 00 4F 00 4E 00 CD CC CC CC CC CC A.R.R.O.N.....
00000020: 1B 40 D4 07 06 01 .@....
OrderID= 2 name= LORI BARRON sum= 6.95 date= 2004 / 6 / 1
```

8.7. СЛУЧАЙ С ЗАШИФРОВАННОЙ БД #1

```
plain:
00000000: 0A 00 FF FE 47 00 41 00 52 00 59 00 20 00 42 00 ....G.A.R.Y. .B.
00000010: 49 00 47 00 47 00 53 00 00 00 00 00 00 C0 65 40 I.G.G.S.....e@
00000020: D4 07 06 01 ....
OrderID= 3 name= GARY BIGGS sum= 174.0 date= 2004 / 6 / 1
```

```
plain:
00000000: 0F 00 FF FE 4D 00 45 00 4C 00 49 00 4E 00 44 00 ....M.E.L.I.N.D.
00000010: 41 00 20 00 44 00 4F 00 48 00 45 00 52 00 54 00 A. .D.O.H.E.R.T.
00000020: 59 00 48 E1 7A 14 AE FF 68 40 D4 07 06 02 Y.H.z...h@....
OrderID= 4 name= MELINDA DOHERTY sum= 199.99 date= 2004 / 6 / 2
```

```
plain:
00000000: 0B 00 FF FE 4C 00 45 00 4E 00 41 00 20 00 4D 00 ....L.E.N.A. .M.
00000010: 41 00 52 00 43 00 55 00 53 00 00 00 00 00 00 60 A.R.C.U.S.....
00000020: 66 40 D4 07 06 03 f@....
OrderID= 5 name= LENA MARCUS sum= 179.0 date= 2004 / 6 / 3
```

См. еще: https://raw.githubusercontent.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/master/examples/encrypted_DB1/decrypted.full.with_data.txt. Или отфильтрованные: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/examples/encrypted_DB1/decrypted.short.txt. Похоже всё корректно.

Это что-то вроде сериализации в **ООП**, т.е., упаковка значений с разными типами в бинарный буфер для хранения и/или передачи.

8.7.8. Шум в конце

Остался только один вопрос, иногда *хвост* длиннее:

```
00000000: 0E 00 FF FE 54 00 48 00 45 00 52 00 45 00 53 00 ....T.H.E.R.E.S.
00000010: 45 00 20 00 54 00 55 00 54 00 54 00 4C 00 45 00 E. .T.U.T.T.L.E.
00000020: 66 66 66 66 66 1E 63 40 D4 07 07 1A 00 07 07 19 fffff.c@.....
OrderID= 172 name= THERESE TUTTLE sum= 152.95 date= 2004 / 7 / 26
```

(Байты *00 07 07 19* не используются и являются балластом.)

```
00000000: 0C 00 FF FE 4D 00 45 00 4C 00 41 00 4E 00 49 00 ....M.E.L.A.N.I.
00000010: 45 00 20 00 4B 00 49 00 52 00 4B 00 00 00 00 00 E. .K.I.R.K.....
00000020: 00 20 64 40 D4 07 09 02 00 02 . d@.....
OrderID= 286 name= MELANIE KIRK sum= 161.0 date= 2004 / 9 / 2
```

(*00 02* не используются.)

После близкого рассмотрения мы можем видеть, что шум в конце *хвоста* просто остался от предыдущего шифрования!

Вот два идущих подряд буфера:

```
00000000: 10 00 FF FE 42 00 4F 00 4E 00 4E 00 49 00 45 00 ....B.O.N.N.I.E.
00000010: 20 00 47 00 4F 00 4C 00 44 00 53 00 54 00 45 00 .G.O.L.D.S.T.E.
00000020: 49 00 4E 00 9A 99 99 99 99 79 46 40 D4 07 07 19 I.N.....yF@....
OrderID= 171 name= BONNIE GOLDSTEIN sum= 44.95 date= 2004 / 7 / 25
```

```
00000000: 0E 00 FF FE 54 00 48 00 45 00 52 00 45 00 53 00 ....T.H.E.R.E.S.
00000010: 45 00 20 00 54 00 55 00 54 00 54 00 4C 00 45 00 E. .T.U.T.T.L.E.
00000020: 66 66 66 66 66 1E 63 40 D4 07 07 1A 00 07 07 19 fffff.c@.....
OrderID= 172 name= THERESE TUTTLE sum= 152.95 date= 2004 / 7 / 26
```

(Последние байты *07 07 19* скопированы из предыдущего незашифрованного буфера.)

Еще два подряд идущих буфера:

```
00000000: 0D 00 FF FE 4C 00 4F 00 52 00 45 00 4E 00 45 00 ....L.O.R.E.N.E.
00000010: 20 00 4F 00 54 00 4F 00 4F 00 4C 00 45 00 CD CC .O.T.O.O.L.E...
00000020: CC CC CC 3C 5E 40 D4 07 09 02 ...<^@....
OrderID= 285 name= LORENE OTTOLE sum= 120.95 date= 2004 / 9 / 2
```

```
00000000: 0C 00 FF FE 4D 00 45 00 4C 00 41 00 4E 00 49 00 ....M.E.L.A.N.I.
```

8.8. РАЗГОН МАЙНЕРА БИТКОИНОВ COINTERRA

```
00000010: 45 00 20 00 4B 00 49 00 52 00 4B 00 00 00 00 00 E. .K.I.R.K.....
00000020: 00 20 64 40 D4 07 09 02 00 02 . d@.....
OrderID= 286 name= MELANIE KIRK sum= 161.0 date= 2004 / 9 / 2
```

Последний байт 02 был скопирован из предыдущего незашифрованного буфера.

Возможно, что буфер использующийся для шифрования глобальный и/или не очищается перед каждым шифрованием. Размер последнего буфера тоже как-то хаотично меняется, тем не менее, ошибка не была отловлена потому что она не влияет на процесс дешифрования, который просто игнорирует шум в конце. Эта распространенная ошибка. Она была даже в OpenSSL (ошибка Heartbleed).

8.7.9. Вывод

Итог: каждый практикующий реверс-инженер должен быть знаком с основными алгоритмами шифрования, а также с основными режимами шифрования. Некоторые книги об этом: [11.1.10](#) (стр. 989).

Зашифрованное содержимое БД было искусственно мною создано ради демонстрации. Я использовал наиболее популярные имена и фамилии в США, отсюда: <http://stackoverflow.com/questions/1803628/raw-list-of-person-names>, и скомбинировал их случайным образом. Даты и суммы были сгенерированы случайным образом.

Все файлы использованные в этой части здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/tree/master/examples/encrypted_DB1.

Тем не менее, многие особенности как здесь, я наблюдал в настоящем ПО. Этот пример основан на них.

8.7.10. Post Scriptum: перебор всех IV

Пример, который вы только что видели, был искусственно создан, но основан на настоящем ПО которое я разбирал. Когда я над ним работал, я в начале заметил, что IV генерируется используя некоторые 32-битное число, и я не мог найти связь между этим числом и OrderID. Так что я приготовился использовать полный перебор, который тут действительно возможен.

Это не проблема перебрать все 32-битные значения и попробовать каждое как основу для IV. Затем вы дешифруете первый 16-байтный блок и проверяете нулевые байты, которые всегда находятся на одних и тех же местах.

8.8. Разгон майнера биткоинов Cointerra

Был такой майнер биткоинов Cointerra, выглядящий так:

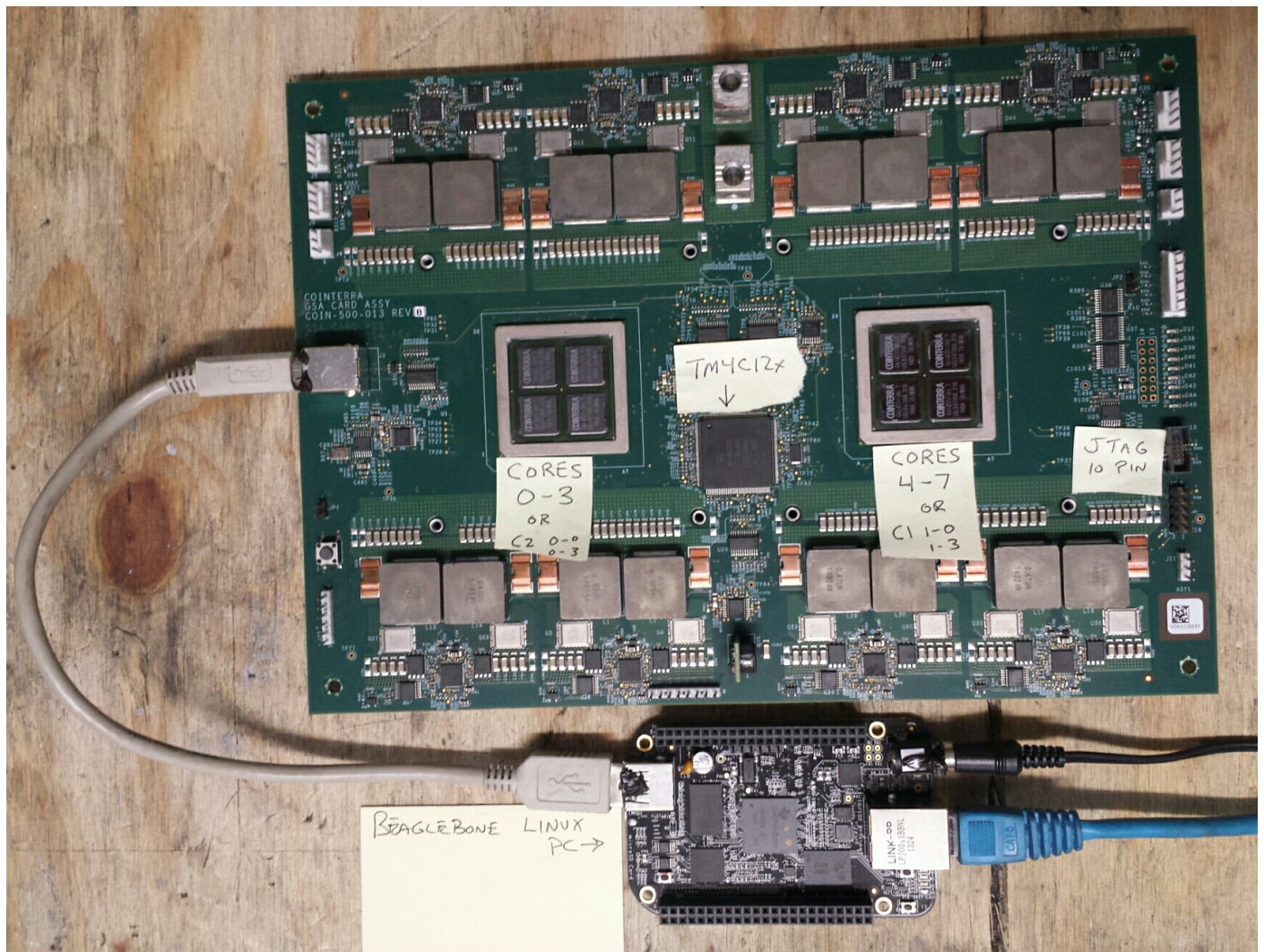


Рис. 8.14: Board

И была также (возможно утекшая) утилита²⁵ которая могла выставить тактовую частоту платы. Она запускается на дополнительной плате BeagleBone на ARM с Linux (маленькая плата внизу фотографии).

И у автора (этих строк) однажды спросили, можно ли хакнуть эту утилиту и посмотреть, какие частоты можно выставить, и какие нет. И можно ли твикнуть её?

Утилиту нужно запускать так: `./cointool-overclock 0 0 900`, где 900 это частота в МГц. Если частота слишком большая, утилита выведет ошибку «Error with arguments» и закончит работу.

Вот фрагмент кода вокруг ссылки на текстовую строку «Error with arguments»:

```
...
.text:0000ABC4    STR     R3, [R11,#var_28]
.text:0000ABC8    MOV     R3, #optind
.text:0000ABD0    LDR     R3, [R3]
.text:0000ABD4    ADD     R3, R3, #1
.text:0000ABD8    MOV     R3, R3, LSL#2
.text:0000ABDC    LDR     R2, [R11,#argv]
.text:0000ABE0    ADD     R3, R2, R3
.text:0000ABE4    LDR     R3, [R3]
.text:0000ABE8    MOV     R0, R3 ; nptr
.text:0000ABEC    MOV     R1, #0 ; endptr
.text:0000ABF0    MOV     R2, #0 ; base
.text:0000ABF4    BL      strtoll
.text:0000ABF8    MOV     R2, R0
```

²⁵Можно скачать здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/raw/master/examples/bitcoin_miner/files/cointool-overclock

8.8. РАЗГОН МАЙНЕРА БИТКОИНОВ COINTERRA

```
.text:0000ABFC      MOV      R3, R1
.text:0000AC00      MOV      R3, R2
.text:0000AC04      STR      R3, [R11,#var_2C]
.text:0000AC08      MOV      R3, #optind
.text:0000AC10      LDR      R3, [R3]
.text:0000AC14      ADD      R3, R3, #2
.text:0000AC18      MOV      R3, R3,LSL#2
.text:0000AC1C      LDR      R2, [R11,#argv]
.text:0000AC20      ADD      R3, R2, R3
.text:0000AC24      LDR      R3, [R3]
.text:0000AC28      MOV      R0, R3 ; nptr
.text:0000AC2C      MOV      R1, #0 ; endptr
.text:0000AC30      MOV      R2, #0 ; base
.text:0000AC34      BL      strtoll
.text:0000AC38      MOV      R2, R0
.text:0000AC3C      MOV      R3, R1
.text:0000AC40      MOV      R3, R2
.text:0000AC44      STR      R3, [R11,#third_argument]
.text:0000AC48      LDR      R3, [R11,#var_28]
.text:0000AC4C      CMP      R3, #0
.text:0000AC50      BLT      errors_with_arguments
.text:0000AC54      LDR      R3, [R11,#var_28]
.text:0000AC58      CMP      R3, #1
.text:0000AC5C      BGT      errors_with_arguments
.text:0000AC60      LDR      R3, [R11,#var_2C]
.text:0000AC64      CMP      R3, #0
.text:0000AC68      BLT      errors_with_arguments
.text:0000AC6C      LDR      R3, [R11,#var_2C]
.text:0000AC70      CMP      R3, #3
.text:0000AC74      BGT      errors_with_arguments
.text:0000AC78      LDR      R3, [R11,#third_argument]
.text:0000AC7C      CMP      R3, #0x31
.text:0000AC80      BLE      errors_with_arguments
.text:0000AC84      LDR      R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AC88      MOV      R3, #950
.text:0000AC8C      CMP      R2, R3
.text:0000AC90      BGT      errors_with_arguments
.text:0000AC94      LDR      R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AC98      MOV      R3, #0x51EB851F
.text:0000ACA0      SMULL    R1, R3, R3, R2
.text:0000ACA4      MOV      R1, R3,ASR#4
.text:0000ACA8      MOV      R3, R2,ASR#31
.text:0000ACAC      RSB      R3, R3, R1
.text:0000ACB0      MOV      R1, #50
.text:0000ACB4      MUL      R3, R1, R3
.text:0000ACB8      RSB      R3, R3, R2
.text:0000ACBC      CMP      R3, #0
.text:0000ACC0      BEQ      loc_ACEC
.text:0000ACC4      errors_with_arguments
.text:0000ACC4      LDR      R3, [R11,#argv]
.text:0000ACC8      LDR      R3, [R3]
.text:0000ACCC      MOV      R0, R3 ; path
.text:0000ACD0      BL      __xpg_basename
.text:0000ACD4      MOV      R3, R0
.text:0000ACD8      MOV      R0, #aSErrWithArgu ; format
.text:0000ACE0      MOV      R1, R3
.text:0000ACE4      BL      printf
.text:0000ACE8      B      loc_ADD4
.text:0000ACEC      ; -----
.text:0000ACEC      loc_ACEC ; CODE XREF: main+66C
.text:0000ACEC      LDR      R2, [R11,#third_argument]
.text:0000ACF0      MOV      R3, #499
.text:0000ACF4      CMP      R2, R3
.text:0000ACF8      BGT      loc_AD08
.text:0000ACFC      MOV      R3, #0x64
.text:0000AD00      STR      R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD04      B      jump_to_write_power
```


8.8. РАЗГОН МАЙНЕРА БИТКОИНОВ COINTERRA

```
.text:0000AD08 ; -----
.text:0000AD08
.text:0000AD08 loc_AD08 ; CODE XREF: main+6A4
.text:0000AD08 LDR R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AD0C MOV R3, #799
.text:0000AD10 CMP R2, R3
.text:0000AD14 BGT loc_AD24
.text:0000AD18 MOV R3, #0x5F
.text:0000AD1C STR R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD20 B jump_to_write_power
.text:0000AD24 ; -----
.text:0000AD24
.text:0000AD24 loc_AD24 ; CODE XREF: main+6C0
.text:0000AD24 LDR R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AD28 MOV R3, #899
.text:0000AD2C CMP R2, R3
.text:0000AD30 BGT loc_AD40
.text:0000AD34 MOV R3, #0x5A
.text:0000AD38 STR R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD3C B jump_to_write_power
.text:0000AD40 ; -----
.text:0000AD40
.text:0000AD40 loc_AD40 ; CODE XREF: main+6DC
.text:0000AD40 LDR R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AD44 MOV R3, #999
.text:0000AD48 CMP R2, R3
.text:0000AD4C BGT loc_AD5C
.text:0000AD50 MOV R3, #0x55
.text:0000AD54 STR R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD58 B jump_to_write_power
.text:0000AD5C ; -----
.text:0000AD5C
.text:0000AD5C loc_AD5C ; CODE XREF: main+6F8
.text:0000AD5C LDR R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AD60 MOV R3, #1099
.text:0000AD64 CMP R2, R3
.text:0000AD68 BGT jump_to_write_power
.text:0000AD6C MOV R3, #0x50
.text:0000AD70 STR R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD74
.text:0000AD74 jump_to_write_power ; CODE XREF: main+6B0
.text:0000AD74 ; main+6CC ...
.text:0000AD74 LDR R3, [R11,#var_28]
.text:0000AD78 UXTB R1, R3
.text:0000AD7C LDR R3, [R11,#var_2C]
.text:0000AD80 UXTB R2, R3
.text:0000AD84 LDR R3, [R11,#unk_constant]
.text:0000AD88 UXTB R3, R3
.text:0000AD8C LDR R0, [R11,#third_argument]
.text:0000AD90 UXTH R0, R0
.text:0000AD94 STR R0, [SP,#0x44+var_44]
.text:0000AD98 LDR R0, [R11,#var_24]
.text:0000AD9C BL write_power
.text:0000ADA0 LDR R0, [R11,#var_24]
.text:0000ADA4 MOV R1, #0x5A
.text:0000ADA8 BL read_loop
.text:0000ADAC B loc_ADD4

...

.rodata:0000B378 aSErrorWithArgu DCB "%s: Error with arguments",0xA,0 ; DATA XREF: main+684

...
```

Имена ф-ций присутствовали в отладочной информации в оригинальном исполняемом файле, такие как `write_power`, `read_loop`. Но имена меткам внутри ф-ции дал я.

Имя `optind` звучит знакомо. Это библиотека `getopt` из *NIX предназначенная для парсинга командной строки — и это то, что внутри и происходит. Затем, третий аргумент (где передается значение частоты) конвертируется из строку в число используя вызов ф-ции `strtoll()`.

8.8. РАЗГОН МАЙНЕРА БИТКОИНОВ COINTERRA

Значение затем сравнивается с разными константами. На 0xACEC есть проверка, меньше ли оно или равно 499, и если это так, то 0x64 будет передано в ф-цию `write_power()` (которая посылает команду через USB используя `send_msg()`). Если значение больше 499, происходит переход на 0xAD08.

На 0xAD08 есть проверка, меньше ли оно или равно 799. Если это так, то 0x5F передается в ф-цию `write_power()`.

Есть еще проверки: на 899 на 0xAD24, на 0x999 на 0xAD40, и наконец, на 1099 на 0xAD5C. Если входная частота меньше или равна 1099, 0x50 (на 0xAD6C) будет передано в ф-цию `write_power()`. И тут что-то вроде баги. Если значение все еще больше 1099, само значение будет передано в ф-цию `write_power()`. Но с другой стороны это не бага, потому что мы не можем попасть сюда: значение в начале проверяется с 950 на 0xAC88, и если оно больше, выводится сообщение об ошибке и утилита заканчивает работу.

Вот таблица между частотами в МГц и значениями передаваемыми в ф-цию `write_power()`:

МГц	шестнадцатеричное представление	десятичное
499MHz	0x64	100
799MHz	0x5f	95
899MHz	0x5a	90
999MHz	0x55	85
1099MHz	0x50	80

Как видно, значение передаваемое в плату постепенно уменьшается с ростом частоты.

Видно что значение в 950МГц это жесткий предел, по крайней мере в этой утилите. Можно ли её обмануть?

Вернемся к этому фрагменту кода:

```
.text:0000AC84    LDR    R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AC88    MOV    R3, #950
.text:0000AC8C    CMP    R2, R3
.text:0000AC90    BGT    errors_with_arguments ; Я пропатчил здесь на 00 00 00 00
```

Нам нужно как-то запретить инструкцию перехода BGT на 0xAC90. И это ARM в режиме ARM, потому что, как мы видим, все адреса увеличиваются на 4, т.е., длина каждой инструкции это 4 байта. Инструкция NOP (нет операции) в режиме ARM это просто 4 нулевых байта: 00 00 00 00. Так что, записывая 4 нуля по адресу 0xAC90 (или по физическому смещению в файле: 0x2C90) мы можем выключить эту проверку.

Теперь можно выставлять частоты вплоть до 1050МГц. И даже больше, но из-за ошибки, если входное значение больше 1099, значение в МГц, как есть, будет передано в плату, что неправильно.

Дальше я не разбирался, но если бы продолжил, я бы уменьшал значение передаваемое в ф-цию `write_power()`.

Теперь страшный фрагмент кода, который я в начале пропустил:

```
.text:0000AC94    LDR    R2, [R11,#third_argument]
.text:0000AC98    MOV    R3, #0x51EB851F
.text:0000ACA0    SMULL  R1, R3, R3, R2 ; R3=3rg_arg/3.125
.text:0000ACA4    MOV    R1, R3, ASR#4 ; R1=R3/16=3rg_arg/50
.text:0000ACA8    MOV    R3, R2, ASR#31 ; R3=MSB(3rg_arg)
.text:0000ACAC    RSB    R3, R3, R1 ; R3=3rd_arg/50
.text:0000ACB0    MOV    R1, #50
.text:0000ACB4    MUL    R3, R1, R3 ; R3=50*(3rd_arg/50)
.text:0000ACB8    RSB    R3, R3, R2
.text:0000ACBC    CMP    R3, #0
.text:0000ACC0    BEQ    loc_ACEC
.text:0000ACC4
.text:0000ACC4    errors_with_arguments
```

Здесь используется деление через умножение, и константа 0x51EB851F. Я написал для себя простой программистский калькулятор²⁶. И там есть возможность вычислять обратное число по модулю.

²⁶<https://github.com/DennisYurichev/progcalc>

8.9. SAP

```
modinv32(0x51EB851F)
Warning, result is not integer: 3.125000
(unsigned) dec: 3 hex: 0x3 bin: 11
```

Это значит что инструкция SMULL на 0xACA0 просто делит 3-й аргумент на 3.125. На самом деле, все что делает ф-ция `modinv32()` в моем калькуляторе, это:

$$\frac{1}{\frac{input}{2^{32}}} = \frac{2^{32}}{input}$$

Потом там есть дополнительные сдвиги и теперь мы видим что 3-й аргумент просто делится на 50. И затем умножается снова на 50. Зачем? Это простейшая проверка, можно ли делить входное значение на 50 без остатка. Если значение этого выражения ненулевое, x не может быть разделено на 50 без остатка:

$$x - \left(\left(\frac{x}{50}\right) \cdot 50\right)$$

На самом деле, это простой способ вычисления остатка от деления.

И затем, если остаток ненулевой, выводится сообщение об ошибке. Так что эта утилита берет значения частот вроде 850, 900, 950, 1000, итд, но не 855 или 911.

Вот и всё! Если вы делаете что-то такое, имейте ввиду, что это может испортить вашу плату, как и в случае разгона чипов вроде [CPU](#), [GPU](#)²⁷, итд. Если у вас есть плата Cointerra, делайте всё это на свой собственный риск!

8.9. SAP

8.9.1. Касательно сжимания сетевого трафика в клиенте SAP

(Трассировка связи между переменной окружения `TDW_NOCOMPRESS` `SAPGUI`²⁸ до «назойливого всплывающего окна» и самой функции сжатия данных.)

Известно, что сетевой трафик между `SAPGUI` и `SAP` по умолчанию не шифруется, а сжимается (читайте здесь²⁹ и здесь³⁰).

Известно также что если установить переменную окружения `TDW_NOCOMPRESS` в 1, можно выключить сжатие сетевых пакетов.

Но вы увидите окно, которое нельзя будет закрыть:

²⁷Graphics Processing Unit

²⁸GUI-клиент от SAP

²⁹<http://go.yurichev.com/17221>

³⁰blog.yurichev.com

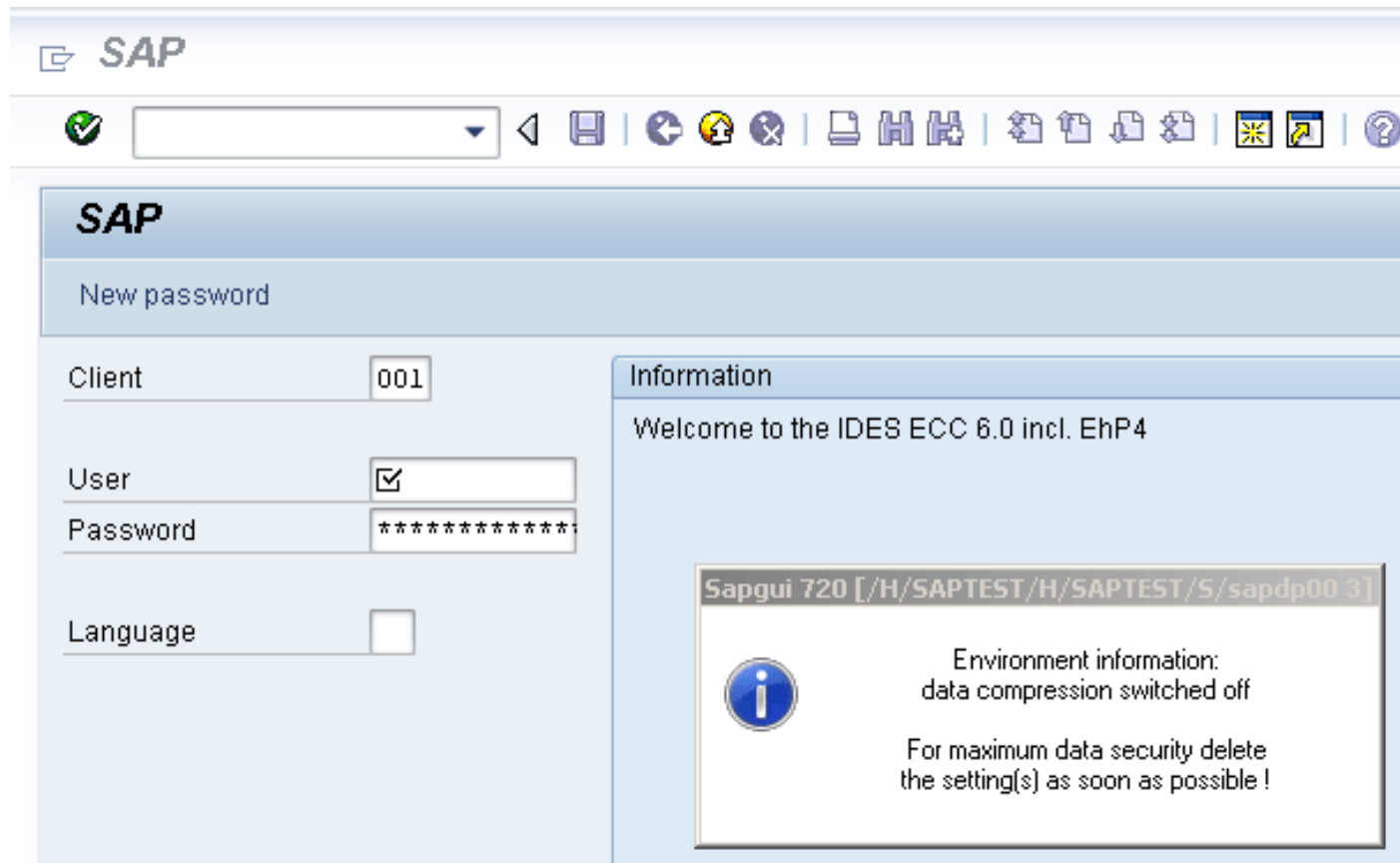


Рис. 8.15: Скриншот

Посмотрим, сможем ли мы как-то убрать это окно.

Но в начале давайте посмотрим, что мы уже знаем. Первое: мы знаем, что переменная окружения *TDW_NOCOMPRESS* проверяется где-то внутри клиента SAPGUI.

Второе: строка вроде «data compression switched off» также должна где-то присутствовать.

При помощи файлового менеджера FAR³¹ мы можем найти обе эти строки в файле SAPguilib.dll.

Так что давайте откроем файл SAPguilib.dll в IDA и поищем там строку «*TDW_NOCOMPRESS*». Да, она присутствует и имеется только одна ссылка на эту строку.

Мы увидим такой фрагмент кода (все смещения верны для версии SAPGUI 720 win32, SAPguilib.dll версия файла 7200,1,0,9009):

```
.text:6440D51B      lea     eax, [ebp+2108h+var_211C]
.text:6440D51E      push    eax                ; int
.text:6440D51F      push    offset aTdw_nocompress ; "TDW_NOCOMPRESS"
.text:6440D524      mov     byte ptr [edi+15h], 0
.text:6440D528      call    chk_env
.text:6440D52D      pop     ecx
.text:6440D52E      pop     ecx
.text:6440D52F      push    offset byte_64443AF8
.text:6440D534      lea     ecx, [ebp+2108h+var_211C]

; demangled name: int ATL::CStringT::Compare(char const *)const
.text:6440D537      call    ds:mfc90_1603
.text:6440D53D      test    eax, eax
.text:6440D53F      jz      short loc_6440D55A
.text:6440D541      lea     ecx, [ebp+2108h+var_211C]

; demangled name: const char* ATL::CStringT::operator PCWSTR
.text:6440D544      call    ds:mfc90_910
.text:6440D54A      push    eax                ; Str
.text:6440D54B      call    ds:atoi
.text:6440D551      test    eax, eax
```

³¹<http://go.yurichev.com/17347>

8.9. SAP

```
.text:6440D553      setnz    al
.text:6440D556      pop      ecx
.text:6440D557      mov     [edi+15h], al
```

Строка возвращаемая функцией `chk_env()` через второй аргумент, обрабатывается далее строковыми функциями MFC, затем вызывается `atoi()`³². После этого, число сохраняется в `edi+15h`.

Обратите также внимание на функцию `chk_env` (это мы так назвали её вручную):

```
.text:64413F20 ; int __cdecl chk_env(char *VarName, int)
.text:64413F20 chk_env      proc near
.text:64413F20
.text:64413F20 DstSize      = dword ptr -0Ch
.text:64413F20 var_8         = dword ptr -8
.text:64413F20 DstBuf       = dword ptr -4
.text:64413F20 VarName      = dword ptr 8
.text:64413F20 arg_4        = dword ptr 0Ch
.text:64413F20
.text:64413F20      push    ebp
.text:64413F21      mov     ebp, esp
.text:64413F23      sub     esp, 0Ch
.text:64413F26      mov     [ebp+DstSize], 0
.text:64413F2D      mov     [ebp+DstBuf], 0
.text:64413F34      push    offset unk_6444C88C
.text:64413F39      mov     ecx, [ebp+arg_4]

; (demangled name) ATL::CStringT::operator=(char const *)
.text:64413F3C      call    ds:mfc90_820
.text:64413F42      mov     eax, [ebp+VarName]
.text:64413F45      push    eax                ; VarName
.text:64413F46      mov     ecx, [ebp+DstSize]
.text:64413F49      push    ecx                ; DstSize
.text:64413F4A      mov     edx, [ebp+DstBuf]
.text:64413F4D      push    edx                ; DstBuf
.text:64413F4E      lea     eax, [ebp+DstSize]
.text:64413F51      push    eax                ; ReturnSize
.text:64413F52      call    ds:getenv_s
.text:64413F58      add     esp, 10h
.text:64413F5B      mov     [ebp+var_8], eax
.text:64413F5E      cmp     [ebp+var_8], 0
.text:64413F62      jz      short loc_64413F68
.text:64413F64      xor     eax, eax
.text:64413F66      jmp     short loc_64413FBC
.text:64413F68
.text:64413F68 loc_64413F68:
.text:64413F68      cmp     [ebp+DstSize], 0
.text:64413F6C      jnz     short loc_64413F72
.text:64413F6E      xor     eax, eax
.text:64413F70      jmp     short loc_64413FBC
.text:64413F72
.text:64413F72 loc_64413F72:
.text:64413F72      mov     ecx, [ebp+DstSize]
.text:64413F75      push    ecx
.text:64413F76      mov     ecx, [ebp+arg_4]

; demangled name: ATL::CStringT<char, 1>::Preallocate(int)
.text:64413F79      call    ds:mfc90_2691
.text:64413F7F      mov     [ebp+DstBuf], eax
.text:64413F82      mov     edx, [ebp+VarName]
.text:64413F85      push    edx                ; VarName
.text:64413F86      mov     eax, [ebp+DstSize]
.text:64413F89      push    eax                ; DstSize
.text:64413F8A      mov     ecx, [ebp+DstBuf]
.text:64413F8D      push    ecx                ; DstBuf
.text:64413F8E      lea     edx, [ebp+DstSize]
.text:64413F91      push    edx                ; ReturnSize
.text:64413F92      call    ds:getenv_s
.text:64413F98      add     esp, 10h
.text:64413F9B      mov     [ebp+var_8], eax
```

³²Стандартная функция Си, конвертирующая число в строке в число

8.9. SAP

```
.text:64413F9E      push    0FFFFFFFh
.text:64413FA0      mov     ecx, [ebp+arg_4]

; demangled name: ATL::CStringT::ReleaseBuffer(int)
.text:64413FA3      call    ds:mfc90_5835
.text:64413FA9      cmp     [ebp+var_8], 0
.text:64413FAD      jz      short loc_64413FB3
.text:64413FAF      xor     eax, eax
.text:64413FB1      jmp     short loc_64413FBC
.text:64413FB3
.text:64413FB3 loc_64413FB3:
.text:64413FB3      mov     ecx, [ebp+arg_4]

; demangled name: const char* ATL::CStringT::operator PCWSTR
.text:64413FB6      call    ds:mfc90_910
.text:64413FBC
.text:64413FBC loc_64413FBC:
.text:64413FBC
.text:64413FBC      mov     esp, ebp
.text:64413FBE      pop     ebp
.text:64413FBF      retn
.text:64413FBF chk_env      endp
```

Да. Функция `getenv_s()`³³ это безопасная версия функции `getenv()`³⁴ в MSVC.

Тут также имеются манипуляции со строками при помощи функций из MFC.

Множество других переменных окружения также проверяются. Здесь список всех переменных проверяемых SAPGUI а также сообщение записываемое им в лог-файл, если переменная включена:

DPTRACE	"GUI-OPTION: Trace set to %d"
TDW_HEXDUMP	"GUI-OPTION: Hexdump enabled"
TDW_WORKDIR	"GUI-OPTION: working directory '%s'"
TDW_SPLASHSRCEENOFF	"GUI-OPTION: Splash Screen Off"
	"GUI-OPTION: Splash Screen On"
TDW_REPLYTIMEOUT	"GUI-OPTION: reply timeout %d milliseconds"
TDW_PLAYBACKTIMEOUT	"GUI-OPTION: PlaybackTimeout set to %d milliseconds"
TDW_NOCOMPRESS	"GUI-OPTION: no compression read"
TDW_EXPERT	"GUI-OPTION: expert mode"
TDW_PLAYBACKPROGRESS	"GUI-OPTION: PlaybackProgress"
TDW_PLAYBACKNETTRAFFIC	"GUI-OPTION: PlaybackNetTraffic"
TDW_PLAYLOG	"GUI-OPTION: /PlayLog is YES, file %s"
TDW_PLAYTIME	"GUI-OPTION: /PlayTime set to %d milliseconds"
TDW_LOGFILE	"GUI-OPTION: TDW_LOGFILE '%s'"
TDW_WAN	"GUI-OPTION: WAN - low speed connection enabled"
TDW_FULLMENU	"GUI-OPTION: FullMenu enabled"
SAP_CP / SAP_CODEPAGE	"GUI-OPTION: SAP_CODEPAGE '%d'"
UPDOWNLOAD_CP	"GUI-OPTION: UPDOWNLOAD_CP '%d'"
SNC_PARTNERNAME	"GUI-OPTION: SNC name '%s'"
SNC_QOP	"GUI-OPTION: SNC_QOP '%s'"
SNC_LIB	"GUI-OPTION: SNC is set to: %s"
SAPGUI_INPLACE	"GUI-OPTION: environment variable SAPGUI_INPLACE is on"

Настройки для каждой переменной записываются в массив через указатель в регистре EDI. EDI выставляется перед вызовом функции:

```
.text:6440EE00      lea     edi, [ebp+2884h+var_2884] ; options here like +0x15...
.text:6440EE03      lea     ecx, [esi+24h]
.text:6440EE06      call    load_command_line
.text:6440EE0B      mov     edi, eax
.text:6440EE0D      xor     ebx, ebx
.text:6440EE0F      cmp     edi, ebx
.text:6440EE11      jz      short loc_6440EE42
.text:6440EE13      push    edi
.text:6440EE14      push    offset aSapguiStoppedA ; "Sapgui stopped after ↵
        ↵ commandline interp"...
.text:6440EE19      push    dword_644F93E8
.text:6440EE1F      call    FEWTraceError
```

³³MSDN

³⁴Стандартная функция Си, возвращающая значение переменной окружения

8.9. SAP

А теперь, можем ли мы найти строку «*data record mode switched on*»? Да, и есть только одна ссылка на эту строку в функции.

CDwsGui::PrepareInfoWindow(). Откуда мы узнали имена классов/методов? Здесь много специальных отладочных вызовов, пишущих в лог-файл вроде:

```
.text:64405160      push     dword ptr [esi+2854h]
.text:64405166      push     offset aCdwsguiPrepare ; "\nCDwsGui::PrepareInfoWindow: ↗
    ↳ sapgui env"...
.text:6440516B      push     dword ptr [esi+2848h]
.text:64405171      call     dbg
.text:64405176      add      esp, 0Ch
```

...или:

```
.text:6440237A      push     eax
.text:6440237B      push     offset aCClientStart_6 ; "CClient::Start: set shortcut ↗
    ↳ user to '\%'...
.text:64402380      push     dword ptr [edi+4]
.text:64402383      call     dbg
.text:64402388      add      esp, 0Ch
```

Они *очень* полезны.

Посмотрим содержимое функции «назойливого всплывающего окна»:

```
.text:64404F4F CDwsGui__PrepareInfoWindow proc near
.text:64404F4F
.text:64404F4F pvParam      = byte ptr -3Ch
.text:64404F4F var_38        = dword ptr -38h
.text:64404F4F var_34        = dword ptr -34h
.text:64404F4F rc          = tagRECT ptr -2Ch
.text:64404F4F cy          = dword ptr -1Ch
.text:64404F4F h            = dword ptr -18h
.text:64404F4F var_14       = dword ptr -14h
.text:64404F4F var_10       = dword ptr -10h
.text:64404F4F var_4        = dword ptr -4
.text:64404F4F
.text:64404F4F      push     30h
.text:64404F51      mov      eax, offset loc_64438E00
.text:64404F56      call     __EH_prolog3
.text:64404F5B      mov      esi, ecx          ; ECX is pointer to object
.text:64404F5D      xor      ebx, ebx
.text:64404F5F      lea      ecx, [ebp+var_14]
.text:64404F62      mov      [ebp+var_10], ebx

; demangled name: ATL::CStringT(void)
.text:64404F65      call     ds:mfc90_316
.text:64404F6B      mov      [ebp+var_4], ebx
.text:64404F6E      lea      edi, [esi+2854h]
.text:64404F74      push     offset aEnvironmentInf ; "Environment information:\n"
.text:64404F79      mov      ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator=(char const *)
.text:64404F7B      call     ds:mfc90_820
.text:64404F81      cmp      [esi+38h], ebx
.text:64404F84      mov      ebx, ds:mfc90_2539
.text:64404F8A      jbe      short loc_64404FA9
.text:64404F8C      push     dword ptr [esi+34h]
.text:64404F8F      lea      eax, [ebp+var_14]
.text:64404F92      push     offset aWorkingDirecto ; "working directory: '%s'\n"
.text:64404F97      push     eax

; demangled name: ATL::CStringT::Format(char const *,...)
.text:64404F98      call     ebx ; mfc90_2539
.text:64404F9A      add      esp, 0Ch
.text:64404F9D      lea      eax, [ebp+var_14]
.text:64404FA0      push     eax
.text:64404FA1      mov      ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(class ATL::CSimpleStringT<char, 1> const &)
```


8.9. SAP

```
.text:64404FA3      call     ds:mfc90_941
.text:64404FA9
.text:64404FA9  loc_64404FA9:
.text:64404FA9      mov     eax, [esi+38h]
.text:64404FAC      test    eax, eax
.text:64404FAE      jbe     short loc_64404FD3
.text:64404FB0      push    eax
.text:64404FB1      lea     eax, [ebp+var_14]
.text:64404FB4      push    offset aTraceLevelDAct ; "trace level %d activated\n"
.text:64404FB9      push    eax

; demangled name: ATL::CStringT::Format(char const *,...)
.text:64404FBA      call    ebx ; mfc90_2539
.text:64404FBC      add     esp, 0Ch
.text:64404FBF      lea     eax, [ebp+var_14]
.text:64404FC2      push    eax
.text:64404FC3      mov     ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(class ATL::CSimpleStringT<char, 1> const &)
.text:64404FC5      call    ds:mfc90_941
.text:64404FCB      xor     ebx, ebx
.text:64404FCD      inc     ebx
.text:64404FCE      mov     [ebp+var_10], ebx
.text:64404FD1      jmp     short loc_64404FD6
.text:64404FD3
.text:64404FD3  loc_64404FD3:
.text:64404FD3      xor     ebx, ebx
.text:64404FD5      inc     ebx
.text:64404FD6
.text:64404FD6  loc_64404FD6:
.text:64404FD6      cmp     [esi+38h], ebx
.text:64404FD9      jbe     short loc_64404FF1
.text:64404FDB      cmp     dword ptr [esi+2978h], 0
.text:64404FE2      jz      short loc_64404FF1
.text:64404FE4      push    offset aHexdumpInTrace ; "hexdump in trace activated\n"
.text:64404FE9      mov     ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64404FEB      call    ds:mfc90_945
.text:64404FF1
.text:64404FF1  loc_64404FF1:
.text:64404FF1
.text:64404FF1      cmp     byte ptr [esi+78h], 0
.text:64404FF5      jz      short loc_64405007
.text:64404FF7      push    offset aLoggingActivat ; "logging activated\n"
.text:64404FFC      mov     ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64404FFE      call    ds:mfc90_945
.text:64405004      mov     [ebp+var_10], ebx
.text:64405007
.text:64405007  loc_64405007:
.text:64405007      cmp     byte ptr [esi+3Dh], 0
.text:6440500B      jz      short bypass
.text:6440500D      push    offset aDataCompressio ; "data compression switched off\
n"
.text:64405012      mov     ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64405014      call    ds:mfc90_945
.text:6440501A      mov     [ebp+var_10], ebx
.text:6440501D
.text:6440501D  bypass:
.text:6440501D      mov     eax, [esi+20h]
.text:64405020      test    eax, eax
.text:64405022      jz      short loc_6440503A
.text:64405024      cmp     dword ptr [eax+28h], 0
.text:64405028      jz      short loc_6440503A
.text:6440502A      push    offset aDataRecordMode ; "data record mode switched on\
n"
```


8.9. SAP

```
.text:6440502F      mov     ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64405031      call    ds:mfc90_945
.text:64405037      mov     [ebp+var_10], ebx
.text:6440503A      loc_6440503A:
.text:6440503A      mov     ecx, edi
.text:6440503C      cmp     [ebp+var_10], ebx
.text:6440503F      jnz     loc_64405142
.text:64405045      push    offset aForMaximumData ; "\nFor maximum data security ↵
        ↵ delete\nthe s"...

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:6440504A      call    ds:mfc90_945
.text:64405050      xor     edi, edi
.text:64405052      push    edi ; fWinIni
.text:64405053      lea     eax, [ebp+pvParam]
.text:64405056      push    eax ; pvParam
.text:64405057      push    edi ; uiParam
.text:64405058      push    30h ; uiAction
.text:6440505A      call    ds:SystemParametersInfoA
.text:64405060      mov     eax, [ebp+var_34]
.text:64405063      cmp     eax, 1600
.text:64405068      jle     short loc_64405072
.text:6440506A      cdq
.text:6440506B      sub     eax, edx
.text:6440506D      sar     eax, 1
.text:6440506F      mov     [ebp+var_34], eax
.text:64405072      loc_64405072:
.text:64405072      push    edi ; hWnd
.text:64405073      mov     [ebp+cy], 0A0h
.text:6440507A      call    ds:GetDC
.text:64405080      mov     [ebp+var_10], eax
.text:64405083      mov     ebx, 12Ch
.text:64405088      cmp     eax, edi
.text:6440508A      jz      loc_64405113
.text:64405090      push    11h ; i
.text:64405092      call    ds:GetStockObject
.text:64405098      mov     edi, ds>SelectObject
.text:6440509E      push    eax ; h
.text:6440509F      push    [ebp+var_10] ; hdc
.text:644050A2      call    edi ; SelectObject
.text:644050A4      and     [ebp+rc.left], 0
.text:644050A8      and     [ebp+rc.top], 0
.text:644050AC      mov     [ebp+h], eax
.text:644050AF      push    401h ; format
.text:644050B4      lea     eax, [ebp+rc]
.text:644050B7      push    eax ; lprc
.text:644050B8      lea     ecx, [esi+2854h]
.text:644050BE      mov     [ebp+rc.right], ebx
.text:644050C1      mov     [ebp+rc.bottom], 0B4h

; demangled name: ATL::CStringT::GetLength(void)
.text:644050C8      call    ds:mfc90_3178
.text:644050CE      push    eax ; cchText
.text:644050CF      lea     ecx, [esi+2854h]

; demangled name: const char* ATL::CStringT::operator PCWSTR
.text:644050D5      call    ds:mfc90_910
.text:644050DB      push    eax ; lpchText
.text:644050DC      push    [ebp+var_10] ; hdc
.text:644050DF      call    ds:DrawTextA
.text:644050E5      push    4 ; nIndex
.text:644050E7      call    ds:GetSystemMetrics
.text:644050ED      mov     ecx, [ebp+rc.bottom]
.text:644050F0      sub     ecx, [ebp+rc.top]
.text:644050F3      cmp     [ebp+h], 0
```

8.9. SAP

```
.text:644050F7      lea     eax, [eax+ecx+28h]
.text:644050FB      mov     [ebp+cy], eax
.text:644050FE      jz      short loc_64405108
.text:64405100      push    [ebp+h]          ; h
.text:64405103      push    [ebp+var_10]      ; hdc
.text:64405106      call    edi ; SelectObject
.text:64405108
.text:64405108 loc_64405108:
.text:64405108      push    [ebp+var_10]      ; hdc
.text:6440510B      push    0                 ; hWnd
.text:6440510D      call    ds:ReleaseDC
.text:64405113
.text:64405113 loc_64405113:
.text:64405113      mov     eax, [ebp+var_38]
.text:64405116      push    80h              ; uFlags
.text:6440511B      push    [ebp+cy]          ; cy
.text:6440511E      inc     eax
.text:6440511F      push    ebx               ; cx
.text:64405120      push    eax               ; Y
.text:64405121      mov     eax, [ebp+var_34]
.text:64405124      add     eax, 0FFFFFFD4h
.text:64405129      cdq
.text:6440512A      sub     eax, edx
.text:6440512C      sar     eax, 1
.text:6440512E      push    eax               ; X
.text:6440512F      push    0                 ; hWndInsertAfter
.text:64405131      push    dword ptr [esi+285Ch] ; hWnd
.text:64405137      call    ds:SetWindowPos
.text:6440513D      xor     ebx, ebx
.text:6440513F      inc     ebx
.text:64405140      jmp     short loc_6440514D
.text:64405142
.text:64405142 loc_64405142:
.text:64405142      push    offset byte_64443AF8

; demangled name: ATL::CStringT::operator=(char const *)
.text:64405147      call    ds:mfc90_820
.text:6440514D
.text:6440514D loc_6440514D:
.text:6440514D      cmp     dword_6450B970, ebx
.text:64405153      jl      short loc_64405188
.text:64405155      call    sub_6441C910
.text:6440515A      mov     dword_644F858C, ebx
.text:64405160      push    dword ptr [esi+2854h]
.text:64405166      push    offset aCdwsGuiPrepare ; "\nCDwsGui::PrepareInfoWindow: ↗
        ↘ sapgui env"...
.text:6440516B      push    dword ptr [esi+2848h]
.text:64405171      call    dbg
.text:64405176      add     esp, 0Ch
.text:64405179      mov     dword_644F858C, 2
.text:64405183      call    sub_6441C920
.text:64405188
.text:64405188 loc_64405188:
.text:64405188      or      [ebp+var_4], 0FFFFFFFh
.text:6440518C      lea     ecx, [ebp+var_14]

; demangled name: ATL::CStringT::~~CStringT()
.text:6440518F      call    ds:mfc90_601
.text:64405195      call    __EH_epilog3
.text:6440519A      retn
.text:6440519A CDwsGui__PrepareInfoWindow endp
```

ECX в начале функции содержит в себе указатель на объект (потому что это тип функции thiscall (3.18.1 (стр. 534))). В нашем случае, класс имеет тип, очевидно, *CDwsGui*. В зависимости от включенных опций в объекте, разные сообщения добавляются к итоговому сообщению.

Если переменная по адресу `this+0x3D` не ноль, компрессия сетевых пакетов будет выключена:

```
.text:64405007 loc_64405007:
.text:64405007      cmp     byte ptr [esi+3Dh], 0
```

8.9. SAP

```
.text:6440500B      jz      short bypass
.text:6440500D      push     offset aDataCompressio ; "data compression switched off\
    ↵ n"
.text:64405012      mov      ecx, edi

; demangled name: ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64405014      call     ds:mfc90_945
.text:6440501A      mov      [ebp+var_10], ebx
.text:6440501D
.text:6440501D      bypass:
```

Интересно, что в итоге, состояние переменной `var_10` определяет, будет ли показано сообщение вообще:

```
.text:6440503C      cmp      [ebp+var_10], ebx
.text:6440503F      jnz      exit ; пропустить отрисовку

; добавить строки "For maximum data security delete" / "the setting(s) as soon as possible !":
.text:64405045      push     offset aForMaximumData ; "\nFor maximum data security
    ↵ delete\nthe s"...
.text:6440504A      call     ds:mfc90_945 ; ATL::CStringT::operator+=(char const *)
.text:64405050      xor      edi, edi
.text:64405052      push     edi ; fWinIni
.text:64405053      lea      eax, [ebp+pvParam]
.text:64405056      push     eax ; pvParam
.text:64405057      push     edi ; uiParam
.text:64405058      push     30h ; uiAction
.text:6440505A      call     ds:SystemParametersInfoA
.text:64405060      mov      eax, [ebp+var_34]
.text:64405063      cmp      eax, 1600
.text:64405068      jle      short loc_64405072
.text:6440506A      cdq
.text:6440506B      sub      eax, edx
.text:6440506D      sar      eax, 1
.text:6440506F      mov      [ebp+var_34], eax
.text:64405072
.text:64405072      loc_64405072:

; начинает рисовать:
.text:64405072      push     edi ; hWnd
.text:64405073      mov      [ebp+cy], 0A0h
.text:6440507A      call     ds:GetDC
```

Давайте проверим нашу теорию на практике.

JNZ в этой строке ...

```
.text:6440503F      jnz      exit ; пропустить отрисовку
```

...заменяем просто на JMP и получим SAPGUI работающим без этого назойливого всплывающего окна!

Копнем немного глубже и проследим связь между смещением 0x15 в `load_command_line()` (Это мы дали имя этой функции) и переменной `this+0x3D` в `CDwsGui::PrepareInfoWindow`. Уверены ли мы что это одна и та же переменная?

Начинаем искать все места где в коде используется константа 0x15. Для таких небольших программ как SAPGUI, это иногда срабатывает. Вот первое что находим:

```
.text:64404C19      sub_64404C19      proc near
.text:64404C19
.text:64404C19      arg_0            = dword ptr 4
.text:64404C19
.text:64404C19      push     ebx
.text:64404C1A      push     ebp
.text:64404C1B      push     esi
```

8.9. SAP

```
.text:64404C1C      push     edi
.text:64404C1D      mov      edi, [esp+10h+arg_0]
.text:64404C21      mov      eax, [edi]
.text:64404C23      mov      esi, ecx ; ESI/ECX are pointers to some unknown object.
.text:64404C25      mov      [esi], eax
.text:64404C27      mov      eax, [edi+4]
.text:64404C2A      mov      [esi+4], eax
.text:64404C2D      mov      eax, [edi+8]
.text:64404C30      mov      [esi+8], eax
.text:64404C33      lea      eax, [edi+0Ch]
.text:64404C36      push     eax
.text:64404C37      lea      ecx, [esi+0Ch]

; demangled name: ATL::CStringT::operator=(class ATL::CStringT ... &)
.text:64404C3A      call     ds:mfc90_817
.text:64404C40      mov      eax, [edi+10h]
.text:64404C43      mov      [esi+10h], eax
.text:64404C46      mov      al, [edi+14h]
.text:64404C49      mov      [esi+14h], al
.text:64404C4C      mov      al, [edi+15h] ; copy byte from 0x15 offset
.text:64404C4F      mov      [esi+15h], al ; to 0x15 offset in CDwsGui object
```

Эта функция вызывается из функции с названием *CDwsGui::CopyOptions*! И снова спасибо отладочной информации.

Но настоящий ответ находится в функции *CDwsGui::Init()*:

```
.text:6440B0BF loc_6440B0BF:
.text:6440B0BF      mov      eax, [ebp+arg_0]
.text:6440B0C2      push     [ebp+arg_4]
.text:6440B0C5      mov      [esi+2844h], eax
.text:6440B0CB      lea      eax, [esi+28h] ; ESI is pointer to CDwsGui object
.text:6440B0CE      push     eax
.text:6440B0CF      call     CDwsGui__CopyOptions
```

Теперь ясно: массив заполняемый в *load_command_line()* на самом деле расположен в классе *CDwsGui* но по адресу *this+0x28*. $0x15 + 0x28$ это $0x3D$. ОК, мы нашли место, куда наша переменная копируется.

Посмотрим также и другие места, где используется смещение $0x3D$. Одно из таких мест находится в функции *CDwsGui::SapguiRun* (и снова спасибо отладочным вызовам):

```
.text:64409D58      cmp      [esi+3Dh], bl ; ESI is pointer to CDwsGui object
.text:64409D5B      lea      ecx, [esi+2B8h]
.text:64409D61      setz     al
.text:64409D64      push     eax ; arg_10 of CConnectionContext::CreateNetwork
.text:64409D65      push     dword ptr [esi+64h]

; demangled name: const char* ATL::CSimpleStringT::operator PCWSTR
.text:64409D68      call     ds:mfc90_910
.text:64409D68      ; no arguments
.text:64409D6E      push     eax
.text:64409D6F      lea      ecx, [esi+2BCh]

; demangled name: const char* ATL::CSimpleStringT::operator PCWSTR
.text:64409D75      call     ds:mfc90_910
.text:64409D75      ; no arguments
.text:64409D7B      push     eax
.text:64409D7C      push     esi
.text:64409D7D      lea      ecx, [esi+8]
.text:64409D80      call     CConnectionContext__CreateNetwork
```

Проверим нашу идею.

Заменяем *setz al* здесь на *xor eax, eax* / *nop*, убираем переменную окружения *TDW_NOCOMPRESS* и запускаем *SAPGUI*. Ух! Назойливого окна больше нет (как и ожидалось: ведь переменной окружения также нет), но в *Wireshark* мы видим, что сетевые пакеты больше не сжимаются! Очевидно, это то самое место где флаг отражающий сжатие пакетов выставляется в объекте *CConnectionContext*.

8.9. SAP

Так что, флаг сжатия передается в пятом аргументе функции *CConnectionContext::CreateNetwork*. Внутри этой функции, вызывается еще одна:

```
...
.text:64403476      push    [ebp+compression]
.text:64403479      push    [ebp+arg_C]
.text:6440347C      push    [ebp+arg_8]
.text:6440347F      push    [ebp+arg_4]
.text:64403482      push    [ebp+arg_0]
.text:64403485      call    CNetwork__CNetwork
```

Флаг отвечающий за сжатие здесь передается в пятом аргументе для конструктора *CNetwork::CNetwork*.

И вот как конструктор *CNetwork* выставляет некоторые флаги в объекте *CNetwork* в соответствии с пятым аргументом и еще какую-то переменную, возможно, также отвечающую за сжатие сетевых пакетов.

```
.text:64411DF1      cmp     [ebp+compression], esi
.text:64411DF7      jz      short set_EAX_to_0
.text:64411DF9      mov     al, [ebx+78h] ; another value may affect compression?
.text:64411DFC      cmp     al, '3'
.text:64411DFE      jz      short set_EAX_to_1
.text:64411E00      cmp     al, '4'
.text:64411E02      jnz     short set_EAX_to_0
.text:64411E04      set_EAX_to_1:
.text:64411E04      xor     eax, eax
.text:64411E06      inc     eax ; EAX -> 1
.text:64411E07      jmp     short loc_64411E0B
.text:64411E09      set_EAX_to_0:
.text:64411E09      xor     eax, eax ; EAX -> 0
.text:64411E0B      loc_64411E0B:
.text:64411E0B      mov     [ebx+3A4h], eax ; EBX is pointer to CNetwork object
```

Теперь мы знаем, что флаг отражающий сжатие данных сохраняется в классе *CNetwork* по адресу *this+0x3A4*.

Поискем теперь значение 0x3A4 в SAPguilib.dll. Находим второе упоминание этого значения в функции *CDwsGui::OnClientMessageWrite* (бесконечная благодарность отладочной информации):

```
.text:64406F76      loc_64406F76:
.text:64406F76      mov     ecx, [ebp+7728h+var_7794]
.text:64406F79      cmp     dword ptr [ecx+3A4h], 1
.text:64406F80      jnz     compression_flag_is_zero
.text:64406F86      mov     byte ptr [ebx+7], 1
.text:64406F8A      mov     eax, [esi+18h]
.text:64406F8D      mov     ecx, eax
.text:64406F8F      test    eax, eax
.text:64406F91      ja      short loc_64406FFF
.text:64406F93      mov     ecx, [esi+14h]
.text:64406F96      mov     eax, [esi+20h]
.text:64406F99      loc_64406F99:
.text:64406F99      push    dword ptr [edi+2868h] ; int
.text:64406F9F      lea     edx, [ebp+7728h+var_77A4]
.text:64406FA2      push    edx ; int
.text:64406FA3      push    30000 ; int
.text:64406FA8      lea     edx, [ebp+7728h+Dst]
.text:64406FAB      push    edx ; Dst
.text:64406FAC      push    ecx ; int
.text:64406FAD      push    eax ; Src
.text:64406FAE      push    dword ptr [edi+28C0h] ; int
.text:64406FB4      call    sub_644055C5 ; actual compression routine
.text:64406FB9      add     esp, 1Ch
.text:64406FBC      cmp     eax, 0FFFFFFFh
.text:64406FBF      jz      short loc_64407004
.text:64406FC1      cmp     eax, 1
.text:64406FC4      jz      loc_6440708C
```

8.9. SAP

.text:64406FCA	cmp	eax, 2
.text:64406FCD	jz	short loc_64407004
.text:64406FCF	push	eax
.text:64406FD0	push	offset aCompressionErr ; "compression error [rc = %d]- ↗
↳ program wi"...		
.text:64406FD5	push	offset aGui_err_compre ; "GUI_ERR_COMPRESS"
.text:64406FDA	push	dword ptr [edi+28D0h]
.text:64406FE0	call	SapPcTxtRead

Заглянем в функцию `sub_644055C5`. Всё что в ней мы находим это вызов `memcpy()` и еще какую-то функцию, названную [IDA sub_64417440](#).

И теперь заглянем в `sub_64417440`. Увидим там:

.text:6441747C	push	offset aErrorCsrcompre ; "\nERROR: CsRCompress: invalid ↗
↳ handle"		
.text:64417481	call	eax ; dword_644F94C8
.text:64417483	add	esp, 4

Voilà! Мы находим функцию которая собственно и сжимает сетевые пакеты. Как уже было видно в прошлом ³⁵, эта функция используется в SAP и в open-сорсном проекте MaxDB. Так что эта функция доступна в виде исходников.

Последняя проверка:

.text:64406F79	cmp	dword ptr [ecx+3A4h], 1
.text:64406F80	jnz	compression_flag_is_zero

Заменим JNZ на безусловный переход JMP. Уберем переменную окружения TDW_NOCOMPRESS. Ву-аля!

В Wireshark мы видим, что сетевые пакеты, исходящие от клиента, не сжаты. Ответы сервера, впрочем, сжаты.

Так что мы нашли связь между переменной окружения и местом где функция сжатия данных вызывается, а также может быть отключена.

8.9.2. Функции проверки пароля в SAP 6.0

Когда автор этой книги в очередной раз вернулся к своему SAP 6.0 IDES установленному в виртуальной машине VMware, он обнаружил что забыл пароль, впрочем, затем он вспомнил его, но теперь получаем такую ошибку:

«*Password logon no longer possible - too many failed attempts*», потому что были потрачены все попытки на то, чтобы вспомнить его.

Первая очень хорошая новость состоит в том, что с SAP поставляется полный [PDB-файл](#) `disp+work.pdb`, он содержит все: имена функций, структуры, типы, локальные переменные, имена аргументов, и т.д. Какой щедрый подарок!

Существует утилита [TYPEINFODUMP](#)³⁶ для дампа содержимого [PDB-файлов](#) во что-то более читаемое и грег-абельное.

Вот пример её работы: информация о функции + её аргументах + её локальных переменных:

FUNCTION ThVmcSysEvent				
Address:	10143190	Size:	675 bytes	Index: 60483 TypeIndex: 60484
Type:	int NEAR_C ThVmcSysEvent (unsigned int, unsigned char, unsigned short*)			
Flags:	0			
PARAMETER events				
Address:	Reg335+288	Size:	4 bytes	Index: 60488 TypeIndex: 60489
Type:	unsigned int			
Flags:	d0			
PARAMETER opcode				
Address:	Reg335+296	Size:	1 bytes	Index: 60490 TypeIndex: 60491
Type:	unsigned char			
Flags:	d0			

³⁵<http://go.yurichev.com/17312>

³⁶<http://go.yurichev.com/17038>

8.9. SAP

```
PARAMETER serverName
  Address: Reg335+304 Size:      8 bytes Index:      60492 TypeIndex:      60493
  Type: unsigned short*
Flags: d0
STATIC_LOCAL_VAR func
  Address:      12274af0 Size:      8 bytes Index:      60495 TypeIndex:      60496
  Type: wchar_t*
Flags: 80
LOCAL_VAR admhead
  Address: Reg335+304 Size:      8 bytes Index:      60498 TypeIndex:      60499
  Type: unsigned char*
Flags: 90
LOCAL_VAR record
  Address: Reg335+64 Size:     204 bytes Index:      60501 TypeIndex:      60502
  Type: AD_RECORD
Flags: 90
LOCAL_VAR adlen
  Address: Reg335+296 Size:       4 bytes Index:      60508 TypeIndex:      60509
  Type: int
Flags: 90
```

А вот пример дампа структуры:

```
STRUCT DBSL_STMTID
Size: 120 Variables: 4 Functions: 0 Base classes: 0
MEMBER moduletype
  Type: DBSL_MODULETYPE
  Offset:      0 Index:      3 TypeIndex:      38653
MEMBER module
  Type: wchar_t module[40]
  Offset:      4 Index:      3 TypeIndex:      831
MEMBER stmtnum
  Type: long
  Offset:      84 Index:      3 TypeIndex:      440
MEMBER timestamp
  Type: wchar_t timestamp[15]
  Offset:      88 Index:      3 TypeIndex:      6612
```

Bay!

Вторая хорошая новость: *отладочные вызовы*, коих здесь очень много, очень полезны.

Здесь вы можете увидеть глобальную переменную `ct_level`³⁷, отражающую уровень трассировки.

В `disp+work.exe` очень много таких отладочных вставок:

```
cmp      cs:ct_level, 1
jl       short loc_1400375DA
call     DpLock
lea      rcx, aDpxxtool4_c ; "dpxxtool4.c"
mov      edx, 4Eh          ; line
call     CTrcSaveLocation
mov      r8, cs:func_48
mov      rcx, cs:hdl        ; hdl
lea      rdx, aSDpreadmemvalu ; "%s: DpReadMemValue (%d)"
mov      r9d, ebx
call     DpTrcErr
call     DpUnlock
```

Если текущий уровень трассировки выше или равен заданному в этом коде порогу, отладочное сообщение будет записано в лог-файл вроде `dev_w0`, `dev_disp` и прочие файлы `dev*`.

Попробуем grep-ать файл недавно полученный при помощи утилиты TYPEINFODUMP:

```
cat "disp+work.pdb.d" | grep FUNCTION | grep -i password
```

Получаем:

³⁷Еще об уровне трассировки: <http://go.yurichev.com/17039>

```

FUNCTION rcui::AgiPassword::DiagISelection
FUNCTION ssf_password_encrypt
FUNCTION ssf_password_decrypt
FUNCTION password_logon_disabled
FUNCTION dySignSkipUserPassword
FUNCTION migrate_password_history
FUNCTION password_is_initial
FUNCTION rcui::AgiPassword::IsVisible
FUNCTION password_distance_ok
FUNCTION get_password_downwards_compatibility
FUNCTION dySignUnSkipUserPassword
FUNCTION rcui::AgiPassword::GetTypeNames
FUNCTION `rcui::AgiPassword::AgiPassword'::`1'::dtor$2
FUNCTION `rcui::AgiPassword::AgiPassword'::`1'::dtor$0
FUNCTION `rcui::AgiPassword::AgiPassword'::`1'::dtor$1
FUNCTION usm_set_password
FUNCTION rcui::AgiPassword::TraceTo
FUNCTION days_since_last_password_change
FUNCTION rsecgrp_generate_random_password
FUNCTION rcui::AgiPassword::`scalar deleting destructor'
FUNCTION password_attempt_limit_exceeded
FUNCTION handle_incorrect_password
FUNCTION `rcui::AgiPassword::`scalar deleting destructor'::`1'::dtor$1
FUNCTION calculate_new_password_hash
FUNCTION shift_password_to_history
FUNCTION rcui::AgiPassword::GetType
FUNCTION found_password_in_history
FUNCTION `rcui::AgiPassword::`scalar deleting destructor'::`1'::dtor$0
FUNCTION rcui::AgiObj::IsaPassword
FUNCTION password_idle_check
FUNCTION SlicHwPasswordForDay
FUNCTION rcui::AgiPassword::IsaPassword
FUNCTION rcui::AgiPassword::AgiPassword
FUNCTION delete_user_password
FUNCTION usm_set_user_password
FUNCTION Password_API
FUNCTION get_password_change_for_SS0
FUNCTION password_in_USR40
FUNCTION rsec_agrp_abap_generate_random_password

```

Попробуем так же искать отладочные сообщения содержащие слова «*password*» и «*locked*». Одна из таких это строка «*user was locked by subsequently failed password logon attempts*» на которую есть ссылка в функции `password_attempt_limit_exceeded()`.

Другие строки, которые эта найденная функция может писать в лог-файл это: «*password logon attempt will be rejected immediately (preventing dictionary attacks)*», «*failed-logon lock: expired (but not removed due to 'read-only' operation)*», «*failed-logon lock: expired => removed*».

Немного поэкспериментировав с этой функцией, мы быстро понимаем, что проблема именно в ней. Она вызывается из функции `chckpass()` — одна из функций проверяющих пароль.

В начале, давайте убедимся, что мы на верном пути:

Запускаем [tracer](#):

```
tracer64.exe -a:disp+work.exe bpf=disp+work.exe!chckpass,args:3,unicode
```

```

PID=2236|TID=2248|(0) disp+work.exe!chckpass (0x202c770, L"Brewered1
    ", 0x41) (called from 0x1402f1060 (disp+work.exe!usrexist+0x3c0))
PID=2236|TID=2248|(0) disp+work.exe!chckpass -> 0x35

```

Функции вызываются так: `syssigni()` -> `DylSigni()` -> `dychkusr()` -> `usrexist()` -> `chckpass()`.

Число 0x35 возвращается из `chckpass()` в этом месте:

```

.text:00000001402ED567 loc_1402ED567:          ; CODE XREF: chckpass+B4
.text:00000001402ED567          mov     rcx, rbx          ; usr02
.text:00000001402ED56A          call   password_idle_check
.text:00000001402ED56F          cmp     eax, 33h

```


8.9. SAP

```
.text:00000001402ED572      jz      loc_1402EDB4E
.text:00000001402ED578      cmp     eax, 36h
.text:00000001402ED57B      jz      loc_1402EDB3D
.text:00000001402ED581      xor     edx, edx          ; usr02_readonly
.text:00000001402ED583      mov     rcx, rbx          ; usr02
.text:00000001402ED586      call    password_attempt_limit_exceeded
.text:00000001402ED58B      test    al, al
.text:00000001402ED58D      jz      short loc_1402ED5A0
.text:00000001402ED58F      mov     eax, 35h
.text:00000001402ED594      add     rsp, 60h
.text:00000001402ED598      pop     r14
.text:00000001402ED59A      pop     r12
.text:00000001402ED59C      pop     rdi
.text:00000001402ED59D      pop     rsi
.text:00000001402ED59E      pop     rbx
.text:00000001402ED59F      retn
```

Отлично, давайте проверим:

```
tracer64.exe -a:disp+work.exe bpf=disp+work.exe!password_attempt_limit_exceeded,args:4,unicode,↵
↵ rt:0
```

```
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!password_attempt_limit_exceeded (0x202c770, 0, 0x257758, 0) ↵
↵ (called from 0x1402ed58b (disp+work.exe!chckpass+0xeb))
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!password_attempt_limit_exceeded -> 1
PID=2744|TID=360|We modify return value (EAX/RAX) of this function to 0
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!password_attempt_limit_exceeded (0x202c770, 0, 0, 0) (called↵
↵ from 0x1402e9794 (disp+work.exe!chngpass+0xe4))
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!password_attempt_limit_exceeded -> 1
PID=2744|TID=360|We modify return value (EAX/RAX) of this function to 0
```

Великолепно! Теперь мы можем успешно залогиниться.

Кстати, мы можем сделать вид что вообще забыли пароль, заставляя *chckpass()* всегда возвращать ноль, и этого достаточно для отключения проверки пароля:

```
tracer64.exe -a:disp+work.exe bpf=disp+work.exe!chckpass,args:3,unicode,rt:0
```

```
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!chckpass (0x202c770, L"bogus ↵
↵ ", 0x41) (called from 0x1402f1060 (disp+work.exe!usrexist+0x3c0))
PID=2744|TID=360|(0) disp+work.exe!chckpass -> 0x35
PID=2744|TID=360|We modify return value (EAX/RAX) of this function to 0
```

Что еще можно сказать, бегло анализируя функцию *password_attempt_limit_exceeded()*, это то, что в начале можно увидеть следующий вызов:

```
lea     rcx, aLoginFailed_us ; "login/failed_user_auto_unlock"
call    sapgparam
test    rax, rax
jz      short loc_1402E19DE
movzx   eax, word ptr [rax]
cmp     ax, 'N'
jz      short loc_1402E19D4
cmp     ax, 'n'
jz      short loc_1402E19D4
cmp     ax, '0'
jnz     short loc_1402E19DE
```

Очевидно, функция *sapgparam()* используется чтобы узнать значение какой-либо переменной конфигурации. Эта функция может вызываться из 1768 разных мест.

Вероятно, при помощи этой информации, мы можем легко находить те места кода, на которые влияют определенные переменные конфигурации.

Замечательно! Имена функций очень понятны, куда понятнее чем в Oracle RDBMS.

По всей видимости, процесс *disp+work* весь написан на Си++. Должно быть, он был переписан не так давно?

8.10. Oracle RDBMS

8.10.1. Таблица V\$VERSION в Oracle RDBMS

Oracle RDBMS 11.2 это очень большая программа, основной модуль `oracle.exe` содержит около 124 тысячи функций. Для сравнения, ядро Windows 7 x64 (`ntoskrnl.exe`) — около 11 тысяч функций, а ядро Linux 3.9.8 (с драйверами по умолчанию) — 31 тысяч функций.

Начнем с одного простого вопроса. Откуда Oracle RDBMS берет информацию, когда мы в SQL*Plus пишем вот такой вот простой запрос:

```
SQL> select * from V$VERSION;
```

И получаем:

BANNER

```
-----
Oracle Database 11g Enterprise Edition Release 11.2.0.1.0 - Production
PL/SQL Release 11.2.0.1.0 - Production
CORE      11.2.0.1.0      Production
TNS for 32-bit Windows: Version 11.2.0.1.0 - Production
NLSRTL Version 11.2.0.1.0 - Production
```

Начнем. Где в самом Oracle RDBMS мы можем найти строку V\$VERSION?

Для win32-версии, эта строка имеется в файле `oracle.exe`, это легко увидеть.

Но мы также можем использовать объектные (.o) файлы от версии Oracle RDBMS для Linux, потому что в них сохраняются имена функций и глобальных переменных, а в `oracle.exe` для win32 этого нет.

Итак, строка V\$VERSION имеется в файле `kqf.o`, в самой главной Oracle-библиотеке `libserver11.a`.

Ссылка на эту текстовую строку имеется в таблице `kqfviw`, размещенной в этом же файле `kqf.o`:

Листинг 8.7: `kqf.o`

```
.rodata:0800C4A0 kqfviw dd 0Bh      ; DATA XREF: kqfchk:loc_8003A6D
.rodata:0800C4A0                ; kqfgbn+34
.rodata:0800C4A4                dd offset _2__STRING_10102_0 ; "GV$WAITSTAT"
.rodata:0800C4A8                dd 4
.rodata:0800C4AC                dd offset _2__STRING_10103_0 ; "NULL"
.rodata:0800C4B0                dd 3
.rodata:0800C4B4                dd 0
.rodata:0800C4B8                dd 195h
.rodata:0800C4BC                dd 4
.rodata:0800C4C0                dd 0
.rodata:0800C4C4                dd 0FFFFFFC1CBh
.rodata:0800C4C8                dd 3
.rodata:0800C4CC                dd 0
.rodata:0800C4D0                dd 0Ah
.rodata:0800C4D4                dd offset _2__STRING_10104_0 ; "V$WAITSTAT"
.rodata:0800C4D8                dd 4
.rodata:0800C4DC                dd offset _2__STRING_10103_0 ; "NULL"
.rodata:0800C4E0                dd 3
.rodata:0800C4E4                dd 0
.rodata:0800C4E8                dd 4Eh
.rodata:0800C4EC                dd 3
.rodata:0800C4F0                dd 0
.rodata:0800C4F4                dd 0FFFFFFC003h
.rodata:0800C4F8                dd 4
.rodata:0800C4FC                dd 0
.rodata:0800C500                dd 5
.rodata:0800C504                dd offset _2__STRING_10105_0 ; "GV$BH"
.rodata:0800C508                dd 4
.rodata:0800C50C                dd offset _2__STRING_10103_0 ; "NULL"
.rodata:0800C510                dd 3
.rodata:0800C514                dd 0
.rodata:0800C518                dd 269h
.rodata:0800C51C                dd 15h
```

8.10. ORACLE RDBMS

```
.rodata:0800C520      dd 0
.rodata:0800C524      dd 0FFFFFFC1EDh
.rodata:0800C528      dd 8
.rodata:0800C52C      dd 0
.rodata:0800C530      dd 4
.rodata:0800C534      dd offset _2__STRING_10106_0 ; "V$BH"
.rodata:0800C538      dd 4
.rodata:0800C53C      dd offset _2__STRING_10103_0 ; "NULL"
.rodata:0800C540      dd 3
.rodata:0800C544      dd 0
.rodata:0800C548      dd 0F5h
.rodata:0800C54C      dd 14h
.rodata:0800C550      dd 0
.rodata:0800C554      dd 0FFFFFFC1EEh
.rodata:0800C558      dd 5
.rodata:0800C55C      dd 0
```

Кстати, нередко, при изучении внутренностей Oracle RDBMS, появляется вопрос, почему имена функций и глобальных переменных такие странные. Вероятно, дело в том, что Oracle RDBMS очень старый продукт сам по себе и писался на Си еще в 1980-х.

А в те времена стандарт Си гарантировал поддержку имен переменных длиной только до шести символов включительно: «6 significant initial characters in an external identifier»³⁸

Вероятно, таблица `kqfviw` содержащая в себе многие (а может даже и все) `view` с префиксом `V$`, это служебные `view` (fixed views), присутствующие всегда. Бегло оценив цикличность данных, мы легко видим, что в каждом элементе таблицы `kqfviw` 12 полей 32-битных полей. В `IDA` легко создать структуру из 12-и элементов и применить её ко всем элементам таблицы. Для версии Oracle RDBMS 11.2, здесь 1023 элемента в таблице, то есть, здесь описываются 1023 всех возможных *fixed view*. Позже, мы еще вернемся к этому числу.

Как видно, мы не очень много можем узнать чисел в этих полях. Самое первое число всегда равно длине строки-названия `view` (без терминирующего нуля).

Это справедливо для всех элементов. Но эта информация не очень полезна.

Мы также знаем, что информацию обо всех *fixed views* можно получить из *fixed view* под названием `V$FIXED_VIEW_DEFINITION` (кстати, информация для этого `view` также берется из таблиц `kqfviw` и `kqfvip`). Кстати, там тоже 1023 элемента. Совпадение? Нет.

```
SQL> select * from V$FIXED_VIEW_DEFINITION where view_name='V$VERSION';

VIEW_NAME
-----
VIEW_DEFINITION
-----

V$VERSION
select  BANNER from GV$VERSION where inst_id = USERENV('Instance')
```

Итак, `V$VERSION` это как бы *thunk view* для другого, с названием `GV$VERSION`, который, в свою очередь:

```
SQL> select * from V$FIXED_VIEW_DEFINITION where view_name='GV$VERSION';

VIEW_NAME
-----
VIEW_DEFINITION
-----

GV$VERSION
select  inst_id, banner from x$version
```

Таблицы с префиксом `X$` в Oracle RDBMS— это также служебные таблицы, они не документированы, не могут изменяться пользователем, и обновляются динамически.

Попробуем поискать текст

³⁸[Draft ANSI C Standard \(ANSI X3J11/88-090\) \(May 13, 1988\) \(yurichev.com\)](#)

```
select BANNER from GV$VERSION where inst_id =
USERENV('Instance')
```

... в файле kqf.o и находим ссылку на него в таблице kqfvip:

Листинг 8.8: kqf.o

```
.rodata:080185A0 kqfvip dd offset _2__STRING_11126_0 ; DATA XREF: kqfgvcn+18
.rodata:080185A0 ; kqfgvt+F
.rodata:080185A0 ; "select inst_id,decode(indx,1,'data bloc"...
.rodata:080185A4 dd offset kqfv459_c_0
.rodata:080185A8 dd 0
.rodata:080185AC dd 0
...
.rodata:08019570 dd offset _2__STRING_11378_0 ; "select BANNER from GV$VERSION where in
↳ "...
.rodata:08019574 dd offset kqfv133_c_0
.rodata:08019578 dd 0
.rodata:0801957C dd 0
.rodata:08019580 dd offset _2__STRING_11379_0 ; "select inst_id,decode(bitand(cfflg,1)
↳ ,0"...
.rodata:08019584 dd offset kqfv403_c_0
.rodata:08019588 dd 0
.rodata:0801958C dd 0
.rodata:08019590 dd offset _2__STRING_11380_0 ; "select STATUS , NAME, IS_RECOVERY_DEST
↳ "...
.rodata:08019594 dd offset kqfv199_c_0
```

Таблица, по всей видимости, имеет 4 поля в каждом элементе. Кстати, здесь так же 1023 элемента, уже знакомое нам число.

Второе поле указывает на другую таблицу, содержащую поля этого *fixed view*.

Для V\$VERSION, эта таблица только из двух элементов, первый это 6 и второй это строка BANNER (число 6 это длина строки) и далее *терминирующий* элемент содержащий 0 и нулевую Си-строку:

Листинг 8.9: kqf.o

```
.rodata:080BBAC4 kqfv133_c_0 dd 6 ; DATA XREF: .rodata:08019574
.rodata:080BBAC8 dd offset _2__STRING_5017_0 ; "BANNER"
.rodata:080BBACC dd 0
.rodata:080BBAD0 dd offset _2__STRING_0_0
```

Объединив данные из таблиц kqfviw и kqfvip, мы получим SQL-запросы, которые исполняются, когда пользователь хочет получить информацию из какого-либо *fixed view*.

Напишем программу oracle tables³⁹, которая собирает всю эту информацию из объектных файлов от Oracle RDBMS под Linux.

Для V\$VERSION, мы можем найти следующее:

Листинг 8.10: Результат работы oracle tables

```
kqfviw_element.viewname: [V$VERSION] ?: 0x3 0x43 0x1 0xfffffc085 0x4
kqfvip_element.statement: [select BANNER from GV$VERSION where inst_id = USERENV('Instance')]
kqfvip_element.params:
[BANNER]
```

И:

Листинг 8.11: Результат работы oracle tables

```
kqfviw_element.viewname: [GV$VERSION] ?: 0x3 0x26 0x2 0xfffffc192 0x1
kqfvip_element.statement: [select inst_id, banner from x$version]
kqfvip_element.params:
[INST_ID] [BANNER]
```

³⁹yurichev.com

8.10. ORACLE RDBMS

Fixed view GV\$VERSION отличается от V\$VERSION тем, что содержит еще и поле отражающее идентификатор *instance*.

Но так или иначе, мы теперь упираемся в таблицу X\$VERSION. Как и прочие X\$-таблицы, она не документирована, однако, мы можем оттуда что-то прочитать:

```
SQL> select * from x$version;
```

ADDR	INDX	INST_ID
------	------	---------

BANNER		
--------	--	--

0DBAF574	0	1
Oracle Database 11g Enterprise Edition Release 11.2.0.1.0 – Production		

...

Эта таблица содержит дополнительные поля вроде ADDR и INDX.

Бегло листая содержимое файла kqf.o в [IDA](#) мы можем увидеть еще одну таблицу где есть ссылка на строку X\$VERSION, это kqftab:

Листинг 8.12: kqf.o

```
.rodata:0803CAC0 dd 9 ; element number 0x1f6
.rodata:0803CAC4 dd offset _2__STRING_13113_0 ; "X$VERSION"
.rodata:0803CAC8 dd 4
.rodata:0803CACC dd offset _2__STRING_13114_0 ; "kqvt"
.rodata:0803CAD0 dd 4
.rodata:0803CAD4 dd 4
.rodata:0803CAD8 dd 0
.rodata:0803CADC dd 4
.rodata:0803CAE0 dd 0Ch
.rodata:0803CAE4 dd 0FFFFC075h
.rodata:0803CAE8 dd 3
.rodata:0803CAEC dd 0
.rodata:0803CAF0 dd 7
.rodata:0803CAF4 dd offset _2__STRING_13115_0 ; "X$KQFSZ"
.rodata:0803CAF8 dd 5
.rodata:0803CAFC dd offset _2__STRING_13116_0 ; "kqfsz"
.rodata:0803CB00 dd 1
.rodata:0803CB04 dd 38h
.rodata:0803CB08 dd 0
.rodata:0803CB0C dd 7
.rodata:0803CB10 dd 0
.rodata:0803CB14 dd 0FFFFC09Dh
.rodata:0803CB18 dd 2
.rodata:0803CB1C dd 0
```

Здесь очень много ссылок на названия X\$-таблиц, вероятно, на все те что имеются в Oracle RDBMS этой версии.

Но мы снова упираемся в то что не имеем достаточно информации. Не ясно, что означает строка kqvt.

Вообще, префикс kq может означать *kernel* и *query*.

v, может быть, *version*, а t — *type*?

Сказать трудно.

Таблицу с очень похожим названием мы можем найти в kqf.o:

Листинг 8.13: kqf.o

```
.rodata:0808C360 kqvt_c_0 kqftap_param <4, offset _2__STRING_19_0, 917h, 0, 0, 0, 4, 0, 0>
.rodata:0808C360 ; DATA XREF: .rodata:08042680
.rodata:0808C360 ; "ADDR"
.rodata:0808C384 kqftap_param <4, offset _2__STRING_20_0, 0B02h, 0, 0, 0, 4, 0, 0> ; "↵
↵ INDX"
.rodata:0808C3A8 kqftap_param <7, offset _2__STRING_21_0, 0B02h, 0, 0, 0, 4, 0, 0> ; "↵
↵ INST_ID"
```

8.10. ORACLE RDBMS

```
.rodata:0808C3CC      kqftap_param <6, offset _2_STRING_5017_0, 601h, 0, 0, 0, 50h, 0, 0> ↵  
    ↵ ; "BANNER"  
.rodata:0808C3F0      kqftap_param <0, offset _2_STRING_0_0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0>
```

Она содержит информацию об именах полей в таблице X\$VERSION. Единственная ссылка на эту таблицу имеется в таблице kqftap:

Листинг 8.14: kqf.o

```
.rodata:08042680      kqftap_element <0, offset kqvt_c_0, offset kqvrow, 0> ; ↵  
    ↵ element 0x1f6
```

Интересно что здесь этот элемент проходит так же под номером 0x1f6 (502-й), как и ссылка на строку X\$VERSION в таблице kqftab.

Вероятно, таблицы kqftap и kqftab дополняют друг друга, как и kqfvip и kqfviv.

Мы также видим здесь ссылку на функцию с названием kqvrow(). А вот это уже кое-что!

Сделаем так чтобы наша программа oracle tables⁴⁰ могла дампить и эти таблицы. Для X\$VERSION получается:

Листинг 8.15: Результат работы oracle tables

```
kqftab_element.name: [X$VERSION] ?: [kqvt] 0x4 0x4 0x4 0xc 0xffffc075 0x3  
kqftap_param.name=[ADDR] ?: 0x917 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0  
kqftap_param.name=[INDX] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0  
kqftap_param.name=[INST_ID] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0  
kqftap_param.name=[BANNER] ?: 0x601 0x0 0x0 0x0 0x50 0x0 0x0  
kqftap_element.fn1=kqvrow  
kqftap_element.fn2=NULL
```

При помощи [tracer](#), можно легко проверить, что эта функция вызывается 6 раз кряду (из функции qerfxFetch()) при получении строк из X\$VERSION.

Запустим [tracer](#) в режиме cc (он добавит комментарий к каждой исполненной инструкции):

```
tracer -a:oracle.exe bpf=oracle.exe!_kqvrow,trace:cc
```

```
_kqvrow_ proc near  
  
var_7C      = byte ptr -7Ch  
var_18      = dword ptr -18h  
var_14      = dword ptr -14h  
Dest        = dword ptr -10h  
var_C       = dword ptr -0Ch  
var_8       = dword ptr -8  
var_4       = dword ptr -4  
arg_8       = dword ptr 10h  
arg_C       = dword ptr 14h  
arg_14      = dword ptr 1Ch  
arg_18      = dword ptr 20h  
  
; FUNCTION CHUNK AT .text1:056C11A0 SIZE 00000049 BYTES  
  
    push    ebp  
    mov     ebp, esp  
    sub     esp, 7Ch  
    mov     eax, [ebp+arg_14] ; [EBP+1Ch]=1  
    mov     ecx, TlsIndex    ; [69AEB08h]=0  
    mov     edx, large fs:2Ch  
    mov     edx, [edx+ecx*4] ; [EDX+ECX*4]=0xc98c938  
    cmp     eax, 2           ; EAX=1  
    mov     eax, [ebp+arg_8] ; [EBP+10h]=0xcdfe554  
    jz      loc_2CE1288  
    mov     ecx, [eax]       ; [EAX]=0..5  
    mov     [ebp+var_4], edi ; EDI=0xc98c938  
  
loc_2CE10F6: ; CODE XREF: _kqvrow_+10A
```

⁴⁰yurichev.com

8.10. ORACLE RDBMS

```

        ; _kqvrow_+1A9
        cmp     ecx, 5          ; ECX=0..5
        ja      loc_56C11C7
        mov     edi, [ebp+arg_18] ; [EBP+20h]=0
        mov     [ebp+var_14], edx ; EDX=0xc98c938
        mov     [ebp+var_8], ebx ; EBX=0
        mov     ebx, eax        ; EAX=0xcdfe554
        mov     [ebp+var_C], esi ; ESI=0xcdfe248

loc_2CE110D: ; CODE XREF: _kqvrow_+29E00E6
        mov     edx, ds:off_628B09C[ecx*4] ; [ECX*4+628B09Ch]=0x2ce1116, 0x2ce11ac, 0x2ce11db ↗
        ↪ , 0x2ce11f6, 0x2ce1236, 0x2ce127a
        jmp     edx             ; EDX=0x2ce1116, 0x2ce11ac, 0x2ce11db, 0x2ce11f6, 0x2ce1236, ↗
        ↪ 0x2ce127a

loc_2CE1116: ; DATA XREF: .rdata:off_628B09C
        push    offset aXKqvvsNBuffer ; "x$kqvvsN buffer"
        mov     ecx, [ebp+arg_C] ; [EBP+14h]=0x8a172b4
        xor     edx, edx
        mov     esi, [ebp+var_14] ; [EBP-14h]=0xc98c938
        push    edx             ; EDX=0
        push    edx             ; EDX=0
        push    50h
        push    ecx             ; ECX=0x8a172b4
        push    dword ptr [esi+10494h] ; [ESI+10494h]=0xc98cd58
        call    _kgghalf        ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this ↗
        ↪ CALL
        mov     esi, ds:__imp__vsnum ; [59771A8h]=0x61bc49e0
        mov     [ebp+Dest], eax ; EAX=0xce2ffb0
        mov     [ebx+8], eax ; EAX=0xce2ffb0
        mov     [ebx+4], eax ; EAX=0xce2ffb0
        mov     edi, [esi] ; [ESI]=0xb200100
        mov     esi, ds:__imp__vsNstr ; [597D6D4h]=0x65852148, "- Production"
        push    esi             ; ESI=0x65852148, "- Production"
        mov     ebx, edi ; EDI=0xb200100
        shr     ebx, 18h ; EBX=0xb200100
        mov     ecx, edi ; EDI=0xb200100
        shr     ecx, 14h ; ECX=0xb200100
        and     ecx, 0Fh ; ECX=0xb2
        mov     edx, edi ; EDI=0xb200100
        shr     edx, 0Ch ; EDX=0xb200100
        movzx   edx, dl ; DL=0
        mov     eax, edi ; EDI=0xb200100
        shr     eax, 8 ; EAX=0xb200100
        and     eax, 0Fh ; EAX=0xb2001
        and     edi, 0FFh ; EDI=0xb200100
        push    edi ; EDI=0
        mov     edi, [ebp+arg_18] ; [EBP+20h]=0
        push    eax ; EAX=1
        mov     eax, ds:__imp__vsNban ; [597D6D8h]=0x65852100, "Oracle Database 11g ↗
        ↪ Enterprise Edition Release %d.%d.%d.%d %s"
        push    edx ; EDX=0
        push    ecx ; ECX=2
        push    ebx ; EBX=0xb
        mov     ebx, [ebp+arg_8] ; [EBP+10h]=0xcdfe554
        push    eax ; EAX=0x65852100, "Oracle Database 11g Enterprise Edition ↗
        ↪ Release %d.%d.%d.%d %s"
        mov     eax, [ebp+Dest] ; [EBP-10h]=0xce2ffb0
        push    eax ; EAX=0xce2ffb0
        call    ds:__imp__sprintf ; op1=MSVCR80.dll!sprintf tracing nested maximum level (1) ↗
        ↪ reached, skipping this CALL
        add     esp, 38h
        mov     dword ptr [ebx], 1

loc_2CE1192: ; CODE XREF: _kqvrow_+FB
        ; _kqvrow_+128 ...
        test    edi, edi ; EDI=0
        jnz     __VInfreq__kqvrow
        mov     esi, [ebp+var_C] ; [EBP-0Ch]=0xcdfe248
        mov     edi, [ebp+var_4] ; [EBP-4]=0xc98c938

```


8.10. ORACLE RDBMS

```
    mov     eax, ebx          ; EBX=0xcdfe554
    mov     ebx, [ebp+var_8]  ; [EBP-8]=0
    lea     eax, [eax+4]      ; [EAX+4]=0xce2ffb0, "NLSRTL Version 11.2.0.1.0 - Production"
    ↪ ", "Oracle Database 11g Enterprise Edition Release 11.2.0.1.0 - Production", "PL/SQL
    ↪ Release 11.2.0.1.0 - Production", "TNS for 32-bit Windows: Version 11.2.0.1.0 -
    ↪ Production"

loc_2CE11A8: ; CODE XREF: _kqvrow_+29E00F6
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    retn                                ; EAX=0xcdfe558

loc_2CE11AC: ; DATA XREF: .rdata:0628B0A0
    mov     edx, [ebx+8]      ; [EBX+8]=0xce2ffb0, "Oracle Database 11g Enterprise Edition
    ↪ Release 11.2.0.1.0 - Production"
    mov     dword ptr [ebx], 2
    mov     [ebx+4], edx      ; EDX=0xce2ffb0, "Oracle Database 11g Enterprise Edition
    ↪ Release 11.2.0.1.0 - Production"
    push    edx              ; EDX=0xce2ffb0, "Oracle Database 11g Enterprise Edition
    ↪ Release 11.2.0.1.0 - Production"
    call    _kxxvsn          ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this
    ↪ CALL
    pop     ecx
    mov     edx, [ebx+4]      ; [EBX+4]=0xce2ffb0, "PL/SQL Release 11.2.0.1.0 - Production"
    movzx   ecx, byte ptr [edx] ; [EDX]=0x50
    test    ecx, ecx         ; ECX=0x50
    jnz     short loc_2CE1192
    mov     edx, [ebp+var_14]
    mov     esi, [ebp+var_C]
    mov     eax, ebx
    mov     ebx, [ebp+var_8]
    mov     ecx, [eax]
    jmp     loc_2CE10F6

loc_2CE11DB: ; DATA XREF: .rdata:0628B0A4
    push    0
    push    50h
    mov     edx, [ebx+8]      ; [EBX+8]=0xce2ffb0, "PL/SQL Release 11.2.0.1.0 - Production"
    mov     [ebx+4], edx      ; EDX=0xce2ffb0, "PL/SQL Release 11.2.0.1.0 - Production"
    push    edx              ; EDX=0xce2ffb0, "PL/SQL Release 11.2.0.1.0 - Production"
    call    _lxxver          ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this
    ↪ CALL
    add     esp, 0Ch
    mov     dword ptr [ebx], 3
    jmp     short loc_2CE1192

loc_2CE11F6: ; DATA XREF: .rdata:0628B0A8
    mov     edx, [ebx+8]      ; [EBX+8]=0xce2ffb0
    mov     [ebp+var_18], 50h
    mov     [ebx+4], edx      ; EDX=0xce2ffb0
    push    0
    call    _npxnli          ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this
    ↪ CALL
    pop     ecx
    test    eax, eax         ; EAX=0
    jnz     loc_56C11DA
    mov     ecx, [ebp+var_14] ; [EBP-14h]=0xc98c938
    lea     edx, [ebp+var_18] ; [EBP-18h]=0x50
    push    edx              ; EDX=0xd76c93c
    push    dword ptr [ebx+8] ; [EBX+8]=0xce2ffb0
    push    dword ptr [ecx+13278h] ; [ECX+13278h]=0xacce190
    call    _nrtnsvrs        ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this
    ↪ CALL
    add     esp, 0Ch

loc_2CE122B: ; CODE XREF: _kqvrow_+29E0118
    mov     dword ptr [ebx], 4
    jmp     loc_2CE1192

loc_2CE1236: ; DATA XREF: .rdata:0628B0AC
```


8.10. ORACLE RDBMS

```

        lea     edx, [ebp+var_7C] ; [EBP-7Ch]=1
        push   edx                ; EDX=0xd76c8d8
        push   0
        mov     esi, [ebx+8]      ; [EBX+8]=0xce2ffb0, "TNS for 32-bit Windows: Version ↵
↳ 11.2.0.1.0 - Production"
        mov     [ebx+4], esi      ; ESI=0xce2ffb0, "TNS for 32-bit Windows: Version 11.2.0.1.0 ↵
↳ - Production"
        mov     ecx, 50h
        mov     [ebp+var_18], ecx ; ECX=0x50
        push   ecx                ; ECX=0x50
        push   esi                ; ESI=0xce2ffb0, "TNS for 32-bit Windows: Version 11.2.0.1.0 ↵
↳ - Production"
        call    _lxvers           ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this ↵
↳ CALL
        add     esp, 10h
        mov     edx, [ebp+var_18] ; [EBP-18h]=0x50
        mov     dword ptr [ebx], 5
        test    edx, edx          ; EDX=0x50
        jnz     loc_2CE1192
        mov     edx, [ebp+var_14]
        mov     esi, [ebp+var_C]
        mov     eax, ebx
        mov     ebx, [ebp+var_8]
        mov     ecx, 5
        jmp     loc_2CE10F6

loc_2CE127A: ; DATA XREF: .rdata:0628B0B0
        mov     edx, [ebp+var_14] ; [EBP-14h]=0xc98c938
        mov     esi, [ebp+var_C] ; [EBP-0Ch]=0xcdfe248
        mov     edi, [ebp+var_4] ; [EBP-4]=0xc98c938
        mov     eax, ebx          ; EBX=0xcdfe554
        mov     ebx, [ebp+var_8] ; [EBP-8]=0

loc_2CE1288: ; CODE XREF: _kqvrow_+1F
        mov     eax, [eax+8]      ; [EAX+8]=0xce2ffb0, "NLSRTL Version 11.2.0.1.0 - Production"
        test    eax, eax          ; EAX=0xce2ffb0, "NLSRTL Version 11.2.0.1.0 - Production"
        jz      short loc_2CE12A7
        push    offset aXKqvvsnBuffer ; "x$kqvvsn buffer"
        push    eax                ; EAX=0xce2ffb0, "NLSRTL Version 11.2.0.1.0 - Production"
        mov     eax, [ebp+arg_C] ; [EBP+14h]=0x8a172b4
        push    eax                ; EAX=0x8a172b4
        push    dword ptr [edx+10494h] ; [EDX+10494h]=0xc98cd58
        call    _kghfrf           ; tracing nested maximum level (1) reached, skipping this ↵
↳ CALL
        add     esp, 10h

loc_2CE12A7: ; CODE XREF: _kqvrow_+1C1
        xor     eax, eax
        mov     esp, ebp
        pop     ebp
        retn                                ; EAX=0
_kqvrow_    endp

```

Так можно легко увидеть, что номер строки таблицы задается извне. Сама функция возвращает строку, формируя её так:

Строка 1	Использует глобальные переменные vsnstr, vsnnum, vsnban. Вызывает sprintf().
Строка 2	Вызывает kkvvsn().
Строка 3	Вызывает lmxver().
Строка 4	Вызывает npinli(), nrtnsvrs().
Строка 5	Вызывает lxvers().

Так вызываются соответствующие функции для определения номеров версий отдельных модулей.

8.10.2. Таблица X\$KSMLRU в Oracle RDBMS

В заметке *Diagnosing and Resolving Error ORA-04031 on the Shared Pool or Other Memory Pools [Video]* [ID 146599.1] упоминается некая служебная таблица:

There is a fixed table called X\$KSMLRU that tracks allocations in the shared pool that cause other objects in the shared pool to be aged out. This fixed table can be used to identify what is causing the large allocation.

If many objects are being periodically flushed from the shared pool then this will cause response time problems and will likely cause library cache latch contention problems when the objects are reloaded into the shared pool.

One unusual thing about the X\$KSMLRU fixed table is that the contents of the fixed table are erased whenever someone selects from the fixed table. This is done since the fixed table stores only the largest allocations that have occurred. The values are reset after being selected so that subsequent large allocations can be noted even if they were not quite as large as others that occurred previously. Because of this resetting, the output of selecting from this table should be carefully kept since it cannot be retrieved back after the query is issued.

Однако, как можно легко убедиться, эта системная таблица очищается всякий раз, когда кто-то делает запрос к ней. Сможем ли мы найти причину, почему это происходит? Если вернуться к уже рассмотренным таблицам `kqftab` и `kqftap` полученных при помощи `oracle tables`⁴¹, содержащим информацию о X\$-таблицах, мы узнаем что для того чтобы подготовить строки этой таблицы, вызывается функция `ksmlrs()`:

Листинг 8.16: Результат работы `oracle tables`

```
kqftab_element.name: [X$KSMLRU] ?: [ksmlr] 0x4 0x64 0x11 0xc 0xffffc0bb 0x5
kqftap_param.name=[ADDR] ?: 0x917 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[INDX] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[INST_ID] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRIDX] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRDUR] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x4 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRSHRPOOL] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x8 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRCOM] ?: 0x501 0x0 0x0 0x0 0x14 0xc 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRSIZ] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x20 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRNUM] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x24 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRHON] ?: 0x501 0x0 0x0 0x0 0x20 0x28 0x0
kqftap_param.name=[KSMLROHV] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x48 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRSES] ?: 0x17 0x0 0x0 0x0 0x4 0x4c 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRADU] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x50 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRNID] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x54 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRNSD] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x58 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRNCD] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x5c 0x0
kqftap_param.name=[KSMLRNED] ?: 0x2 0x0 0x0 0x0 0x4 0x60 0x0
kqftap_element.fn1=ksmlrs
kqftap_element.fn2=NULL
```

Действительно, при помощи `tracer` легко убедиться, что эта функция вызывается каждый раз, когда мы обращаемся к таблице X\$KSMLRU.

Здесь есть ссылки на функции `ksmsplu_sp()` и `ksmsplu_jp()`, каждая из которых в итоге вызывает `ksmsplu()`. В конце функции `ksmsplu()` мы видим вызов `memset()`:

Листинг 8.17: `ksm.o`

```
...
.text:00434C50 loc_434C50: ; DATA XREF: .rdata:off_5E50EA8
.text:00434C50 mov     edx, [ebp-4]
.text:00434C53 mov     [eax], esi
.text:00434C55 mov     esi, [edi]
.text:00434C57 mov     [eax+4], esi
.text:00434C5A mov     [edi], eax
.text:00434C5C add     edx, 1
.text:00434C5F mov     [ebp-4], edx
.text:00434C62 jnz     loc_434B7D
```

⁴¹yurichev.com

8.10. ORACLE RDBMS

```
.text:00434C68      mov     ecx, [ebp+14h]
.text:00434C6B      mov     ebx, [ebp-10h]
.text:00434C6E      mov     esi, [ebp-0Ch]
.text:00434C71      mov     edi, [ebp-8]
.text:00434C74      lea     eax, [ecx+8Ch]
.text:00434C7A      push    370h                ; Size
.text:00434C7F      push    0                   ; Val
.text:00434C81      push    eax                  ; Dst
.text:00434C82      call    __intel_fast_memset
.text:00434C87      add     esp, 0Ch
.text:00434C8A      mov     esp, ebp
.text:00434C8C      pop     ebp
.text:00434C8D      retn
.text:00434C8D _ksmsplu endp
```

Такие конструкции (`memset (block, 0, size)`) очень часто используются для простого обнуления блока памяти. Мы можем попробовать рискнуть, заблокировав вызов `memset()` и посмотреть, что будет?

Запускаем `tracer` со следующей опцией: поставить точку останова на `0x434C7A` (там, где начинается передача параметров для функции `memset()`) так, чтобы `tracer` в этом месте установил указатель инструкций процессора (EIP) на место, где уже произошла очистка переданных параметров в `memset()` (по адресу `0x434C8A`):

Можно сказать, при помощи этого, мы симулируем безусловный переход с адреса `0x434C7A` на `0x434C8A`.

```
tracer -a:oracle.exe bpx=oracle.exe!0x00434C7A,set(eip,0x00434C8A)
```

(Важно: все эти адреса справедливы только для win32-версии Oracle RDBMS 11.2)

Действительно, после этого мы можем обращаться к таблице `X$KSMLRU` сколько угодно, и она уже не очищается!

~~Не делайте этого дома ("Разрушители легенд")~~ Не делайте этого на своих production-серверах.

Впрочем, это не обязательно полезное или желаемое поведение системы, но как эксперимент по поиску нужного кода, нам это подошло!

8.10.3. Таблица V\$TIMER в Oracle RDBMS

`V$TIMER` это еще один служебный *fixed view*, отражающий какое-то часто меняющееся значение:

`V$TIMER` displays the elapsed time in hundredths of a second. Time is measured since the beginning of the epoch, which is operating system specific, and wraps around to 0 again whenever the value overflows four bytes (roughly 497 days).

(Из документации Oracle RDBMS⁴²)

Интересно что периоды разные в Oracle для Win32 и для Linux. Сможем ли мы найти функцию, отвечающую за генерирование этого значения?

Как видно, эта информация, в итоге, берется из системной таблицы `X$KSUTM`.

```
SQL> select * from V$FIXED_VIEW_DEFINITION where view_name='V$TIMER';

VIEW_NAME
-----
VIEW_DEFINITION
-----

V$TIMER
select  HSECS from GV$TIMER where inst_id = USERENV('Instance')

SQL> select * from V$FIXED_VIEW_DEFINITION where view_name='GV$TIMER';
```

⁴²<http://go.yurichev.com/17088>

8.10. ORACLE RDBMS

VIEW_NAME

VIEW_DEFINITION

GV\$TIMER

select inst_id,ksutmtim from x\$ksutm

Здесь мы упираемся в небольшую проблему, в таблицах kqftab/kqftap нет указателей на функцию, которая бы генерировала значение:

Листинг 8.18: Результат работы oracle tables

```
kqftab_element.name: [X$KSUTM] ?: [ksutm] 0x1 0x4 0x4 0x0 0xffffc09b 0x3
kqftap_param.name=[ADDR] ?: 0x10917 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[INDX] ?: 0x20b02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[INST_ID] ?: 0xb02 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x0
kqftap_param.name=[KSUTMTIM] ?: 0x1302 0x0 0x0 0x0 0x4 0x0 0x1e
kqftap_element.fn1=NULL
kqftap_element.fn2=NULL
```

Попробуем в таком случае просто поискать строку KSUTMTIM, и находим ссылку на нее в такой функции:

```
kqfd_DRN_ksutm_c proc near      ; DATA XREF: .rodata:0805B4E8
```

```
arg_0    = dword ptr 8
arg_8    = dword ptr 10h
arg_C    = dword ptr 14h

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        push    [ebp+arg_C]
        push    offset ksugtm
        push    offset _2__STRING_1263_0 ; "KSUTMTIM"
        push    [ebp+arg_8]
        push    [ebp+arg_0]
        call    kqfd_cfui_drain
        add     esp, 14h
        mov     esp, ebp
        pop     ebp
        retn
kqfd_DRN_ksutm_c endp
```

Сама функция kqfd_DRN_ksutm_c() упоминается в таблице kqfd_tab_registry_0 вот так:

```
dd offset _2__STRING_62_0 ; "X$KSUTM"
dd offset kqfd_OPN_ksutm_c
dd offset kqfd_tabl_fetch
dd 0
dd 0
dd offset kqfd_DRN_ksutm_c
```

Упоминается также некая функция ksugtm(). Посмотрим, что там (в Linux x86):

Листинг 8.19: ksu.o

```
ksugtm proc near

var_1C   = byte ptr -1Ch
arg_4    = dword ptr 0Ch

        push    ebp
        mov     ebp, esp
        sub     esp, 1Ch
        lea     eax, [ebp+var_1C]
        push    eax
        call    slgcs
        pop     ecx
```

8.10. ORACLE RDBMS

```
mov     edx, [ebp+arg_4]
mov     [edx], eax
mov     eax, 4
mov     esp, ebp
pop     ebp
retn
ksugtm  endp
```

В win32-версии тоже самое.

Искомая ли эта функция? Попробуем узнать:

```
tracer -a:oracle.exe bpf=oracle.exe!_ksugtm,args:2,dump_args:0x4
```

Пробуем несколько раз:

```
SQL> select * from V$TIMER;
```

```
      HSECS
-----
27294929
```

```
SQL> select * from V$TIMER;
```

```
      HSECS
-----
27295006
```

```
SQL> select * from V$TIMER;
```

```
      HSECS
-----
27295167
```

Листинг 8.20: вывод [tracer](#)

```
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm (0x0, 0xd76c5f0) (called from oracle.exe!__VInfreq__qerfxFetch✓
↳ +0xfad (0x56bb6d5))
Argument 2/2
0D76C5F0: 38 C9                                "8."
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm () -> 0x4 (0x4)
Argument 2/2 difference
00000000: D1 7C A0 01                                ".|.."
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm (0x0, 0xd76c5f0) (called from oracle.exe!__VInfreq__qerfxFetch✓
↳ +0xfad (0x56bb6d5))
Argument 2/2
0D76C5F0: 38 C9                                "8."
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm () -> 0x4 (0x4)
Argument 2/2 difference
00000000: 1E 7D A0 01                                ".}.."
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm (0x0, 0xd76c5f0) (called from oracle.exe!__VInfreq__qerfxFetch✓
↳ +0xfad (0x56bb6d5))
Argument 2/2
0D76C5F0: 38 C9                                "8."
TID=2428|(0) oracle.exe!_ksugtm () -> 0x4 (0x4)
Argument 2/2 difference
00000000: BF 7D A0 01                                ".}.."
```

Действительно — значение то, что мы видим в SQL*Plus, и оно возвращается через второй аргумент.

Посмотрим, что в функции `slgcs()` (Linux x86):

```
slgcs  proc near
var_4   = dword ptr -4
arg_0   = dword ptr 8

        push    ebp
        mov     ebp, esp
```

8.10. ORACLE RDBMS

```
    push    esi
    mov     [ebp+var_4], ebx
    mov     eax, [ebp+arg_0]
    call    $+5
    pop     ebx
    nop
    ; PIC mode
    mov     ebx, offset _GLOBAL_OFFSET_TABLE_
    mov     dword ptr [eax], 0
    call    sltrgtime64 ; PIC mode
    push    0
    push    0Ah
    push    edx
    push    eax
    call    __udivdi3 ; PIC mode
    mov     ebx, [ebp+var_4]
    add     esp, 10h
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    retn
_slgcs    endp
```

(это просто вызов `sltrgtime64()` и деление его результата на 10 (3.9 (стр. 487)))

И в win32-версии:

```
_slgcs    proc near    ; CODE XREF: _dbgfgHtElResetCount+15
                ; _dbgerRunActions+1528
    db      66h
    nop
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     eax, [ebp+8]
    mov     dword ptr [eax], 0
    call    ds:__imp__GetTickCount@0 ; GetTickCount()
    mov     edx, eax
    mov     eax, 0CCCCCDh
    mul     edx
    shr     edx, 3
    mov     eax, edx
    mov     esp, ebp
    pop     ebp
    retn
_slgcs    endp
```

Это просто результат `GetTickCount()` ⁴³ поделенный на 10 (3.9 (стр. 487)).

Вуаля! Вот почему в win32-версии и версии Linux x86 разные результаты, потому что они получают разными системными функциями [OC](#).

Drain по-английски *дренаж, отток, водосток*. Таким образом, возможно имеется ввиду *подключение* определенного столбца системной таблице к функции.

Добавим поддержку таблицы `kqfd_tab_registry_0` в `oracle tables`⁴⁴, теперь мы можем видеть, при помощи каких функций, столбцы в системных таблицах *подключаются* к значениям, например:

```
[X$KSUTM] [kqfd_OPN_ksutm_c] [kqfd_tabl_fetch] [NULL] [NULL] [kqfd_DRN_ksutm_c]
[X$KSUSGIF] [kqfd_OPN_ksusg_c] [kqfd_tabl_fetch] [NULL] [NULL] [kqfd_DRN_ksusg_c]
```

OPN, возможно, *open*, а *DRN*, вероятно, означает *drain*.

⁴³[MSDN](#)

⁴⁴[yurichev.com](#)

8.11. Вручную написанный на ассемблере код

8.11.1. Тестовый файл EICAR

Этот .COM-файл предназначен для тестирования антивирусов, его можно запустить в MS-DOS и он выведет такую строку: «EICAR-STANDARD-ANTIVIRUS-TEST-FILE!»⁴⁵.

Он примечателен тем, что он полностью состоит только из печатных ASCII-символов, следовательно, его можно набрать в любом текстовом редакторе:

X50!P%@AP[4\PZX54(P^)7CC)7}\$EICAR-STANDARD-ANTIVIRUS-TEST-FILE!\$H+H*

Попробуем его разобрать:

```
; изначальное состояние: SP=0FFFFh, SS:[SP]=0
0100 58          pop     ax
; AX=0, SP=0
0101 35 4F 21     xor     ax, 214Fh
; AX = 214Fh and SP = 0
0104 50          push    ax
; AX = 214Fh, SP = FFFh and SS:[FFFE] = 214Fh
0105 25 40 41     and     ax, 4140h
; AX = 140h, SP = FFFh and SS:[FFFE] = 214Fh
0108 50          push    ax
; AX = 140h, SP = FFFCh, SS:[FFFC] = 140h and SS:[FFFE] = 214Fh
0109 5B          pop     bx
; AX = 140h, BX = 140h, SP = FFFh and SS:[FFFE] = 214Fh
010A 34 5C        xor     al, 5Ch
; AX = 11Ch, BX = 140h, SP = FFFh and SS:[FFFE] = 214Fh
010C 50          push    ax
010D 5A          pop     dx
; AX = 11Ch, BX = 140h, DX = 11Ch, SP = FFFh and SS:[FFFE] = 214Fh
010E 58          pop     ax
; AX = 214Fh, BX = 140h, DX = 11Ch and SP = 0
010F 35 34 28     xor     ax, 2834h
; AX = 97Bh, BX = 140h, DX = 11Ch and SP = 0
0112 50          push    ax
0113 5E          pop     si
; AX = 97Bh, BX = 140h, DX = 11Ch, SI = 97Bh and SP = 0
0114 29 37        sub     [bx], si
0116 43          inc     bx
0117 43          inc     bx
0118 29 37        sub     [bx], si
011A 7D 24        jge     short near ptr word_10140
011C 45 49 43 ... db 'EICAR-STANDARD-ANTIVIRUS-TEST-FILE!$'
0140 48 2B word_10140 dw 2B48h ; CD 21 (INT 21) будет здесь
0142 48 2A        dw 2A48h ; CD 20 (INT 20) будет здесь
0144 0D          db 0Dh
0145 0A          db 0Ah
```

Добавим везде комментарии, показывающие состояние регистров и стека после каждой инструкции.

Собственно, все эти инструкции нужны только для того чтобы исполнить следующий код:

```
B4 09          MOV AH, 9
BA 1C 01       MOV DX, 11Ch
CD 21          INT 21h
CD 20          INT 20h
```

INT 21h с функцией 9 (переданной в AH) просто выводит строку, адрес которой передан в DS:DX. Кстати, строка должна быть завершена символом '\$'. Надо полагать, это наследие CP/M и эта функция в DOS осталась для совместимости. INT 20h возвращает управление в DOS.

Но, как видно, далеко не все опкоды этих инструкций печатные. Так что основная часть EICAR-файла это:

- подготовка нужных значений регистров (AH и DX);

⁴⁵[wikipedia](https://wikipedia.org/wiki/EICAR)

8.12. ДЕМО

- подготовка в памяти опкодов для INT 21 и INT 20;
- исполнение INT 21 и INT 20.

Кстати, подобная техника широко используется для создания шеллкодов, где нужно создать x86-код, который будет нужно передать в виде текстовой строки.

Здесь также список всех x86-инструкций с печатаемыми опкодами: [.1.6](#) (стр. [1012](#)).

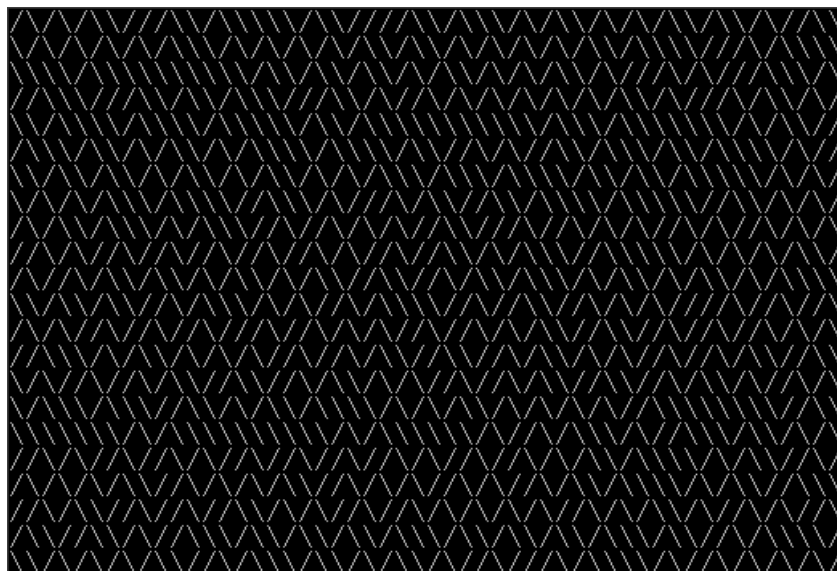
8.12. Демо

Демо (или демомейкинг) были великолепным упражнением в математике, программировании компьютерной графики и очень плотному программированию на ассемблере вручную.

8.12.1. 10 PRINT CHR\$(205.5+RND(1)); : GOTO 10

Все примеры здесь для .COM-файлов под MS-DOS.

В [Nick Montfort et al, *10 PRINT CHR\$(205.5+RND(1)); : GOTO 10*, (The MIT Press:2012)] [46](#) можно прочитать об одном из простейших генераторов случайных лабиринтов. Он просто бесконечно и случайно печатает символ слэша или обратный слэша, выдавая в итоге что-то вроде:



Здесь несколько известных реализаций для 16-битного x86.

Версия 42-х байт от Trixter

Листинг взят с его сайта [47](#), но комментарии — автора.

```
00000000: B001      mov     al,1      ; установить видеорежим 40x25
00000002: CD10      int     010
00000004: 30FF      xor     bh,bh    ; установить видеостраницу для вызова int 10h
00000006: B9D007    mov     cx,007D0    ; вывод 2000 символов
00000009: 31C0      xor     ax,ax
0000000B: 9C        pushf      ; сохранить флаги
; узнать случайное число из чипа таймера
0000000C: FA        cli        ; запретить прерывания
0000000D: E643      out     043,al ; записать 0 в порт 43h
; прочитать 16-битное значение из порта 40h
0000000F: E440      in      al,040
00000011: 88C4      mov     ah,al
00000013: E440      in      al,040
```

⁴⁶Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17286>

⁴⁷<http://go.yurichev.com/17305>

8.12. ДЕМО

```
00000015: 9D          popf          ; разрешить прерывания возвращая значение флага IF
00000016: 86C4        xchg          ah,al
; здесь мы имеем псевдослучайное 16-битное значение
00000018: D1E8        shr           ax,1
0000001A: D1E8        shr           ax,1
; в CF сейчас находится второй бит из значения
0000001C: B05C        mov          al,05C ; '\'
; если CF=1, пропускаем следующую инструкцию
0000001E: 7202        jc           00000022
; если CF=0, загружаем в регистр AL другой символ
00000020: B02F        mov          al,02F ; '/'
; вывод символа
00000022: B40E        mov          ah,00E
00000024: CD10        int           010
00000026: E2E1        loop          00000009 ; цикл в 2000 раз
00000028: CD20        int           020      ; возврат в DOS
```

Псевдослучайное число на самом деле это время, прошедшее со старта системы, получаемое из чипа таймера 8253, это значение увеличивается на единицу 18.2 раза в секунду.

Записывая ноль в порт 43h, мы имеем ввиду что команда это «выбрать счетчик 0», "counter latch", "двоичный счетчик" (а не значение BCD).

Прерывания снова разрешаются при помощи инструкции POPF, которая также возвращает флаг IF.

Инструкцию IN нельзя использовать с другими регистрами кроме AL, поэтому здесь перетасовка.

Моя попытка укоротить версию Trixter: 27 байт

Мы можем сказать, что мы используем таймер не для того чтобы получить точное время, но псевдослучайное число, так что мы можем не тратить время (и код) на запрещение прерываний. Еще можно сказать, что так как мы берем бит из младшей 8-битной части, то мы можем считывать только её.

Немного укоротим код и выходит 27 байт:

```
00000000: B9D007      mov     cx,007D0 ; вывести только 2000 символов
00000003: 31C0        xor     ax,ax ; команда чипу таймера
00000005: E643        out     043,al
00000007: E440        in      al,040 ; читать 8 бит из таймера
00000009: D1E8        shr     ax,1 ; переместить второй бит в флаг CF
0000000B: D1E8        shr     ax,1
0000000D: B05C        mov     al,05C ; подготовить '\'
0000000F: 7202        jc      00000013
00000011: B02F        mov     al,02F ; подготовить '/'
; вывести символ на экран
00000013: B40E        mov     ah,00E
00000015: CD10        int     010
00000017: E2EA        loop   00000003
; выход в DOS
00000019: CD20        int     020
```

Использование случайного мусора в памяти как источника случайных чисел

Так как это MS-DOS, защиты памяти здесь нет вовсе, так что мы можем читать с какого угодно адреса. И даже более того: простая инструкция LODSB будет читать байт по адресу DS:SI, но это не проблема если правильные значения не установлены в регистры, пусть она читает 1) случайные байты; 2) из случайного места в памяти!

Так что на странице Trixter-а⁴⁸ можно найти предложение использовать LODSB без всякой инициализации.

Есть также предложение использовать инструкцию SCASB вместо, потому что она выставляет флаги в соответствии с прочитанным значением.

⁴⁸<http://go.yurichev.com/17305>

8.12. ДЕМО

Еще одна идея насчет минимизации кода — это использовать прерывание DOS INT 29h которое просто печатает символ на экране из регистра AL.

Это то что сделали Peter Ferrie и Андрей «hermlt» Баранович (11 и 10 байт) ⁴⁹:

Листинг 8.21: Андрей «hermlt» Баранович: 11 байт

```
00000000: B05C      mov     al,05C    ;'\'  
; читать байт в AL из случайного места в памяти  
00000002: AE        scasb  
; PF = четность (AL – случайный байт) = четность (5Ch – случайный байт)  
00000003: 7A02      jp      00000007  
00000005: B02F      mov     al,02F    ;'/'  
00000007: CD29      int     029      ; вывод AL на экран  
00000009: EBF5      jmp     00000000    ; бесконечный цикл
```

SCASB также использует значение в регистре AL, она вычитает значение случайного байта в памяти из 5Ch в AL. JP это редкая инструкция, здесь она используется для проверки флага четности (PF), который вычисляется по формуле в листинге. Как следствие, выводимый символ определяется не каким-то конкретным битом из случайного байта в памяти, а суммой бит, и это (надемся) сделает результат более распределенным.

Можно сделать еще короче, если использовать недокументированную x86-инструкцию SALC (АКА SETALC) («Set AL CF»). Она появилась в CPU и выставляет AL в 0xFF если CF это 1 или 0 если наоборот.

Листинг 8.22: Peter Ferrie: 10 байт

```
; AL в этом месте имеет случайное значение  
00000000: AE        scasb  
; CF устанавливается по результату вычитания случайного байта памяти из AL.  
; так что он здесь случаен, в каком-то смысле  
00000001: D6        setalc  
; AL выставляется в 0xFF если CF=1 или в 0 если наоборот  
00000002: 242D      and     al,02D    ;'-'  
; AL здесь 0x2D либо 0  
00000004: 042F      add     al,02F    ;'/'  
; AL здесь 0x5C либо 0x2F  
00000006: CD29      int     029      ; вывести AL на экране  
00000008: EBF6      jmps    00000000    ; бесконечный цикл
```

Так что можно избавиться и от условных переходов. ASCII-код обратного слэша («\») это 0x5C и 0x2F для слэша («/»).

Так что нам нужно конвертировать один (псевдослучайный) бит из флага CF в значение 0x5C или 0x2F.

Это делается легко: применяя операцию «И» ко всем битам в AL (где все 8 бит либо выставлены, либо сброшены) с 0x2D мы имеем просто 0 или 0x2D.

Прибавляя значение 0x2F к этому значению, мы получаем 0x5C или 0x2F. И просто выводим это на экран.

Вывод

Также стоит отметить, что результат может быть разным в эмуляторе DOSBox, Windows NT и даже MS-DOS, из-за разных условий: чип таймера может эмулироваться по-разному, изначальные значения регистров также могут быть разными.

⁴⁹<http://go.yurichev.com/17087>

8.12.2. Множество Мандельброта

You know, if you magnify the coastline, it still looks like a coastline, and a lot of other things have this property. Nature has recursive algorithms that it uses to generate clouds and Swiss cheese and things like that.

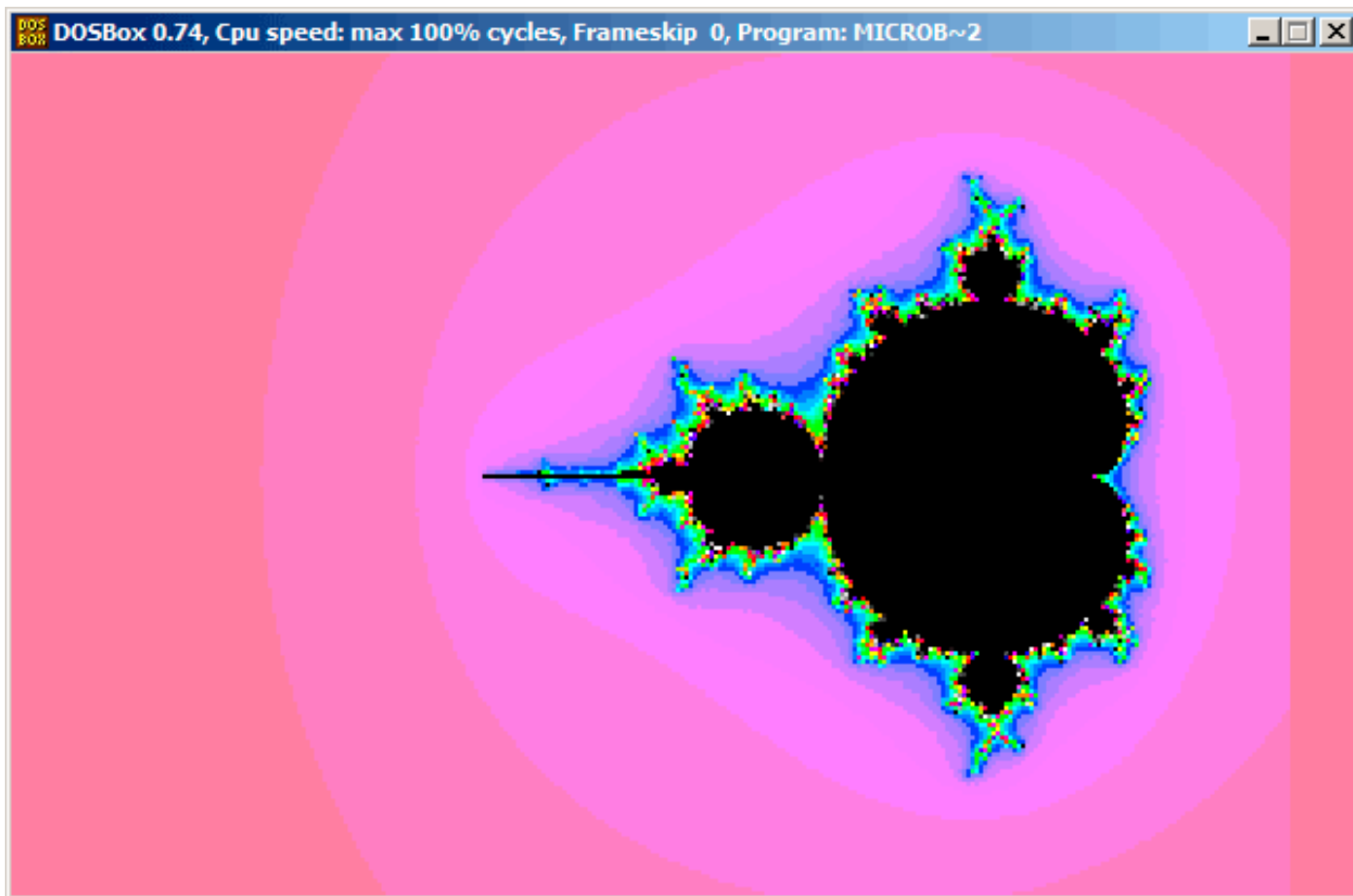
Дональд Кнут, интервью (1993)

Множество Мандельброта это фрактал, характерное свойство которого это самоподобие.

При увеличении картинки, вы видите, что этот характерный узор повторяется бесконечно.

Вот демо⁵⁰ написанное автором по имени «Sir_Lagsalot» в 2009, рисующее множество Мандельброта, и это программа для x86 с размером файла всего 64 байта. Там только 30 16-битных x86-инструкций.

Вот что она рисует:



Попробуем разобраться, как она работает.

Теория

Немного о комплексных числах

Комплексное число состоит из двух чисел (вещественная (Re) и мнимая (Im)).

Комплексная плоскость — это двумерная плоскость, где любое комплексное число может быть расположено: вещественная часть — это одна координата и мнимая — вторая.

Некоторые базовые правила, которые нам понадобятся:

⁵⁰Можно скачать [здесь](#),

8.12. ДЕМО

- Сложение: $(a + bi) + (c + di) = (a + c) + (b + d)i$

Другими словами:

$$\text{Re}(sum) = \text{Re}(a) + \text{Re}(b)$$

$$\text{Im}(sum) = \text{Im}(a) + \text{Im}(b)$$

- Умножение: $(a + bi)(c + di) = (ac - bd) + (bc + ad)i$

Другими словами:

$$\text{Re}(product) = \text{Re}(a) \cdot \text{Re}(c) - \text{Re}(b) \cdot \text{Re}(d)$$

$$\text{Im}(product) = \text{Im}(b) \cdot \text{Im}(c) + \text{Im}(a) \cdot \text{Im}(d)$$

- Возведение в квадрат: $(a + bi)^2 = (a + bi)(a + bi) = (a^2 - b^2) + (2ab)i$

Другими словами:

$$\text{Re}(square) = \text{Re}(a)^2 - \text{Im}(a)^2$$

$$\text{Im}(square) = 2 \cdot \text{Re}(a) \cdot \text{Im}(a)$$

Как нарисовать множество Мандельброта

Множество Мандельброта — это набор точек, для которых рекурсивное соотношение $z_{n+1} = z_n^2 + c$ (где z и c это комплексные числа и c это начальное значение) не стремится к бесконечности.

Простым русским языком:

- Перечисляем все точки на экране.
- Проверяем, является ли эта точка в множестве Мандельброта.
- Вот как проверить:
 - Представим точку как комплексное число.
 - Возведем в квадрат.
 - Прибавим значение точки в самом начале.
 - Вышло за пределы? Прерываемся, если да.
 - Передвигаем точку в новое место, координаты которого только что вычислили.
 - Повторять всё это некое разумное количество итераций.
- Двигающаяся точка в итоге не вышла за пределы? Тогда рисуем точку.
- Двигающаяся точка в итоге вышла за пределы?
 - (Для черно-белого изображения) ничего не рисуем.
 - (Для цветного изображения) преобразуем количество итераций в какой-нибудь цвет. Так что цвет будет показывать, с какой скоростью точка вышла за пределы.

Вот алгоритмы для комплексных и обычных целочисленных чисел (на языке, отдаленно напоминающем Python):

Листинг 8.23: Для комплексных чисел

```
def check_if_is_in_set(P):
    P_start=P
    iterations=0

    while True:
        if (P>bounds):
            break
        P=P^2+P_start
        if iterations > max_iterations:
            break
        iterations++

    return iterations
```

8.12. ДЕМО

```
# черно-белое
for each point on screen P:
    if check_if_is_in_set (P) < max_iterations:
        нарисовать точку

# цветное
for each point on screen P:
    iterations = if check_if_is_in_set (P)
    преобразовать количество итераций в цвет
    нарисовать цветную точку
```

Целочисленная версия, это версия где все операции над комплексными числами заменены на операции с целочисленными, в соответствии с изложенными ранее правилами.

Листинг 8.24: Для целочисленных чисел

```
def check_if_is_in_set(X, Y):
    X_start=X
    Y_start=Y
    iterations=0

    while True:
        if (X^2 + Y^2 > bounds):
            break
        new_X=X^2 - Y^2 + X_start
        new_Y=2*X*Y + Y_start
        if iterations > max_iterations:
            break
        iterations++

    return iterations

# черно-белое
for X = min_X to max_X:
    for Y = min_Y to max_Y:
        if check_if_is_in_set (X,Y) < max_iterations:
            нарисовать точку на X, Y

# цветное
for X = min_X to max_X:
    for Y = min_Y to max_Y:
        iterations = if check_if_is_in_set (X,Y)
        преобразовать количество итераций в цвет
        нарисовать цветную точку на X,Y
```

Вот также исходный текст на C#, который есть в статье в Wikipedia⁵¹, но мы немного изменим его, чтобы он выдавал количество итераций, вместо некоторого символа⁵²:

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;

namespace Mnoj
{
    class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            double realCoord, imagCoord;
            double realTemp, imagTemp, realTemp2, arg;
            int iterations;
            for (imagCoord = 1.2; imagCoord >= -1.2; imagCoord -= 0.05)
            {
                for (realCoord = -0.6; realCoord <= 1.77; realCoord += 0.03)
                {
                    iterations = 0;
```

⁵¹[wikipedia](#)

⁵²Здесь также и исполняемый файл: [beginners.re](#)

8.12. ДЕМО

```
        realTemp = realCoord;
        imagTemp = imagCoord;
        arg = (realCoord * realCoord) + (imagCoord * imagCoord);
        while ((arg < 2*2) && (iterations < 40))
        {
            realTemp2 = (realTemp * realTemp) - (imagTemp * imagTemp) - realCoord;
            imagTemp = (2 * realTemp * imagTemp) - imagCoord;
            realTemp = realTemp2;
            arg = (realTemp * realTemp) + (imagTemp * imagTemp);
            iterations += 1;
        }
        Console.Write("{0,2:D} ", iterations);
    }
    Console.WriteLine("\n");
}
Console.ReadKey();
}
}
```

Вот файл с результатом, который слишком широкий, чтобы привести его здесь: beginners.re.

Максимальное число итераций 40, так что если вы видите 40 в этом файле, это означает, что точка ходила 40 итераций, но так и не вышла за пределы.

Номер n меньше 40 означает, что эта точка оставалась внутри пределов только n итераций, и затем вышла наружу.

8.12. ДЕМО

Вот здесь есть неплохая демонстрация: <http://go.yurichev.com/17309>, она показывает визуально, как определенная точка двигается по плоскости на каждой итерации. Вот два скриншота.

В начале кликаем внутри желтой области, и увидим траекторию (зеленые линии), которая в итоге закручивается в какой-то точке внутри:

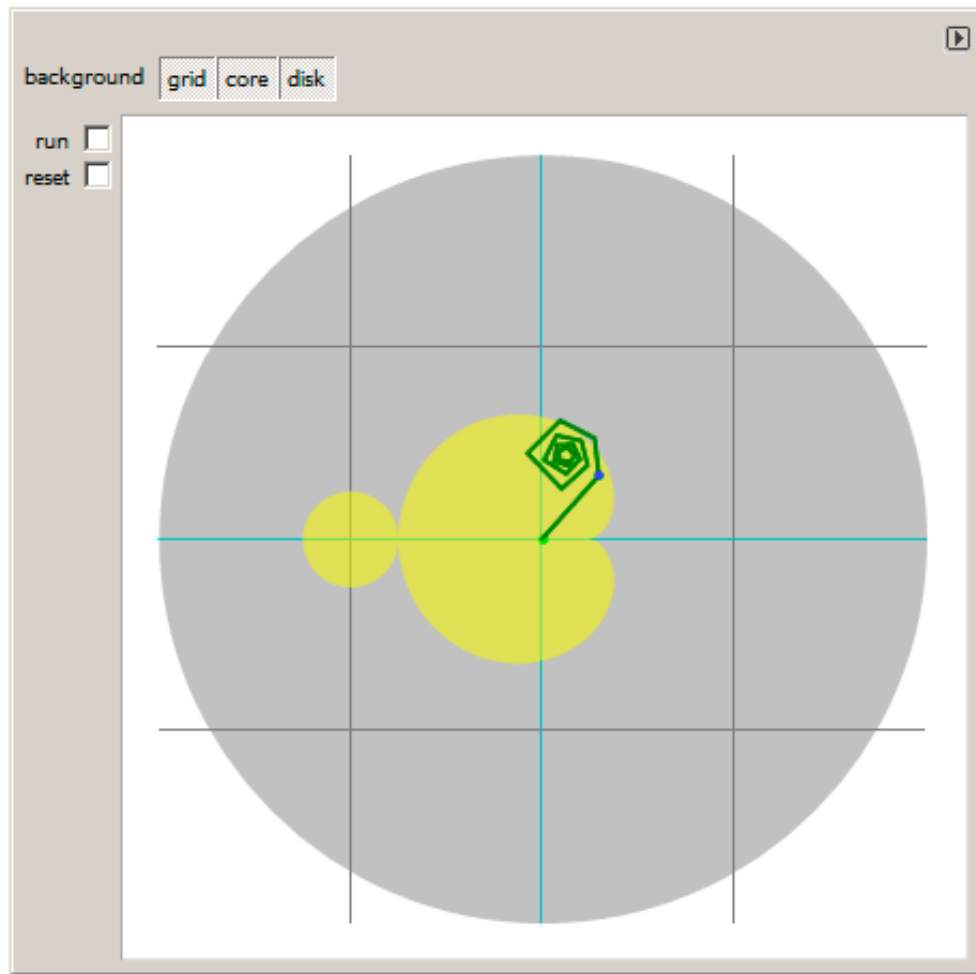


Рис. 8.16: Клик внутри желтой области

Это значит, что точка на которой кликнули, находится внутри множества Мандельброта.

8.12. ДЕМО

Затем кликаем снаружи желтой области, и мы видим более хаотичные движения точки, которая быстро выходит за пределы:

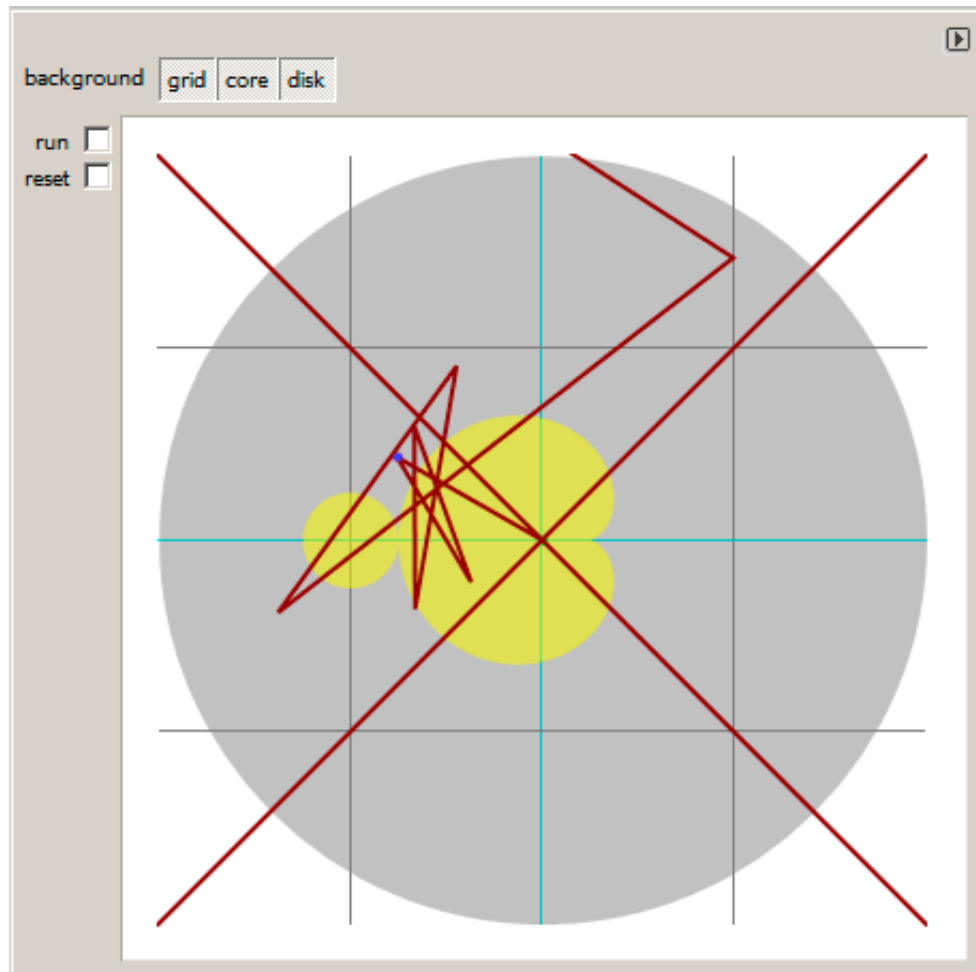


Рис. 8.17: Клик снаружи желтой области

Это значит, что эта точка не принадлежит множеству Мандельброта.

Другая неплохая демонстрация там: <http://go.yurichev.com/17310>.

Вернемся к демо

Демо, хотя и крошечная (только 64 байта или 30 инструкций), реализует общий алгоритм, изложенный здесь, но с некоторыми трюками.

Исходный код можно скачать, так что вот он, но также снабдим его своими комментариями:

Листинг 8.25: Исходный код с комментариями

```

1 ; X это столбец на экране
2 ; Y это строка на экране
3
4
5 ; X=0, Y=0          X=319, Y=0
6 ; +----->
7 ; |
8 ; |
9 ; |
10 ; |
11 ; |
12 ; |
13 ; v
14 ; X=0, Y=199       X=319, Y=199
15
16
17 ; переключиться в графический видеорежим VGA 320*200*256
18 mov al,13h
19 int 10h
20 ; в самом начале BX равен 0
21 ; в самом начале DI равен 0xFFFFE
22 ; DS:BX (или DS:0) указывает на Program Segment Prefix в этот момент
23 ; ... первые 4 байта которого этого CD 20 FF 9F
24 les ax,[bx]
25 ; ES:AX=9FFF:20CD
26
27 FillLoop:
28 ; установить DX в 0. CWD работает так: DX:AX = sign_extend(AX).
29 ; AX здесь 0x20CD (в начале) или меньше 320 (когда вернемся после цикла),
30 ; так что DX всегда будет 0.
31 cwd
32 mov ax,di
33 ; AX это текущий указатель внутри VGA-буфера
34 ; разделить текущий указатель на 320
35 mov cx,320
36 div cx
37 ; DX (start_X) – остаток (столбец: 0..319); AX – результат (строка: 0..199)
38 sub ax,100
39 ; AX=AX-100, так что AX (start_Y) сейчас в пределах -100..99
40 ; DX в пределах 0..319 или 0x0000..0x013F
41 dec dh
42 ; DX сейчас в пределах 0xFF00..0x003F (-256..63)
43
44 xor bx,bx
45 xor si,si
46 ; BX (temp_X)=0; SI (temp_Y)=0
47
48 ; получить максимальное количество итераций
49 ; CX всё еще 320 здесь, так что это будет максимальным количеством итераций
50 MandelLoop:
51 mov bp,si      ; BP = temp_Y
52 imul si,bx     ; SI = temp_X*temp_Y
53 add si,si      ; SI = SI*2 = (temp_X*temp_Y)*2
54 imul bx,bx     ; BX = BX^2 = temp_X^2
55 jo MandelBreak ; переполнение?
56 imul bp,bp     ; BP = BP^2 = temp_Y^2
57 jo MandelBreak ; переполнение?
58 add bx,bp      ; BX = BX+BP = temp_X^2 + temp_Y^2
59 jo MandelBreak ; переполнение?
60 sub bx,bp      ; BX = BX-BP = temp_X^2 + temp_Y^2 - temp_Y^2 = temp_X^2
61 sub bx,bp      ; BX = BX-BP = temp_X^2 - temp_Y^2
62

```

8.12. ДЕМО

```
63 ; скорректировать масштаб:
64 sar bx,6 ; BX=BX/64
65 add bx,dx ; BX=BX+start_X
66 ; здесь temp_X = temp_X^2 - temp_Y^2 + start_X
67 sar si,6 ; SI=SI/64
68 add si,ax ; SI=SI+start_Y
69 ; здесь temp_Y = (temp_X*temp_Y)*2 + start_Y
70
71 loop MandelLoop
72
73 MandelBreak:
74 ; CX=итерации
75 xchg ax,cx
76 ; AX=итерации. записать AL в VGA-буфер на ES:[DI]
77 stosb
78 ; stosb также инкрементирует DI, так что DI теперь указывает на следующую точку в VGA-буфере
79 ; всегда переходим, так что это вечный цикл
80 jmp FillLoop
```

Алгоритм:

- Переключаемся в режим VGA 320*200 256 цветов. $320 * 200 = 64000$ (0xFA00). Каждый пиксель кодируется одним байтом, так что размер буфера 0xFA00 байт.

Он адресуется здесь при помощи пары регистров ES:DI.

ES должен быть здесь 0xA000, потому что это сегментный адрес видеобуфера, но запись числа 0xA000 в ES потребует по крайней мере 4 байта (PUSH 0A000h / POP ES). О 16-битной модели памяти в MS-DOS, читайте больше тут: [10.6](#) (стр. 978).

Учитывая, что BX здесь 0, и Program Segment Prefix находится по нулевому адресу, 2-байтная инструкция LES AX, [BX] запишет 0x20CD в AX и 0x9FFF в ES.

Так что программа начнет рисовать на 16 пикселей (или байт) перед видеобуфером.

Но это MS-DOS, здесь нет защиты памяти, так что запись происходит в самый конец обычной памяти, а там, как правило, ничего важного нет.

Вот почему вы видите красную полосу шириной 16 пикселей справа. Вся картинка сдвинута налево на 16 пикселей. Это цена экономии 2-х байт.

- Вечный цикл, обрабатывающий каждый пиксель. Наверное, самый общий метод обойти все точки на экране это два цикла: один для X-координаты, второй для Y-координаты.

Но тогда вам придется перемножать координаты для поиска байта в видеобуфере VGA. Автор этого демо решил сделать наоборот: перебирать все байты в видеобуфере при помощи одного цикла вместо двух и затем получать координаты текущей точки при помощи деления.

В итоге координаты такие: X в пределах -256..63 и Y в пределах -100..99. Вы можете увидеть на скриншоте что картинка как бы сдвинута в правую часть экрана. Это потому что самая большая черная дыра в форме сердца обычно появляется на координатах 0,0 и они здесь сдвинуты вправо.

Мог ли автор просто отнять 160 от X, чтобы получилось значение в пределах -160..159? Да, но инструкция SUB DX, 160 занимает 4 байта, тогда как DEC DH — 2 байта (которая отнимает 0x100 (256) от DX). Так что картинка сдвинута ценой экономии еще 2-х байт.

- Проверить, является ли текущая точка внутри множества Мандельброта. Алгоритм такой же, как и описанный здесь.
- Цикл организуется инструкцией LOOP, которая использует регистр CX как счетчик. Автор мог бы установить число итераций на какое-то число, но не сделал этого: потому что 320 уже находится в CX (было установлено на строке 35), и это итак подходящее число как число максимальных итераций.

Мы здесь экономим немного места, не загружая другое значение в регистр CX.

- Здесь используется IMUL вместо MUL, потому что мы работаем со знаковыми значениями: помните, что координаты 0,0 должны быть где-то рядом с центром экрана.

Тоже самое и с SAR (арифметический сдвиг для знаковых значений): она используется вместо SHR.

8.12. ДЕМО

- Еще одна идея — это упростить проверку пределов. Нам бы пришлось проверять пару координат, т.е. две переменных. Что делает автор это трижды проверяет на переполнение: две операции возведения в квадрат и одно прибавление. Действительно, мы ведь используем 16-битные регистры, содержащие знаковые значения в пределах -32768..32767, так что если любая из координат больше чем 32767 в процессе умножения, точка однозначно вышла за пределы, и мы переходим на метку MandelBreak.
- Здесь также имеется деление на 64 (при помощи инструкции SAR). 64 задает масштаб.

Попробуйте увеличить значение и вы получите более увеличенную картинку, или уменьшить для меньшей.

- Мы находимся на метке MandelBreak, есть только две возможности попасть сюда: цикл закончился с CX=0 (точка внутри множества Мандельброта); или потому что произошло переполнение (CX все еще содержит какое-то значение). Записываем 8-битную часть CX (CL) в видеобuffer. Палитра по умолчанию грубая, тем не менее, 0 это черный: поэтому видим черные дыры в местах где точки внутри множества Мандельброта.

Палитру можно инициализировать в начале программы, но не забывайте, это всего лишь программа на 64 байта!

- Программа работает в вечном цикле, потому что дополнительная проверка, где остановится, или пользовательский интерфейс, это дополнительные инструкции.

Еще оптимизационные трюки:

- 1-байтная CWD используется здесь для обнуления DX вместо двухбайтной XOR DX, DX или даже трехбайтной MOV DX, 0.
- 1-байтная XCHG AX, CX используется вместо двухбайтной MOV AX, CX. Текущее значение в AX все равно уже не нужно.
- DI (позиция в видеобufferе) не инициализирована, и будет 0xFFFFE в начале ⁵³. Это нормально, потому что программа работает бесконечно для всех DI в пределах 0..0xFFFF, и пользователь не может увидеть, что работала началась за экраном (последний пиксель видеобufferа 320*200 имеет адрес 0xF9FF).

Так что некоторая часть работы на самом деле происходит за экраном. А иначе понадобятся дополнительные инструкции для установки DI в 0; добавить проверку на конец буфера.

Моя «исправленная» версия

Листинг 8.26: Моя «исправленная» версия

```
1  org 100h
2  mov al,13h
3  int 10h
4
5  ; установить палитру
6  mov dx, 3c8h
7  mov al, 0
8  out dx, al
9  mov cx, 100h
10 inc dx
11 l00:
12 mov al, cl
13 shl ax, 2
14 out dx, al ; красный
15 out dx, al ; зеленый
16 out dx, al ; синий
17 loop l00
18
19 push 0a000h
20 pop es
21
22 xor di, di
23
24 FillLoop:
25 cwd
```

⁵³Больше о состояниях регистров на старте: <http://go.yurichev.com/17004>

8.12. ДЕМО

```
26 mov ax,di
27 mov cx,320
28 div cx
29 sub ax,100
30 sub dx,160
31
32 xor bx,bx
33 xor si,si
34
35 MandelLoop:
36 mov bp,si
37 imul si,bx
38 add si,si
39 imul bx,bx
40 jo MandelBreak
41 imul bp,bp
42 jo MandelBreak
43 add bx,bp
44 jo MandelBreak
45 sub bx,bp
46 sub bx,bp
47
48 sar bx,6
49 add bx,dx
50 sar si,6
51 add si,ax
52
53 loop MandelLoop
54
55 MandelBreak:
56 xchg ax,cx
57 stosb
58 cmp di, 0FA00h
59 jb FillLoop
60
61 ; дождаться нажатия любой клавиши
62 xor ax,ax
63 int 16h
64 ; установить текстовый видеорежим
65 mov ax, 3
66 int 10h
67 ; выход
68 int 20h
```

Автор сих строк попытался исправить все эти странности: теперь палитра плавная черно-белая, видеобуфер на правильном месте (строки 19..20), картинка рисуется в центре экрана (строка 30), программа в итоге заканчивается и ждет, пока пользователь нажмет какую-нибудь клавишу (строки 58..68).

Но теперь она намного больше: 105 байт (или 54 инструкции)

54.

⁵⁴ Можете поэкспериментировать и сами: скачайте DosBox и NASM и компилируйте так:
nasm fiote.asm -fbin -o file.com

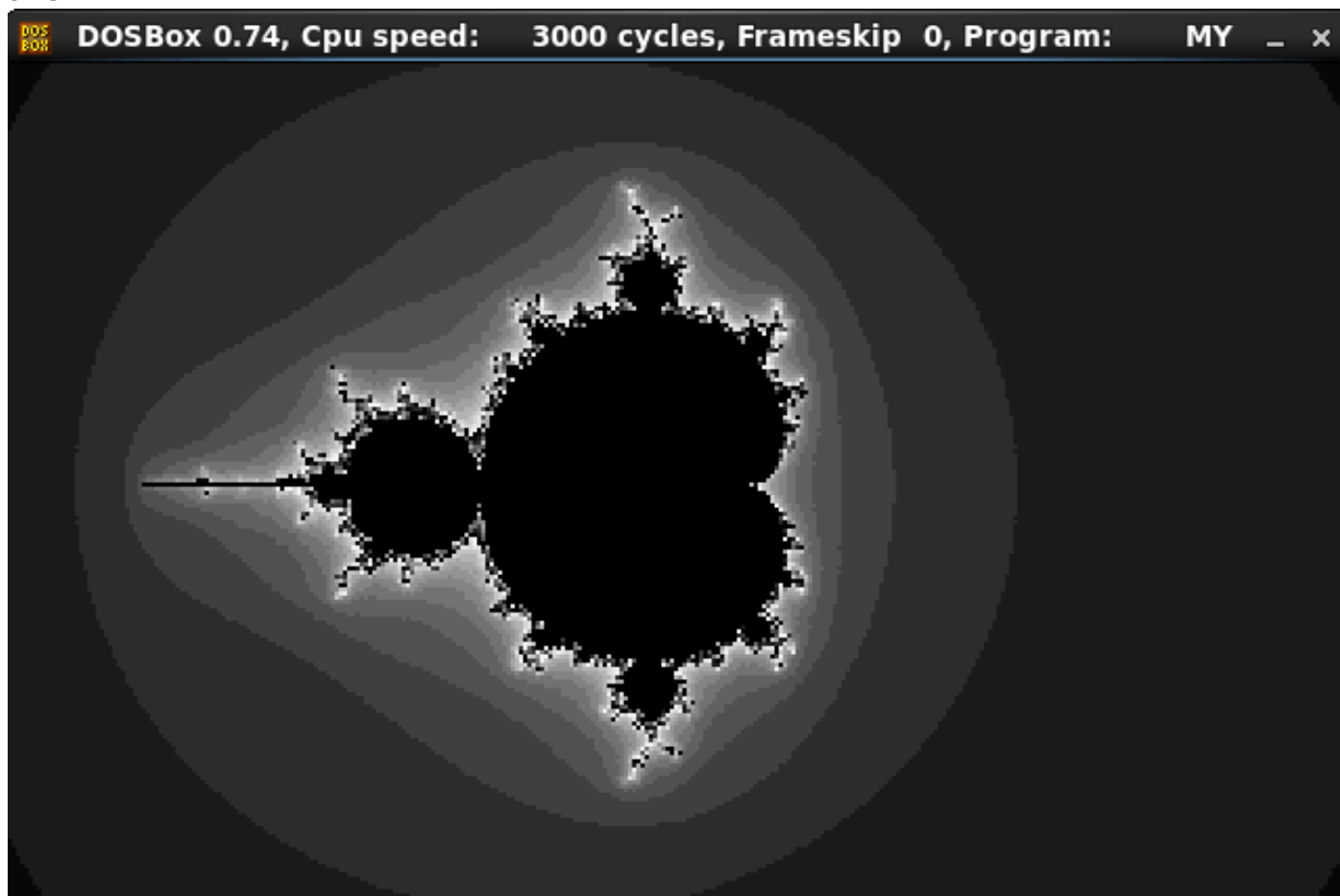


Рис. 8.18: Моя «исправленная» версия

8.13. "Прикуп" в игре "Марьяж"

Знал бы прикуп — жил бы в Сочи.

Поговорка.

"Марьяж" — старая и довольно популярная версия игры в "Преферанс" под DOS.

Играют три игрока, каждому раздается по 10 карт, остальные 2 остаются в т.н. "прикупе". Начинаются торги, во время которых "прикуп" скрыт. Он открывается после того, как один из игроков сделает "заказ".

Знание карт в "прикупе" обычно имеет решающее преимущество.

Вот так в игре выглядит состояние "торгов", и "прикуп" посередине, скрытый:

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"



Рис. 8.19: "Торги"

Попробуем "подсмотреть" карты в "прикупе" в этой игре.

Для начала — что мы знаем? Игра под DOS, датируется 1997-м годом. IDA показывает имена стандартных функций вроде `@GetImage$q7Integert1t1t1m3Any` — это "манглинг" типичный для Borland Pascal, что позволяет сделать вывод, что сама игра написана на Паскале и скомпилирована Borland Pascal-ем.

Файлов около 10-и и некоторые имеют текстовую строку в заголовке "Marriage Image Library" — должно быть, это библиотеки спрайтов.

В IDA можно увидеть что используется функция `@PutImage$q7Integert1m3Any4Word`, которая, собственно, рисует некий спрайт на экране. Она вызывается по крайней мере из 8-и мест. Чтобы узнать что происходит в каждом из этих 8-и мест, мы можем блокировать работу каждой функции и смотреть, что будет происходить. Например, первая ф-ция имеет адрес `seg002:062E`, и она заканчивается инструкцией `retf 0Eh` на `seg002:102A`. Это означает, что метод вызовов ф-ций в Borland Pascal под DOS схож с `stdcall` — вызываемая ф-ция должна сама возвращать стек в состояние до того как началась передача аргументов. В самом начале этой ф-ции вписываем инструкцию `"retf 0eh"`, либо 3 байта: `CA 0E 00`. Запускаем "Марьяж" и внешне вроде бы ничего не изменилось.

Переходим ко второй ф-ции, которая активно использует `@PutImage$q7Integert1m3Any4Word`. Она находится по адресу `seg008:0AB5` и заканчивается инструкцией `retf 0Ah`. Вписываем эту инструкцию в самом начале и запускаем:



Рис. 8.20: Карт нет

Карт не видно вообще. И видимо, эта функция их отображает, мы её заблокировали, и теперь карт не видно. Назовем эту ф-цию в IDA `draw_card()`. Помимо `@PutImage$q7Integert1m3Any4Word`, в этой ф-ции вызываются также ф-ции `@SetColor$q4Word`, `@SetFillStyle$q4Wordt1`, `@Bar$q7Integert1t1t1`, `@OutTextXY$q7Integert16String`.

Сама ф-ция `draw_cards()` (её название мы дали ей сами только что) вызывается из 4-х мест. Попробуем точно также "блокировать" каждую ф-цию.

Когда я "блокирую" вторую, по адресу `seg008:0DF3` и запускаю программу, вижу такое:

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"

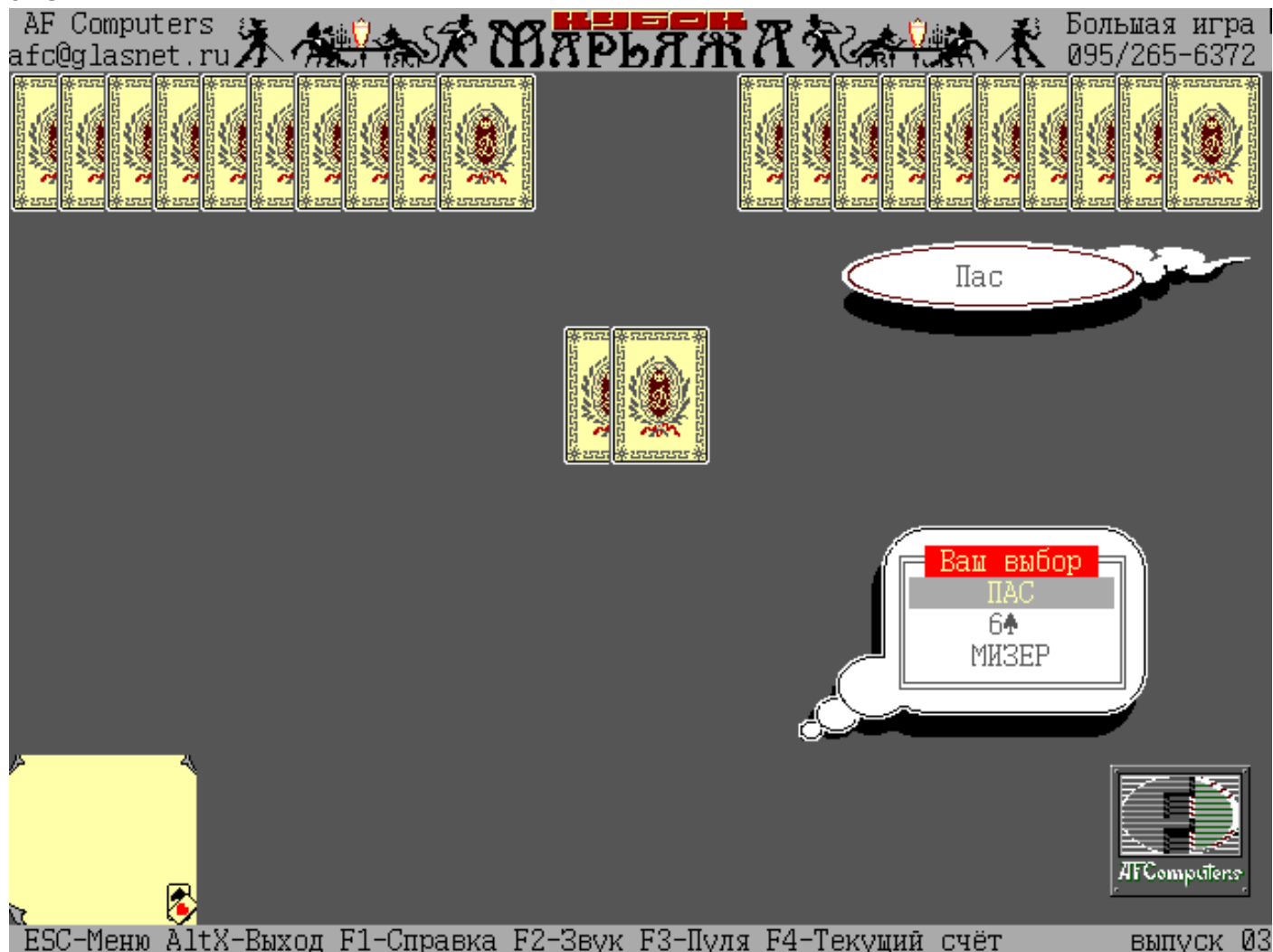


Рис. 8.21: Все карты кроме карт игрока

Видны все карты, кроме карт игрока. Видимо, эта функция рисует карты игрока. Я переименовываю её в IDA в `draw_players_cards()`.

Четвертая ф-ция, вызывающая `draw_cards()`, находится по адресу `seg008:16B3`, и когда я её "блокирую", я вижу в игре такое:

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"

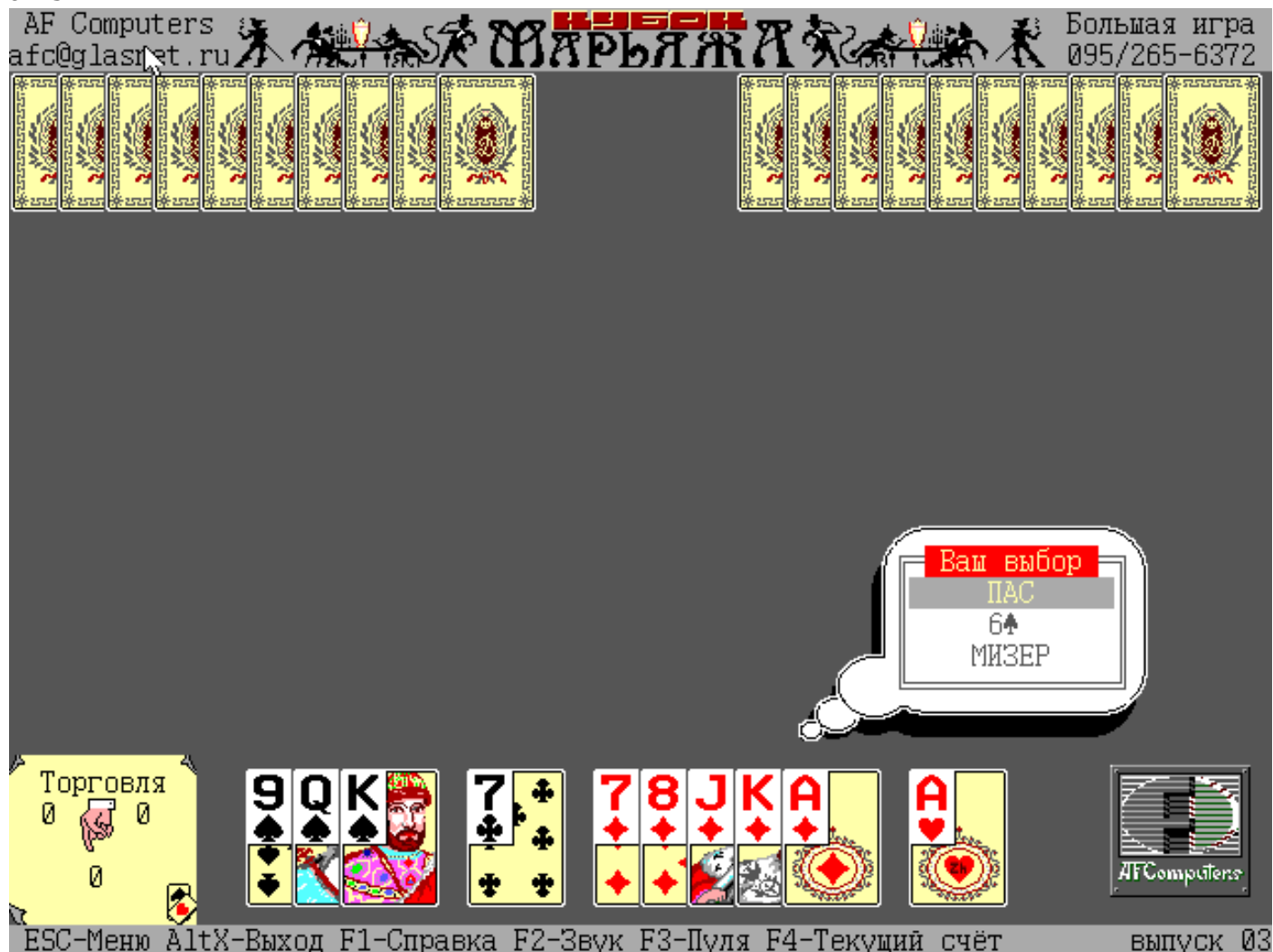


Рис. 8.22: "Прикупа" нет

Все карты есть, кроме "прикупа". Более того, эта ф-ция вызывает только `draw_cards()`, и только 2 раза. Видимо эта ф-ция и отображает карты "прикупа". Будем рассматривать её внимательнее.

```

seg008:16B3 draw_prikup      proc far                ; CODE XREF: seg010:00B0
seg008:16B3                                     ; sub_15098+6
seg008:16B3
seg008:16B3 var_E           = word ptr -0Eh
seg008:16B3 var_C           = word ptr -0Ch
seg008:16B3 arg_0           = byte ptr 6
seg008:16B3
seg008:16B3               enter    0Eh, 0
seg008:16B7               mov     al, byte_2C0EA
seg008:16BA               xor     ah, ah
seg008:16BC               imul    ax, 23h
seg008:16BF               mov     [bp+var_C], ax
seg008:16C2               mov     al, byte_2C0EB
seg008:16C5               xor     ah, ah
seg008:16C7               imul    ax, 0Ah
seg008:16CA               mov     [bp+var_E], ax
seg008:16CD               cmp     [bp+arg_0], 0
seg008:16D1               jnz     short loc_1334A
seg008:16D3               cmp     byte_2BB08, 0
seg008:16D8               jz      short loc_13356
seg008:16DA
seg008:16DA loc_1334A:                ; CODE XREF: draw_prikup+1E
seg008:16DA               mov     al, byte ptr word_32084
seg008:16DD               mov     byte_293AD, al
seg008:16E0               mov     al, byte ptr word_32086
seg008:16E3               mov     byte_293AC, al
seg008:16E6

```

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"

```

seg008:16E6 loc_13356:                                ; CODE XREF: draw_prikup+25
seg008:16E6                mov     al, byte_293AC
seg008:16E9                xor     ah, ah
seg008:16EB                push    ax
seg008:16EC                mov     al, byte_293AD
seg008:16EF                xor     ah, ah
seg008:16F1                push    ax
seg008:16F2                push    [bp+var_C]
seg008:16F5                push    [bp+var_E]
seg008:16F8                cmp     [bp+arg_0], 0
seg008:16FC                jnz     short loc_13379
seg008:16FE                cmp     byte_2BB08, 0
seg008:1703                jnz     short loc_13379
seg008:1705                mov     al, 0
seg008:1707                jmp     short loc_1337B
seg008:1709 ; -----
seg008:1709 loc_13379:                                ; CODE XREF: draw_prikup+49
seg008:1709                ; draw_prikup+50
seg008:1709                mov     al, 1
seg008:170B loc_1337B:                                ; CODE XREF: draw_prikup+54
seg008:170B                push    ax
seg008:170C                push    cs
seg008:170D                call    near ptr draw_card
seg008:1710                mov     al, byte_2C0EA
seg008:1713                xor     ah, ah
seg008:1715                mov     si, ax
seg008:1717                shl     ax, 1
seg008:1719                add     ax, si
seg008:171B                add     ax, [bp+var_C]
seg008:171E                mov     [bp+var_C], ax
seg008:1721                cmp     [bp+arg_0], 0
seg008:1725                jnz     short loc_1339E
seg008:1727                cmp     byte_2BB08, 0
seg008:172C                jz      short loc_133AA
seg008:172E loc_1339E:                                ; CODE XREF: draw_prikup+72
seg008:172E                mov     al, byte ptr word_32088
seg008:1731                mov     byte_293AD, al
seg008:1734                mov     al, byte ptr word_3208A
seg008:1737                mov     byte_293AC, al
seg008:173A loc_133AA:                                ; CODE XREF: draw_prikup+79
seg008:173A                mov     al, byte_293AC
seg008:173D                xor     ah, ah
seg008:173F                push    ax
seg008:1740                mov     al, byte_293AD
seg008:1743                xor     ah, ah
seg008:1745                push    ax
seg008:1746                push    [bp+var_C]
seg008:1749                push    [bp+var_E]
seg008:174C                cmp     [bp+arg_0], 0
seg008:1750                jnz     short loc_133CD
seg008:1752                cmp     byte_2BB08, 0
seg008:1757                jnz     short loc_133CD
seg008:1759                mov     al, 0
seg008:175B                jmp     short loc_133CF
seg008:175D ; -----
seg008:175D loc_133CD:                                ; CODE XREF: draw_prikup+9D
seg008:175D                ; draw_prikup+A4
seg008:175D                mov     al, 1
seg008:175F loc_133CF:                                ; CODE XREF: draw_prikup+A8
seg008:175F                push    ax
seg008:1760                push    cs
seg008:1761                call    near ptr draw_card ; prikup #2
seg008:1764                leave
seg008:1765                retf     2

```

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"

```
seg008:1765 draw_prikup    endp
```

Интересно посмотреть, как именно вызывается draw_prikup(). У нее только один аргумент.

Иногда она вызывается с аргументом 1:

```
...
seg010:084C                push    1
seg010:084E                call   draw_prikup
...
```

А иногда с аргументом 0, причем вот в таком контексте, где уже есть другая знакомая функция:

```
seg010:0067                push    1
seg010:0069                mov     al, byte_31F41
seg010:006C                push    ax
seg010:006D                call   sub_12FDC
seg010:0072                push    1
seg010:0074                mov     al, byte_31F41
seg010:0077                push    ax
seg010:0078                call   draw_players_cards
seg010:007D                push    2
seg010:007F                mov     al, byte_31F42
seg010:0082                push    ax
seg010:0083                call   sub_12FDC
seg010:0088                push    2
seg010:008A                mov     al, byte_31F42
seg010:008D                push    ax
seg010:008E                call   draw_players_cards
seg010:0093                push    3
seg010:0095                mov     al, byte_31F43
seg010:0098                push    ax
seg010:0099                call   sub_12FDC
seg010:009E                push    3
seg010:00A0                mov     al, byte_31F43
seg010:00A3                push    ax
seg010:00A4                call   draw_players_cards
seg010:00A9                call   sub_1257A
seg010:00AE                push    0
seg010:00B0                call   draw_prikup
seg010:00B5                mov     byte_2BB95, 0
```

Так что единственный аргумент у draw_prikup() может быть или 0 или 1, т.е., это, возможно, булевый тип. На что он влияет внутри самой ф-ции? При ближайшем рассмотрении видно, что входящий 0 или 1 передается в draw_card(), т.е., у последней тоже есть булевый аргумент. Помимо всего прочего, если передается 1, то по адресам seg008:16DA и seg008:172E копируются несколько байт из одной группы глобальных переменных в другую.

Эксперимент: здесь 4 раза сравнивается единственный аргумент с 0 и далее следует JNZ. Что если сравнение будет происходить с 1, и, таким образом, работа функции draw_prikup() будет обратной? Патчим и запускаем:

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"



Рис. 8.23: "Прикуп" открыт

"Прикуп" открыт, но когда я делаю "заказ", и, по логике вещей, "прикуп" теперь должен стать открытым, он наоборот становится закрытым:

8.13. "ПРИКУП" В ИГРЕ "МАРЬЯЖ"



Рис. 8.24: "Прикуп" закрыт

Всё ясно: если аргумент `draw_prikup()` нулевой, то карты рисуются рубашкой вверх, если 1, то открытые. Этот же аргумент передается в `draw_card()` — эта ф-ция может рисовать и открытые и закрытые карты.

Пропатчить "Марьяж" теперь легко, достаточно исправить все условные переходы так, как будто бы в ф-цию всегда приходит 1 в аргументе и тогда "прикуп" всегда будет открыт.

Но что за байты копируются в `seg008:16DA` и `seg008:172E`? Я попробовал забить инструкции копирования `MOV NOP`-ами — "прикуп" вообще перестал отображаться.

Тогда я сделал так, чтобы всегда записывалась 1:

```

...
00004B5A: B001          mov     al,1
00004B5C: 90            nop
00004B5D: A26D08       mov     [0086D],al
00004B60: B001          mov     al,1
00004B62: 90            nop
00004B63: A26C08       mov     [0086C],al
...

```

Тогда "прикуп" отображается как два пиковых туза. А если первый байт — 2, а второй — 1, получается трефовый туз. Видимо так и кодируется масть карты, а затем и сама карта. А `draw_card()` затем считывает эту информацию из пары глобальных переменных. А копируется она тоже из глобальных переменных, где собственно и находится состояние карт у игроков и в прикупе после случайной тасовки. Но нельзя забывать, что если мы сделаем так, что в "прикупе" всегда будет 2 пиковых туза, это будет только на экране так отображаться, а в памяти состояние карт останется таким же, как и после тасовки.

8.14. ДРУГИЕ ПРИМЕРЫ

Всё понятно: автор решил сделать одну ф-цию для отрисовки и закрытого и открытого прикупа, поэтому нам, можно сказать, повезло. Могло быть труднее: в самом начале рисовались бы просто две рубашки карт, а открытый прикуп только потом.

Я также пробовал сделать шутку-пранк: во время торгов одна карта "прикупа" открыта, а вторая закрыта, а после "заказа", наоборот, первая закрыта, а вторая открывается. В качестве упражнения, вы можете попробовать сделать так.

Еще кое-что: чтобы сделать прикуп открытым, ведь можно же найти место где вызывается `draw_prikup()` и поменять 0 на 1. Можно, только это место не в головной `marriage.exe`, а в `marriage.000`, а это DOS-овский оверлей (начинается с сигнатуры "FBOV").

В качестве упражнения, можно попробовать подсматривать состояние всех карт, и у обоих игроков. Для этого нужно отладчиком смотреть состояние глобальной памяти рядом с тем, откуда считываются обе карты прикупа.

Файлы:

оригинальная версия: <http://beginners.re/examples/marriage/original.zip>,

пропатченная мною версия: <http://beginners.re/examples/marriage/patched.zip> (все 4 условных перехода после `cmp [bp+arg_0]`, 0 заменены на `JMP`).

8.13.1. Упражнение

Бытовали слухи, что сама программа жульничает, "подглядывая в карты". Это возможно, если алгоритмы, определяющие лучший ход, будут использовать информацию из карт соперника. Тогда будет видно, что происходят обращения к этим глобальным переменным из этих мест. Либо же этого не будет видно, если эти обращения происходят только из ф-ции генерации случайных карт и ф-ций их отрисовки.

8.14. Другие примеры

Здесь также был пример с Z3 и ручной декомпиляцией. Он (временно) перемещен сюда: http://yurichev.com/tmp/SAT_SMT_DRAFT.pdf.

Глава 9

Примеры разбора закрытых (proprietary) форматов файлов

9.1. Примитивное XOR-шифрование

В русскоязычной литературе также используется термин *гаммирование*.

9.1.1. Norton Guide: простейшее однобайтное XOR-шифрование

Norton Guide¹ был популярен во времена MS-DOS, это была резидентная программа, работающая как гипертекстовый справочник.

Базы данных Norton Guide это файлы с расширением .ng, содержимое которых выглядит как зашифрованное:

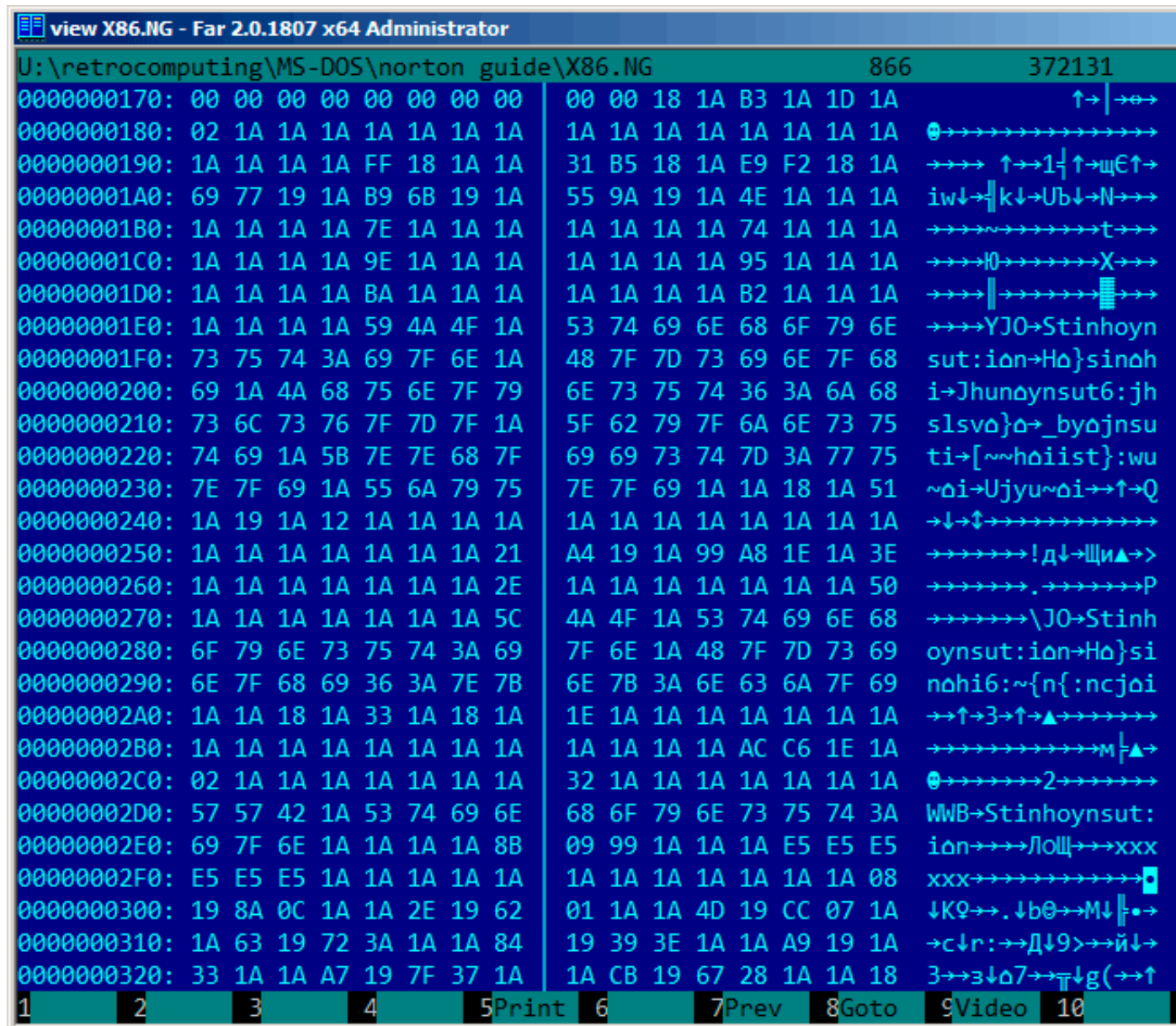


Рис. 9.1: Очень типичный вид

Почему мы думаем, что зашифрованное а не сжатое?

Мы видим, как слишком часто попадаете байт 0x1A (который выглядит как «>»), в сжатом файле такого не было бы никогда.

Во-вторых, мы видим длинные части состоящие только из латинских букв, они выглядят как строки на незнакомом языке.

¹wikipedia

9.1. ПРИМИТИВНОЕ XOR-ШИФРОВАНИЕ

Из-за того, что байт 0x1A слишком часто встречается, мы можем попробовать расшифровать файл, полагая что он зашифрован простейшим XOR-шифрованием.

Применяем XOR с константой 0x1A к каждому байту в Hiew и мы можем видеть знакомые текстовые строки на английском:

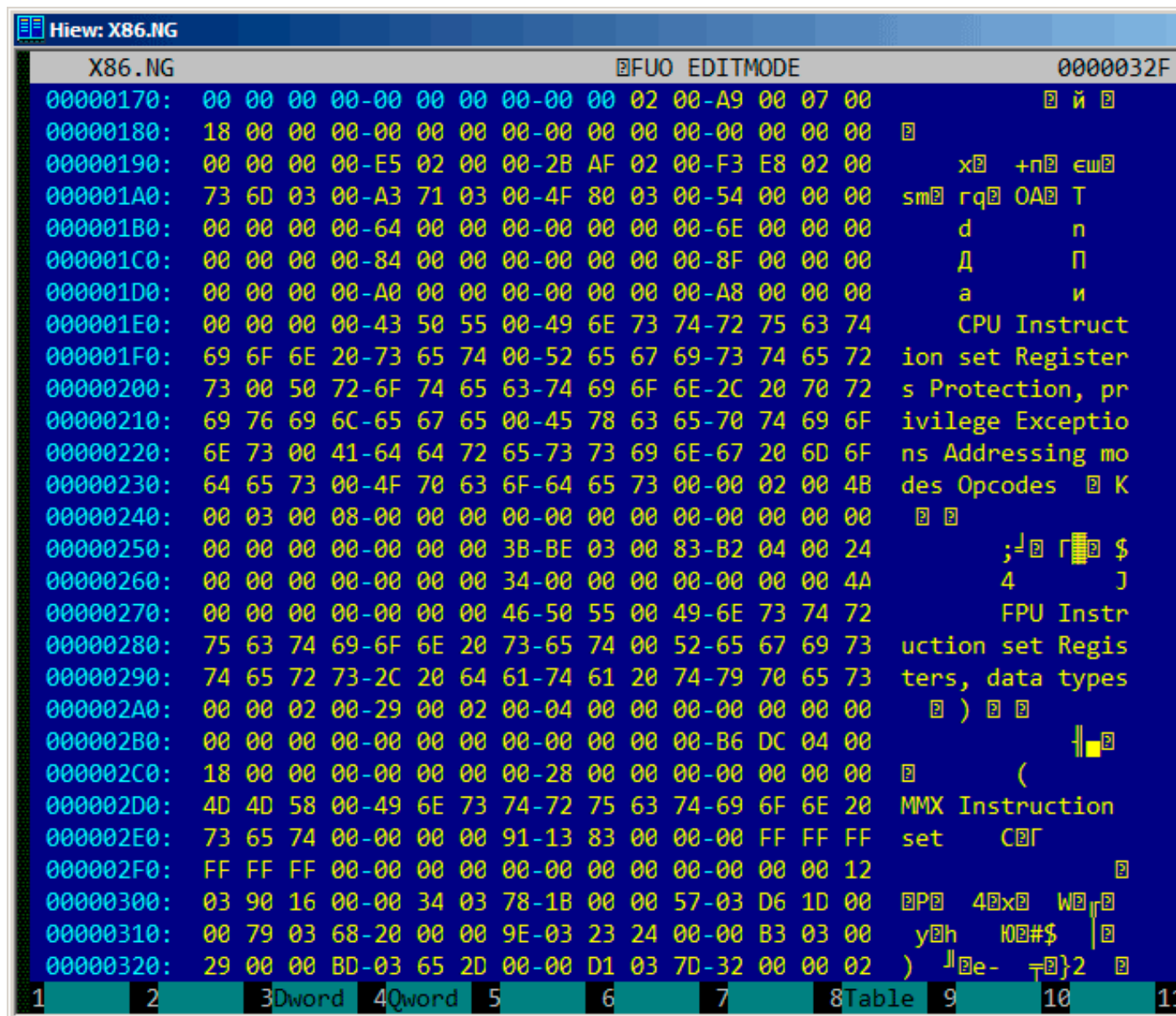


Рис. 9.2: Hiew применение XOR с 0x1A

XOR-шифрование с одним константным байтом это самый простой способ шифрования, который, тем не менее, иногда встречается.

Теперь понятно почему байт 0x1A так часто встречался: потому что в файле очень много нулевых байт и в зашифрованном виде они везде были заменены на 0x1A.

Но эта константа могла быть другой.

В таком случае, можно было бы попробовать перебрать все 256 комбинаций, и посмотреть содержимое «на глаз», а 256 — это совсем немного.

Больше о формате файлов Norton Guide: <http://go.yurichev.com/17317>.

Энтропия

Очень важное свойство подобного примитивного шифрования в том, что информационная энтропия зашифрованного/дешифрованного блока точно такая же. Вот мой анализ в Wolfram Mathematica

Листинг 9.1: Wolfram Mathematica 10

```

In[1]:= input = BinaryReadList["X86.NG"];

In[2]:= Entropy[2, input] // N
Out[2]= 5.62724

In[3]:= decrypted = Map[BitXor[#, 16^^1A] &, input];

In[4]:= Export["X86_decrypted.NG", decrypted, "Binary"];

In[5]:= Entropy[2, decrypted] // N
Out[5]= 5.62724

In[6]:= Entropy[2, ExampleData[{"Text", "ShakespearesSonnets"}]] // N
Out[6]= 4.42366

```

Что мы здесь делаем это загружаем файл, вычисляем его энтропию, дешифруем его, сохраняем, снова вычисляем энтропию (точно такая же!).

Mathematica дает возможность анализировать некоторые хорошо известные англоязычные тексты.

Так что мы вычисляем энтропию сонетов Шейкспира, и она близка к энтропии анализируемого нами файла.

Анализируемый нами файл состоит из предложений на английском языке, которые близки к языку Шейкспира.

И применение побайтового XOR к тексту на английском языке не меняет энтропию.

Хотя, это не будет справедливо когда файл зашифрован при помощи XOR шаблоном длиннее одного байта.

Файл, который мы анализировали, можно скачать здесь: <http://go.yurichev.com/17350>.

Еще кое-что о базе энтропии

Wolfram Mathematica вычисляет энтропию с базой e (основание натурального логарифма), а утилита UNIX *ent*² использует базу 2.

Так что мы явно указываем базу 2 в команде Entropy, чтобы Mathematica давала те же результаты, что и утилита *ent*.

²<http://www.fourmilab.ch/random/>

Например, вот начало файла kernel32.dll (32-битная версия из Windows Server 2008):

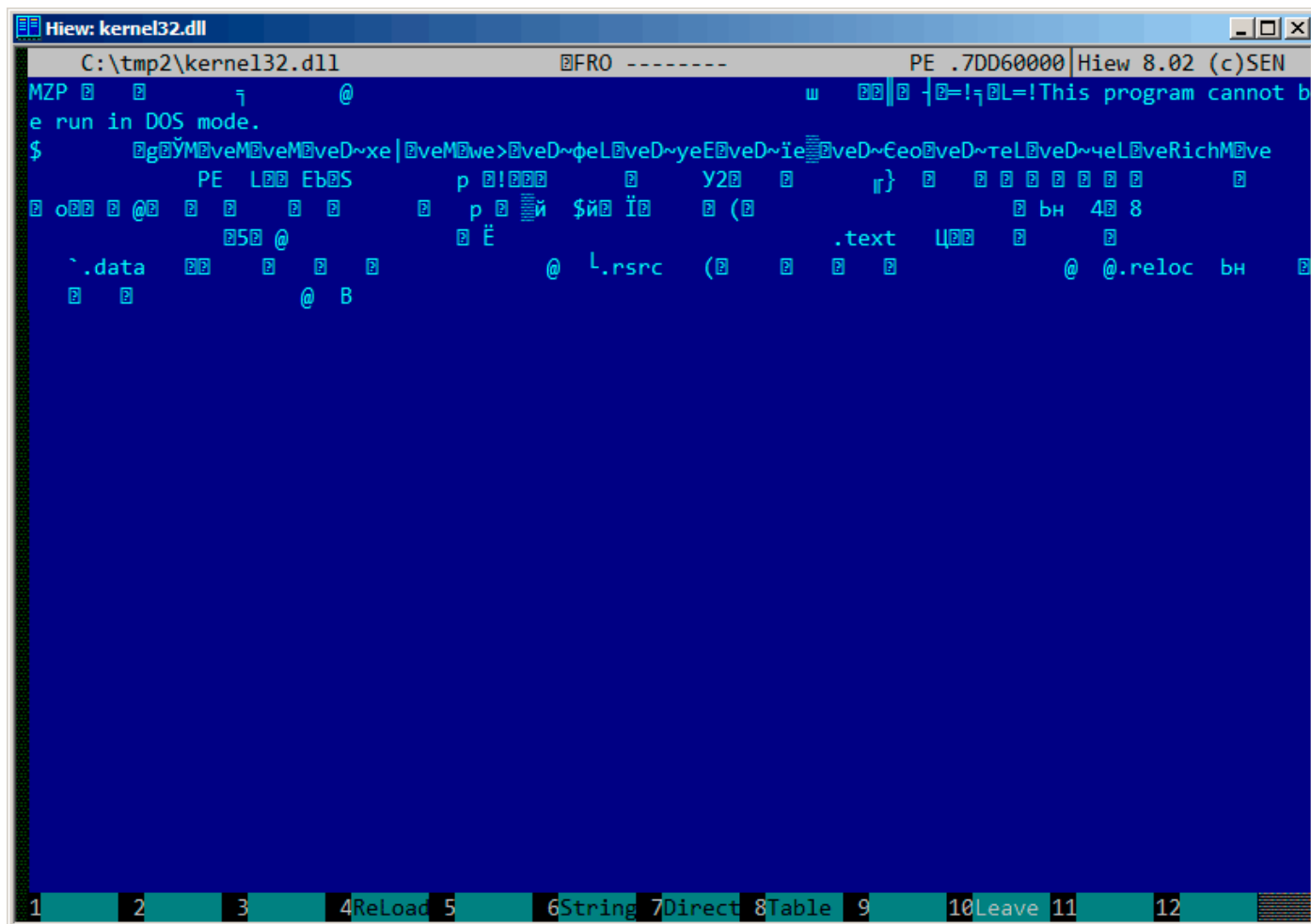


Рис. 9.3: Оригинальный файл

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

Вот он же, но «зашифрованный» 4-байтным ключом:

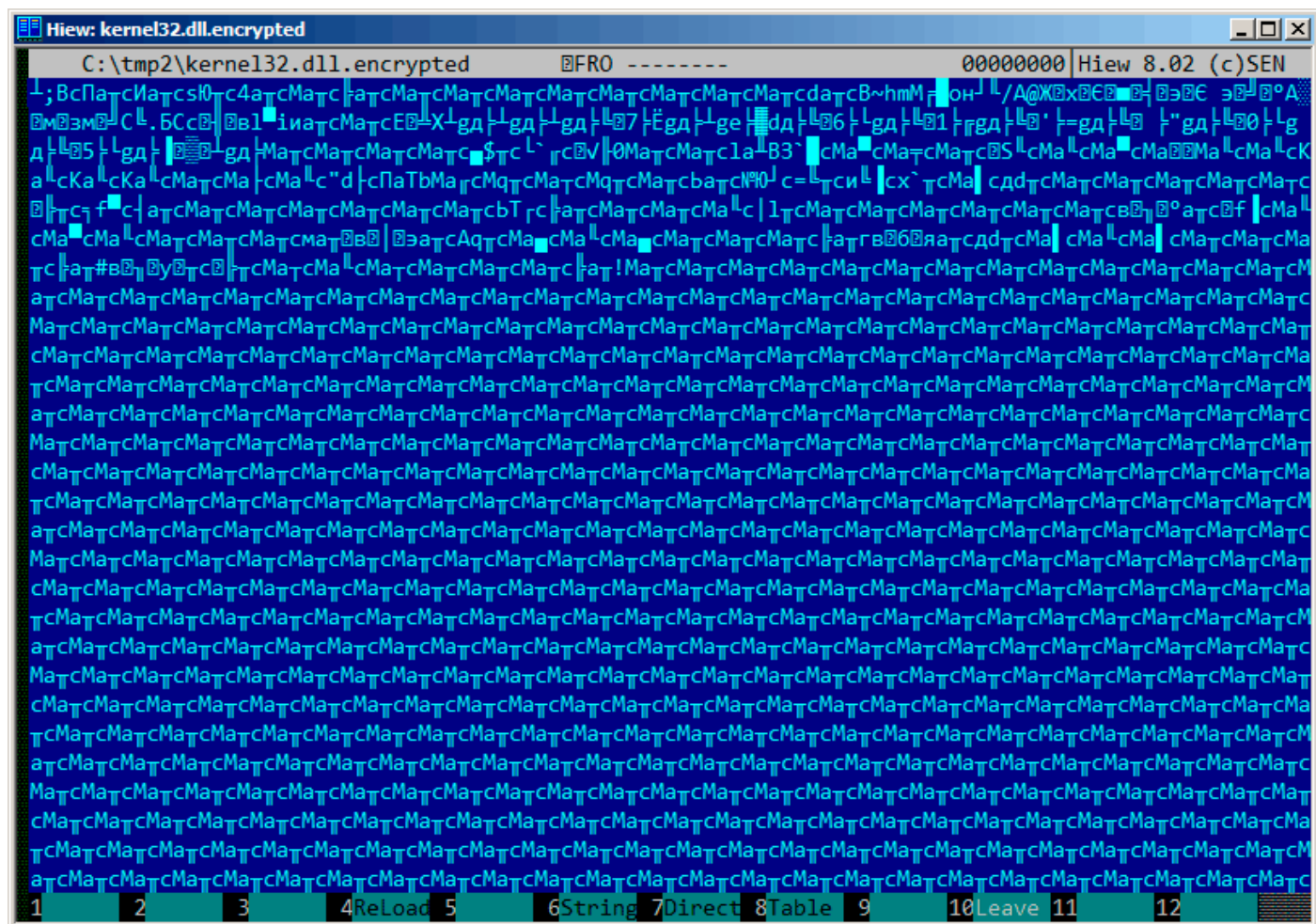


Рис. 9.4: «Зашифрованный» файл

Очень легко увидеть повторяющиеся 4 символа.

Ведь в заголовке PE-файла много длинных нулевых областей, из-за которых ключ становится видным.

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОУ-ШИФРОВАНИЕ

Вот начало РЕ-заголовка в 16-ричном виде:

Hiew: kernel32.dll															
C:\tmp2\kernel32.dll															
FRO -----															
PE .7DD60290															
.7DD600E0:	00	00	00	00-00	00	00	00-50	45	00	00-4C	01	04	00	PE	LE
.7DD600F0:	85	9A	15	53-00	00	00	00-00	00	00	00-E0	00	02	21	EbS	p !
.7DD60100:	0B	01	09	00-00	00	0D	00-00	00	03	00-00	00	00	00	???	?
.7DD60110:	93	32	01	00-00	00	01	00-00	00	0D	00-00	00	D6	7D	Y2	}
.7DD60120:	00	00	01	00-00	00	01	00-06	00	01	00-06	00	01	00	?	?
.7DD60130:	06	00	01	00-00	00	00	00-00	00	11	00-00	00	01	00	?	?
.7DD60140:	AE	05	11	00-03	00	40	01-00	00	04	00-00	10	00	00	o??	@?
.7DD60150:	00	00	10	00-00	10	00	00-00	00	00	00-10	00	00	00	?	?
.7DD60160:	70	FF	0B	00-B1	A9	00	00-24	A9	0C	00-F4	01	00	00	p ?	й \$й ?
.7DD60170:	00	00	0F	00-28	05	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00	?	(?
.7DD60180:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	10	00-9C	AD	00	00	?	бн
.7DD60190:	34	07	0D	00-38	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00	4?	8
.7DD601A0:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00		
.7DD601B0:	10	35	08	00-40	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00	???	@
.7DD601C0:	00	00	01	00-F0	0D	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00	?	?
.7DD601D0:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00		
.7DD601E0:	2E	74	65	78-74	00	00	00-96	07	0C	00-00	00	01	00	.text	???
.7DD601F0:	00	00	0D	00-00	00	01	00-00	00	00	00-00	00	00	00	?	
.7DD60200:	00	00	00	00-20	00	00	60-2E	64	61	74-61	00	00	00		.data
.7DD60210:	0C	10	00	00-00	00	0E	00-00	00	01	00-00	00	0E	00	??	?
.7DD60220:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-40	00	00	C0		@ L
.7DD60230:	2E	72	73	72-63	00	00	00-28	05	00	00-00	00	0F	00	.rsrc	(?
.7DD60240:	00	00	01	00-00	00	0F	00-00	00	00	00-00	00	00	00	?	?
.7DD60250:	00	00	00	00-40	00	00	40-2E	72	65	6C-6F	63	00	00	@	@.reloc
.7DD60260:	9C	AD	00	00-00	00	10	00-00	00	01	00-00	00	10	00	бн	?
.7DD60270:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-40	00	00	42		@ B
.7DD60280:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00		
.7DD60290:	00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00-00	00	00	00		
1Global 2FilBlk 3CryBlk 4ReLoad 5 6String 7Direct 8Table 9 10Leave 11															

Рис. 9.5: РЕ-заголовок

И вот он же, «зашифрованный»:

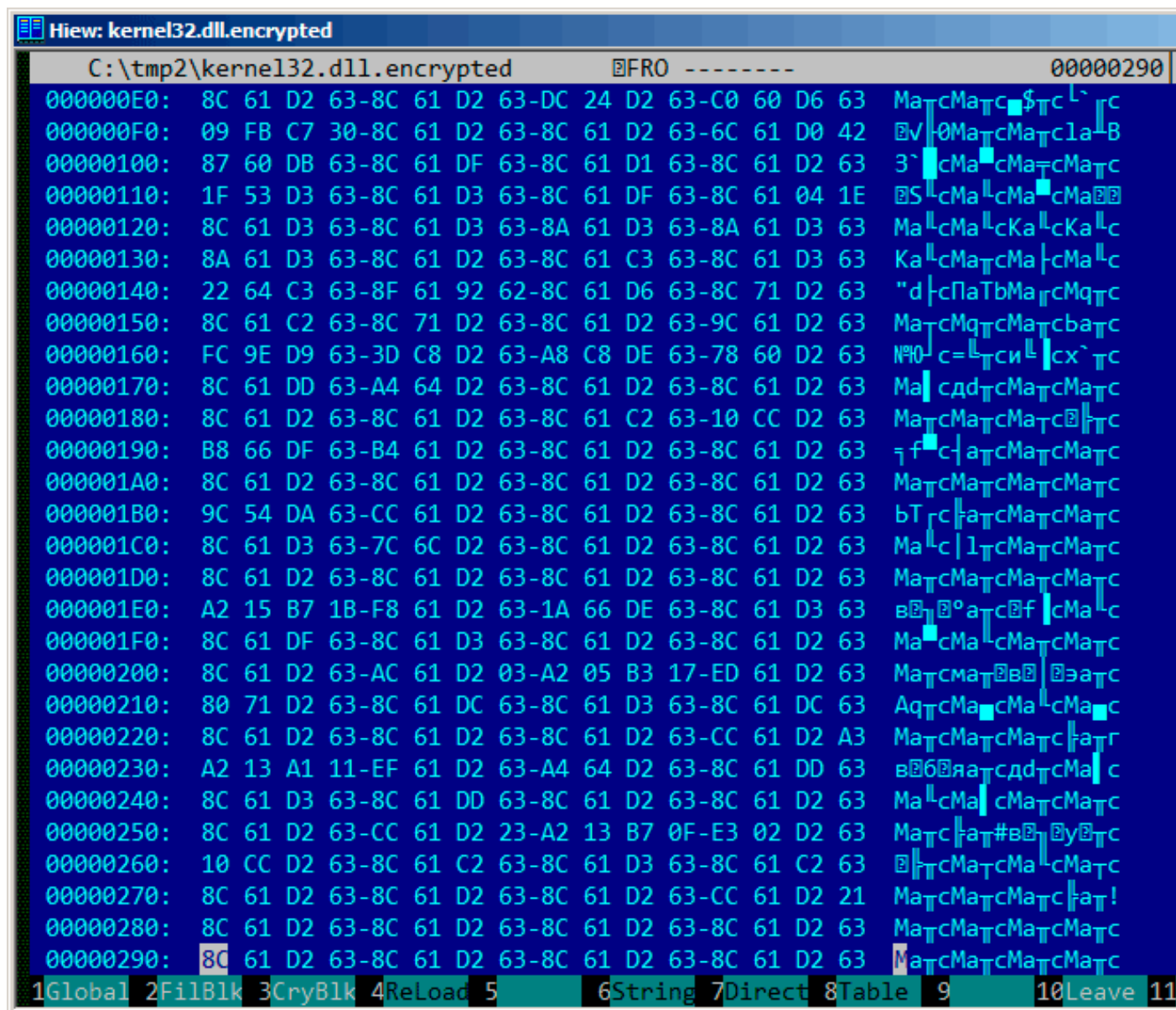


Рис. 9.6: «Зашифрованный» PE-заголовок

Легко увидеть визуально, что ключ это следующие 4 байта: 8C 61 D2 63. Используя эту информацию, довольно легко расшифровать весь файл.

Таким образом, важно помнить эти свойства PE-файлов: 1) в PE-заголовке много нулевых областей; 2) все PE-секции дополняются нулями до границы страницы (4096 байт), так что после всех секций обычно имеются длинные нулевые области.

Некоторые другие форматы файлов могут также иметь длинные нулевые области.

Это очень типично для файлов, используемых научным и инженерным ПО.

Для тех, кто самостоятельно хочет изучить эти файлы, то их можно скачать здесь:

<http://go.yurichev.com/17352>.

Упражнение

- <http://challenges.re/50>

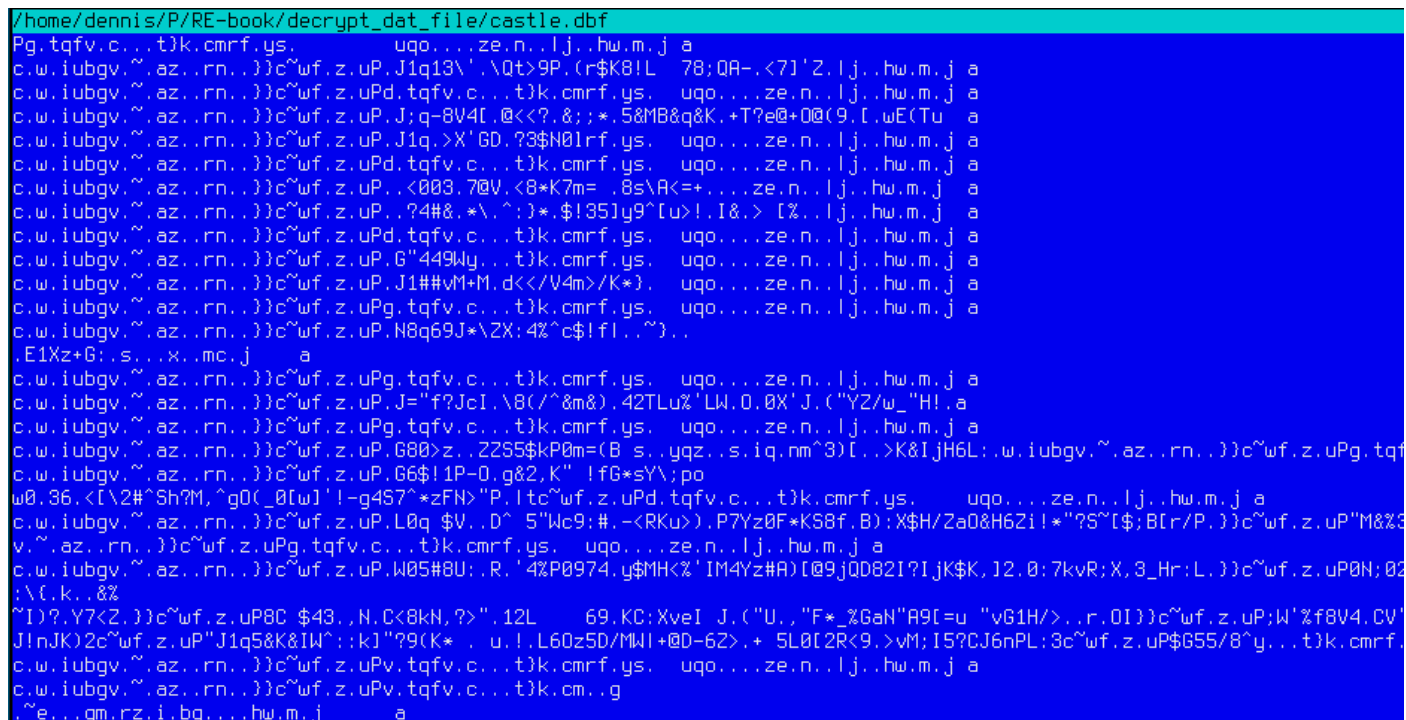
9.1.3. Простое шифрование используя XOR-маску

Я нашел одну старую игру в стиле interactive fiction в архиве *if-archive*³:

```
The New Castle v3.5 – Text/Adventure Game
in the style of the original Infocom (tm)
type games, Zork, Colossal Cave (Adventure),
etc. Can you solve the mystery of the
abandoned castle?
Shareware from Software Customization.
Software Customization [ASP] Version 3.5 Feb. 2000
```

Можно скачать здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/ff/XOR/mask_1/files/newcastle.tgz.

Там внутри есть файл (с названием *castle.dbf*), который явно зашифрован, но не настоящим крипто-алгоритмом, и он сжат, это что-то куда проще. Я бы даже не стал измерять уровень энтропии (9.2 (стр. 930)) этого файла, потому что я итак уверен, что он низкий. Вот как он выглядит в Midnight Commander:



```
/home/dennis/P/RE-book/decrypt_dat_file/castle.dbf
Pg.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.      uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.J1q13'\.Qt>9P.(r$K8!L 78;QA-.<7]'Z.|j..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPd.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.J;q-8V4I.@<<?.&;*.5&MB&q&K,+T?e@+0@9.[.wE(Tu a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.J1q.>X'6D.?3$N0!rf.us.    uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPd.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.<003.70V.<8*K7m=.8s\A<+...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.?4#&.*\^;)*.$!35]y9^[u]!.I&.> [%..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPd.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.G"449Wj...t)k.cmr.f.us.   uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.J1##vM+M.d<</V4m>/K*).   uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPg.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.N8q69J*ZX:4%^c$!f!..~)...
.E1Xz+G;.s...x..mc.j      a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPg.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.J="f?JcI.\8(/^&m&).42TLu%'LW.0.0X'J.("Y2/w_"H!.a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPg.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.680>z..22S5$Kp0m=(B.s..yqz;.s.iq.nm^3)[...>K&IjH6L:.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPg.tq
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.G6$!1P-0.g&2,K" !fG*sY\;po
u0.36.<[\2#^Sh?M.^g0C_0[u]'!-g4S7^*zFN>'P.ltc~wf.z.uPd.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.    uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.L0q $V..D^ 5"Wc9;#.-<RKu>).P7Yz0F*Ks8f.B):X$H/Za0&H6Zi!*"?S~[;$;B(r/P.))c~wf.z.uP"M&X3
v..az..rn..))c~wf.z.uPg.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.    uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uP.W05#8U;.R.'4%P0974.y$MH<%'IM4Yz#A)[@9j0D82I?IjK$K,12.0:7kvR;X,3_Hr:L.))c~wf.z.uP0N;02
;\f.k..&z
~I)?..Y7<Z.))c~wf.z.uP8C $43..N.C<8kN,?>".12L      69.KC:XveI J.("U.. "F*_%GaN"A9[=u "vG1H/>..r.OI))c~wf.z.uP;W'%'f8V4.CV'
J!nJK)2c~wf.z.uP"J1q5&K&IW^::kI"99(K* .u.!.L60z5D/MWl+@0-6Z)+.5L0[2R<9.>vM;I5?CJ6nPL:3c~wf.z.uP$G55/8^y...t)k.cmr.f.
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPv.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
c.w.iubgv.~.az..rn..))c~wf.z.uPv.tqfv.c...t)k.cmr.f.us.  uqo...ze.n..lj..hw.m.j a
~e...qm.rz.i.bq...hw.m.j      a
```

Рис. 9.7: Зашифрованный файл в Midnight Commander

Зашифрованный файл можно скачать здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/ff/XOR/mask_1/files/castle.dbf.bz2.

Можно ли расшифровать его без доступа к программе, используя просто этот файл?

Тут явно просматривается повторяющаяся строка. Если использовалось простое шифрование с XOR-маской, такие повторяющиеся строки это явное свидетельство, потому что, вероятно, тут были длинные лакуны с нулевыми байтами, которые, в свою очередь, присутствуют во многих исполняемых файлах, и в остальных бинарных файлах.

Вот дам начала этого файла используя утилиту *xxd* из UNIX:

```
...
0000030: 09 61 0d 63 0f 77 14 69 75 62 67 76 01 7e 1d 61 .a.c.w.iubgv.~.a
0000040: 7a 11 0f 72 6e 03 05 7d 7d 63 7e 77 66 1e 7a 02 z..rn..))c~wf.z.
0000050: 75 50 02 4a 31 71 31 33 5c 27 08 5c 51 74 3e 39 uP.J1q13'\.Qt>9
0000060: 50 2e 28 72 24 4b 38 21 4c 09 37 38 3b 51 41 2d P.(r$K8!L.78;QA-
0000070: 1c 3c 37 5d 27 5a 1c 7c 6a 10 14 68 77 08 6d 1a .<7]'Z.|j..hw.m.
```

³<http://www.ifarchive.org/>

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

```
0000080: 6a 09 61 0d 63 0f 77 14 69 75 62 67 76 01 7e 1d j.a.c.w.iubgv.~.
0000090: 61 7a 11 0f 72 6e 03 05 7d 7d 63 7e 77 66 1e 7a az..rn..}}c~wf.z
00000a0: 02 75 50 64 02 74 71 66 76 19 63 08 13 17 74 7d .uPd.tqfv.c...t}
00000b0: 6b 19 63 6d 72 66 0e 79 73 1f 09 75 71 6f 05 04 k.cmrf.ys..uqo..
00000c0: 7f 1c 7a 65 08 6e 0e 12 7c 6a 10 14 68 77 08 6d ..ze.n..|j..hw.m

00000d0: 1a 6a 09 61 0d 63 0f 77 14 69 75 62 67 76 01 7e .j.a.c.w.iubgv.~
00000e0: 1d 61 7a 11 0f 72 6e 03 05 7d 7d 63 7e 77 66 1e .az..rn..}}c~wf.
00000f0: 7a 02 75 50 01 4a 3b 71 2d 38 56 34 5b 13 40 3c z.uP.J;q-8V4[.@<
0000100: 3c 3f 19 26 3b 3b 2a 0e 35 26 4d 42 26 71 26 4b <?.&;*.5&MB&q&K
0000110: 04 2b 54 3f 65 40 2b 4f 40 28 39 10 5b 2e 77 45 .+T?e@+0@(9.[.wE

0000120: 28 54 75 09 61 0d 63 0f 77 14 69 75 62 67 76 01 (Tu.a.c.w.iubgv.
0000130: 7e 1d 61 7a 11 0f 72 6e 03 05 7d 7d 63 7e 77 66 ~.az..rn..}}c~wf
0000140: 1e 7a 02 75 50 02 4a 31 71 15 3e 58 27 47 44 17 .z.uP.Jlq.>X'GD.
0000150: 3f 33 24 4e 30 6c 72 66 0e 79 73 1f 09 75 71 6f ?3$N0lrf.ys..uqo
0000160: 05 04 7f 1c 7a 65 08 6e 0e 12 7c 6a 10 14 68 77 ....ze.n..|j..hw
```

...

Давайте держаться за повторяющуюся строку `iubgv`. Глядя на этот дамп, мы можем легко увидеть, что период повторений этой строки это `0x51` или 81. Вероятно, 81 это длина блока? Длина файла 1658961, и она может быть поделена на 81 без остатка (и тогда там 20481 блоков).

Теперь я буду использовать Mathematica для анализа, есть ли тут повторяющиеся 81-байтные блоки в файле? Я разделю входной файл на 81-байтные блоки и затем использую ф-цию `Tally[]`⁴ которая просто считает, сколько раз каждый элемент встретился во входном списке. Вывод `Tally` не отсортирован, так что я также добавлю ф-цию `Sort[]` для сортировки его по кол-ву вхождений в нисходящем порядке.

```
input = BinaryReadList["/home/dennis/.../castle.dbf"];

blocks = Partition[input, 81];

stat = Sort[Tally[blocks], #1[[2]] > #2[[2]] &]
```

И вот вывод:

```
{{{80, 103, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116, 125, 107,
  25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113, 111, 5, 4,
  127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20, 104, 119, 8,
  109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118,
  1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126,
  119, 102, 30, 122, 2, 117}}, 1739},
{{80, 100, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116,
  125, 107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113,
  111, 5, 4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20,
  104, 119, 8, 109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117,
  98, 103, 118, 1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125,
  125, 99, 126, 119, 102, 30, 122, 2, 117}}, 1422},
{{80, 101, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116,
  125, 107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113,
  111, 5, 4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20,
  104, 119, 8, 109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117,
  98, 103, 118, 1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125,
  125, 99, 126, 119, 102, 30, 122, 2, 117}}, 1012},
{{80, 120, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116,
  125, 107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113,
  111, 5, 4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20,
  104, 119, 8, 109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117,
  98, 103, 118, 1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125,
  125, 99, 126, 119, 102, 30, 122, 2, 117}}, 377},

...

{{80, 2, 74, 49, 113, 21, 62, 88, 39, 71, 68, 23, 63, 51, 36, 78, 48,
  108, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113, 111, 5, 4, 127, 28,
```

⁴<https://reference.wolfram.com/language/ref/Tally.html>

9.1. ПРИМИТИВНОЕ XOR-ШИФРОВАНИЕ

```
122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20, 104, 119, 8, 109, 26,
106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, 1, 126,
29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, 102,
30, 122, 2, 117}, 1},
{{80, 1, 74, 59, 113, 45, 56, 86, 52, 91, 19, 64, 60, 60, 63,
25, 38, 59, 59, 42, 14, 53, 38, 77, 66, 38, 113, 38, 75, 4, 43, 84,
63, 101, 64, 43, 79, 64, 40, 57, 16, 91, 46, 119, 69, 40, 84, 117,
9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, 1, 126, 29,
97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, 102, 30,
122, 2, 117}, 1},
{{80, 2, 74, 49, 113, 49, 51, 92, 39, 8, 92, 81, 116, 62, 57,
80, 46, 40, 114, 36, 75, 56, 33, 76, 9, 55, 56, 59, 81, 65, 45, 28,
60, 55, 93, 39, 90, 28, 124, 106, 16, 20, 104, 119, 8, 109, 26,
106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, 1, 126,
29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, 102,
30, 122, 2, 117}, 1}}
```

Вывод Tally это список пар, каждая пара это 81-байтный блок и количество раз, сколько он встретился в файле. Мы видим, что наиболее часто встречающийся блок это первый, он встретился 1739 раз. Второй встретился 1422 раза. Есть и другие: 1012 раза, 377 раз, итд. 81-байтные блоки, встреченные лишь один раз, находятся в конце вывода.

Попробуем сравнить эти блоки. Первый и второй. Есть ли в Mathematica ф-ция для сравнения списков/массивов? Наверняка есть, но в педагогических целях, я буду использовать операцию XOR для сравнения. Действительно: если байты во входных массивах равны друг другу, результат операции XOR это 0. Если не равны, результат будет ненулевой.

Сравним первый блок (встречается 1739 раз) и второй (встречается 1422 раз):

```
In[ ]:= BitXor[stat[[1]][[1]], stat[[2]][[1]]]
Out[ ]= {0, 3, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}
```

Они отличаются только вторым байтом.

Сравним второй блок (встречается 1422 раза) и третий (встречается 1012 раз):

```
In[ ]:= BitXor[stat[[2]][[1]], stat[[3]][[1]]]
Out[ ]= {0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0}
```

Они тоже отличаются только вторым байтом.

Так или иначе, попробуем использовать самый встречающийся блок как XOR-ключ и попробуем расшифровать первые 4 81-байтных блока в файле:

```
In[ ]:= key = stat[[1]][[1]]
Out[ ]= {80, 103, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116, \
125, 107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113, 111, \
5, 4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20, 104, 119, \
8, 109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, \
1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, \
102, 30, 122, 2, 117}

In[ ]:= ToASCII[val_] := If[val == 0, " ", FromCharacterCode[val, "PrintableASCII"]]

In[ ]:= DecryptBlockASCII[blk_] := Map[ToASCII[#] &, BitXor[key, blk]]

In[ ]:= DecryptBlockASCII[blocks[[1]]]
Out[ ]= {" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", \
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", \
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", \
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", \
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", \
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " " }

In[ ]:= DecryptBlockASCII[blocks[[2]]]
```

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

```
Out[] = {" ", "e", "H", "E", " ", "W", "E", "E", "D", " ", "O", "\n",
"F", " ", "C", "R", "I", "M", "E", " ", "B", "E", "A", "R", "S", " ", "\n",
"B", "I", "T", "T", "E", "R", " ", "F", "R", "U", "I", "T", "?", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" "}
```

```
In[] := DecryptBlockASCII[blocks[[3]]]
Out[] = {" ", "?", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" "}
```

```
In[] := DecryptBlockASCII[blocks[[4]]]
Out[] = {" ", "f", "H", "O", " ", "K", "N", "O", "W", "S", " ", "\n",
"W", "H", "A", "T", " ", "E", "V", "I", "L", " ", "L", "U", "R", "K", "\n",
"S", " ", "I", "N", " ", "T", "H", "E", " ", "H", "E", "A", "R", "T", "\n",
"S", " ", "O", "F", " ", "M", "E", "N", "?", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", " ", "\n",
" "}
```

(Я заменил непечатаемые символы на «?».)

Мы видим что первый и третий блоки пустые (или почти пустые), но второй и четвертый имеют ясно различимые английские слова/фразы. Похоже что наше предположение насчет ключа верно (как минимум частично). Это означает, что самый встречающийся 81-байтный блок в файле находится в местах лакун с нулевыми байтами или что-то в этом роде.

Попробуем расшифровать весь файл:

```
DecryptBlock[blk_] := BitXor[key, blk]

decrypted = Map[DecryptBlock[#] &, blocks];

BinaryWrite["/home/dennis/.../tmp", Flatten[decrypted]]

Close["/home/dennis/.../tmp"]
```

```

RE-book/decrypt_dat_file/tmp                                4011/1620K                                0%
.....eHE.WEED.OF
TTER.FRUIT.....
.....fHO.KNOWS.WHAT.EVIL.LURKS.IN.THE.HE
.....eHE.sHADOW.KNOWS.....
.....x.HAVE.THE.HEART.OF.A.CHILD.....
P.IT.IN.A.GLASS.JAR.ON.MY.DESK.....
.....uEVERON.....
.....fHERE.THE.sHADOW.LIES.....
.....pLL.POSITIONING.IS.relative.AND.NOT.absolute.....
.....eHIS.IS.A.KLUDGE.TO.MAKE.THIS.STUPID.THING.WORK.....
.....cELAX
Y.....cLOCK.tICKS.AWAY.....
.....uEBUGGING.pROGRAMS.IS.FUN...s
AD
K.WALLS.....
.....pND.FROM.WITHIN.THE.TOMB.OF.THE.UNDEAD..VAMPIRES.BEGAN.THEIR.FEA
..EORTURED.CRIES.RANG.OUT.....tASTES.GREAT..lESS.FILLING.....
.....bUDDENL
RAITHLIKE.FIGURE.APPEARS.BEFORE.YOU..SEEMING.TO.....WLOAT.IN.THE.AIR...
NFUL.VOICE.HE.SAYS...aLAS..THE.VERY....._ATURE.OF.THE.WORLD.HAS.CHANGED
ON.CANNOT.BE.FOUND...aLL.....\UST.NOW.PASS.AWAY...rAISING.HIS.OAKEN.STA
HE.FADES.INTO.....EHE.SPREADING.DARKNESS...iN.HIS.PLACE.APPEARS.A.TASTEFU
GN.....CEADING.....

```

Рис. 9.8: Расшифрованный файл в Midnight Commander, первая попытка

Выглядит как английские фразы для какой-то игры, но что-то не так. Прежде всего, регистр инвертирован: фразы и некоторые слова начинаются со строчных букв, в то время как остальные буквы заглавные. Также, некоторые фразы начинаются с не тех букв. Посмотрите на самую первую фразу: «eHE WEED OF CRIME BEARS BITTER FRUIT». Что такое «eHE»? Разве не «tHE» тут должно быть? Возможно ли что наш ключ для дешифрования имеет неверный байт в этом месте?

Посмотрим снова на второй блок в файле, на ключ и на результат дешифрования:

```

In[]:= blocks[[2]]
Out[]= {80, 2, 74, 49, 113, 49, 51, 92, 39, 8, 92, 81, 116, 62, \
57, 80, 46, 40, 114, 36, 75, 56, 33, 76, 9, 55, 56, 59, 81, 65, 45, \
28, 60, 55, 93, 39, 90, 28, 124, 106, 16, 20, 104, 119, 8, 109, 26, \
106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, 1, 126, 29, \
97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, 102, 30, \
122, 2, 117}

In[]:= key
Out[]= {80, 103, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116, \
125, 107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113, 111, \
5, 4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20, 104, 119, \
8, 109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118, \
1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119, \
102, 30, 122, 2, 117}

In[]:= BitXor[key, blocks[[2]]]
Out[]= {0, 101, 72, 69, 0, 87, 69, 69, 68, 0, 79, 70, 0, 67, 82, \
73, 77, 69, 0, 66, 69, 65, 82, 83, 0, 66, 73, 84, 84, 69, 82, 0, 70, \
82, 85, 73, 84, 14, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \
0, 0, 0, 0}

```

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

Зашифрованный байт это 2, байт из ключа это 103, $2 \oplus 103 = 101$ и 101 это ASCII-код символа «е». Чему должен равняться этот байт ключа, чтобы ASCII-код был 116 (для символа «t»)? $2 \oplus 116 = 118$, присвоим 118 второму байту в ключе ...

```
key = {80, 118, 2, 116, 113, 102, 118, 25, 99, 8, 19, 23, 116, 125,
       107, 25, 99, 109, 114, 102, 14, 121, 115, 31, 9, 117, 113, 111, 5,
       4, 127, 28, 122, 101, 8, 110, 14, 18, 124, 106, 16, 20, 104, 119, 8,
       109, 26, 106, 9, 97, 13, 99, 15, 119, 20, 105, 117, 98, 103, 118,
       1, 126, 29, 97, 122, 17, 15, 114, 110, 3, 5, 125, 125, 99, 126, 119,
       102, 30, 122, 2, 117}
```

...и снова дешифруем весь файл.

Рис. 9.9: Дешифрованный файл в Midnight Commander, вторая попытка

Ух ты, теперь грамматика корректна, и все фразы начинаются с корректных букв. Но все таки, регистр подозрителен. С чего бы разработчику игры записывать их в такой манере? Может быть наш ключ все еще неправилен?

Изучая таблицу ASCII мы можем заметить что ASCII-коды для букв в верхнем и нижнем регистре отличаются только на один бит (6-й бит, если считать с первого, 0b100000):

Characters in the coded character set ascii.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0x	C-@	C-a	C-b	C-c	C-d	C-e	C-f	C-g	C-h	TAB	C-j	C-k	C-l	RET	C-n	C-o
1x	C-p	C-q	C-r	C-s	C-t	C-u	C-v	C-w	C-x	C-y	C-z	ESC	C-\ [	C-]]	C-^ ^	C-_ _
2x		!	"	#	\$	%	&	'	()	*	+	,	-	.	/
3x	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4x	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5x	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^	_
6x	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7x	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{	|	}	~	DEL

Рис. 9.10: 7-битная таблица ASCII в Emacs

6-й бит, выставленный в нулевом байте, В десятичном виде это будет 32. Но 32 это ASCII-код пробела!

9.1. ПРИМИТИВНОЕ XOR-ШИФРОВАНИЕ

Действительно, можно менять регистр просто применяя XOR к ASCII-коду, с 32 (больше об этом: 3.16.3 (стр. 529)).

Возможно ли, что пустые лакуны в файле это не нулевые байты, а скорее содержащие пробелы? Еще раз модифицируем наш XOR-ключ (я про-XOR-ю каждый байт ключа с 32):

```
(* "32" это скаляр, и "key" это вектор, но это ОК *)

In[]:= key3 = BitXor[32, key]
Out[]:= {112, 86, 34, 84, 81, 70, 86, 57, 67, 40, 51, 55, 84, 93, 75, \
57, 67, 77, 82, 70, 46, 89, 83, 63, 41, 85, 81, 79, 37, 36, 95, 60, \
90, 69, 40, 78, 46, 50, 92, 74, 48, 52, 72, 87, 40, 77, 58, 74, 41, \
65, 45, 67, 47, 87, 52, 73, 85, 66, 71, 86, 33, 94, 61, 65, 90, 49, \
47, 82, 78, 35, 37, 93, 93, 67, 94, 87, 70, 62, 90, 34, 85}

In[]:= DecryptBlock[blk_] := BitXor[key3, blk]
```

И снова дешифруем входной файл:

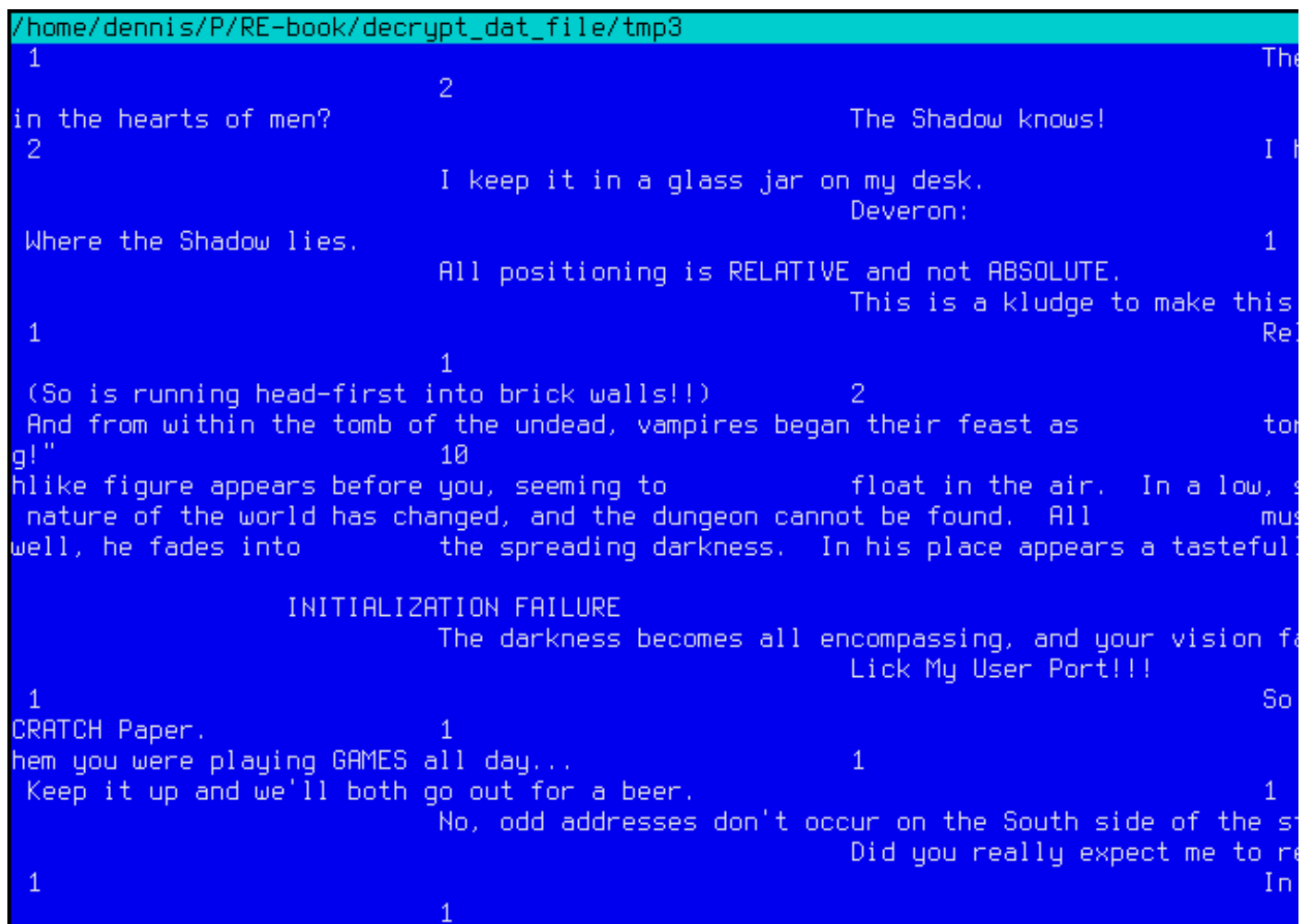


Рис. 9.11: Дешифрованный файл в Midnight Commander, последняя попытка

(Расшифрованный файл доступен здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/ff/XOR/mask_1/files/decrypted.dat.bz2.)

Несомненно, это корректный исходный файл. Да, и мы видим числа в начале каждого блока. Должно быть это и есть источник некорректного XOR-ключа. Как выходит, самый встречающийся 81-байтный блок в файле это блок заполненный пробелами и содержащий символ «1» на месте второго байта. Действительно, как-то так получилось что многие блоки здесь перемежаются с этим блоком. Может быть это что-то вроде выравнивания (padding) для коротких фраз/сообщений? Другой часто встречающийся 81-байтный блок также заполнен пробелами, но с другой цифрой, следовательно, они отличаются только вторым байтом.

9.1. ПРИМИТИВНОЕ XOR-ШИФРОВАНИЕ

Вот и всё! Теперь мы можем написать утилиту для зашифрования файла назад, и, может быть, модифицировать его перед этим

Файл для Mathematica можно скачать здесь: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/ff/XOR/mask_1/files/XOR_mask_1.nb.

Итог: XOR-шифрование не надежно вообще. Вероятно, разработчик игры хотел просто скрыть внутренности игры от игрока, ничего более серьезного. Все же, шифрование вроде этого крайне популярно вследствие его простоты, так что многие реверс инженеры обычно хорошо с этим знакомы.

9.1.4. Простое шифрование используя XOR-маску, второй случай

Нашел еще один зашифрованный файл, который явно зашифрован чем-то простым вроде XOR-шифрования:

/home/dennis/tmp/cipher.txt				0x00000000			
00000000	00	D2 0F 70	1C E7 9E 8D	E9 EC AC 3D	61 5A 15 95	.p.騰	=aZ.
00000010	5C	F5 D3 0D	70 38 E7 94	DF F2 E2 BC	76 34 61 0F	\.p8	v4a.
00000020	98	5D FC D9	01 26 2A FD	82 DF E9 E2	BB 33 61 7B	] .&*	3a{
00000030	14	D9 45 F8	C5 01 3D 20	FD 95 96 EB	E4 BC 7A 61	.E.=	za
00000040	61	1B 8F 54	9D AA 54 20	20 E1 DB 8B	ED EC BC 33	a.T.T	3
00000050	61	7C 15 8D	11 F9 CE 47	22 2A FE 8E	9A EB F7 EF	al..G"*	
00000060	39	22 71 1B	8A 58 FF CE	52 70 38 E7	9E 91 A5 EB	9"q.X Rp8	豈
00000070	AA	76 36 73	09 D9 44 E0	80 40 3C 23	AF 95 96 E2	v6s.D @<#	
00000080	EB	BB 7A 61	65 1B 8A 11	E3 C5 40 24	2A EB F6 F5	zae.. @*\$	
00000090	E4	F7 EF 22	29 77 5A 9B	43 F5 C1 4A	36 2E FC 8F	)wZ C J6.	
000000A0	DF	F1 E2 AD	3A 24 3C 5A	B0 11 E3 D4	4E 3F 2B AF	:\$<Z . N?+	
000000B0	8E	8F EA ED	EF 22 29 77	5A 91 54 F1	D2 55 38 62	)wZ T U8b	
000000C0	FD	8E 98 A5	E2 A1 32 61	62 13 9A 5A	F5 C4 01 25	2ab. Z .%	
000000D0	3F	AF 8F 97	E0 8E C5 25	35 7B 19 92	11 E7 C8 48	? %5(. . H	
000000E0	33	27 AF 94	8A F7 A3 B9	3F 32 7B 0E	96 43 B0 C8	3' ?2(. C	
000000F0	40	34 6F E3	9E 99 F1 A3	AD 33 29 7B	14 9D 11 F8	@4o尾 3){. .	
00000100	C9	4C 70 3B	E7 9E DF EB	EA A8 3E 35	32 18 9C 57	Lp; >52. W	
00000110	FF	D2 44 7E	6F C6 8F DF	F2 E2 BC 76	20 1F 70 9F	D~oð v .p	
00000120	58	FE C5 0D	70 3B E7 92	9C EE A3 BF	3F 24 71 1F	X .p;璠 卩 ?\$q.	
00000130	D9	5E F6 80	56 3F 20 EB	D7 DF E7 F6	A3 34 2E 67	^ V? 4.g	
00000140	09	D4 59 F5	C1 45 35 2B	A3 DB 90 E3	A3 BB 3E 24	. Y E5+ ㄣ ㄨ >\$	
00000150	32	09 96 43	E4 80 56 38	26 EC 93 DF	EC F0 EF 3D	2. C V8& =	
00000160	2F	7D 0D 97	11 F1 D3 2C	5A 2E AF D9	AF E0 ED AE	/). . ,Z. ㄣ	
00000170	38	26 32 16	98 46 E9 C5	53 7E 6D AF	B1 8A F6 F7	8&2. F S~m	
00000180	EF	23 2F 76	1F 8B 11 E4	C8 44 70 27	EA 9A 9B A5	#/v. . Dp'.	
00000190	F4	AE 25 61	73 5A 9B 43	FF C1 45 70	3C E6 97 89	%asZ C Ep<豈	
000001A0	E0	F1 EF 34	20 7C 1E D9	5F F5 C1 53	3C 36 82 F1	4 l. _ S<6	
000001B0	9E	EB A3 A6	38 22 7A 5A	98 52 E2 CF	52 23 61 AF	류 8"zZ R R#a	
000001C0	D9	AB EA A3	85 37 2C 77	09 D9 7C FF	D2 55 39 22	. 7,w. l U9"	
000001D0	EA	89 D3 A5	CE E1 04 6F	51 54 AA 1F	BC 80 47 22	ü .oQT . G"	
000001E0	20	E2 DB 97	EC F0 EF 30	33 7B 1F 97	55 E3 80 4E	03(. U N	
000001F0	36	6F FB 93	9A 88 89 8C	78 02 3C 32	D7 1D B2 80	6o x.<2 .	

Рис. 9.12: Зашифрованный файл в Midnight Commander

Зашифрованный файл можно скачать [здесь](#).

Утилита *ent* в Linux сообщает о ~7.5 бит на байт, и это высокий уровень энтропии (9.2 (стр. 930)), что близко к сжатою или правильно зашифрованному файлу. Но все-таки, мы ясно видим некоторый шаблон, здесь есть блоки длиной в 17 байт, и вы можете увидеть что-то вроде лестницы, сдвигающейся на 1 байт на каждой 16-байтной линии.

Также известно, что исходный текст это текст на английском языке.

9.1. ПРИМИТИВНОЕ XOR-ШИФРОВАНИЕ

Предположим что этот фрагмент текста зашифрован простым XOR-шифрованием с 17-байтным ключом.

Я попробовал поискать повторяющиеся 17-байтные блоки при помощи Mathematica, как я делал это в моем предыдущем примере (9.1.3 (стр. 918)):

Листинг 9.2: Mathematica

```
In[]:=input = BinaryReadList["/home/dennis/tmp/cipher.txt"];
In[]:=blocks = Partition[input, 17];
In[]:=Sort[Tally[blocks], #1[[2]] > #2[[2]] &]

Out[]:={{{248,128,88,63,58,175,159,154,232,226,161,50,97,127,3,217,80},1},
{{226,207,67,60,42,226,219,150,246,163,166,56,97,101,18,144,82},1},
{{228,128,79,49,59,250,137,154,165,236,169,118,53,122,31,217,65},1},
{{252,217,1,39,39,238,143,223,241,235,170,91,75,119,2,152,82},1},
{{244,204,88,112,59,234,151,147,165,238,170,118,49,126,27,144,95},1},
{{241,196,78,112,54,224,142,223,242,236,186,58,37,50,17,144,95},1},
{{176,201,71,112,56,230,143,151,234,246,187,118,44,125,8,156,17},1},
...
{{255,206,82,112,56,231,158,145,165,235,170,118,54,115,9,217,68},1},
{{249,206,71,34,42,254,142,154,235,247,239,57,34,113,27,138,88},1},
{{157,170,84,32,32,225,219,139,237,236,188,51,97,124,21,141,17},1},
{{248,197,1,61,32,253,149,150,235,228,188,122,97,97,27,143,84},1},
{{252,217,1,38,42,253,130,223,233,226,187,51,97,123,20,217,69},1},
{{245,211,13,112,56,231,148,223,242,226,188,118,52,97,15,152,93},1},
{{221,210,15,112,28,231,158,141,233,236,172,61,97,90,21,149,92},1}}
```

Ничего не выходит, каждый 17-байтный блок уникален внутри файла и встречается только один раз. Возможно, здесь нет 17-байтных нулевых лакун (или лакун содержащих пробелы). Это действительно возможно: подобное выравнивание пробелами может и отсутствовать в плотно сверстаном тексте.

Первая идея это попробовать все возможные 17-байтные ключи и найти тот, который после дешифровки приведет к читаемому тексту. Полный перебор брутфорсом это не вариант, потому что здесь 256^{17} возможных ключей ($\sim 10^{40}$), это слишком. Но есть и хорошие новости: кто сказал что нужно тестировать 17-байтный ключ как что-то целое, почему мы не можем тестировать каждый байт ключа отдельно? Это действительно возможно.

И алгоритм такой:

- попробовать все 256 байт для первого байта ключа;
- дешифровать первый байт каждого 17-байтного блока в файле;
- все ли полученные дешифрованные байты печатаемы? вести учет;
- делать это для всех 17 байт ключа.

Я написал такой скрипт на Питоне для проверки этой идеи:

Листинг 9.3: Python script

```
each_nth_byte=[""]*KEY_LEN

content=read_file(sys.argv[1])
# split input by 17-byte chunks:
all_chunks=chunks(content, KEY_LEN)
for c in all_chunks:
    for i in range(KEY_LEN):
        each_nth_byte[i]=each_nth_byte[i] + c[i]

# try each byte of key
for N in range(KEY_LEN):
    print "N=", N
    possible_keys=[]
    for i in range(256):
        tmp_key=chr(i)*len(each_nth_byte[N])
        tmp=xor_strings(tmp_key,each_nth_byte[N])
        # are all characters in tmp[] are printable?
        if is_string_printable(tmp)==False:
```


9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

```
        continue
    possible_keys.append(i)
print possible_keys, "len=", len(possible_keys)
```

(Полная версия исходного кода [здесь](#).)

И вот вывод:

```
N= 0
[144, 145, 151] len= 3
N= 1
[160, 161] len= 2
N= 2
[32, 33, 38] len= 3
N= 3
[80, 81, 87] len= 3
N= 4
[78, 79] len= 2
N= 5
[142, 143] len= 2
N= 6
[250, 251] len= 2
N= 7
[254, 255] len= 2
N= 8
[130, 132, 133] len= 3
N= 9
[130, 131] len= 2
N= 10
[206, 207] len= 2
N= 11
[81, 86, 87] len= 3
N= 12
[64, 65] len= 2
N= 13
[18, 19] len= 2
N= 14
[122, 123] len= 2
N= 15
[248, 249] len= 2
N= 16
[48, 49] len= 2
```

Так что есть 2 или 3 возможных байта для каждого байта 17-байтного ключа. Это намного лучше чем 256 возможных байт для каждого ключа, но все равно слишком. Тут вплоть до одного миллиона возможных ключей:

Листинг 9.4: Mathematica

```
In[]:= 3*2*3*3*2*2*2*2*3*2*2*3*2*2*2*2
Out[]= 995328
```

Можно проверить их все, но затем нам придется проверять визуально, похож ли дешифрованный текст на текст на английском языке.

Также будет учитывать те факты, что мы имеем дело с 1) человеческим языком; 2) английским языком. Человеческие языки имеют выдающиеся статистические особенности. Прежде всего, пунктуация и длины слов. Какая средняя длина слова в английском языке? Просто будем считать пробелы в некоторых хорошо известных текстах на английском используя Mathematica.

Вот текст is «[The Complete Works of William Shakespeare](#)» из библиотеки Гутенберга:

Листинг 9.5: Mathematica

```
In[]:= input = BinaryReadList["/home/dennis/tmp/pg100.txt"];

In[]:= Tally[input]
Out[]= {{239, 1}, {187, 1}, {191, 1}, {84, 39878}, {104,
  218875}, {101, 406157}, {32, 1285884}, {80, 12038}, {114,
  209907}, {111, 282560}, {106, 2788}, {99, 67194}, {116,
  291243}, {71, 11261}, {117, 115225}, {110, 216805}, {98,
```


9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

```
46768}, {103, 57328}, {69, 42703}, {66, 15450}, {107, 29345}, {102,
69103}, {67, 21526}, {109, 95890}, {112, 46849}, {108, 146532}, {87,
16508}, {115, 215605}, {105, 199130}, {97, 245509}, {83,
34082}, {44, 83315}, {121, 85549}, {13, 124787}, {10, 124787}, {119,
73155}, {100, 134216}, {118, 34077}, {46, 78216}, {89, 9128}, {45,
8150}, {76, 23919}, {42, 73}, {79, 33268}, {82, 29040}, {73,
55893}, {72, 18486}, {68, 15726}, {58, 1843}, {65, 44560}, {49,
982}, {50, 373}, {48, 325}, {91, 2076}, {35, 3}, {93, 2068}, {74,
2071}, {57, 966}, {52, 107}, {70, 11770}, {85, 14169}, {78,
27393}, {75, 6206}, {77, 15887}, {120, 4681}, {33, 8840}, {60,
468}, {86, 3587}, {51, 343}, {88, 608}, {40, 643}, {41, 644}, {62,
440}, {39, 31077}, {34, 488}, {59, 17199}, {126, 1}, {95, 71}, {113,
2414}, {81, 1179}, {63, 10476}, {47, 48}, {55, 45}, {54, 73}, {64,
3}, {53, 94}, {56, 47}, {122, 1098}, {90, 532}, {124, 33}, {38,
21}, {96, 1}, {125, 2}, {37, 1}, {36, 2}}
```

```
In[]:= Length[input]/1285884 // N
Out[]= 4.34712
```

Тут 1285884 пробела во всем файле, и распространение пробелов это один пробел на ~4.3 символов.

Теперь вот [Alice's Adventures in Wonderland, by Lewis Carroll](#) из той же библиотеки:

Листинг 9.6: Mathematica

```
In[]:= input = BinaryReadList["/home/dennis/tmp/pgl1.txt"];

In[]:= Tally[input]
Out[]= {{239, 1}, {187, 1}, {191, 1}, {80, 172}, {114, 6398}, {111,
9243}, {106, 222}, {101, 15082}, {99, 2815}, {116, 11629}, {32,
27964}, {71, 193}, {117, 3867}, {110, 7869}, {98, 1621}, {103,
2750}, {39, 2885}, {115, 6980}, {65, 721}, {108, 5053}, {105,
7802}, {100, 5227}, {118, 911}, {87, 256}, {97, 9081}, {44,
2566}, {121, 2442}, {76, 158}, {119, 2696}, {67, 185}, {13,
3735}, {10, 3735}, {84, 571}, {104, 7580}, {66, 125}, {107,
1202}, {102, 2248}, {109, 2245}, {46, 1206}, {89, 142}, {112,
1796}, {45, 744}, {58, 255}, {68, 242}, {74, 13}, {50, 12}, {53,
13}, {48, 22}, {56, 10}, {91, 4}, {69, 313}, {35, 1}, {49, 68}, {93,
4}, {82, 212}, {77, 222}, {57, 11}, {52, 10}, {42, 88}, {83,
288}, {79, 234}, {70, 134}, {72, 309}, {73, 831}, {85, 111}, {78,
182}, {75, 88}, {86, 52}, {51, 13}, {63, 202}, {40, 76}, {41,
76}, {59, 194}, {33, 451}, {113, 135}, {120, 170}, {90, 1}, {122,
79}, {34, 135}, {95, 4}, {81, 85}, {88, 6}, {47, 24}, {55, 6}, {54,
7}, {37, 1}, {64, 2}, {36, 2}}
```

```
In[]:= Length[input]/27964 // N
Out[]= 5.99049
```

Результат другой, вероятно потому что используется разное форматирование этих текстов (может быть из-за выравнивания и отступов).

ОК, будем считать что средняя частота появления пробела в английском тексте это 1 пробел на 4..7 символов.

И снова хорошие новости: мы можем измерять частоту пробелов во время постепенного дешифрования файла. Теперь я считаю пробелы в каждом *ломтике* и выкидываю 1-байтные ключи, которые приводят к результатам со слишком малым количеством пробелов (или слишком большим, но это почти невозможно учитывая такой короткий ключ):

Листинг 9.7: Python script

```
each_Nth_byte=[""]*KEY_LEN

content=read_file(sys.argv[1])
# split input by 17-byte chunks:
all_chunks=chunks(content, KEY_LEN)
for c in all_chunks:
    for i in range(KEY_LEN):
        each_Nth_byte[i]=each_Nth_byte[i] + c[i]
```

9.1. ПРИМИТИВНОЕ ХОР-ШИФРОВАНИЕ

```
# try each byte of key
for N in range(KEY_LEN):
    print "N=", N
    possible_keys=[]
    for i in range(256):
        tmp_key=chr(i)*len(each_Nth_byte[N])
        tmp=xor_strings(tmp_key,each_Nth_byte[N])
        # are all characters in tmp[] are printable?
        if is_string_printable(tmp)==False:
            continue
        # count spaces in decrypted buffer:
        spaces=tmp.count(' ')
        if spaces==0:
            continue
        spaces_ratio=len(tmp)/spaces
        if spaces_ratio<4:
            continue
        if spaces_ratio>7:
            continue
        possible_keys.append(i)
    print possible_keys, "len=", len(possible_keys)
```

(Полная версия исходного кода [здесь](#).)

Это выдает всего один возможный байт для каждого байта ключа:

```
N= 0
[144] len= 1
N= 1
[160] len= 1
N= 2
[33] len= 1
N= 3
[80] len= 1
N= 4
[79] len= 1
N= 5
[143] len= 1
N= 6
[251] len= 1
N= 7
[255] len= 1
N= 8
[133] len= 1
N= 9
[131] len= 1
N= 10
[207] len= 1
N= 11
[86] len= 1
N= 12
[65] len= 1
N= 13
[18] len= 1
N= 14
[122] len= 1
N= 15
[249] len= 1
N= 16
[49] len= 1
```

Проверим этот ключ в Mathematica:

Листинг 9.8: Mathematica

```
In[]:= input = BinaryReadList["/home/dennis/tmp/cipher.txt"];
In[]:= blocks = Partition[input, 17];
In[]:= key = {144, 160, 33, 80, 79, 143, 251, 255, 133, 131, 207, 86, 65, 18, 122, 249, 49};
```

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

```
In[]:= EncryptBlock[blk_] := BitXor[key, blk]

In[]:= encrypted = Map[EncryptBlock[#] &, blocks];

In[]:= BinaryWrite["/home/dennis/tmp/plain2.txt", Flatten[encrypted]]

In[]:= Close["/home/dennis/tmp/plain2.txt"]
```

И дешифрованный текст:

Mr. Sherlock Holmes, who was usually very late in the mornings, save upon those not infrequent occasions when he was up all night, was seated at the breakfast table. I stood upon the hearth-rug and picked up the stick which our visitor had left behind him the night before. It was a fine, thick piece of wood, bulbous-headed, of the sort which is known as a "Penang lawyer." Just under the head was a broad silver band nearly an inch across. "To James Mortimer, M.R.C.S., from his friends of the C.C.H.," was engraved upon it, with the date "1884." It was just such a stick as the old-fashioned family practitioner used to carry--dignified, solid, and reassuring.

"Well, Watson, what do you make of it?"

Holmes was sitting with his back to me, and I had given him no sign of my occupation.

...

(Полная версия текста [здесь](#).)

Текст выглядит правильным. Да, я придумал этот пример и выбрал хорошо известный текст Конан Дойля, но это очень близко к тому, что у меня недавно было на практике.

Другие идеи

Если бы не получилось с подсчетом пробелов, вот еще идеи, которые можно было бы попробовать:

- Учитывать тот факт что буквы в нижнем регистре встречаются намного чаще, чем в верхнем.
- Частотный анализ.
- Есть очень хорошая техника для определения языка текста: триграммы. Каждый язык имеет часто встречающиеся тройки буквы, для английского это могут быть «the» и «tha». Больше об этом: [N-Gram-Based Text Categorization](http://code.activestate.com/recipes/326576/), <http://code.activestate.com/recipes/326576/>. Интересно знать, что выявление триграмм может быть использовано при постепенном дешифровании текста, как в этом примере (нужно просто проверять 3 рядом стоящих дешифрованных символа).

Для систем письменности отличных от латинского алфавита, закодированных в UTF-8, все может быть еще проще. Например, в тексте на русском, закодированном в UTF-8, каждый байт перемежается с байтом 0xD0 или 0xD1. Это потому что символы кириллицы расположен в 4-м блоке в таблице Уникода. Другие системы письменности имеют свои блоки.

9.2. Информационная энтропия

Ради упрощения, я бы сказал, что информационная энтропия это мера, насколько хорошо можно сжать некоторый блок данных. Например, обычно нельзя сжать файл, который уже был сжат, так что он имеет высокую энтропию. С другой стороны, 1MiB нулевых байт можно сжать в крохотный файл на выходе. Действительно, в обычном русском языке, один миллион нулей можно описать просто как “в итоговом файле 1 миллион нулевых байт”. Сжатые файлы это обычно список инструкций для декомпрессора вроде “выдай 1000 нулей, потом байт 0x23, потом байт 0x45, потом выдай блок длиной в 10 байт, который мы видели 500 байт назад, итд.”

Тексты, написанные на натуральных языках, также легко могут быть сжаты, по той причине что в натуральных языках очень много избыточности (иначе мелкая опечатка могла бы привести к

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

непониманию, так, как любой перевернутый бит в сжатом архиве приводит к невозможности декомпрессии), некоторые слова используются чаще, итд. Из обычной ежедневной речи можно выкидывать вплоть до половины слов, и всё еще можно будет что-то понять.

Код для CPU тоже может быть сжат, потому что некоторые инструкции в ISA используются чаще других. В x86 самые используемые инструкции, это MOV/PUSH/CALL (5.11.2 (стр. 709)).

Компрессоры данных и шифры выдают результаты с очень большой энтропией. Хорошие ГПСЧ также выдают данные, которые нельзя сжать (по этому признаку можно измерять их качество).

Так что, другими словами, энтропия это мера, которая может помочь узнать содержимое неизвестного блока данных.

9.2.1. Анализирование энтропии в Mathematica

(Эта часть впервые появилась в моем блоге 13-May-2015. Обсуждение: <https://news.ycombinator.com/item?id=9545276>.)

Можно нарезать файл на блоки, подсчитать энтропию для каждого и построить график. Я сделал это в Wolfram Mathematica для демонстрации, и вот исходный код (Mathematica 10):

```
(* loading the file *)
input=BinaryReadList["file.bin"];

(* setting block sizes *)
BlockSize=4096;BlockSizeToShow=256;

(* slice blocks by 4k *)
blocks=Partition[input,BlockSize];

(* how many blocks we've got? *)
Length[blocks]

(* calculate entropy for each block. 2 in Entropy[] (base) is set with the intention so Entropy ↵
↳ []
function will produce the same results as Linux ent utility does *)
entropies=Map[N[Entropy[2,#]]&,blocks];

(* helper functions *)
fBlockToShow[input_,offset_]:=Take[input,{1+offset,1+offset+BlockSizeToShow}]
fToASCII[val_]:=FromCharacterCode[val,"PrintableASCII"]
fToHex[val_]:=IntegerString[val,16]
fPutASCIIWindow[data_]:=Framed[Grid[Partition[Map[fToASCII,data],16]]]
fPutHexWindow[data_]:=Framed[Grid[Partition[Map[fToHex,data],16],Alignment->Right]]

(* that will be the main knob here *)
{Slider[Dynamic[offset],{0,Length[input]-BlockSize,BlockSize}],Dynamic[BaseForm[offset,16]]}

(* main UI part *)
Dynamic[{ListLinePlot[entropies,GridLines->{{-1,offset/BlockSize,1}},Filling->Axis,AxesLabel ↵
↳ ->{"offset","entropy"}},
CurrentBlock=fBlockToShow[input,offset];
fPutHexWindow[CurrentBlock],
fPutASCIIWindow[CurrentBlock]]}
```

База GeoIP ISP⁵


Начнем с файла GeoIP (в котором информация об ISP для каждого блока IP-адресов). Бинарный файл GeoIPISP.dat имеет какие-то таблицы (вероятно, интервалы IP-адресов) плюс какой-то набор текстовых строк в конце файла (содержащий названия ISP).

Когда загружаю его в Mathematica, вижу такое:

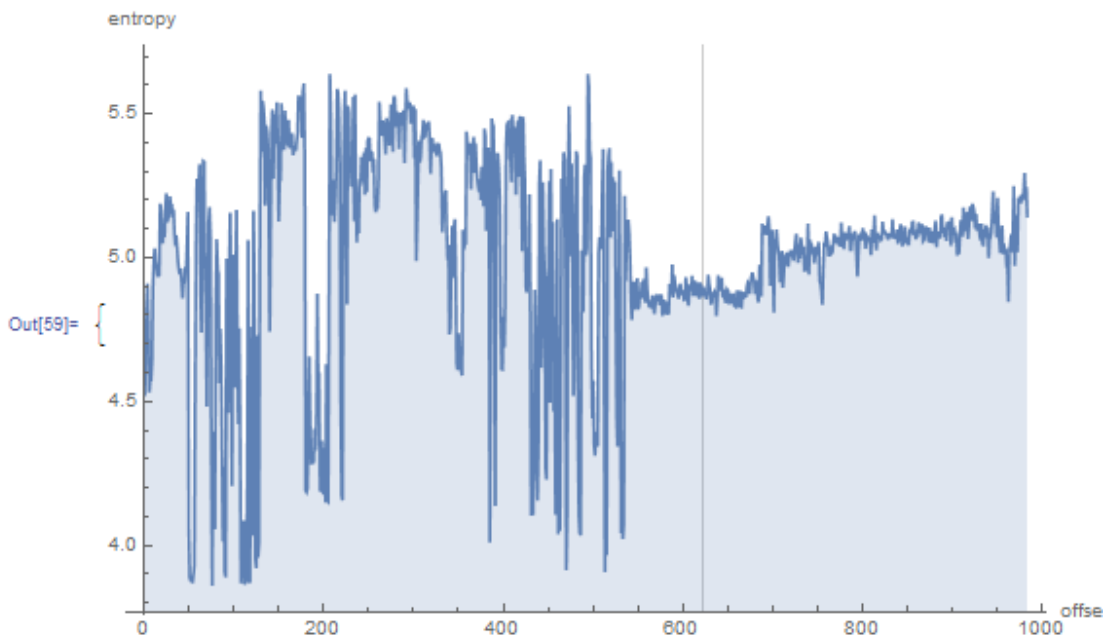
⁵Internet Service Provider

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

```
In[58]:= (* that will be the main knob here *)
{Slider[Dynamic[offset], {0, Length[input] - BlockSize, BlockSize}]

Out[58]:= {, 26d00016}

In[59]:= (* main UI part *)
Dynamic[{ListLinePlot[entropies, GridLines -> {{-1, offset/BlockSize,
CurrentBlock = fBlockToShow[input, offset];
fPutHexWindow[CurrentBlock], fPutASCIIWindow[CurrentBlock]]}]
```



6c	69	73	68	69	6e	67	20	43	6f	6d	70	61	6e	79	0	l	i	s	h	i	n	g		C	o	m	p	a	n	y	□	
43	61	6e	76	61	73	20	54	65	63	68	6e	6f	6c	6f	67	C	a	n	v	a	s		T	e	c	h	n	o	l	o	g	
79	0	43	6f	6c	75	6d	62	75	73	20	4d	69	64	64	6c	y	□	C	o	l	u	m	b	u	s		M	i	d	d	l	
65	20	53	63	68	6f	6f	6c	0	43	6f	61	73	74	61	6c	e		S	c	h	o	o	l	□	C	o	a	s	t	a	l	
20	57	69	72	65	20	26	20	43	61	62	6c	65	0	43	75	W	i	r	e		&		C	a	b	l	e	□	C	u		
72	72	65	6e	65	78	0	41	75	67	75	73	74	20	53	6f	r	r	e	n	e	x	□	A	u	g	u	s	t		S	o	
66	74	77	61	72	65	20	43	6f	72	70	6f	72	61	74	69	f	t	w	a	r	e		C	o	r	p	o	r	a	t	i	
6f	6e	0	41	6d	65	72	69	63	61	6e	20	41	75	74	6f	o	n	□	A	m	e	r	i	c	a	n		A	u	t	o	
6d	6f	62	69	6c	65	20	41	73	73	6f	63	69	61	74	69	m	o	b	i	l	e		A	s	s	o	c	i	a	t	i	
6f	6e	20	4e	61	74	6f	69	6e	61	6c	20	4f	66	66	69	o	n		N	a	t	o	i	n	a	l		O	f	f	i	
63	65	0	41	63	75	72	65	78	20	45	6e	76	69	72	6f	c	e	□	A	c	u	r	e	x		E	n	v	i	r	o	
6e	6d	65	6e	74	61	6c	20	43	6f	72	70	2e	0	50	72	n	m	e	n	t	a	l		C	o	r	p	.	□	P	r	
69	6e	63	65	20	43	6f	72	70	6f	72	61	74	69	6f	6e	i	n	c	e		C	o	r	p	o	r	a	t	i	o	n	
0	47	6f	32	74	65	6c	2e	63	6f	6d	0	45	6d	70	6c	□	G	o	2	t	e	l	.	c	o	m	□	E	m	p	l	
6f	79	6d	65	6e	74	20	53	65	63	75	72	69	74	79	20	o	y	m	e	n	t		S	e	c	u	r	i	t	y		
43	6f	6d	6d	69	73	73	69	6f	6e	0	47	6c	6f	62	61	C	o	m	m	i	s	s	i	o	n	□	G	l	o	b	a	

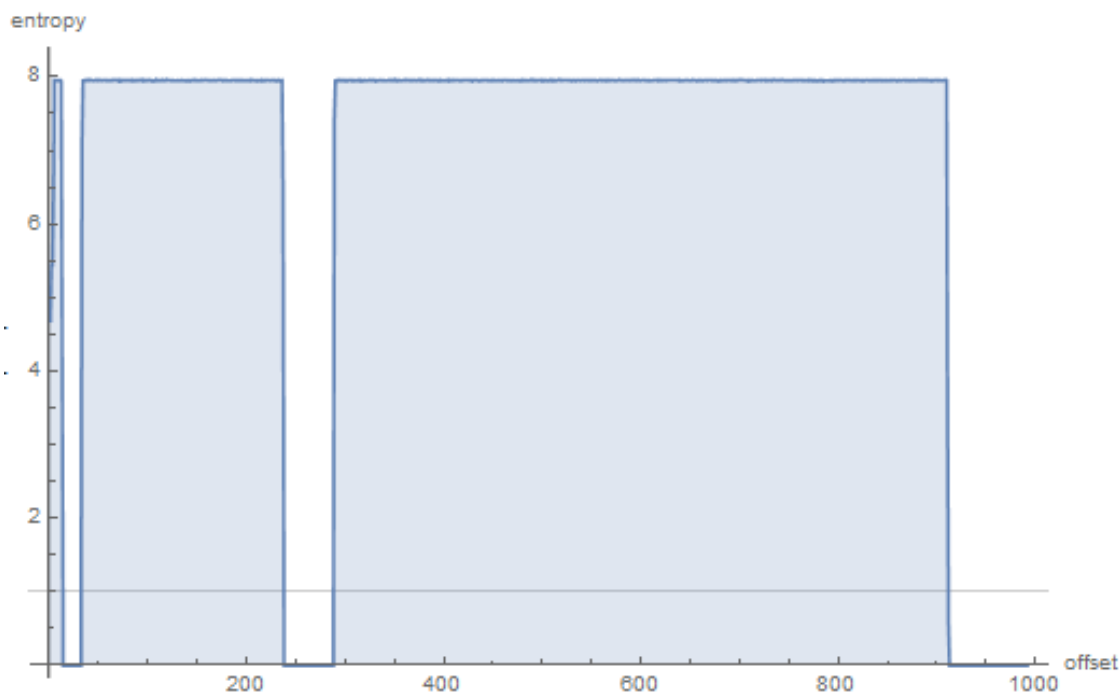
Действительно, это названия ISP. Так что, энтропия английского текста это 4.5-5.5 бита на байт? Да, что-то в этом роде. В Wolfram Mathematica есть встроенный корпус хорошо известной английской литературы, и мы можем посмотреть энтропию шейкспировских сонетов:

```
In[ ]:= Entropy[2,ExampleData[{"Text","ShakespearesSonnets"}]]//N
Out[ ]= 4.42366
```

4.4 это близко к тому, что мы получили (4.7-5.3). Конечно, классическая английская литература немного отличается от названий ISP и других английских текстов, которые мы можем найти в бинарных файлах (отладочные сообщения, сообщения об ошибках), но это значение близко.

Прошивка TP-Link WR941

Следующий пример. Вот прошивка от роутера TP-Link WR941:



Мы тут видим 3 блока с пустыми лакунами. Затем, первый блок с большой энтропией (начиная с адреса 0) маленький, второй (с адресом где-то на 0x22000) больше и третий (адрес 0x123000) самый большой. Не уверен насчет точного уровня энтропии первого блока, но второй и третий имеют большой уровень, означая что эти блоки или сжаты и/или зашифрованы.

Я попробовал [binwalk](#) для этого файла с прошивкой:

DECIMAL	HEXADECIMAL	DESCRIPTION
0	0x0	TP-Link firmware header, firmware version: 0.-15221.3, image ↳ version: "", product ID: 0x0, product version: 155254789, kernel load address: 0x0, ↳ kernel entry point: 0x-7FFFE000, kernel offset: 4063744, kernel length: 512, rootfs ↳ offset: 837431, rootfs length: 1048576, bootloader offset: 2883584, bootloader length: 0
14832	0x39F0	U-Boot version string, "U-Boot 1.1.4 (Jun 27 2014 - 14:56:49)"
14880	0x3A20	CRC32 polynomial table, big endian
16176	0x3F30	uImage header, header size: 64 bytes, header CRC: 0x3AC66E95, ↳ created: 2014-06-27 06:56:50, image size: 34587 bytes, Data Address: 0x80010000, Entry ↳ Point: 0x80010000, data CRC: 0xDF2DBA0B, OS: Linux, CPU: MIPS, image type: Firmware Image ↳ , compression type: lzma, image name: "u-boot image"
16240	0x3F70	LZMA compressed data, properties: 0x5D, dictionary size: 33554432 ↳ bytes, uncompressed size: 90000 bytes
131584	0x20200	TP-Link firmware header, firmware version: 0.0.3, image version: ↳ "", product ID: 0x0, product version: 155254789, kernel load address: 0x0, kernel entry ↳ point: 0x-7FFFE000, kernel offset: 3932160, kernel length: 512, rootfs offset: 837431, ↳ rootfs length: 1048576, bootloader offset: 2883584, bootloader length: 0
132096	0x20400	LZMA compressed data, properties: 0x5D, dictionary size: 33554432 ↳ bytes, uncompressed size: 2388212 bytes
1180160	0x120200	Squashfs filesystem, little endian, version 4.0, compression: lzma ↳ , size: 2548511 bytes, 536 inodes, blocksize: 131072 bytes, created: 2014-06-27 07:06:52

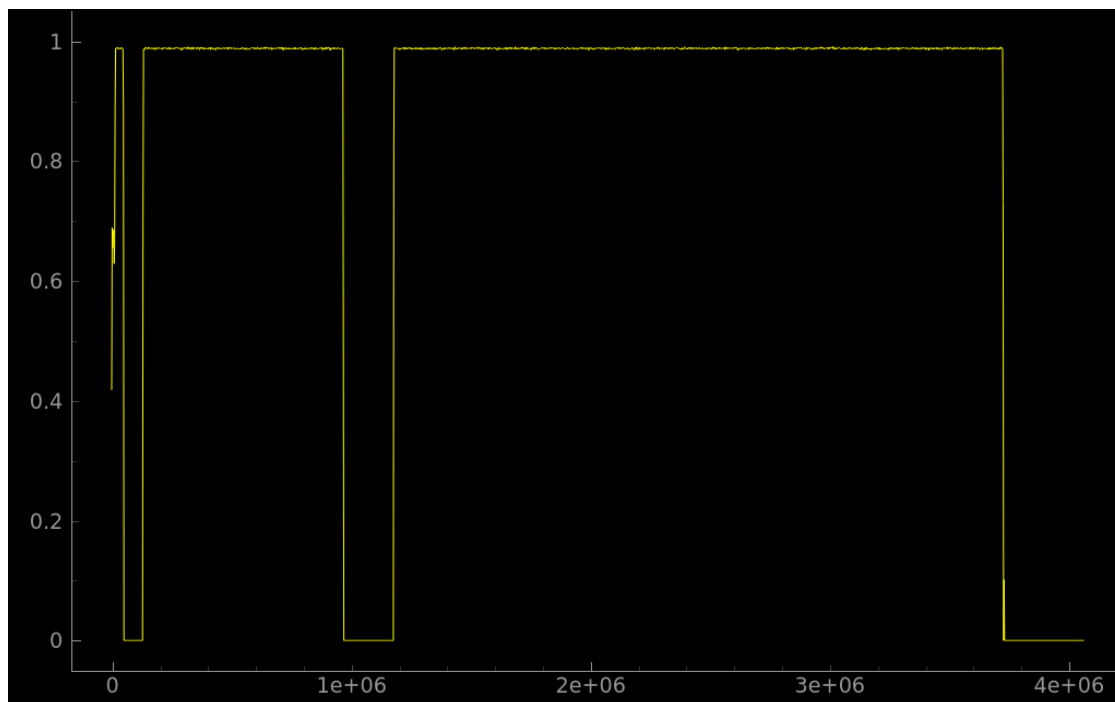
Действительно: в начале есть что-то, но два больших блока сжатых LZMA начинаются на 0x20400 и 0x120200. Это примерно те же адреса, что мы видим в Mathematica. И кстати, binwalk тоже может показывать информацию об энтропии (опция -E):

DECIMAL	HEXADECIMAL	ENTROPY
0	0x0	Falling entropy edge (0.419187)
16384	0x4000	Rising entropy edge (0.988639)
51200	0xC800	Falling entropy edge (0.000000)
133120	0x20800	Rising entropy edge (0.987596)
968704	0xEC800	Falling entropy edge (0.508720)
1181696	0x120800	Rising entropy edge (0.989615)
3727360	0x38E000	Falling entropy edge (0.732390)

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

Передние фронты соответствуют передним фронтам блока на нашем графе. Задние фронты соответствуют местам, где начинаются пустые лакуны.

Binwalk также может генерировать графики в PNG (-E -J):



Что можно сказать о лакунах? Глядя в бинарном редакторе, мы видим что они просто заполнены байтами 0xFF. Зачем разработчики оставили эти места? Вероятно, потому что они не могли рассчитать точные размеры сжатых блоков, так что они выделили место с запасом.

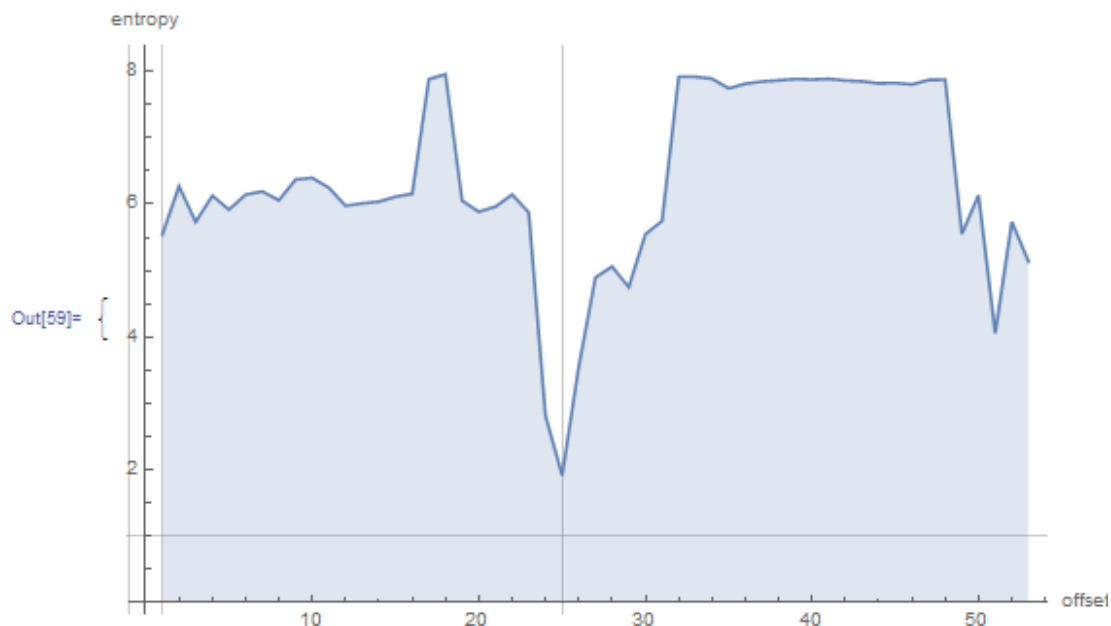
Notepad

Еще один пример это notepad.exe, который я взял из Windows 8.1:


```
In[72]:= (* that will be the main knob here *)
{Slider[Dynamic[offset], {0, Length[input] - BlockSize, BlockSize}],

Out[72]:= { , 1900016}
```

```
+
In[59]:= (* main UI part *)
Dynamic[{ListLinePlot[entropies, GridLines -> {{-1, offset / BlockSize},
CurrentBlock = fBlockToShow[input, offset];
fPutHexWindow[CurrentBlock], fPutASCIIWindow[CurrentBlock]]}]
```



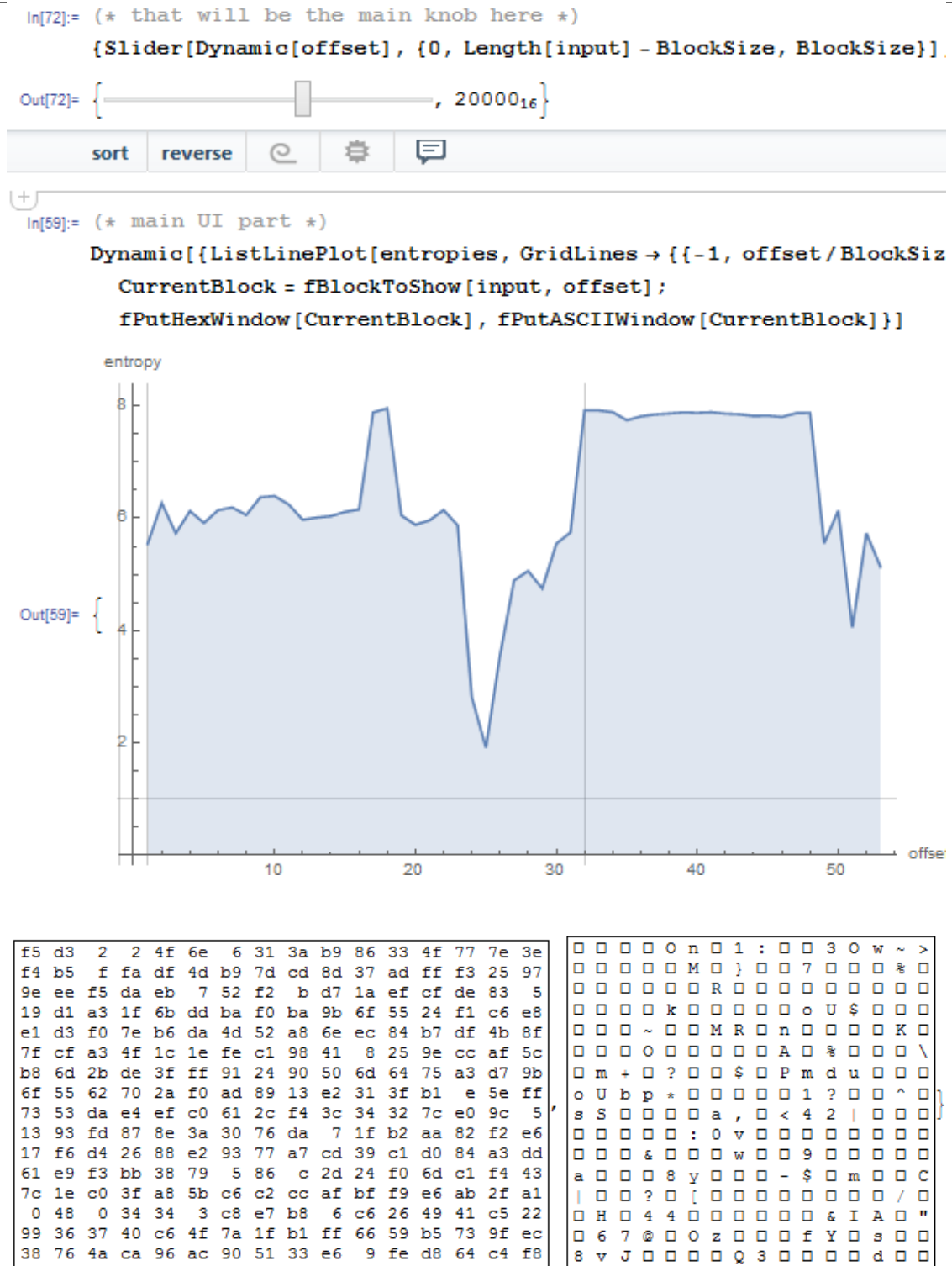
60	7f	1	0	d0	69	0	0	24	6a	0	0	8c	7f	1	0
24	6a	0	0	e0	6a	0	0	94	7f	1	0	e0	6a	0	0
a5	6b	0	0	14	7d	1	0	c0	6b	0	0	c	6c	0	0
c	7d	1	0	c	6c	0	0	5b	6c	0	0	9c	7f	1	0
5b	6c	0	0	a4	6c	0	0	15	c1	1	0	a4	6c	0	0
5f	6d	0	0	bc	7f	1	0	5f	6d	0	0	c0	6d	0	0
9d	c0	1	0	c0	6d	0	0	14	6e	0	0	28	7f	1	0
80	78	0	0	9e	78	0	0	bd	c1	1	0	9e	78	0	0
c4	78	0	0	f1	c0	1	0	c4	78	0	0	19	79	0	0
ed	c1	1	0	19	79	0	0	d7	81	0	0	31	c0	1	0
d7	81	0	0	d1	83	0	0	3d	c0	1	0	d1	83	0	0
b2	86	0	0	d	c0	1	0	b2	86	0	0	1f	87	0	0
69	c1	1	0	1f	87	0	0	3d	87	0	0	9	c1	1	0
3d	87	0	0	5a	87	0	0	15	c1	1	0	5a	87	0	0
83	87	0	0	85	c0	1	0	83	87	0	0	25	8a	0	0
61	c0	1	0	25	8a	0	0	36	8a	0	0	d5	c1	1	0

`	0	0	0	0	i	0	0	\$	j	0	0	0	0	0	0
\$	j	0	0	0	j	0	0	0	0	0	0	0	0	j	0
0	k	0	0	0	}	0	0	0	k	0	0	0	0	l	0
0	}	0	0	0	l	0	0	[	l	0	0	0	0	0	0
[	l	0	0	0	l	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
_	m	0	0	0	0	0	0	_	m	0	0	0	0	m	0
0	0	0	0	0	m	0	0	0	n	0	0	0	0	(	0
0	x	0	0	0	x	0	0	0	0	0	0	0	0	x	0
0	x	0	0	0	0	0	0	0	x	0	0	0	0	y	0
0	0	0	0	0	y	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	=	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
i	0	0	0	0	0	0	0	=	0	0	0	0	0	0	0
=	0	0	0	z	0	0	0	0	0	0	0	0	0	z	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	%	0
a	0	0	0	%	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0

Имеется углубление на $\approx 0x19000$ (абсолютное смещение в файле). Я открыл этот исполняемый файл в шестнадцатеричном редакторе и нашел там таблицу импортов (которая имеет уровень энтропии ниже, чем код x86-64 code в первой половине графика).

Имеется также блок с высоким уровнем энтропии, начинающийся на $\approx 0x20000$:

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ



В шестнадцатеричном редакторе можно найти там PNG-файл, вставленный в секцию ресурсов PE-файла (это большое изображение иконки notepad-a). Действительно, PNG-файлы ведь сжаты.

Безымянный видеорегистратор

Теперь самый продвинутый пример в этой части это прошивка от какого-то безымянного видеоре-гистратора, которую мне прислал друг:

[illegible]

Спад в самом начале это текст на английском: отладочные сообщения. Я попробовал разные ISA и нашел, что первая треть всего файла (с сегментом текста внутри) это на самом деле код для MIPS (little-endian).

Например, это очень заметный эпилог ф-ции в MIPS-коде:

ROM:000013B0	move	\$sp, \$fp
ROM:000013B4	lw	\$ra, 0x1C(\$sp)
ROM:000013B8	lw	\$fp, 0x18(\$sp)
ROM:000013BC	lw	\$s1, 0x14(\$sp)
ROM:000013C0	lw	\$s0, 0x10(\$sp)
ROM:000013C4	jr	\$ra
ROM:000013C8	addiu	\$sp, 0x20

Из нашего графика мы видим, что энтропия кода для MIPS 5-6 бит на байт. Действительно, я измерил энтропию кода для различных ISA и получил такие значения:

9.2. ИНФОРМАЦИОННАЯ ЭНТРОПИЯ

- x86: секция .text в файле ntoskrnl.exe из Windows 2003: 6.6
- x64: секция .text в файле ntoskrnl.exe из Windows 7 x64: 6.5
- ARM (режим thumb), Angry Birds Classic: 7.05
- ARM (режим ARM) Linux Kernel 3.8.0: 6.03
- MIPS (little endian), секция .text файла user32.dll из Windows NT 4: 6.09

Энтропия исполняемого кода выше чем у текста на английском, но всё равно можно сжимать.

Теперь вторая треть, начинающаяся с 0xF5000. Я не знаю, что это. Пробовал различные ISA без всякого успеха. Энтропия этого блока выглядит ровнее, чем у блока с исполняемым кодом. Может это какие-то данные?

Имеется также всплеск на $\approx 0x213000$. Я посмотрел на это место в бинарном редакторе и нашел JPEG-файл (который, конечно же, сжат)! Также, я не знаю, что находится в конце. Попробуем Binwalk на этом файле:

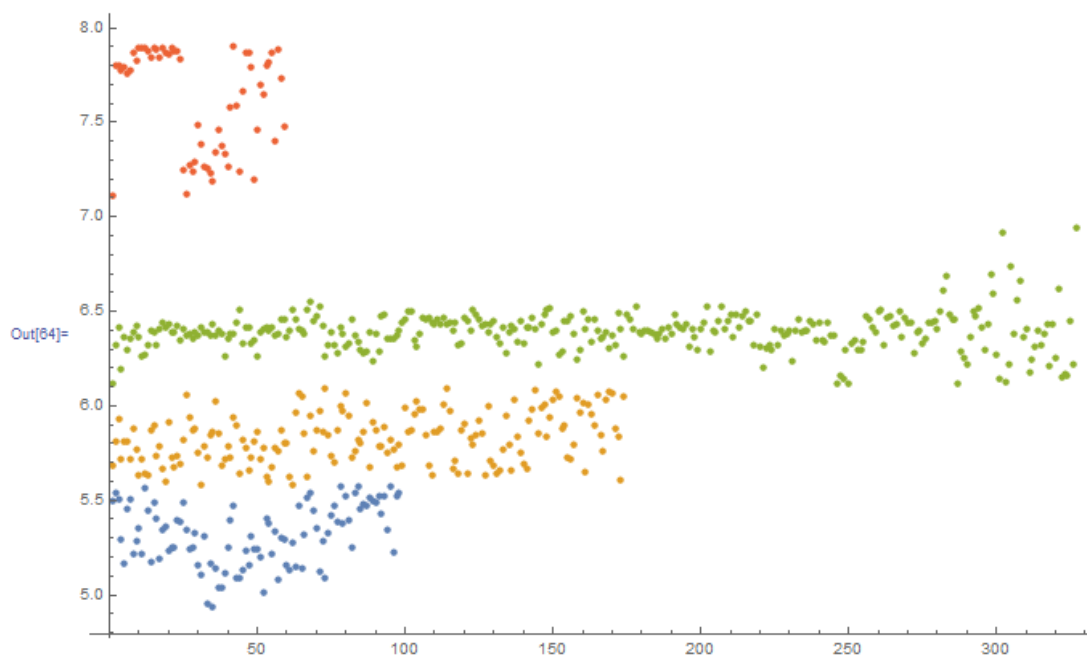
% binwalk FW96650A.bin		
DECIMAL	HEXADECIMAL	DESCRIPTION
167698	0x28F12	Unix path: /15/20/24/25/30/60/120/240fps can be served..
280286	0x446DE	Copyright string: "Copyright (c) 2012 Novatek Microelectronic Corp."
2169199	0x21196F	JPEG image data, JFIF standard 1.01
2300847	0x231BAF	MySQL MISAM compressed data file Version 3
% binwalk -E FW96650A.bin		
DECIMAL	HEXADECIMAL	ENTROPY
0	0x0	Falling entropy edge (0.579792)
2170880	0x212000	Rising entropy edge (0.967373)
2267136	0x229800	Falling entropy edge (0.802974)
2426880	0x250800	Falling entropy edge (0.846639)
2490368	0x260000	Falling entropy edge (0.849804)
2560000	0x271000	Rising entropy edge (0.974340)
2574336	0x274800	Rising entropy edge (0.970958)
2588672	0x278000	Falling entropy edge (0.763507)
2592768	0x279000	Rising entropy edge (0.951883)
2596864	0x27A000	Falling entropy edge (0.712814)
2600960	0x27B000	Rising entropy edge (0.968167)
2607104	0x27C800	Rising entropy edge (0.958582)
2609152	0x27D000	Falling entropy edge (0.760989)
2654208	0x288000	Rising entropy edge (0.954127)
2670592	0x28C000	Rising entropy edge (0.967883)
2676736	0x28D800	Rising entropy edge (0.975779)
2684928	0x28F800	Falling entropy edge (0.744369)

Да, она нашла JPEG-файл и даже данные для MySQL! Но я не уверен что это правда — пока не проверял.

Также интересно попробовать кластеризацию в Mathematica:

```
In[84]:= (* let also take a look on clustering attempt of Mathematica *)
```

```
ListPlot[FindClusters[entropies]]
```



Это пример, как Mathematica группирует различные значения энтропии в различные группы. Действительно, похоже на правду. Синие точки в районе 5.0-5.5, вероятно относятся к тексту на английском. Желтые точки в 5.5-6 это код для MIPS. Множество зеленых точек в 6.0-6.5 это неизвестная вторая треть. Оранжевые точки близкие к 8.0 относятся к сжатоу JPEG-файлу. Другие оранжевые точки, видимо, относятся к концу прошивки (неизвестные для нас данные).

Ссылки

Бинарные файлы, которые использовались в этой части: <https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/tree/master/ff/entropy/files>. Файл для Wolfram Mathematica: https://github.com/DennisYurichev/RE-for-beginners/blob/master/ff/entropy/files/binary_file_entropy.nb (все ячейки должны быть в начале проинициализированы, что всё начало работать).

9.2.2. Вывод

Информационная энтропия может использоваться как простой метод для быстрого изучения неизвестных бинарных файлов. В частности, это очень быстрый способ найти сжатые/зашифрованные фрагменты данных. Кто-то говорит, что так же можно находить открытые/закрытые ключи RSA⁶ (и для других несимметричных шифров) в исполняемом коде (ключи также имеют высокую энтропию), но я не пробовал.

9.2.3. Инструменты

Удобная утилита из Linux `ent` для вычисления энтропии файла⁷.

Неплохой онлайн-визуализатор энтропии, сделанный Aldo Cortesi, которому я пытался подражать при помощи Mathematica: <http://binvis.io>. Его статьи о визуализации энтропии тоже стоит почитать: <http://corte.si/posts/visualisation/entropy/index.html>, <http://corte.si/posts/visualisation/malware/index.html>, <http://corte.si/posts/visualisation/binvis/index.html>.

В фреймворке radare2 есть команда `#entropy`.

Для IDA есть IDAtropy⁸.

⁶Rivest Shamir Adleman

⁷<http://www.fourmilab.ch/random/>

⁸<https://github.com/danigargu/IDAtropy>

9.2.4. Кое-что о примитивном шифровании как XOR

Интересно, что простое шифрование при помощи XOR не меняет энтропии данных. В этой книге я показал это в примере с *Norton Guide* (9.1.1 (стр. 911)).

Обобщая: шифрования при помощи шифровании с заменой также не меняет энтропии данных (а XOR можно рассматривать как шифрование заменой). Причина в том, что алгоритм вычисления энтропии рассматривает данные на уровне байт. С другой стороны, данные зашифрованные с 2-х или 4-х байтным XOR-шаблоном приведут к другому уровню энтропии.

Так или иначе, низкая энтропия это обычно верный признак слабой любительской криптографии (которая используется в лицензионных ключах/файлах, итд).

9.2.5. Еще об энтропии исполняемого кода

Легко заметить, что наверное самый большой источник большой энтропии в исполняемом коде это относительные смещения закодированные в опкодах. Например, эти две последовательные инструкции будут иметь разные относительные смещения в своих опкодах, в то время как они, на самом деле, указывают на одну и ту же ф-цию:

```
function proc
...
function endp

...

CALL function
...
CALL function
```

Идеальный компрессор исполняемого кода мог бы кодировать информацию так: *есть CALL в "function" по адресу X и такой же CALL по адресу Y без необходимости кодировать адрес ф-ции function дважды.*

Чтобы с этим разобраться, компрессоры исполняемых файлов иногда могут уменьшить энтропию здесь. Один из примеров это UPX: <http://sourceforge.net/p/upx/code/ci/default/tree/doc/filter.txt>.

9.2.6. ГПСЧ

Когда я запускаю GnuPG для генерации закрытого (секретного) ключа, он спрашивает об энтропии

```
...

We need to generate a lot of random bytes. It is a good idea to perform
some other action (type on the keyboard, move the mouse, utilize the
disks) during the prime generation; this gives the random number
generator a better chance to gain enough entropy.
```

```
Not enough random bytes available. Please do some other work to give
the OS a chance to collect more entropy! (Need 169 more bytes)
```

Это означает, что хороший ГПСЧ выдает длинные результаты с большой энтропией, и это тоже что нужно для секретного ключа в асимметричной криптографии. Но CPRNG⁹ это сложно (потому что компьютер сам по себе это очень детерменистичное устройство), так что GnuPG просит у пользователя дополнительной случайной информации.

9.2.7. Еще примеры

Вот случай, где я делаю попытку подсчитать энтропию некоторых блоков с неизвестным содержанием: 8.7 (стр. 842).

⁹Cryptographically secure PseudoRandom Number Generator

9.2.8. Энтропия различных файлов

Энтропия случайной информации близка к 8:

```
% dd bs=1M count=1 if=/dev/urandom | ent
Entropy = 7.999803 bits per byte.
```

Это означает, что почти всё доступное место внутри байта заполнено информацией.

256 байта в пределах 0..255 дает точное значение 8:

```
#!/usr/bin/env python
import sys

for i in range(256):
    sys.stdout.write(chr(i))
```

```
% python 1.py | ent
Entropy = 8.000000 bits per byte.
```

Порядок не важен. Это означает, что всё доступное место внутри байта заполнено.

Энтропия любого блока заполненного нулевыми байтами это 0:

```
% dd bs=1M count=1 if=/dev/zero | ent
Entropy = 0.000000 bits per byte.
```

Энтропия строки, состоящей из одного (любого) байта это 0:

```
% echo -n "aaaaaaaaaaaaaaaaaaaaa" | ent
Entropy = 0.000000 bits per byte.
```

Энтропия base64-строки такая же, как и энтропия исходных данных, но умножена на $\frac{3}{4}$. Это потому что кодирование в base64 использует 64 символа вместо 256.

```
% dd bs=1M count=1 if=/dev/urandom | base64 | ent
Entropy = 6.022068 bits per byte.
```

Вероятно, 6.02 не так близко к 6 из-за того, что выравнивающий символ (=) немного портит статистику.

Uuencode также использует 64 символа:

```
% dd bs=1M count=1 if=/dev/urandom | uuencode - | ent
Entropy = 6.013162 bits per byte.
```

Это означает, что любая строка в base64 и Uuencode может быть передана используя 6-битные байты или символы.

Любая случайная информация в шестнадцатеричном виде имеет энтропию в 4 бита на байт:

```
% openssl rand -hex $$$$(( 2**16 )) | ent
Entropy = 4.000013 bits per byte.
```

Энтропия случайно выбранного текста на английском из библиотеки Гутенберга имеет энтропию ≈ 4.5 . Это потому что английские тексты используют, в основном, 26 латинских символов, и $\log_2(26) \approx 4.7$, т.е., вам нужны 5-битные байты для передачи несжатых английских текстов, это будет достаточно (так это и было в эпоху телетайпов).

Случайно выбранный текст на русском из библиотеки <http://lib.ru> это Ф.М.Достоевский “Идиот”¹⁰, закодированный в CP1251.

И этот файл имеет энтропию в ≈ 4.98 . В кириллице 33 буквы, и $\log_2(33) \approx 5.04$. Но в русской письменности есть малопопулярная и редкая буква “ё”. И $\log_2(32) = 5$ (кириллический алфавит без этой редкой буквы) — теперь это близко к тому, что мы получили.

Впрочем, этот текст использует букву “ё”, но, наверное, и там она встречается не часто.

¹⁰http://az.lib.ru/d/dostoevskij_f_m/text_0070.shtml

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM

В игре есть шахта. Шахты на некоторых планетах работают быстрее, на некоторых других — медленнее. Набор ресурсов также разный.

Здесь видно, какие ресурсы добыты в этот момент:

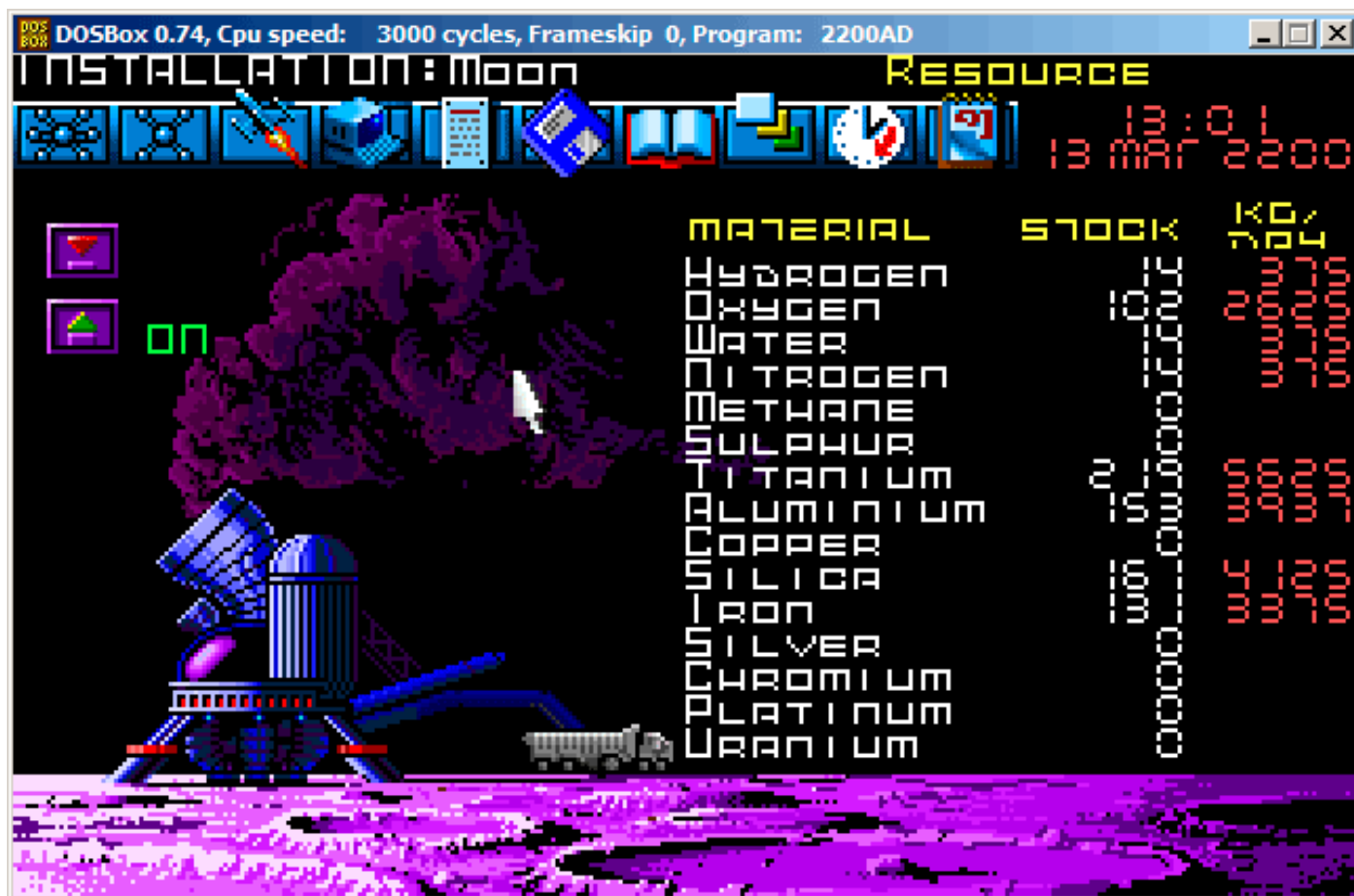


Рис. 9.13: Шахта: первое состояние

Сохраним состояние игры. Это файл размером 9538 байт.

Подождем несколько «дней» здесь в игре и теперь в шахте добыто больше ресурсов:

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM



Рис. 9.14: Шахта: второе состояние

Снова сохраним состояние игры.

Теперь просто попробуем сравнить оба файла побайтово используя простую утилиту FC под DOS/Windows:

```
...> FC /b 2200save.i.v1 2200SAVE.I.V2

Comparing files 2200save.i.v1 and 2200SAVE.I.V2
00000016: 0D 04
00000017: 03 04
0000001C: 1F 1E
00000146: 27 3B
00000BDA: 0E 16
00000BDC: 66 9B
00000BDE: 0E 16
00000BE0: 0E 16
00000BE6: DB 4C
00000BE7: 00 01
00000BE8: 99 E8
00000BEC: A1 F3
00000BEE: 83 C7
00000BFB: A8 28
00000BFD: 98 18
00000BFF: A8 28
00000C01: A8 28
00000C07: D8 58
00000C09: E4 A4
00000C0D: 38 B8
00000C0F: E8 68
...
```

Вывод здесь неполный, там было больше отличий, но мы обрежем результат до самого интересного.

В первой версии у нас было 14 единиц водорода (hydrogen) и 102 — кислорода (oxygen).

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM

Во второй версии у нас 22 и 155 единиц соответственно.

Если эти значения сохраняются в файл, мы должны увидеть разницу. И она действительно есть. Там 0x0E (14) на позиции 0xBDA и это значение 0x16 (22) в новой версии файла. Это, наверное, водород. Там также 0x66 (102) на позиции 0xBDC в старой версии и 0x9B (155) в новой версии файла. Это, наверное, кислород.

Обе версии файла доступны на сайте, для тех кто хочет их изучить (или поэкспериментировать): beginners.re.

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM

Новую версию файла откроем в Hiew и отметим значения, связанные с ресурсами, добытыми на шахте в игре:

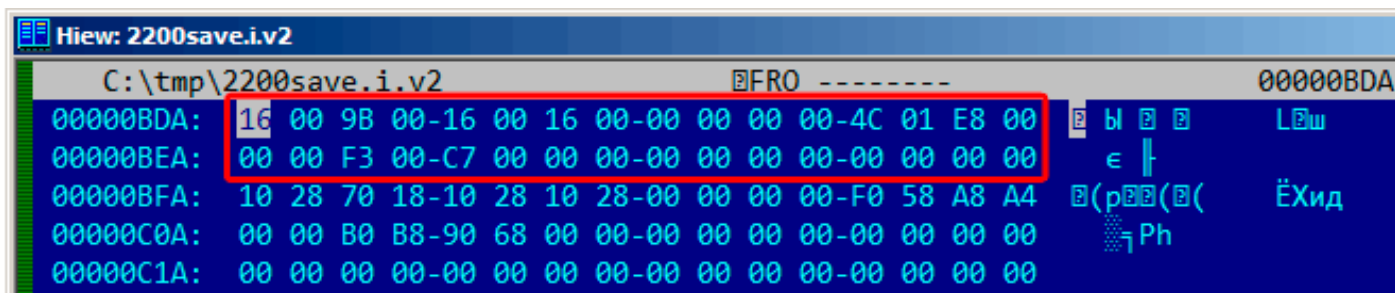


Рис. 9.15: Hiew: первое состояние

Проверим каждое. Это явно 16-битные значения: не удивительно для 16-битной программы под DOS, где *int* имел длину в 16 бит.

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM

Проверим наши предположения. Запишем 1234 (0x4D2) на первой позиции (это должен быть водород):

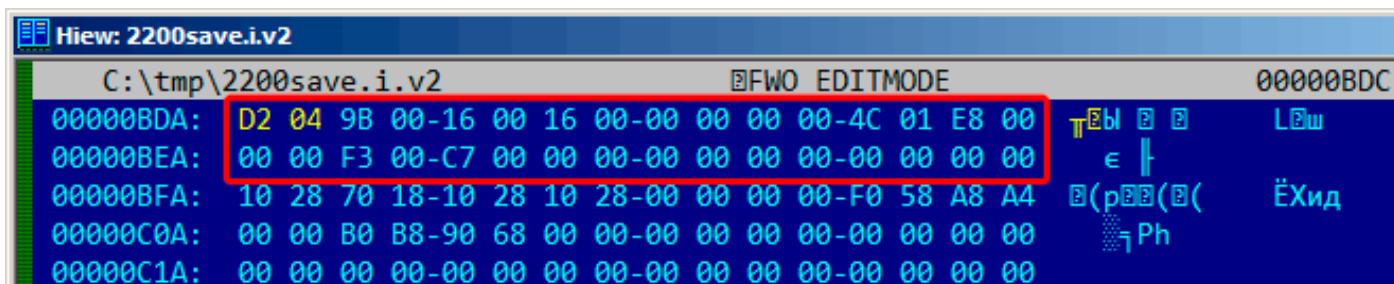


Рис. 9.16: Hiew: запишем там (0x4D2)

Затем загрузим измененный файл в игру и посмотрим на статистику в шахте:



Рис. 9.17: Проверим значение водорода

Так что да, это оно.

9.3. ФАЙЛ СОХРАНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ В ИГРЕ MILLENIUM

Попробуем пройти игру как можно быстрее, установим максимальные значения везде:

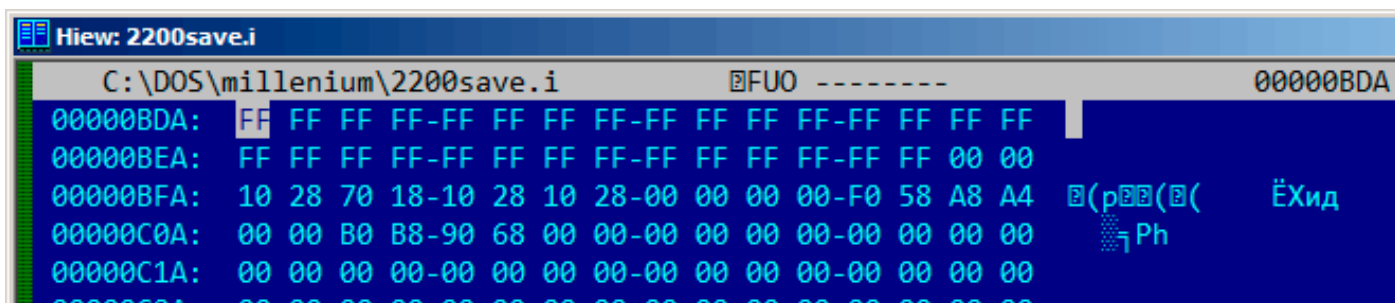


Рис. 9.18: Hiew: установим максимальные значения

0xFFFF это 65535, так что да, у нас много ресурсов теперь:



Рис. 9.19: Все ресурсы теперь действительно 65535 (0xFFFF)

9.4. ФАЙЛ С ИНДЕКСАМИ В ПРОГРАММЕ FORTUNE

Пропустим еще несколько «дней» в игре и видим что-то неладное! Некоторых ресурсов стало меньше:

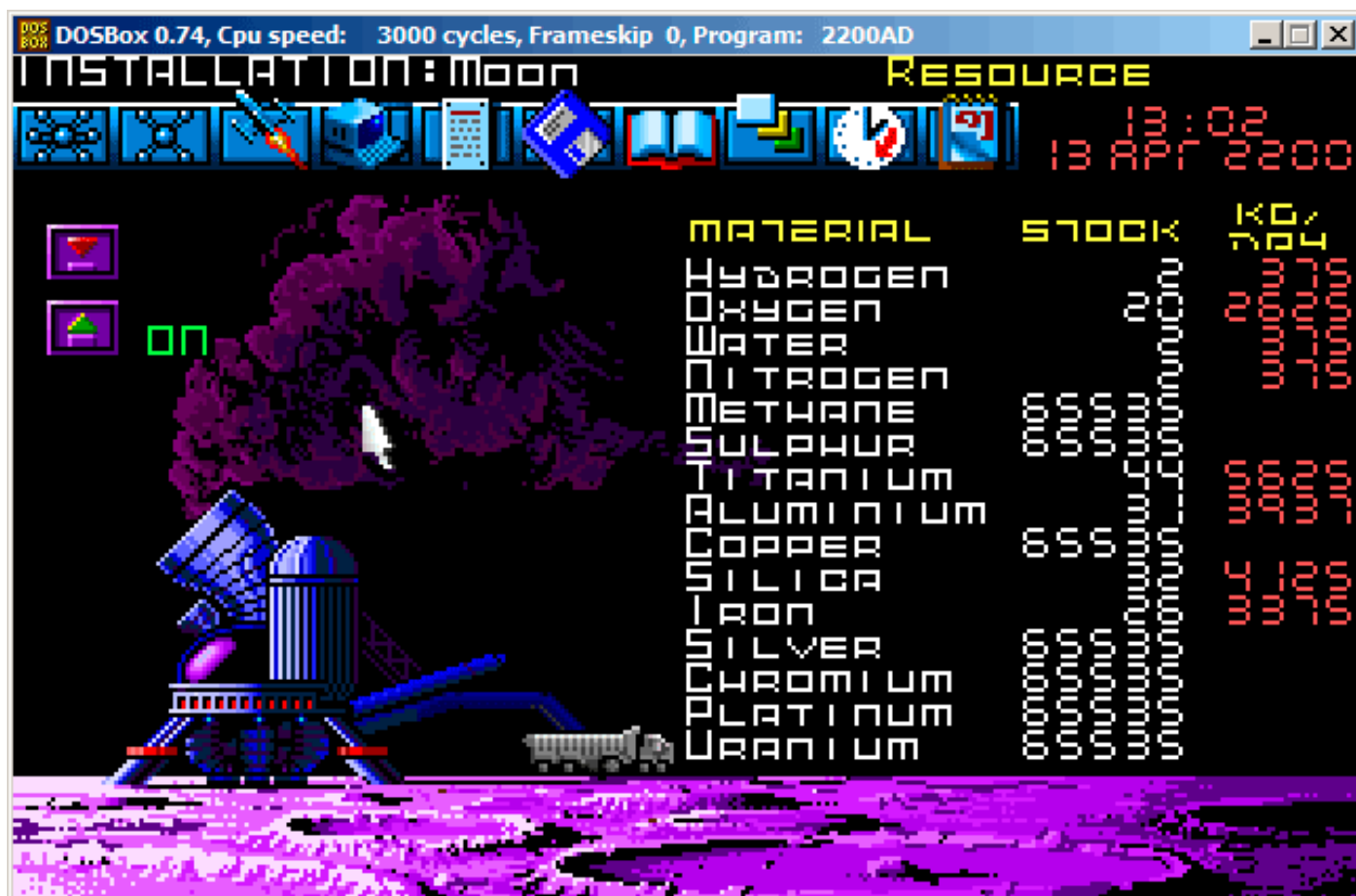


Рис. 9.20: Переполнение переменных ресурсов

Это просто переполнение. Разработчик игры, должно быть, никогда не думал, что значения ресурсов будут такими большими, так что, здесь, наверное, нет проверок на переполнение, но шахта в игре «работает», ресурсы добавляются, отсюда и переполнение.

Вероятно, не нужно было жадничать.

Здесь наверняка еще какие-то значения в этом файле.

Так что это очень простой способ читинга в играх. Файл с таблицей очков также можно легко модифицировать.

Еще насчет сравнения файлов и снимков памяти: [5.10.2](#) (стр. [703](#)).

9.4. Файл с индексами в программе fortune

(Эта часть впервые появилась в моем блоге 25 апреля 2015.)

fortune это хорошо известная программа в UNIX, которая показывает случайную фразу из коллекции. Некоторые гики настраивают свою систему так, что *fortune* запускается после входа в систему. *fortune* берет фразы из текстовых файлов расположенных в */usr/share/games/fortunes* (по крайней мере, в Ubuntu Linux). Вот пример (текстовый файл «fortunes»):

```
A day for firm decisions!!!! Or is it?
%
A few hours grace before the madness begins again.
%
A gift of a flower will soon be made to you.
%
A long-forgotten loved one will appear soon.
```

9.4. ФАЙЛ С ИНДЕКСАМИ В ПРОГРАММЕ FORTUNE

```
Buy the negatives at any price.
%
A tall, dark stranger will have more fun than you.
%
...
```

Так что это фразы, иногда из нескольких строк, все разделены знаком процента. Задача программы *fortune* это найти случайную фразу и вывести её. Чтобы это сделать, она должна просканировать весь текстовый файл, подсчитать кол-во фраз, выбрать случайную и вывести. Но текстовый файл может стать большим, и даже на современных компьютерах, этот наивный алгоритм немного неэкономичный по отношению к ресурсам. Прямолинейный метод это держать бинарный файл с индексами, содержащий смещение каждой фразы в текстовом файле. С файлом индексов, программа *fortune* может работать намного быстрее: просто выбрать случайный элемент из индекса, взять смещение оттуда, найти смещение в текстовом файле и прочитать фразу оттуда. Это и сделано в программе *fortune*. Посмотрим, что внутри файла с индексами (это .dat-файлы в том же директории) в шестнадцатеричном редакторе. Конечно, эта программа с открытыми исходными кодами, но сознательно, мы не будем подсматривать в исходники.

```
% od -t x1 --address-radix=x fortunes.dat
000000 00 00 00 02 00 00 01 af 00 00 00 bb 00 00 00 0f
000010 00 00 00 00 25 00 00 00 00 00 00 00 00 00 2b
000020 00 00 00 60 00 00 00 8f 00 00 00 df 00 00 01 14
000030 00 00 01 48 00 00 01 7c 00 00 01 ab 00 00 01 e6
000040 00 00 02 20 00 00 02 3b 00 00 02 7a 00 00 02 c5
000050 00 00 03 04 00 00 03 3d 00 00 03 68 00 00 03 a7
000060 00 00 03 e1 00 00 04 19 00 00 04 2d 00 00 04 7f
000070 00 00 04 ad 00 00 04 d5 00 00 05 05 00 00 05 3b
000080 00 00 05 64 00 00 05 82 00 00 05 ad 00 00 05 ce
000090 00 00 05 f7 00 00 06 1c 00 00 06 61 00 00 06 7a
0000a0 00 00 06 d1 00 00 07 0a 00 00 07 53 00 00 07 9a
0000b0 00 00 07 f8 00 00 08 27 00 00 08 59 00 00 08 8b
0000c0 00 00 08 a0 00 00 08 c4 00 00 08 e1 00 00 08 f9
0000d0 00 00 09 27 00 00 09 43 00 00 09 79 00 00 09 a3
0000e0 00 00 09 e3 00 00 0a 15 00 00 0a 4d 00 00 0a 5e
0000f0 00 00 0a 8a 00 00 0a a6 00 00 0a bf 00 00 0a ef
000100 00 00 0b 18 00 00 0b 43 00 00 0b 61 00 00 0b 8e
000110 00 00 0b cf 00 00 0b fa 00 00 0c 3b 00 00 0c 66
000120 00 00 0c 85 00 00 0c b9 00 00 0c d2 00 00 0d 02
000130 00 00 0d 3b 00 00 0d 67 00 00 0d ac 00 00 0d e0
000140 00 00 0e 1e 00 00 0e 67 00 00 0e a5 00 00 0e da
000150 00 00 0e ff 00 00 0f 43 00 00 0f 8a 00 00 0f bc
000160 00 00 0f e5 00 00 10 1e 00 00 10 63 00 00 10 9d
000170 00 00 10 e3 00 00 11 10 00 00 11 46 00 00 11 6c
000180 00 00 11 99 00 00 11 cb 00 00 11 f5 00 00 12 32
000190 00 00 12 61 00 00 12 8c 00 00 12 ca 00 00 13 87
0001a0 00 00 13 c4 00 00 13 fc 00 00 14 1a 00 00 14 6f
0001b0 00 00 14 ae 00 00 14 de 00 00 15 1b 00 00 15 55
0001c0 00 00 15 a6 00 00 15 d8 00 00 16 0f 00 00 16 4e
...
```

Без всякой посторонней помощи, мы видим что здесь 4 4-байтных элемента в каждой 16-байтной строке. Вероятно, это и есть наш массив с индексами. Попробую загрузить весь файл в Wolfram Mathematica как массив из 32-битных целочисленных значений:

```
In[ ]:= BinaryReadList["c:/tmp1/fortunes.dat", "UnsignedInteger32"]

Out[ ]= {33554432, 2936078336, 3137339392, 251658240, 0, 37, 0, \
721420288, 1610612736, 2399141888, 3741319168, 335609856, 1208025088, \
2080440320, 2868969472, 3858825216, 537001984, 989986816, 2046951424, \
3305242624, 67305472, 1023606784, 1745027072, 2801991680, 3775070208, \
419692544, 755236864, 2130968576, 2902720512, 3573809152, 84213760, \
990183424, 1678049280, 2181365760, 2902786048, 3456434176, \
4144300032, 470155264, 1627783168, 2047213568, 3506831360, 168230912, \
1392967680, 2584150016, 4161208320, 654835712, 1493696512, \
2332557312, 2684878848, 3288858624, 3775397888, 4178051072, \
...
```


9.4. ФАЙЛ С ИНДЕКСАМИ В ПРОГРАММЕ FORTUNE

Нет, что-то не так. Числа подозрительно большие. Вернемся к выводу *od*: каждый 4-байтный элемент содержит 2 нулевых байта и 2 ненулевых байта, так что смещения (по крайней мере в начале файла) как минимум 16-битные. Вероятно, в этом файле используется другой *endianness* (порядок байт)? Порядок байт в Mathematica, по умолчанию, это *little-endian*, как тот, что используется в Intel CPU. Теперь я переключаю на *big-endian*:

```
In[]:= BinaryReadList["c:/tmp1/fortunes.dat", "UnsignedInteger32",  
  ByteOrdering -> 1]  
  
Out[]= {2, 431, 187, 15, 0, 620756992, 0, 43, 96, 143, 223, 276, \  
328, 380, 427, 486, 544, 571, 634, 709, 772, 829, 872, 935, 993, \  
1049, 1069, 1151, 1197, 1237, 1285, 1339, 1380, 1410, 1453, 1486, \  
1527, 1564, 1633, 1658, 1745, 1802, 1875, 1946, 2040, 2087, 2137, \  
2187, 2208, 2244, 2273, 2297, 2343, 2371, 2425, 2467, 2531, 2581, \  
2637, 2654, 2698, 2726, 2751, 2799, 2840, 2883, 2913, 2958, 3023, \  
3066, 3131, 3174, 3205, 3257, 3282, 3330, 3387, 3431, 3500, 3552, \  
...
```

Теперь это можно читать. Я выбрал случайный элемент (3066), а это 0xBFA в шестнадцатеричном виде. Открываю текстовый файл 'fortunes' в шестнадцатеричном редакторе, выставляю 0xBFA как смещение, и вижу эту фразу:

```
% od -t x1 -c --skip-bytes=0xbfa --address-radix=x fortunes  
000bfa 44 6f 20 77 68 61 74 20 63 6f 6d 65 73 20 6e 61  
        D   o       w   h   a   t       c   o   m   e   s       n   a  
000c0a 74 75 72 61 6c 6c 79 2e 20 20 53 65 65 74 68 65  
        t   u   r   a   l   l   y   .       S   e   e   t   h   e  
000c1a 20 61 6e 64 20 66 75 6d 65 20 61 6e 64 20 74 68  
        a   n   d       f   u   m   e       a   n   d       t   h  
....
```

Или:

```
Do what comes naturally.  Seethe and fume and throw a tantrum.  
%
```

Другие смещения тоже можно проверить и, да, они верные.

В Mathematica я также могу удостовериться, что каждый следующий элемент больше предыдущего. Т.е., элементы возрастают. На математическом жаргоне, это называется *строго возрастающая монотонная ф-ция*.

```
In[]:= Differences[input]  
  
Out[]= {429, -244, -172, -15, 620756992, -620756992, 43, 53, 47, \  
80, 53, 52, 52, 47, 59, 58, 27, 63, 75, 63, 57, 43, 63, 58, 56, 20, \  
82, 46, 40, 48, 54, 41, 30, 43, 33, 41, 37, 69, 25, 87, 57, 73, 71, \  
94, 47, 50, 50, 21, 36, 29, 24, 46, 28, 54, 42, 64, 50, 56, 17, 44, \  
28, 25, 48, 41, 43, 30, 45, 65, 43, 65, 43, 31, 52, 25, 48, 57, 44, \  
69, 52, 62, 73, 62, 53, 37, 68, 71, 50, 41, 57, 69, 58, 70, 45, 54, \  
38, 45, 50, 42, 61, 47, 43, 62, 189, 61, 56, 30, 85, 63, 48, 61, 58, \  
81, 50, 55, 63, 83, 80, 49, 42, 94, 54, 67, 81, 52, 57, 68, 43, 28, \  
120, 64, 53, 81, 33, 82, 88, 29, 61, 32, 75, 63, 70, 47, 101, 60, 79, \  
33, 48, 65, 35, 59, 47, 55, 22, 43, 35, 102, 53, 80, 65, 45, 31, 29, \  
69, 32, 25, 38, 34, 35, 49, 59, 39, 41, 18, 43, 41, 83, 37, 31, 34, \  
59, 72, 72, 81, 77, 53, 53, 50, 51, 45, 53, 39, 70, 54, 103, 33, 70, \  
51, 95, 67, 54, 55, 65, 61, 54, 54, 53, 45, 100, 63, 48, 65, 71, 23, \  
28, 43, 51, 61, 101, 65, 39, 78, 66, 43, 36, 56, 40, 67, 92, 65, 61, \  
31, 45, 52, 94, 82, 82, 91, 46, 76, 55, 19, 58, 68, 41, 75, 30, 67, \  
92, 54, 52, 108, 60, 56, 76, 41, 79, 54, 65, 74, 112, 76, 47, 53, 61, \  
66, 53, 28, 41, 81, 75, 69, 89, 63, 60, 18, 18, 50, 79, 92, 37, 63, \  
88, 52, 81, 60, 80, 26, 46, 80, 64, 78, 70, 75, 46, 91, 22, 63, 46, \  
34, 81, 75, 59, 62, 66, 74, 76, 111, 55, 73, 40, 61, 55, 38, 56, 47, \  
78, 81, 62, 37, 41, 60, 68, 40, 33, 54, 34, 41, 36, 49, 44, 68, 51, \  
50, 52, 36, 53, 66, 46, 41, 45, 51, 44, 44, 33, 72, 40, 71, 57, 55, \  
39, 66, 40, 56, 68, 43, 88, 78, 30, 54, 64, 36, 55, 35, 88, 45, 56, \  
76, 61, 66, 29, 76, 53, 96, 36, 46, 54, 28, 51, 82, 53, 60, 77, 21, \  
84, 53, 43, 104, 85, 50, 47, 39, 66, 78, 81, 94, 70, 49, 67, 61, 37, \  
51, 91, 99, 58, 51, 49, 46, 68, 72, 40, 56, 63, 65, 41, 62, 47, 41, \  
43, 30, 43, 67, 78, 80, 101, 61, 73, 70, 41, 82, 69, 45, 65, 38, 41, \  
...
```

9.4. ФАЙЛ С ИНДЕКСАМИ В ПРОГРАММЕ FORTUNE

```
57, 82, 66}
```

Как мы видим, за исключением только первых 6-и значений (которые, вероятно, относятся к заголову файла с индексами), все числа на самом деле это длины текстовых строк (смещение следующей фразы минус смещение текущей фразы на самом деле это длина текущей фразы).

Важно помнить, что порядок байт (*endiannes*) легко спутать с неверным началом массива. Действительно, из вывода *od* мы можем увидеть что каждый элемент начинается с двух нулей. Но если сдвинуть на два байта в любую сторону, массив можно интерпретировать как *little-endian*:

```
% od -t x1 --address-radix=x --skip-bytes=0x32 fortunes.dat
000032 01 48 00 00 01 7c 00 00 01 ab 00 00 01 e6 00 00
000042 02 20 00 00 02 3b 00 00 02 7a 00 00 02 c5 00 00
000052 03 04 00 00 03 3d 00 00 03 68 00 00 03 a7 00 00
000062 03 e1 00 00 04 19 00 00 04 2d 00 00 04 7f 00 00
000072 04 ad 00 00 04 d5 00 00 05 05 00 00 05 3b 00 00
000082 05 64 00 00 05 82 00 00 05 ad 00 00 05 ce 00 00
000092 05 f7 00 00 06 1c 00 00 06 61 00 00 06 7a 00 00
0000a2 06 d1 00 00 07 0a 00 00 07 53 00 00 07 9a 00 00
0000b2 07 f8 00 00 08 27 00 00 08 59 00 00 08 8b 00 00
0000c2 08 a0 00 00 08 c4 00 00 08 e1 00 00 08 f9 00 00
0000d2 09 27 00 00 09 43 00 00 09 79 00 00 09 a3 00 00
0000e2 09 e3 00 00 0a 15 00 00 0a 4d 00 00 0a 5e 00 00
...
```

Если будем интерпретировать массив как *little-endian*, то первый элемент это 0x4801, второй 0x7C01, итд. Старшая 8-битная часть каждого из этих 16-битных значений, выглядит для нас как случайная, а младшая 8-битная часть возрастает.

Но я уверен, что это массив *big-endian*, потому что самый последний 32-битных элемент в файле тоже *big-endian* (и это 00 00 5f c4):

```
% od -t x1 --address-radix=x fortunes.dat
...
000660 00 00 59 0d 00 00 59 55 00 00 59 7d 00 00 59 b5
000670 00 00 59 f4 00 00 5a 35 00 00 5a 5e 00 00 5a 9c
000680 00 00 5a cb 00 00 5a f4 00 00 5b 1f 00 00 5b 3d
000690 00 00 5b 68 00 00 5b ab 00 00 5b f9 00 00 5c 49
0006a0 00 00 5c ae 00 00 5c eb 00 00 5d 34 00 00 5d 7a
0006b0 00 00 5d a3 00 00 5d f5 00 00 5e 3a 00 00 5e 67
0006c0 00 00 5e a8 00 00 5e ce 00 00 5e f7 00 00 5f 30
0006d0 00 00 5f 82 00 00 5f c4
0006d8
```

Возможно, разработчик программы *fortune* имел *big-endian*-компьютер, а может программа была портирована с чего-то такого.

ОК, массив *big-endian*, и, если пользоваться здравым смыслом, самая первая фраза в текстовом файле должна начинаться с нулевого смещения. Так что нулевое значение должно присутствовать где-то в самом начале. У нас в начале пара нулевых элементов. Но второй выглядит более привлекательно: после него идет 43, и 43 это корректное смещение, по которому в текстовом файле находится фраза на английском.

Последний элемент массива это 0x5FC4, а в текстовом файле нет байта по этому смещению. Так что последний элемент указывает на место сразу за концом файла. Вероятно так сделано, потому что длина фразы вычисляется как разница между смещением текущей фразы и смещением следующей фразы. Это может быть быстрее, чем искать в строке символ процента. Но это не будет работать для последнего элемента. Так что элемент-пустышка добавлен в конец массива.

Так что первые 5 32-битных значений, видимо, это что-то вроде заголовка.

О, и я забыл подсчитать количество фраз в текстовом файле:

```
% cat fortunes | grep % | wc -l
432
```

Количество фраз может присутствовать в индексе, а может и нет. В случае с простейшими файлами индексов, количество элементов легко получить из размера файла. Так или иначе, в этом текстовом файле 432 фразы. И мы видим что-то очень знакомое во втором элементе (значение 431). Я

9.4. ФАЙЛ С ИНДЕКСАМИ В ПРОГРАММЕ FORTUNE

проверил остальные файлы (literature.dat и riddles.dat в Ubuntu Linux), и да, второй 32-битный элемент это количество фраз минус 1. А почему *минус 1*? Вероятно, это не количество фраз, а скорее номер последней фразы (считая с нуля)?

В заголовке есть еще и другие элементы. В Mathematica, я загружаю каждый из трех доступных файлов и смотрю на заголовки:

```
In[14]:= input = BinaryReadList["c:/tmp1/fortunes.dat", "UnsignedInteger32",  
    ByteOrdering -> 1];  
  
In[18]:= BaseForm[Take[input, {1, 6}], 16]  
Out[18]//BaseForm=  
    {216, 1af16, bb16, f16, 016, 2500000016}  
  
In[19]:= input = BinaryReadList["c:/tmp1/literature.dat", "UnsignedInteger32",  
    ByteOrdering -> 1];  
  
In[20]:= BaseForm[Take[input, {1, 6}], 16]  
Out[20]//BaseForm=  
    {216, 10616, 98316, 1a16, 016, 2500000016}  
  
In[21]:= input = BinaryReadList["c:/tmp1/riddles.dat", "UnsignedInteger32", ByteOrdering -> 1];  
  
In[22]:= BaseForm[Take[input, {1, 6}], 16]  
Out[22]//BaseForm=  
    {216, 8016, 7f216, 2416, 016, 2500000016}
```

Не знаю, что могут означать другие значения, кроме размера файла с индексами. Некоторые поля одинаковые для всех файлов, некоторые нет. Судя по моему опыту, тут могут быть:

- сигнатура файла;
- версия файла;
- контрольная сумма;
- какие-нибудь флаги;
- может быть даже идентификатор языка;
- дата/время текстового файла, так что программа *fortune* будет регенирировать файл с индексами только тогда, когда пользователь изменит текстовый файл.

Например, .SYM-файлы в Oracle (9.5 (стр. 956)), содержащие таблицу символов DLL-файлов, также содержат дату/время соответствующей DLL, чтобы быть уверенным, что файл всё еще верен.

Но с другой стороны, дата/время и текстового файла и файла с индексами легко может испортиться после архивирования/разархивирования/инсталлирования/развертывания/итд.

По моему мнению, здесь нет даты/времени. Самый компактный способ представления даты и времени это UNIX-время, а это большое 32-битное число. Ничего такого мы здесь не видим. Другие способы представления даже еще менее компактны.

Вот вероятный алгоритм, как работает *fortune*:

- прочитать номер последней фразы из второго элемента;
- сгенерировать случайное число в пределах 0..номер_последней_фразы;
- найти соответствующий элемент в массиве смещений, также прочитать следующее смещение;
- вывести в *stdout* все символы из текстового файла начиная со смещения до следующего смещения минус 2 (чтобы проигнорировать завершающий знак процента и символ из следующей фразы).

```
Phrase one.
%
Phrase two.
%
```

```
% od -t x1 --address-radix=x fortunes.dat
0000000 00 00 00 02 00 00 00 00 00 00 00 00 bb 00 00 00 0f
0000010 00 00 00 00 25 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 1c
```

```
% /usr/games/fortune
fortune: no fortune found
```

```
% od -t x1 --address-radix=x fortunes.dat
000000 00 00 00 02 00 00 00 01 00 00 00 bb 00 00 00 0f
000010 00 00 00 00 25 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 1c
```

```
% /usr/games/fortune
Phrase one.
```

```
% od -t x1 --address-radix=x fortunes.dat
000000 00 00 00 02 00 00 00 01 00 00 00 bb 00 00 00 0f
000010 00 00 00 00 25 00 00 00 00 00 00 00
00001c
```

Из этого эксперимента мы узнали что знак процента из текстового файла все-таки обрабатывается, а размер вычисляется не так, как предполагал, вероятно, последний элемент массива не используется. Хотя, его все еще можно использовать. И возможно он использовался в прошлом?

9.4.2. Файлы

Для нетерпеливых читателей, исходники *fortune* здесь: <https://launchpad.net/ubuntu/+source/fortune-mod/1:1.99.1-3.1ubuntu4>.

955

9.5. Oracle RDBMS: .SYM-файлы

Когда процесс в Oracle RDBMS терпит серьезную ошибку (crash), он записывает массу информации в лог-файлы, включая состояние стека, вроде:

```
----- Call Stack Trace -----
calling      call      entry      argument values in hex
location     type      point      (? means dubious value)
-----
_kqvrow()    00000000
_opifch2()+2729  CALLptr  00000000    23D4B914 E47F264 1F19AE2
EB1C8A8 1
_kpoal8()+2832  CALLrel  _opifch2()  89 5 EB1CC74
_opiodr()+1248  CALLreg  00000000    5E 1C EB1F0A0
_ttccip()+1051  CALLreg  00000000    5E 1C EB1F0A0 0
_opitsk()+1404  CALL???  00000000    C96C040 5E EB1F0A0 0 EB1ED30
EB1F1CC 53E52E 0 EB1F1F8
_opiino()+980   CALLrel  _opitsk()   0 0
_opiodr()+1248  CALLreg  00000000    3C 4 EB1FBF4
_opidrv()+1201  CALLrel  _opiodr()   3C 4 EB1FBF4 0
_sou2o()+55     CALLrel  _opidrv()   3C 4 EB1FBF4
_opimai_real()+124  CALLrel  _sou2o()    EB1FC04 3C 4 EB1FBF4
_opimai()+125    CALLrel  _opimai_real() 2 EB1FC2C
_OracleThreadStart@  CALLrel  _opimai()   2 EB1FF6C 7C88A7F4 EB1FC34 0
4()+830         EB1FD04
77E6481C       CALLreg  00000000    E41FF9C 0 0 E41FF9C 0 EB1FFC4
00000000       CALL???  00000000
```

Но конечно, для этого исполняемые файлы Oracle RDBMS должны содержать некоторую отладочную информацию, либо map-файлы с информацией о символах или что-то в этом роде.

Oracle RDBMS для Windows NT содержит информацию о символах в файлах с расширением .SYM, но его формат закрыт.

(Простые текстовые файлы — это хорошо, но они требуют дополнительной обработки (парсинга), и из-за этого доступ к ним медленнее.)

Посмотрим, сможем ли мы разобрать его формат. Выберем самый короткий файл orawtc8.sym, поставляемый с файлом orawtc8.dll в Oracle 8.1.7 ¹³.

¹³Будем использовать древнюю версию Oracle RDBMS сознательно, из-за более короткого размера его модулей

Вот я открываю этот файл в Hiew:



Мы также видим, что в общем-то, формат файла это: OSYM + какие-то бинарные данные + текстовые строки разделенные нулем + OSYM.

957

Отметим сигнатуры OSYM и строки здесь:

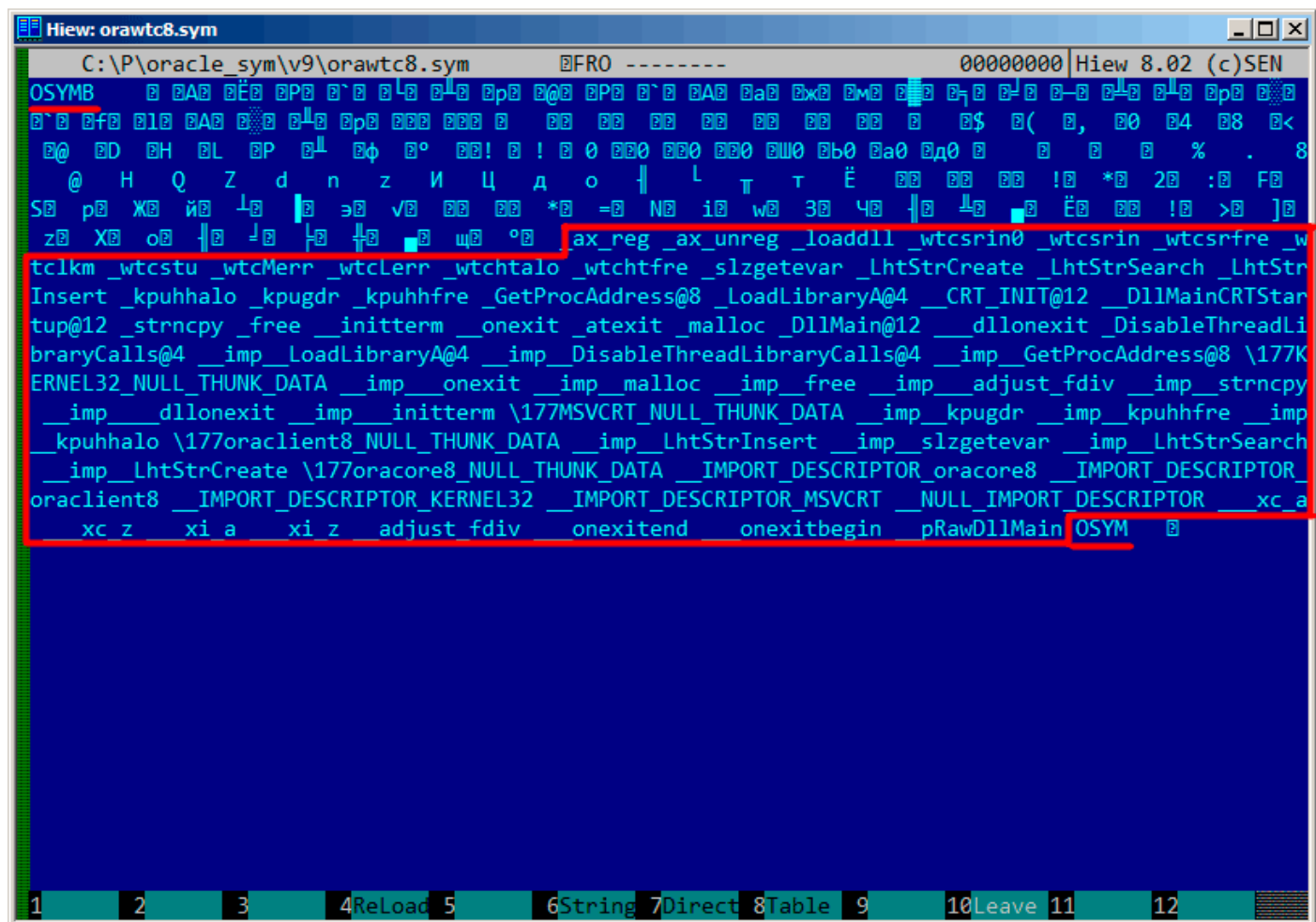


Рис. 9.22: Сигнатура OSYM и текстовые строки

Посмотрим. В Niew отметим весь блок со строками (исключая оконечивающую сигнатуру OSYM) и сохраним его в отдельный файл.

Затем запустим UNIX-утилиты *strings* и *wc* для подсчета текстовых строк:

```
strings strings_block | wc -l
66
```

Так что здесь 66 текстовых строк. Запомните это число.

Можно сказать, что в общем, как правило, количество *чего-либо* часто сохраняется в бинарном файле отдельно.

Это действительно так, мы можем найти значение 66 (0x42) в самом начале файла, прямо после сигнатуры OSYM:

```
$ hexdump -C orawtc8.sym
00000000  4f 53 59 4d 42 00 00 00 00 10 00 10 80 10 00 10 |OSYMB.....|
00000010  f0 10 00 10 50 11 00 10 60 11 00 10 c0 11 00 10 |....P...`.....|
00000020  d0 11 00 10 70 13 00 10 40 15 00 10 50 15 00 10 |....p...@...P...|
00000030  60 15 00 10 80 15 00 10 a0 15 00 10 a6 15 00 10 |`.....|
....
```

Конечно, 0x42 здесь это не байт, но скорее всего, 32-битное значение, запакованное как little-endian, поэтому мы видим 0x42 и затем как минимум 3 байта.

Почему мы полагаем, что оно 32-битное? Потому что файлы с символами в Oracle RDBMS могут быть очень большими. *oracle.sym* для главного исполняемого файла *oracle.exe* (версия 10.2.0.4) содержит 0x3A38E (238478) символов.

16-битного значения тут недостаточно.

Проверим другие .SYM-файлы как этот и это подтвердит нашу догадку: значение после 32-битной сигнатуры OSYM всегда отражает количество текстовых строк в файле.

Это общая особенность почти всех бинарных файлов: заголовок с сигнатурой плюс некоторая дополнительная информация о файле.

Рассмотрим бинарный блок поближе. Снова используя Hiew, сохраним блок начиная с адреса 8 (т.е. после 32-битного значения, отражающего количество) до блока со строками, в отдельный файл.

Посмотрим этот блок в Hiew:

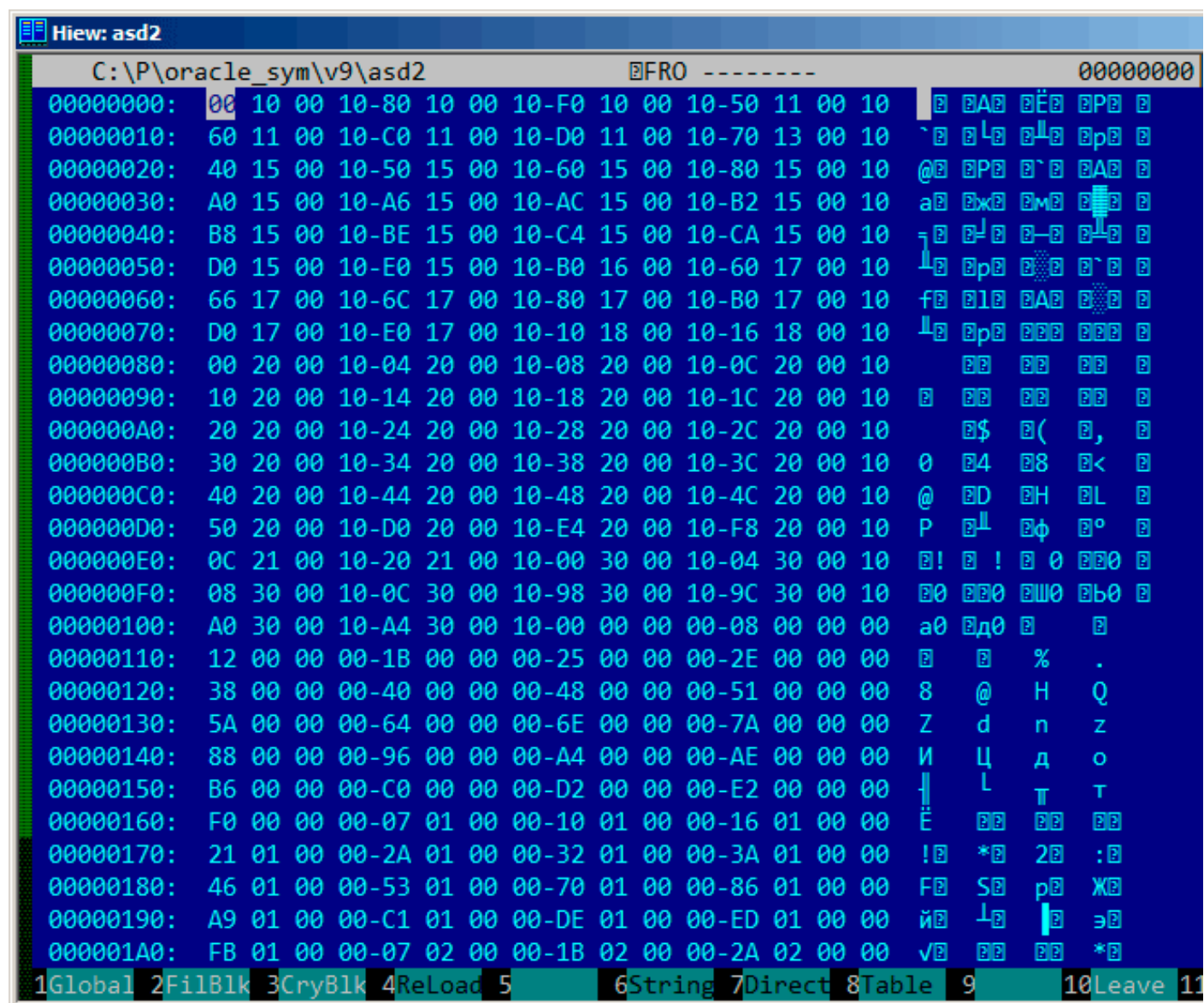


Рис. 9.23: Бинарный блок

Тут явно есть какая-то структура.

Добавим красные линии, чтобы разделить блок:

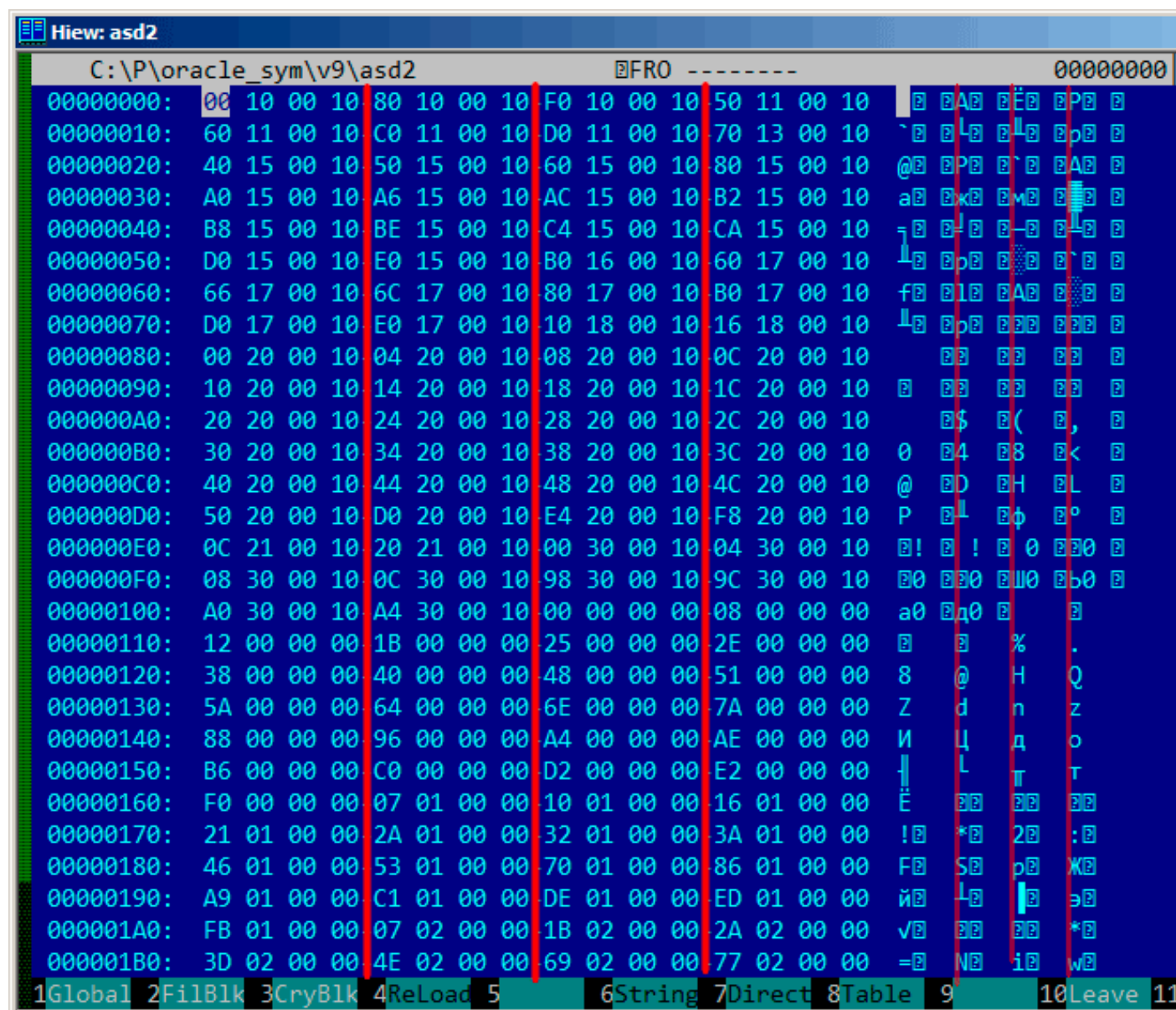


Рис. 9.24: Структура бинарного блока

Hiew, как и многие другие шестнадцатеричные редакторы, показывает 16 байт на строку.

Так что структура явно видна: здесь 4 32-битных значения на строку.

Эта структура видна визуально потому что некоторые значения здесь (вплоть до адреса 0x104) всегда в виде 0x1000xxxx, так что начинаются с байт 0x10 и 0.

Другие значения (начинающиеся на 0x108) всегда в виде 0x0000xxxx, так что начинаются с двух нулевых байт.

Посмотрим на этот блок как на массив 32-битных значений:

Листинг 9.9: первый столбец — это адрес

```
$ od -v -t x4 binary_block
0000000 10001000 10001080 100010f0 10001150
0000020 10001160 100011c0 100011d0 10001370
0000040 10001540 10001550 10001560 10001580
0000060 100015a0 100015a6 100015ac 100015b2
0000100 100015b8 100015be 100015c4 100015ca
0000120 100015d0 100015e0 100016b0 10001760
0000140 10001766 1000176c 10001780 100017b0
0000160 100017d0 100017e0 10001810 10001816
```

9.5. ORACLE RDBMS: .SYM-ФАЙЛЫ

```
0000200 10002000 10002004 10002008 1000200c
0000220 10002010 10002014 10002018 1000201c
0000240 10002020 10002024 10002028 1000202c
0000260 10002030 10002034 10002038 1000203c
0000300 10002040 10002044 10002048 1000204c
0000320 10002050 100020d0 100020e4 100020f8
0000340 1000210c 10002120 10003000 10003004
0000360 10003008 1000300c 10003098 1000309c
0000400 100030a0 100030a4 00000000 00000008
0000420 00000012 0000001b 00000025 0000002e
0000440 00000038 00000040 00000048 00000051
0000460 0000005a 00000064 0000006e 0000007a
0000500 00000088 00000096 000000a4 000000ae
0000520 000000b6 000000c0 000000d2 000000e2
0000540 000000f0 00000107 00000110 00000116
0000560 00000121 0000012a 00000132 0000013a
0000600 00000146 00000153 00000170 00000186
0000620 000001a9 000001c1 000001de 000001ed
0000640 000001fb 00000207 0000021b 0000022a
0000660 0000023d 0000024e 00000269 00000277
0000700 00000287 00000297 000002b6 000002ca
0000720 000002dc 000002f0 00000304 00000321
0000740 0000033e 0000035d 0000037a 00000395
0000760 000003ae 000003b6 000003be 000003c6
0001000 000003ce 000003dc 000003e9 000003f8
0001020
```

Здесь 132 значения, а это 66*2. Может быть здесь 2 32-битных значения на каждый символ, а может быть здесь два массива? Посмотрим.

Значения, начинающиеся с 0x1000 могут быть адресами. В конце концов, этот .SYM-файл для DLL, а базовый адрес для DLL в win32 это 0x10000000, и сам код обычно начинается по адресу 0x10001000.

Когда открываем файл orawtc8.dll в [IDA](#), базовый адрес другой, но тем не менее, первая функция это:

```
.text:60351000 sub_60351000      proc near
.text:60351000
.text:60351000 arg_0          = dword ptr 8
.text:60351000 arg_4          = dword ptr 0Ch
.text:60351000 arg_8          = dword ptr 10h
.text:60351000
.text:60351000          push    ebp
.text:60351001          mov     ebp, esp
.text:60351003          mov     eax, dword_60353014
.text:60351008          cmp     eax, 0FFFFFFFFh
.text:6035100B          jnz     short loc_6035104F
.text:6035100D          mov     ecx, hModule
.text:60351013          xor     eax, eax
.text:60351015          cmp     ecx, 0FFFFFFFFh
.text:60351018          mov     dword_60353014, eax
.text:6035101D          jnz     short loc_60351031
.text:6035101F          call    sub_603510F0
.text:60351024          mov     ecx, eax
.text:60351026          mov     eax, dword_60353014
.text:6035102B          mov     hModule, ecx
.text:60351031
.text:60351031 loc_60351031:      ; CODE XREF: sub_60351000+1D
.text:60351031          test    ecx, ecx
.text:60351033          jbe     short loc_6035104F
.text:60351035          push    offset ProcName ; "ax_reg"
.text:6035103A          push    ecx              ; hModule
.text:6035103B          call    ds:GetProcAddress
...
```

Ух ты, «ax_reg» звучит знакомо. Действительно, это самая первая строка в блоке строк!

Так что имя этой функции, похоже «ax_reg».

Вторая функция:

```
.text:60351080 sub_60351080      proc near
.text:60351080
.text:60351080 arg_0          = dword ptr 8
.text:60351080 arg_4          = dword ptr 0Ch
.text:60351080
.text:60351080          push    ebp
.text:60351081          mov     ebp, esp
.text:60351083          mov     eax, dword_60353018
.text:60351088          cmp     eax, 0FFFFFFFFh
.text:6035108B          jnz     short loc_603510CF
.text:6035108D          mov     ecx, hModule
.text:60351093          xor     eax, eax
.text:60351095          cmp     ecx, 0FFFFFFFFh
.text:60351098          mov     dword_60353018, eax
.text:6035109D          jnz     short loc_603510B1
.text:6035109F          call    sub_603510F0
.text:603510A4          mov     ecx, eax
.text:603510A6          mov     eax, dword_60353018
.text:603510AB          mov     hModule, ecx
.text:603510B1
.text:603510B1 loc_603510B1:      ; CODE XREF: sub_60351080+1D
.text:603510B1          test    ecx, ecx
.text:603510B3          jbe     short loc_603510CF
.text:603510B5          push    offset aAx_unreg ; "ax_unreg"
.text:603510BA          push    ecx              ; hModule
.text:603510BB          call    ds:GetProcAddress
...
```

Строка «ax_unreg» также это вторая строка в строке блок!

Адрес начала второй функции это 0x60351080, а второе значение в бинарном блоке это 10001080.

Так что это адрес, но для DLL с базовым адресом по умолчанию.

Мы можем быстро проверить и убедиться, что первые 66 значений в массиве (т.е. первая половина) это просто адреса функций в DLL, включая некоторые метки, и т.д.

Хорошо, что же тогда остальная часть массива? Остальные 66 значений, начинающиеся с 0x0000? Они похожи в пределах [0...0x3F8]. И не похоже, что это битовые поля: ряд чисел возрастает. Последняя шестнадцатеричная цифра выглядит как случайная, так что, не похоже, что это адрес чего-либо (в противном случае, он бы делился, может быть, на 4 или 8 или 0x10).

Спросим себя: что еще разработчики Oracle RDBMS хранили бы здесь, в этом файле?

Случайная догадка: это может быть адрес текстовой строки (название функции).

Это можно легко проверить, и да, каждое число — это просто позиция первого символа в блоке строк.

Вот и всё! Всё закончено.

Напишем утилиту для конвертирования .SYM-файлов в IDA-скрипт, так что сможем загружать .idc-скрипт и он выставит имена функций:

```
#include <stdio.h>
#include <stdint.h>
#include <io.h>
#include <assert.h>
#include <malloc.h>
#include <fcntl.h>
#include <string.h>

int main (int argc, char *argv[])
{
    uint32_t sig, cnt, offset;
    uint32_t *d1, *d2;
    int      h, i, remain, file_len;
    char     *d3;
    uint32_t array_size_in_bytes;

    assert (argc[1]); // file name
    assert (argc[2]); // additional offset (if needed)
```

```

// additional offset
assert (sscanf (argv[2], "%X", &offset)==1);

// get file length
assert ((h=open (argv[1], _O_RDONLY | _O_BINARY, 0))!=-1);
assert ((file_len=lseek (h, 0, SEEK_END))!=-1);
assert (lseek (h, 0, SEEK_SET)!=-1);

// read signature
assert (read (h, &sig, 4)==4);
// read count
assert (read (h, &cnt, 4)==4);

assert (sig==0x4D59534F); // OSYM

// skip timestamp (for 11g)
//_lseek (h, 4, 1);

array_size_in_bytes=cnt*sizeof(uint32_t);

// load symbol addresses array
d1=(uint32_t*)malloc (array_size_in_bytes);
assert (d1);
assert (read (h, d1, array_size_in_bytes)==array_size_in_bytes);

// load string offsets array
d2=(uint32_t*)malloc (array_size_in_bytes);
assert (d2);
assert (read (h, d2, array_size_in_bytes)==array_size_in_bytes);

// calculate strings block size
remain=file_len-(8+4)-(cnt*8);

// load strings block
assert (d3=(char*)malloc (remain));
assert (read (h, d3, remain)==remain);

printf ("#include <idc.idc>\n\n");
printf ("static main() {\n");

for (i=0; i<cnt; i++)
    printf ("\tMakeName(0x%08X, \"%s\");\n", offset + d1[i], &d3[d2[i]]);

printf ("}\n");

close (h);
free (d1); free (d2); free (d3);
};

```

Пример его работы:

```

#include <idc.idc>

static main() {
    MakeName(0x60351000, "_ax_reg");
    MakeName(0x60351080, "_ax_unreg");
    MakeName(0x603510F0, "_loaddll");
    MakeName(0x60351150, "_wtcsrln0");
    MakeName(0x60351160, "_wtcsrln");
    MakeName(0x603511C0, "_wtcsrfr");
    MakeName(0x603511D0, "_wtclkm");
    MakeName(0x60351370, "_wtcstu");
    ...
}

```

Файлы, использованные в этом примере, здесь: beginners.re.

9.6. ORACLE RDBMS: .MSB-ФАЙЛЫ

О, можно еще попробовать Oracle RDBMS для win64. Там ведь должны быть 64-битные адреса, верно?

8-байтная структура здесь видна даже еще лучше:

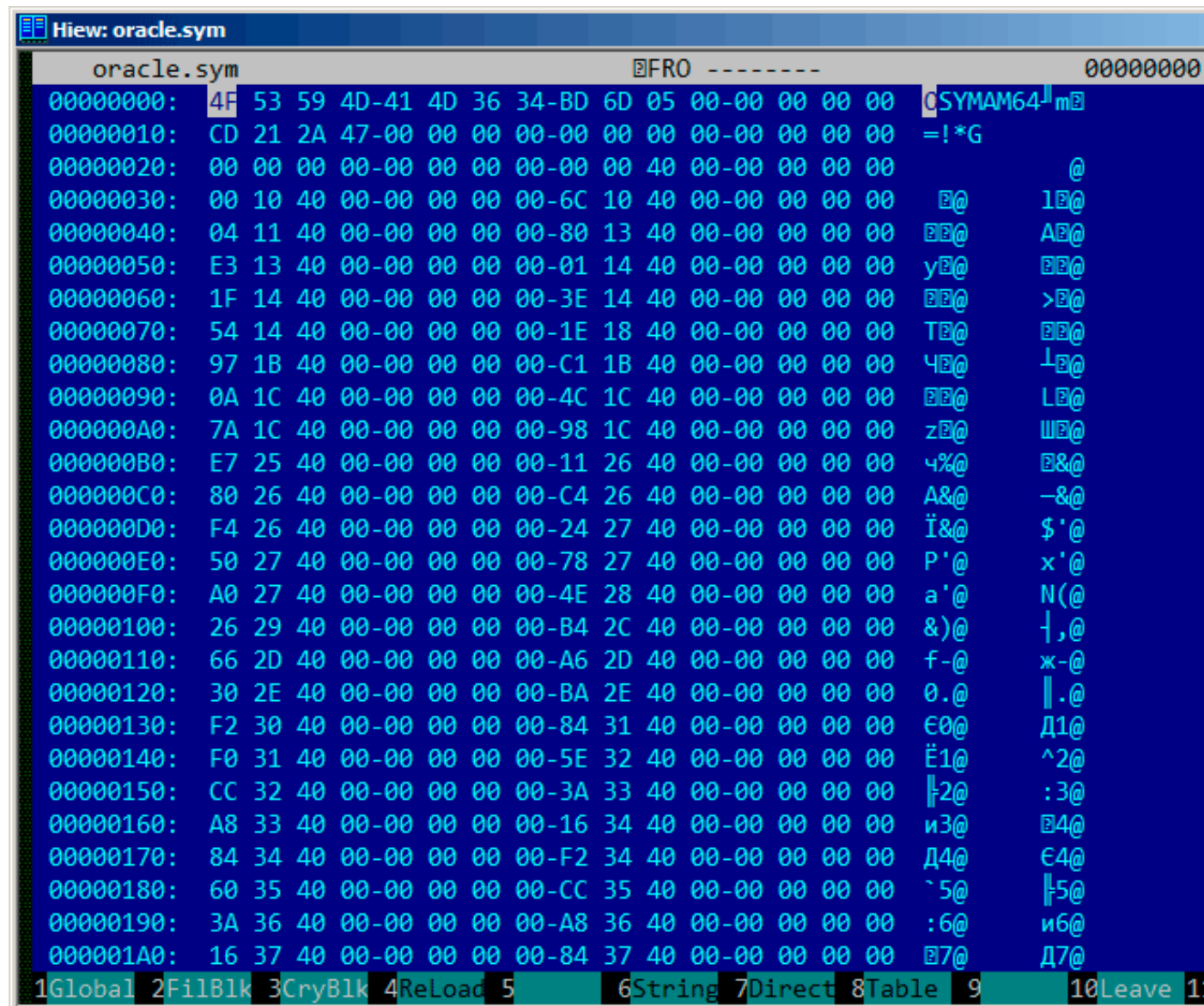


Рис. 9.25: пример .SYM-файла из Oracle RDBMS для win64

Так что да, все таблицы здесь имеют 64-битные элементы, даже смещения строк!

Сигнатура теперь 0SYMMAM64, чтобы отличить целевую платформу, очевидно.

Вот и всё! Вот также библиотека в которой есть функция для доступа к .SYM-файлам Oracle RDBMS: [GitHub](#).

9.6. Oracle RDBMS: .MSB-файлы

Работая над решением задачи, всегда полезно знать ответ.

Законы Мерфи, правило точности

Это бинарный файл, содержащий сообщения об ошибках вместе с их номерами.

Давайте попробуем понять его формат и найти способ распаковать его.

9.6. ORACLE RDBMS: .MSB-ФАЙЛЫ

В Oracle RDBMS имеются файлы с сообщениями об ошибках в текстовом виде, так что мы можем сравнивать файлы: текстовый и запакованный бинарный ¹⁴.

Это начало файла ORAUS.MSG без ненужных комментариев:

Листинг 9.10: Начало файла ORAUS.MSG без комментариев

```
00000, 00000, "normal, successful completion"
00001, 00000, "unique constraint (%s.%s) violated"
00017, 00000, "session requested to set trace event"
00018, 00000, "maximum number of sessions exceeded"
00019, 00000, "maximum number of session licenses exceeded"
00020, 00000, "maximum number of processes (%s) exceeded"
00021, 00000, "session attached to some other process; cannot switch session"
00022, 00000, "invalid session ID; access denied"
00023, 00000, "session references process private memory; cannot detach session"
00024, 00000, "logins from more than one process not allowed in single-process mode"
00025, 00000, "failed to allocate %s"
00026, 00000, "missing or invalid session ID"
00027, 00000, "cannot kill current session"
00028, 00000, "your session has been killed"
00029, 00000, "session is not a user session"
00030, 00000, "User session ID does not exist."
00031, 00000, "session marked for kill"
...
```

Первое число — это код ошибки. Второе это, вероятно, могут быть дополнительные флаги.

¹⁴Текстовые файлы с открытым кодом в Oracle RDBMS имеются не для каждого .MSB-файла, вот почему мы будем работать над его форматом

Давайте откроем бинарный файл ORAUS.MSB и найдем эти текстовые строки. И вот они:

The screenshot shows a hex editor window titled "Hiew: oraus.msb". The address bar indicates the file path "C:\tmp\oraus.msb". The main editing area displays a mix of hexadecimal and ASCII characters. Red horizontal lines highlight specific ASCII text segments within the binary data, including error messages from Oracle RDBMS. At the bottom, a toolbar shows various icons and a list of operations: 1, 2, 3, 4ReLoad, 5, 6String, 7Direct, 8Table, 9, 10Leave, 11, 12.

Рис. 9.26: Hiew: первый блок

Мы видим текстовые строки (включая те, с которых начинается файл ORAUS.MSG) перемежаемые с какими-то бинарными значениями. Мы можем довольно быстро обнаружить что главная часть бинарного файла поделена на блоки размером 0x200 (512) байт.

Посмотрим содержимое первого блока:

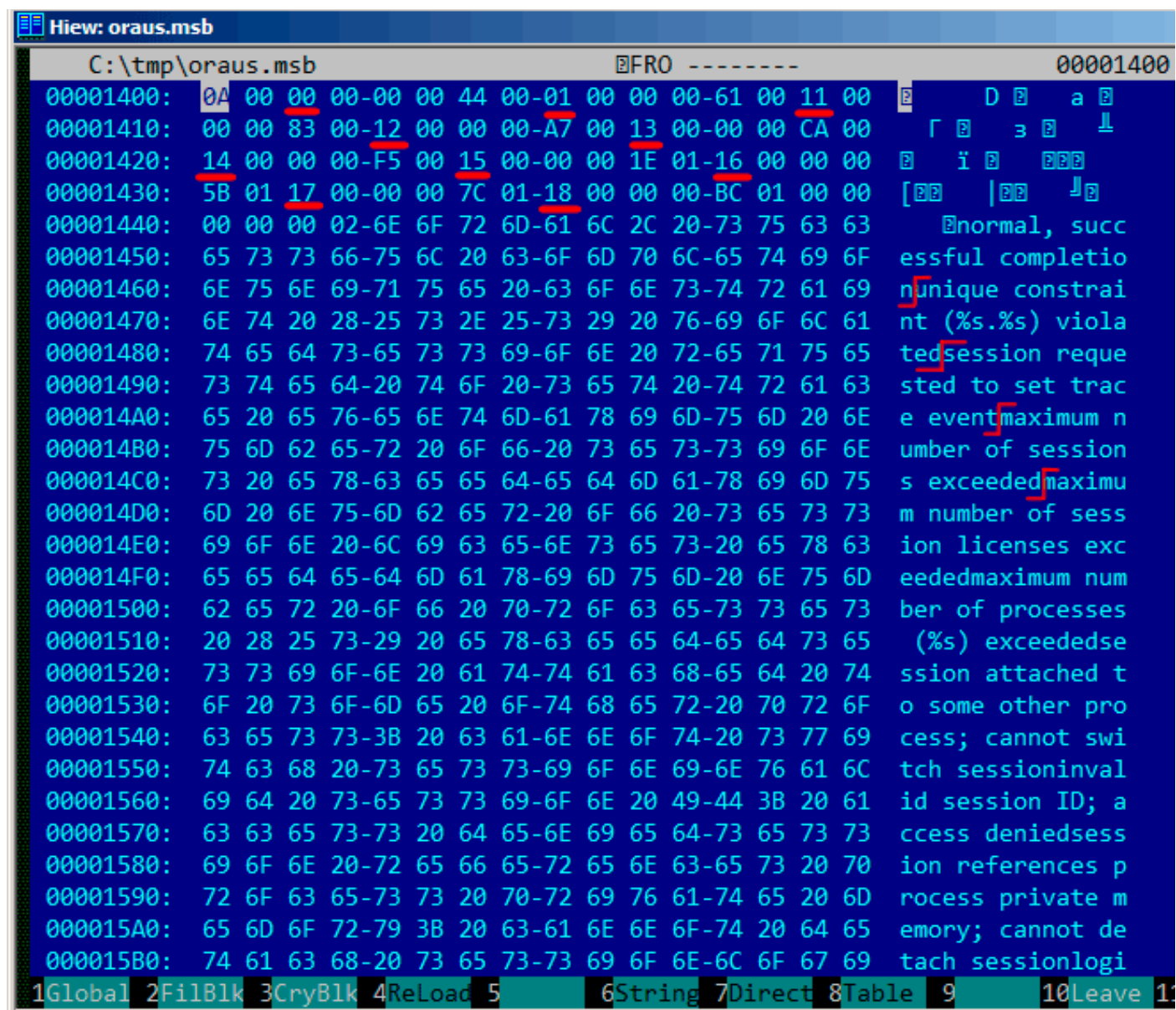


Рис. 9.27: Hiew: первый блок

Мы видим тексты первых сообщений об ошибках. Что мы видим еще, так это то, что здесь нет нулевых байтов между сообщениями. Это значит, что это не оканчивающиеся нулем Си-строки. Как следствие, длина каждого сообщения об ошибке должна быть как-то закодирована. Попробуем также найти номера ошибок. Файл ORAUS.MSG начинается с таких: 0, 1, 17 (0x11), 18 (0x12), 19 (0x13), 20 (0x14), 21 (0x15), 22 (0x16), 23 (0x17), 24 (0x18)... Найдем эти числа в начале блока и отметим их красными линиями. Период между кодами ошибок 6 байт. Это значит, здесь, наверное, 6 байт информации выделено для каждого сообщения об ошибке.

Первое 16-битное значение (здесь 0xA или 10) означает количество сообщений в блоке: это можно проверить глядя на другие блоки.

Действительно: сообщения об ошибках имеют произвольный размер. Некоторые длиннее, некоторые короче. Но длина блока всегда фиксирована, следовательно, никогда не знаешь, сколько сообщений можно запаковать в каждый блок.

Как мы уже отметили, так как это не оканчивающиеся нулем Си-строки, длина строки должна быть закодирована где-то.

Длина первой строки «normal, successful completion» это 29 (0x1D) байт. Длина второй строки «unique constraint (%s.%s) violated» это 34 (0x22) байт.

Мы не можем отыскать этих значений (0x1D или/и 0x22) в блоке.

9.6. ORACLE RDBMS: .MSB-ФАЙЛЫ

А вот еще кое-что. Oracle RDBMS должен как-то определять позицию строки, которую он должен загрузить, верно? Первая строка «normal, successful completion» начинается с позиции 0x1444 (если считать с начала бинарного файла) или с 0x44 (от начала блока). Вторая строка «unique constraint (%s.%s) violated» начинается с позиции 0x1461 (от начала файла) или с 0x61 (считая с начала блока). Эти числа (0x44 и 0x61) нам знакомы! Мы их можем легко отыскать в начале блока.

Так что, каждый 6-байтный блок это:

- 16-битный номер ошибки;
- 16-битный ноль (может быть, дополнительные флаги);
- 16-битная начальная позиция текстовой строки внутри текущего блока.

Мы можем быстро проверить остальные значения чтобы удостовериться в своей правоте. И здесь еще последний «пустой» 6-байтный блок с нулевым номером ошибки и начальной позицией за последним символом последнего сообщения об ошибке. Может быть именно так и определяется длина сообщения? Мы просто перебираем 6-байтные блоки в поисках нужного номера ошибки, затем мы узнаем позицию текстовой строки, затем мы узнаем позицию следующей текстовой строки глядя на следующий 6-байтный блок! Так мы определяем границы строки! Этот метод позволяет сэкономить место в файле не записывая длину строки! Нельзя сказать, что экономия памяти большая, но это интересный трюк.

Вернемся к заголовку .MSB-файла:

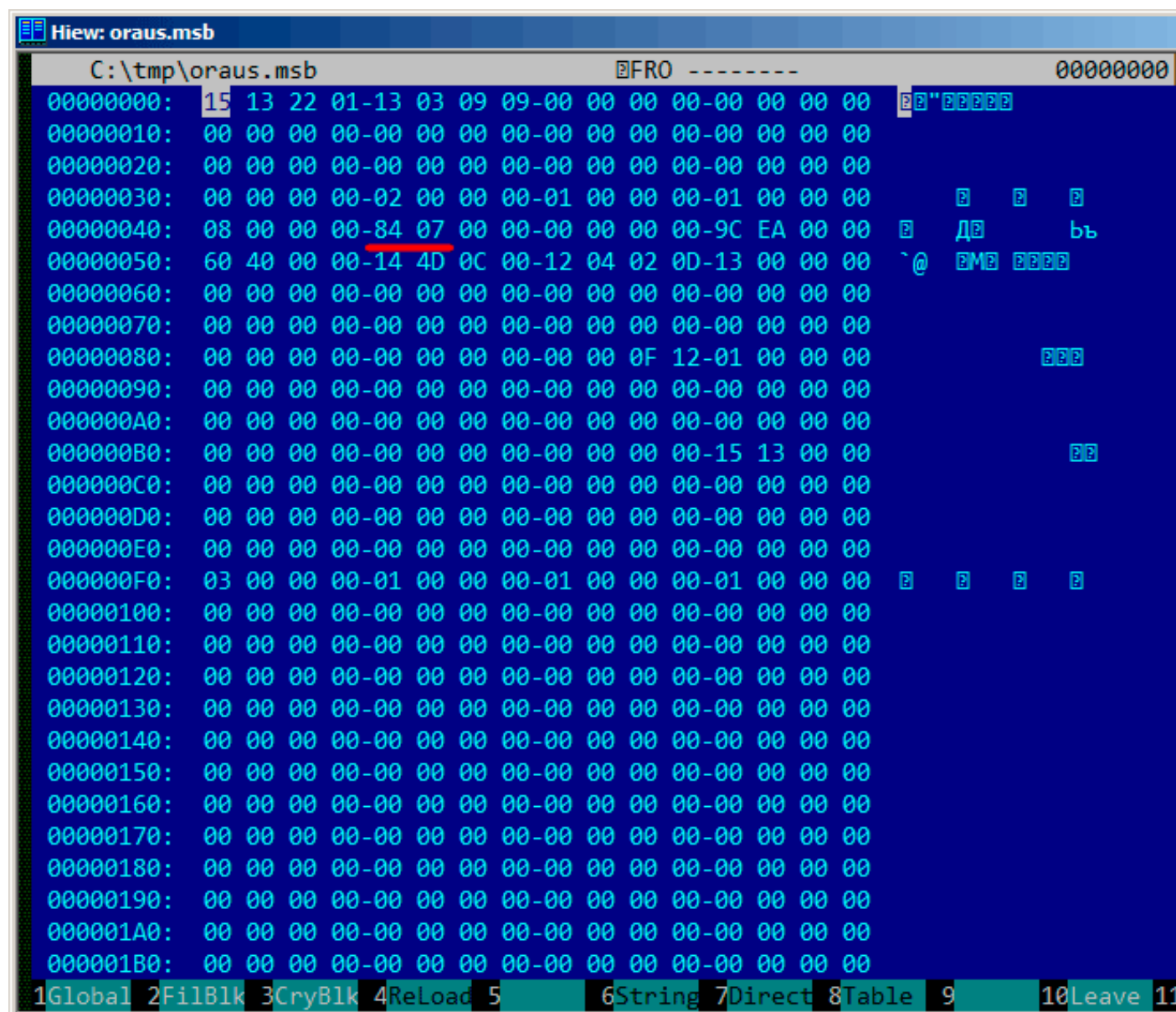


Рис. 9.28: Hiew: заголовок файла

Теперь мы можем быстро найти количество блоков (отмечено красным). Проверяем другие .MSB-файлы и оказывается что это справедливо для всех. Здесь есть много других значений, но мы не будем разбираться с ними, так как наша задача (утилита для распаковки) уже решена.

А если бы мы писали запаковщик .MSB-файлов, тогда нам наверное пришлось бы понять, зачем нужны остальные.

Тут еще есть таблица после заголовка, по всей видимости, содержащая 16-битные значения:

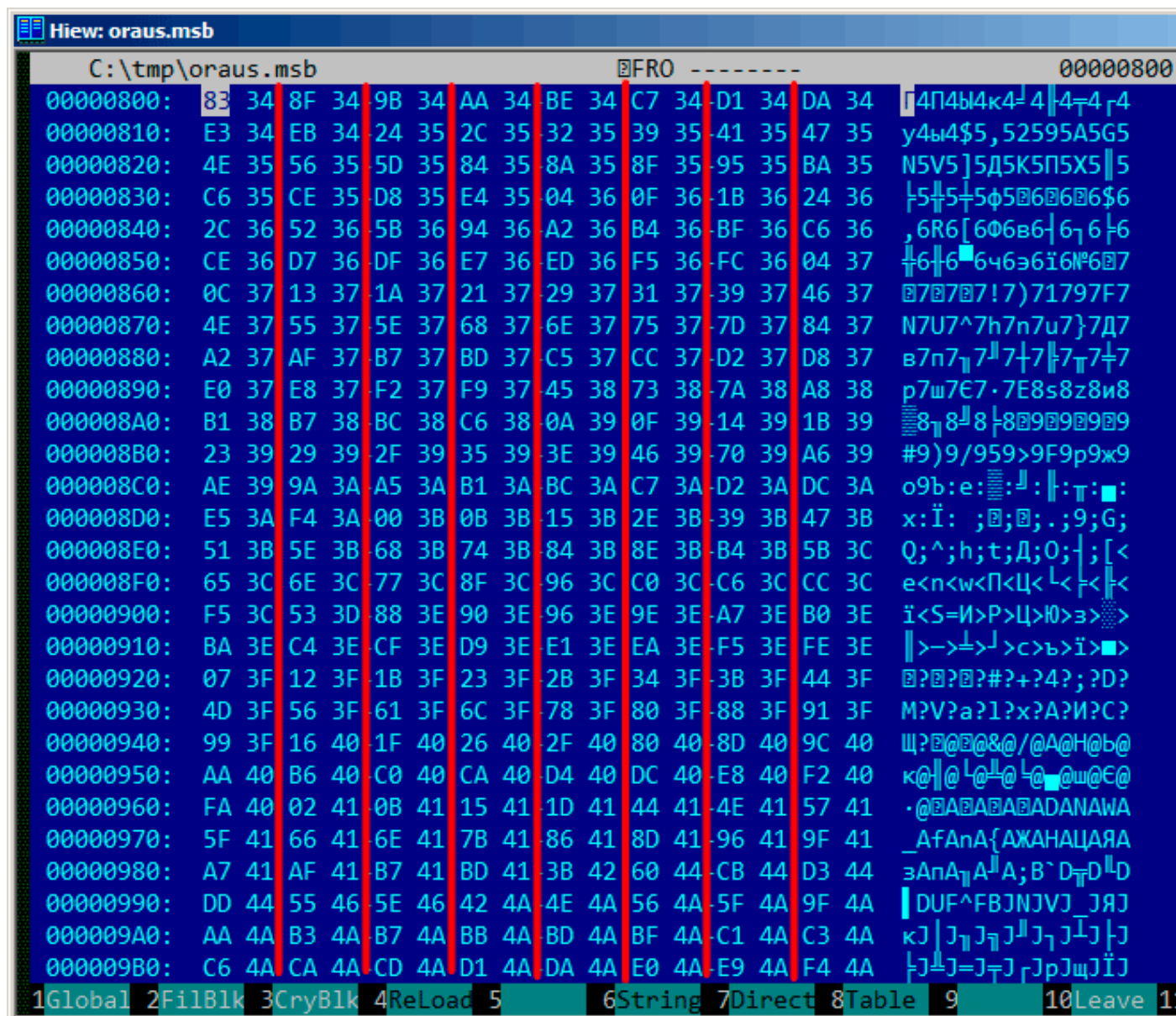


Рис. 9.29: Hiew: таблица last_errnos

Их длина может быть определена визуально (здесь нарисованы красные линии).

Когда мы сдампили эти значения, мы обнаружили, что каждое 16-битное число — это последний код ошибки для каждого блока.

Так вот как Oracle RDBMS быстро находит сообщение об ошибке:

- загружает таблицу, которую мы назовем last_errnos (содержащую последний номер ошибки для каждого блока);
- находит блок содержащий код ошибки, полагая что все коды ошибок увеличиваются и внутри каждого блока и также в файле;
- загружает соответствующий блок;
- перебирает 6-байтные структуры, пока не найдется соответствующий номер ошибки;
- находит позицию первого символа из текущего 6-байтного блока;
- находит позицию последнего символа из следующего 6-байтного блока;
- загружает все символы сообщения в этих пределах.

Это программа на Си которую мы написали для распаковки .MSB-файлов: beginners.re.

И еще два файла которые были использованы в этом примере

(Oracle RDBMS 11.1.0.6): beginners.re, beginners.re.

9.6.1. Вывод

Этот метод, наверное, слишком олд-скульный для современных компьютеров. Возможно, формат этого файла был разработан в середине 1980-х кем-то, кто программировал для мейнфреймов, учитывая экономию памяти и места на дисках. Тем не менее, это интересная (хотя и простая) задача на разбор проприетарного формата файла без заглядывания в код Oracle RDBMS.

9.7. Упражнения

Попробуйте разобраться со структурой бинарных файлов вашей любимой игры, включая файлы с очками, ресурсами, итд.

Вот еще бинарные файлы с известной структурой: utmp/wtmp, попробуйте разобраться с ними без документации.

EXIF-заголовок в JPEG-файлах документирован, но вы можете попытаться понять его структуру без помощи, просто делайте фотографии в разные дни/разное время, в разных местах и попробуйте отыскать дату/время и GPS-координаты в EXIF-е. Попробуйте пропатчить GPS-координаты, загрузите JPEG-файл в Facebook и посмотрите, куда на карте он поместит вашу фотографию.

Попробуйте пропатчить любую информацию в MP3-файле и посмотрите, как на это отреагирует ваш любимый MP3-плеер.

9.8. Дальнейшее чтение

[Pierre Capillon – Black-box cryptanalysis of home-made encryption algorithms: a practical case study.](#)

Глава 10

Прочее

10.1. Модификация исполняемых файлов

10.1.1. Текстовые строки

Сишные строки проще всего модифицировать (если они не зашифрованы) в любом шестнадцатеричном редакторе. Эта техника доступна даже для тех, кто вовсе не разбирается в машинном коде и форматах исполняемых файлов. Новая строка не должна быть длиннее старой, потому что имеется риск затереть какую-то другую переменную или код. Используя этот метод, очень много ПО было *локализовано* во времена MS-DOS, как минимум, в странах бывшего СССР, в 80-х и 90-х. Отсюда наличие очень странных аббревиатур и сокращений в *локализованном* ПО: там просто не было места для более длинных строк.

В строках в Delphi, длина строки также должна быть поправлена, если нужно.

10.1.2. x86-код

Часто необходимые задачи:

- Часто нужно просто запретить исполнение какой-либо инструкции. И чаще всего, это можно сделать, заполняя её байтом 0x90 ([NOP](#)).
- Условные переходы, имеющие опкод вроде 74 xx (JZ), так же могут быть заполнены двумя [NOP](#)-ами. Также возможно запретить исполнение условного перехода записав 0 во второй байт (*jump offset*).
- Еще одна часто необходимая задача это сделать условный переход всегда срабатывающим: это возможно при помощи записи 0xEB вместо опкода, это значит JMP.
- Исполнение функции может быть запрещено, если записать RETN (0xC3) в её начале. Это справедливо для всех функций кроме stdcall ([6.1.2](#) (стр. [713](#))). При модификации функций stdcall, нужно в начале определить количество аргументов (например, отыскав RETN в этой функции), и использовать RETN с 16-битным аргументом (0xC2).
- Иногда, запрещенная функция должна возвращать 0 или 1. Это можно сделать при помощи MOV EAX, 0 или MOV EAX, 1, но это слишком многословно. Способ получше это XOR EAX, EAX (2 байта 0x31 0xC0) или XOR EAX, EAX / INC EAX (3 байта 0x31 0xC0 0x40).

ПО может быть защищено от модификаций. Эта защита чаще всего реализуется путем чтения кода и вычисления контрольной суммы. Следовательно, код должен быть прочитан перед тем как защита сработает. Это можно определить установив точку останова на чтение памяти.

В [tracer](#) имеется опция BPM для этого.

Релоки в исполняемых PE-файлах ([6.5.2](#) (стр. [739](#))) не должны быть тронуты, потому что загрузчик Windows перезапишет ваш новый код.

(Они выделяются серым в Hiew, например: илл. [1.21](#)). В качестве последней меры, можно записать JMP для обхода релока, либо же придется модифицировать таблицу релоков.

10.2. Статистика количества аргументов функций

Всгде было интересно узнать, какое среднее количество аргументов у ф-ций.

Я проанализировал множество DLL из 32-битной Windows 7 (crypt32.dll, mfc71.dll, msvcr100.dll, shell32.dll, user32.dll, d3d11.dll, mshtml.dll, msxml6.dll, sqlncli11.dll, wininet.dll, mfc120.dll, msvbvm60.dll, ole32.dll, themeui.dll, wmp.dll) (потому что они используют соглашение о вызовах *stdcall*, так что легко просто *grep*-ать вывод дизассемблера используя просто `RETN X`).

- без аргументов: $\approx 29\%$
- 1 аргумент: $\approx 23\%$
- 2 аргументов: $\approx 20\%$
- 3 аргументов: $\approx 11\%$
- 4 аргументов: $\approx 7\%$
- 5 аргументов: $\approx 3\%$
- 6 аргументов: $\approx 2\%$
- 7 аргументов: $\approx 1\%$

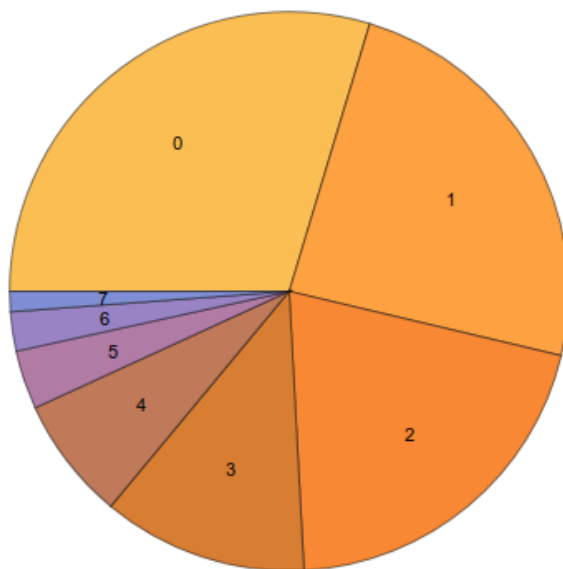


Рис. 10.1: Статистика количества аргументов функций

Это сильно зависит от стиля программирования, и может быть совсем другим в другом ПО.

10.3. Compiler intrinsic

Специфичная для компилятора функция не являющаяся обычной библиотечной функцией. Компилятор вместо её вызова генерирует определенный машинный код. Нередко, это псевдофункции для определенной инструкции [CPU](#).

Например, в языках Си/Си++ нет операции циклического сдвига, а во многих [CPU](#) она есть. Чтобы программисту были доступны эти инструкции, в MSVC есть псевдофункции `_rotl()` and `_rotr()`¹, которые компилятором напрямую транслируются в x86-инструкции ROL/ROR.

¹[MSDN](#)

Еще один пример это функции позволяющие генерировать SSE-инструкции прямо в коде.

Полный список intrinsics от MSVC: [MSDN](#).

10.4. Аномалии компиляторов

10.4.1. Oracle RDBMS 11.2 and Intel C++ 10.1

Intel C++ 10.1 которым скомпилирован Oracle RDBMS 11.2 Linux86, может сгенерировать два JZ идущих подряд, причем на второй JZ нет ссылки ниоткуда. Второй JZ таким образом, не имеет никакого смысла.

Листинг 10.1: kdli.o из libserver11.a

```
.text:08114CF1          loc_8114CF1: ; CODE XREF: __PG0SF539_kdlimemSer+89A
.text:08114CF1          ; __PG0SF539_kdlimemSer+3994
.text:08114CF1 8B 45 08          mov     eax, [ebp+arg_0]
.text:08114CF4 0F B6 50 14      movzx   edx, byte ptr [eax+14h]
.text:08114CF8 F6 C2 01          test    dl, 1
.text:08114CFB 0F 85 17 08 00 00 jnz     loc_8115518
.text:08114D01 85 C9            test    ecx, ecx
.text:08114D03 0F 84 8A 00 00 00 jz      loc_8114D93
.text:08114D09 0F 84 09 08 00 00 jz      loc_8115518
.text:08114D0F 8B 53 08          mov     edx, [ebx+8]
.text:08114D12 89 55 FC          mov     [ebp+var_4], edx
.text:08114D15 31 C0            xor     eax, eax
.text:08114D17 89 45 F4          mov     [ebp+var_C], eax
.text:08114D1A 50              push    eax
.text:08114D1B 52              push    edx
.text:08114D1C E8 03 54 00 00     call    len2nbytes
.text:08114D21 83 C4 08          add     esp, 8
```

Листинг 10.2: оттуда же

```
.text:0811A2A5          loc_811A2A5: ; CODE XREF: kdliSerLengths+11C
.text:0811A2A5          ; kdliSerLengths+1C1
.text:0811A2A5 8B 7D 08          mov     edi, [ebp+arg_0]
.text:0811A2A8 8B 7F 10          mov     edi, [edi+10h]
.text:0811A2AB 0F B6 57 14      movzx   edx, byte ptr [edi+14h]
.text:0811A2AF F6 C2 01          test    dl, 1
.text:0811A2B2 75 3E            jnz     short loc_811A2F2
.text:0811A2B4 83 E0 01          and     eax, 1
.text:0811A2B7 74 1F            jz      short loc_811A2D8
.text:0811A2B9 74 37            jz      short loc_811A2F2
.text:0811A2BB 6A 00            push    0
.text:0811A2BD FF 71 08          push    dword ptr [ecx+8]
.text:0811A2C0 E8 5F FE FF FF     call    len2nbytes
```

Возможно, это ошибка его кодегенератора, не выявленная тестами (ведь результирующий код и так работает нормально).

10.4.2. MSVC 6.0

Нашел такое в каком-то старом коде:

```
fabs
fild    [esp+50h+var_34]
fabs
fxch    st(1) ; первая инструкция
fxch    st(1) ; вторая инструкция
faddp   st(1), st
fcomp   [esp+50h+var_3C]
fnstsw  ax
test    ah, 41h
jz      short loc_100040B7
```


10.5. ITANIUM

Первая инструкция FXCH просто меняет ST(0) и ST(1), вторая делает то же самое, так что обе ничего не делают. Эта программа использует MFC42.dll, так что это может быть MSVC 6.0, 5.0 или даже MSVC 4.2 из 1990-х.

Эта пара ничего не делает, так что это не было обнаружено тестами компилятора MSVC. Или я ошибаюсь?

10.4.3. Итог

Еще подобные аномалии компиляторов в этой книге: [1.22.2](#) (стр. 306), [3.7.3](#) (стр. 483), [3.15.7](#) (стр. 523), [1.20.7](#) (стр. 293), [1.14.4](#) (стр. 137), [1.22.5](#) (стр. 323).

В этой книге здесь приводятся подобные случаи для того, чтобы легче было понимать, что подобные ошибки компиляторов все же имеют место быть, и не следует ломать голову над тем, почему он сгенерировал такой странный код.

10.5. Itanium

Еще одна очень интересная архитектура (хотя и почти провальная) это Intel Itanium ([IA64](#)). Другие OOE-процессоры сами решают, как переставлять инструкции и исполнять их параллельно, [EPIC](#)² это была попытка сдвинуть эти решения на компилятор: дать ему возможность самому группировать инструкции во время компиляции.

Это вылилось в очень сложные компиляторы.

Вот один пример [IA64](#)-кода: простой криптоалгоритм из ядра Linux:

Листинг 10.3: Linux kernel 3.2.0.4

```
#define TEA_ROUNDS          32
#define TEA_DELTA           0x9e3779b9

static void tea_encrypt(struct crypto_tfm *tfm, u8 *dst, const u8 *src)
{
    u32 y, z, n, sum = 0;
    u32 k0, k1, k2, k3;
    struct tea_ctx *ctx = crypto_tfm_ctx(tfm);
    const __le32 *in = (const __le32 *)src;
    __le32 *out = (__le32 *)dst;

    y = le32_to_cpu(in[0]);
    z = le32_to_cpu(in[1]);

    k0 = ctx->KEY[0];
    k1 = ctx->KEY[1];
    k2 = ctx->KEY[2];
    k3 = ctx->KEY[3];

    n = TEA_ROUNDS;

    while (n-- > 0) {
        sum += TEA_DELTA;
        y += ((z << 4) + k0) ^ (z + sum) ^ ((z >> 5) + k1);
        z += ((y << 4) + k2) ^ (y + sum) ^ ((y >> 5) + k3);
    }

    out[0] = cpu_to_le32(y);
    out[1] = cpu_to_le32(z);
}
```

И вот как он был скомпилирован:

Листинг 10.4: Linux Kernel 3.2.0.4 для Itanium 2 (McKinley)

```
0090|          tea_encrypt:
```

²Explicitly Parallel Instruction Computing

10.5. ITANIUM

```

0090|08 80 80 41 00 21      adds r16 = 96, r32          // ptr to ctx->KEY[2]
0096|80 C0 82 00 42 00      adds r8 = 88, r32           // ptr to ctx->KEY[0]
009C|00 00 04 00            nop.i 0
00A0|09 18 70 41 00 21      adds r3 = 92, r32          // ptr to ctx->KEY[1]
00A6|F0 20 88 20 28 00      ld4 r15 = [r34], 4         // load z
00AC|44 06 01 84          adds r32 = 100, r32;;      // ptr to ctx->KEY[3]
00B0|08 98 00 20 10 10      ld4 r19 = [r16]           // r19=k2
00B6|00 01 00 00 42 40      mov r16 = r0              // r0 always contain zero
00BC|00 08 CA 00          mov.i r2 = ar.lc           // save lc register
00C0|05 70 00 44 10 10      ld4 r14 = [r34]           // load y
      9E FF FF FF 7F 20
00CC|92 F3 CE 6B          movl r17 = 0xFFFFFFFF9E3779B9;; // TEA_DELTA
00D0|08 00 00 00 01 00      nop.m 0
00D6|50 01 20 20 20 00      ld4 r21 = [r8]            // r21=k0
00DC|F0 09 2A 00          mov.i ar.lc = 31         // TEA_ROUNDS is 32
00E0|0A A0 00 06 10 10      ld4 r20 = [r3];;         // r20=k1
00E6|20 01 80 20 20 00      ld4 r18 = [r32]          // r18=k3
00EC|00 00 04 00          nop.i 0
00F0|
00F0|                                loc_F0:
00F0|09 80 40 22 00 20      add r16 = r16, r17        // r16=sum, r17=TEA_DELTA
00F6|D0 71 54 26 40 80      shladd r29 = r14, 4, r21  // r14=y, r21=k0
00FC|A3 70 68 52          extr.u r28 = r14, 5, 27;;
0100|03 F0 40 1C 00 20      add r30 = r16, r14
0106|B0 E1 50 00 40 40      add r27 = r28, r20;;      // r20=k1
010C|D3 F1 3C 80          xor r26 = r29, r30;;
0110|0B C8 6C 34 0F 20      xor r25 = r27, r26;;
0116|F0 78 64 00 40 00      add r15 = r15, r25        // r15=z
011C|00 00 04 00          nop.i 0;;
0120|00 00 00 00 01 00      nop.m 0
0126|80 51 3C 34 29 60      extr.u r24 = r15, 5, 27
012C|F1 98 4C 80          shladd r11 = r15, 4, r19   // r19=k2
0130|0B B8 3C 20 00 20      add r23 = r15, r16;;
0136|A0 C0 48 00 40 00      add r10 = r24, r18        // r18=k3
013C|00 00 04 00          nop.i 0;;
0140|0B 48 28 16 0F 20      xor r9 = r10, r11;;
0146|60 B9 24 1E 40 00      xor r22 = r23, r9
014C|00 00 04 00          nop.i 0;;
0150|11 00 00 00 01 00      nop.m 0
0156|E0 70 58 00 40 A0      add r14 = r14, r22
015C|A0 FF FF 48          br.cloop.sptk.few loc_F0;;
0160|09 20 3C 42 90 15      st4 [r33] = r15, 4        // store z
0166|00 00 00 02 00 00      nop.m 0
016C|20 08 AA 00          mov.i ar.lc = r2;;        // restore lc register
0170|11 00 38 42 90 11      st4 [r33] = r14          // store y
0176|00 00 00 02 00 80      nop.i 0
017C|08 00 84 00          br.ret.sptk.many b0;;

```

Прежде всего, все инструкции **IA64** сгруппированы в пачки (bundle) из трех инструкций. Каждая пачка имеет размер 16 байт (128 бит) и состоит из template-кода (5 бит) и трех инструкций (41 бит на каждую).

IDA показывает пачки как 6+6+4 байт — вы можете легко заметить эту повторяющуюся структуру.

Все 3 инструкции каждой пачки обычно исполняются одновременно, если только у какой-то инструкции нет «стоп-бита».

Может быть, инженеры Intel и HP собрали статистику наиболее встречающихся шаблонных сочетаний инструкций и решили ввести типы пачек (**AKA** «templates»): код пачки определяет типы инструкций в пачке. Их всего 12. Например, нулевой тип это MII, что означает: первая инструкция это Memory (загрузка или запись в память), вторая и третья это I (инструкция, работающая с целочисленными значениями).

Еще один пример, тип 0x1d: MFB: первая инструкция это Memory (загрузка или запись в память), вторая это Float (инструкция, работающая с **FPU**), третья это Branch (инструкция перехода).

Если компилятор не может подобрать подходящую инструкцию в соответствующее место пачки, он может вставить **NOP**: вы можете здесь увидеть инструкции **por.i** (**NOP** на том месте где должна была бы находиться целочисленная инструкция) или **por.m** (инструкция обращения к памяти должна была находиться здесь).

10.6. МОДЕЛЬ ПАМЯТИ В 8086

Если вручную писать на ассемблере, **NOP**-ы могут вставляться автоматически.

И это еще не все. Пачки тоже могут быть объединены в группы. Каждая пачка может иметь «стоп-бит», так что все следующие друг за другом пачки вплоть до той, что имеет стоп-бит, могут быть исполнены одновременно. На практике, Itanium 2 может исполнять 2 пачки одновременно, таким образом, исполнять 6 инструкций одновременно.

Так что все инструкции внутри пачки и группы не могут мешать друг другу (т.е. не должны иметь data hazard-ов). А если это так, то результаты будут непредсказуемые.

На ассемблере, каждый стоп-бит маркируется как две точки с запятой (; ;) после инструкции.

Так, инструкции на [90-ас] могут быть исполнены одновременно: они не мешают друг другу. Следующая группа: [b0-cc].

Мы также видим стоп-бит на 10с. Следующая инструкция на 110 также имеет стоп-бит. Это значит, что эти инструкции должны исполняться изолированно от всех остальных (как в **CISC**). Действительно: следующая инструкция на 110 использует результат, полученный от предыдущей (значение в регистре r26), так что они не могут исполняться одновременно. Должно быть, компилятор не смог найти лучший способ распараллелить инструкции, или, иными словами, загрузить **CPU** насколько это возможно, отсюда так много стоп-битов и **NOP**-ов. Писать на ассемблере вручную это также очень трудная задача: программист должен группировать инструкции вручную.

У программиста остается возможность добавлять стоп-биты к каждой инструкции, но это сведет на нет всю мощность Itanium, ради которой он создавался.

Интересные примеры написания **IA64**-кода вручную можно найти в исходниках ядра Linux:

<http://go.yurichev.com/17322>.

Еще пара вводных статей об ассемблере Itanium: [Mike Burrell, *Writing Efficient Itanium 2 Assembly Code* (2010)]³, [papasutra of haquebright, *WRITING SHELLCODE FOR IA-64* (2001)]⁴.

Еще одна интересная особенность Itanium это *speculative execution* (исполнение инструкций заранее, когда еще не известно, нужно ли это) и бит NaT («not a thing»), отдаленно напоминающий **NaN**-числа:

[MSDN](#).

10.6. Модель памяти в 8086

Разбирая 16-битные программы для MS-DOS или Win16 (**8.5.3** (стр. 810) или **3.27.5** (стр. 631)), мы можем увидеть, что указатель состоит из двух 16-битных значений. Что это означает? О да, еще один дивный артефакт MS-DOS и 8086.

8086/8088 был 16-битным процессором, но мог адресовать 20-битное адресное пространство (таким образом мог адресовать 1MB внешней памяти). Внешняя адресное пространство было разделено между **RAM** (максимум 640KB), **ПЗУ**, окна для видеопамати, EMS-карт, и т.д.

Припомним также что 8086/8088 был на самом деле наследником 8-битного процессора 8080. Процессор 8080 имел 16-битное адресное пространство, т.е. мог адресовать только 64KB. И возможно в расчете на портирование старого ПО⁵, 8086 может поддерживать 64-килобайтные окна, одновременно много таких, расположенных внутри одномогабайтного адресного пространства. Это, в каком-то смысле, игрушечная виртуализация. Все регистры 8086 16-битные, так что, чтобы адресовать больше, специальные сегментные регистры (CS, DS, ES, SS) были введены. Каждый 20-битный указатель вычисляется, используя значения из пары состоящей из сегментного регистра и адресного регистра (например DS:BX) вот так:

$$real_address = (segment_register \ll 4) + address_register$$

Например, окно памяти для графики (**EGA**⁶, **VGA**⁷) на старых IBM PC-совместимых компьютерах имело размер 64KB.

Для доступа к нему, значение 0xA000 должно быть записано в один из сегментных регистров, например, в DS.

³Также доступно здесь: <http://yurichev.com/mirrors/RE/itanium.pdf>

⁴Также доступно здесь: <http://phrack.org/issues/57/5.html>

⁵Автор не уверен на 100% здесь

⁶Enhanced Graphics Adapter

⁷Video Graphics Array

10.7. ПЕРЕСТАНОВКА BASIC BLOCK-ОВ

Тогда DS:0 будет адресовать самый первый байт видеопамяти, а DS:0xFFFF — самый последний байт.

А реальный адрес на 20-битной адресной шине, на самом деле будет от 0xA0000 до 0xFFFFF.

Программа может содержать жесткопривязанные адреса вроде 0x1234, но ОС может иметь необходимость загрузить программу по другим адресам, так что она пересчитывает значения для сегментных регистров так, что программа будет нормально работать, не обращая внимания на то, в каком месте памяти она была расположена.

Так что, любой указатель в окружении старой MS-DOS на самом деле состоял из адреса сегмента и адреса внутри сегмента, т.е. из двух 16-битных значений. 20-битного значения было бы достаточно для этого, хотя, тогда пришлось бы вычислять адреса слишком часто: так что передача большего количества информации в стеке — это более хороший баланс между экономией места и удобством.

Кстати, из-за всего этого, не было возможным выделить блок памяти больше чем 64KB.

В 80286 сегментные регистры получили новую роль селекторов, имеющих немного другую функцию.

Когда появился процессор 80386 и компьютеры с большей памятью, MS-DOS была всё еще популярна, так что появились DOS-экстендеры: на самом деле это уже был шаг к «серьезным» ОС, они переключали CPU в защищенный режим и предлагали куда лучшее API для программ, которые всё еще предполагалось запускать в MS-DOS.

Широко известные примеры это DOS/4GW (игра DOOM была скомпилирована под него), Phar Lap, PMODE.

Кстати, точно такой же способ адресации памяти был и в 16-битной линейке Windows 3.x, перед Win32.

10.7. Перестановка basic block-ов

10.7.1. Profile-guided optimization

Этот метод оптимизации кода может перемещать некоторые basic block-и в другую секцию исполняемого бинарного файла.

Очевидно, в функции есть места которые исполняются чаще всего (например, тела циклов) и реже всего (например, код обработки ошибок, обработчики исключений).

Компилятор добавляет дополнительный (instrumentation) код в исполняемый файл, затем разработчик запускает его с тестами для сбора статистики.

Затем компилятор, при помощи собранной статистики, приготавливает итоговый исполняемый файл где весь редко исполняемый код перемещен в другую секцию.

В результате, весь часто исполняемый код функции становится компактным, что очень важно для скорости исполнения и кэш-памяти.

Пример из Oracle RDBMS, который скомпилирован при помощи Intel C++:

Листинг 10.5: orageneric11.dll (win32)

```
public _skgfsync
proc near
; address 0x6030D86A

    db      66h
    nop
    push    ebp
    mov     ebp, esp
    mov     edx, [ebp+0Ch]
    test    edx, edx
    jz      short loc_6030D884
    mov     eax, [edx+30h]
    test    eax, 400h
    jnz     __VInfreq__skgfsync ; write to log
continue:
    mov     eax, [ebp+8]
```

10.8. МОЙ ОПЫТ С HEX-RAYS 2.2.0

```
mov     edx, [ebp+10h]
mov     dword ptr [eax], 0
lea     eax, [edx+0Fh]
and     eax, 0FFFFFFFh
mov     ecx, [eax]
cmp     ecx, 45726963h
jnz     error                ; exit with error
mov     esp, ebp
pop     ebp
retn
_skgfsync    endp

...

; address 0x60B953F0
__VInfreq__skgfsync:
mov     eax, [edx]
test    eax, eax
jz      continue
mov     ecx, [ebp+10h]
push    ecx
mov     ecx, [ebp+8]
push    ecx
push    edx
push    ecx
push    offset ... ; "skgfsync(se=0x%x, ctx=0x%x, iov=0x%x)\n"
push    dword ptr [edx+4]
call    dword ptr [eax] ; write to log
add     esp, 14h
jmp     continue

error:
mov     edx, [ebp+8]
mov     dword ptr [edx], 69AAh ; 27050 "function called with invalid FIB/IOV ↵
↳ structure"
mov     eax, [eax]
mov     [edx+4], eax
mov     dword ptr [edx+8], 0FA4h ; 4004
mov     esp, ebp
pop     ebp
retn
; END OF FUNCTION CHUNK FOR _skgfsync
```

Расстояние между двумя адресами приведенных фрагментов кода почти 9 МБ.

Весь редко исполняемый код помещен в конце секции кода DLL-файла, среди редко исполняемых частей прочих функций. Эта часть функции была отмечена компилятором Intel C++ префиксом `VInfreq`. Мы видим часть функции которая записывает в лог-файл (вероятно, в случае ошибки или предупреждения, или чего-то в этом роде) которая, наверное, не исполнялась слишком часто, когда разработчики Oracle собирали статистику (если вообще исполнялась).

Basic block записывающий в лог-файл, в конце концов возвращает управление в «горячую» часть функции.

Другая «редкая» часть — это [basic block](#) возвращающий код ошибки 27050.

В ELF-файлах для Linux весь редко исполняемый код перемещается компилятором Intel C++ в другую секцию (`text.unlikely`) оставляя весь «горячий» код в секции `text.hot`.

С точки зрения reverse engineer-а, эта информация может помочь разделить функцию на её основу и части, отвечающие за обработку ошибок.

10.8. Мой опыт с Hex-Rays 2.2.0

10.8.1. Ошибки

Есть несколько ошибок.

10.8. МОЙ ОПЫТ С HEX-RAYS 2.2.0

Прежде всего, Hex-Rays теряет, когда инструкции FPU перемежаются (кодегенератором компилятора) с другими.

Например:

```
f          proc    near

            lea     eax, [esp+4]
            fild    dword ptr [eax]
            lea     eax, [esp+8]
            fild    dword ptr [eax]
            fabs
            fcompp
            fnstsw  ax
            test    ah, 1
            jz      l01

            mov     eax, 1
            retn

l01:
            mov     eax, 2
            retn

f          endp
```

...будет корректно декомпилировано в:

```
signed int __cdecl f(signed int a1, signed int a2)
{
    signed int result; // eax@2

    if ( fabs((double)a2) >= (double)a1 )
        result = 2;
    else
        result = 1;
    return result;
}
```

Но давайте прокомментируем одну инструкцию в конце:

```
...
l01:
            ;mov     eax, 2
            retn

...
```

...получаем явную ошибку:

```
void __cdecl f(char a1, char a2)
{
    fabs((double)a2);
}
```

Вот еще ошибка:

```
extrn f1:dword
extrn f2:dword

f          proc    near

            fld     dword ptr [esp+4]
            fadd    dword ptr [esp+8]
            fst     dword ptr [esp+12]
            fcomp   ds:const_100
            fld     dword ptr [esp+16]      ; прокомментируйте эту инструкцию, и всё будет
    хорошо

            fnstsw  ax
            test    ah, 1

            jnz     short l01
```

10.8. МОЙ ОПЫТ С HEX-RAYS 2.2.0

```

                                call    f1
                                retn
l01:
                                call    f2
                                retn
f
                                endp
...
const_100      dd 42C80000h      ; 100.0
```

Результат:

```
int __cdecl f(float a1, float a2, float a3, float a4)
{
    double v5; // st7@1
    char v6; // c0@1
    int result; // eax@2

    v5 = a4;
    if ( v6 )
        result = f2(v5);
    else
        result = f1(v5);
    return result;
}
```

У переменной *v6* тип *char*, и если вы попытаетесь скомпилировать этот код, компилятор выдаст предупреждение о том, что переменная используется перед тем, как была инициализирована.

Еще ошибка: инструкция *FPATAN* корректно декомпилируется в *atan2()*, но аргументы перепутаны.

10.8.2. Странности

Hex-Rays часто конвертирует 32-битный *int* в 64-битный. Вот пример:

```
f      proc    near

                                mov     eax, [esp+4]
                                cdq
                                xor     eax, edx
                                sub     eax, edx
                                ; EAX=abs(a1)

                                sub     eax, [esp+8]
                                ; EAX=EAX-a2

                                ; в этом месте, EAX каким-то образом был сконвертирован в 64-битный (RAX)

                                cdq
                                xor     eax, edx
                                sub     eax, edx
                                ; EAX=abs(abs(a1)-a2)

                                retn
f      endp
```

Результат:

```
int __cdecl f(int a1, int a2)
{
    __int64 v2; // rax@1

    v2 = abs(a1) - a2;
    return (HIDWORD(v2) ^ v2) - HIDWORD(v2);
}
```

10.8. МОЙ ОПЫТ С HEX-RAYS 2.2.0

Возможно, это результат инструкции CDQ? Я не уверен. Так или иначе, если вы видите тип `__int64` вы 32-битном коде, обращайтесь внимание.

Это тоже странно:

```
f          proc      near

            mov      esi, [esp+4]

            lea      ebx, [esi+10h]
            cmp      esi, ebx
            jge      short l00

            cmp      esi, 1000
            jg       short l00

            mov      eax, 2
            retn

l00:
            mov      eax, 1
            retn

f          endp
```

Результат:

```
signed int __cdecl f(signed int a1)
{
    signed int result; // eax@3

    if ( __OFSUB__(a1, a1 + 16) ^ 1 && a1 <= 1000 )
        result = 2;
    else
        result = 1;
    return result;
}
```

Код корректный, но требует ручного вмешательства.

Иногда Hex-Rays не сокращает деление через умножение:

```
f          proc      near

            mov      eax, [esp+4]
            mov      edx, 2AAAAAABh
            imul     edx
            mov      eax, edx

            retn

f          endp
```

Результат:

```
int __cdecl f(int a1)
{
    return (unsigned __int64)(715827883i64 * a1) >> 32;
}
```

Это можно сократить вручную.

Многие из этих странностей можно решить при помощи ручного переупорядочивания инструкций, перекомпиляции ассемблерного кода, и затем подачи его снова на вход Hex-Rays.

10.8.3. Безмолвие


```

extrn some_func:dword

f                proc    near

                mov     ecx, [esp+4]
                mov     eax, [esp+8]
                push    eax
                call    some_func
                add     esp, 4

                ; используем ECX
                mov     eax, ecx

                retn

f                endp

```

Результат:

```

int __cdecl f(int a1, int a2)
{
    int v2; // ecx@1

    some_func(a2);
    return v2;
}

```

Переменная `v2` (из `ECX`) потерялась ...Да, код некорректный (значение в регистре `ECX` не сохраняется после вызова другой ф-ции), но для `Hex-Rays` было бы неплохо выдать предупреждение.

Вот еще:

```

extrn some_func:dword

f                proc    near

                call    some_func
                jnz     l01

                mov     eax, 1
                retn

l01:
                mov     eax, 2
                retn

f                endp

```

Результат:

```

signed int f()
{
    char v0; // zf@1
    signed int result; // eax@2

    some_func();
    if ( v0 )
        result = 1;
    else
        result = 2;
    return result;
}

```

И снова, предупреждение бы помогло.

Так или иначе, если вы видите переменную типа `char`, которая используется без инициализации, это явный признак того, что что-то пошло не так и требует ручного вмешательства.

10.8.4. Запятая

Запятая в Си/Си++ имеет дурную славу, потому что она приводит к малопонятному коду.

Вот простая задача, что возвращает эта ф-ция на Си/Си++?

```
int f()
{
    return 1, 2;
};
```

Это 2: когда компилятор встречает выражение с запятой, он генерирует код, исполняющий все подвыражения, и *возвращает* значение последнего подвыражения.

Я видел такое в реальном коде:

```
if (cond)
    return global_var=123, 456; // возвращается 456
else
    return global_var=789, 321; // возвращается 321
```

Вероятно, автор хотел сделать код немного короче, без дополнительных фигурных скобок. Другими словами, запятая позволяет упаковать несколько выражений в одно, без формирования блока внутри фигурных скобок.

Запятая в Си/Си++ близка к `begin` в Scheme/Racket: <https://docs.racket-lang.org/guide/begin.html>.

Вероятн, есть только одно популярное и всеми одобренное использование запятой, это в выражении `for()`:

```
char *s="hello, world";
for(int i=0; *s; s++, i++);
; i = длина строки
```

И `s++` и `i++` исполняются на каждой итерации цикла.

Читайте больше об этом: <http://stackoverflow.com/questions/52550/what-does-the-comma-operator-d>

Я пишу всё это потому что Hex-Rays выдает код (как минимум, в моем случае) очень богатый и на запятые и на *short-circuit*-выражения (*короткое замыкание*). Например, вот реальный пример работы Hex-Rays:

```
if ( a >= b || (c = a, (d[a] - e) >> 2 > f) )
{
    ...
}
```

Это корректно, оно компилируется и работает, и да поможет вам бог понять, как. Вот оно переписанное:

```
if (cond1 || (comma_expr, cond2))
{
    ...
}
```

Здесь работает *short-circuit* (*короткое замыкание*): в начале проверяется `cond1`, и если оно истинно, исполняется тело `if()`, и остальная часть выражения `if()` полностью игнорируется. Если `cond1` ложно, тогда исполняется `comma_expr` (в предыдущем примере, `a` копируется в `c`), затем проверяется `cond2`. Если `cond2` истинно, исполняется тело `if()`, или нет. Другими словами, тело `if()` исполняется, если `cond1` истинно, или если `cond2` истинно, но если последнее истинно, исполняется также `comma_expr`.

Теперь вы видите, почему запятая имеет такую славу.

Еще о short-circuit (короткое замыкание). Частое заблуждение начинающих в том, что подусловия проверяются в каком-то незаданном порядке, и это не верно. В выражении `a | b | c`, `a`, `b` и `c` исполняются в незаданном порядке, и вот почему в Си/Си++ был также добавлен оператор `||`, чтобы явно применять *short-circuit*.

10.8.5. Типы данных

Типы данных это проблема для декомпиляторов.

Hex-Rays может быть слеп к массивам в локальном стеке, если они не были корректно обозначены перед декомпиляцией. Та же история с глобальными массивами.

Другая проблема это большие ф-ции, где один и тот же слот в локальном стеке может использоваться разными переменными во время исполнения ф-ции. Нередкий случай, когда слот в начале используется для *int*-переменной, затем для указателя, затем для переменной типа *float*. Hex-Rays корректно декомпилирует это: он создает переменную с каким-то типом, затем приводит её к другому типу в разных частях ф-ции. Эта проблема решалась мною ручным разделением ф-ции на несколько меньших. Просто сделайте локальные переменные глобальными, итд, итд. И не забывайте о тестах.

10.8.6. Длинные и запутанные выражения

Иногда, во время переписывания, вы можете прийти к длинным и труднопонятным выражениям в конструкциях *if()*, вроде:

```
if ((!(v38 && v30 <= 5 && v27 != -1)) && (!(v38 && v30 <= 5) && v27 != -1) || (v24 >= 5 || ↵
    ↵ v26)) && v25)
{
    ...
}
```

Wolfram Mathematica может оптимизировать некоторые из них, используя ф-цию `BooleanMinimize[]`:

```
In[1]:= BooleanMinimize[!(v38 && v30 <= 5 && v27 != -1)) && v38 && v30 <= 5 && v25 == 0]

Out[1]:= v38 && v25 == 0 && v27 == -1 && v30 <= 5
```

Есть даже способ еще лучше, с поиском общих подвыражений:

```
In[2]:= Experimental`OptimizeExpression[!(v38 && v30 <= 5 &&
    v27 != -1)) && (!(v38 && v30 <= 5) &&
    v27 != -1) || (v24 >= 5 || v26)) && v25]
Out[2]= Experimental`OptimizedExpression[
    Block[{Compile`$1, Compile`$2}, Compile`$1 = v30 <= 5;
        Compile`$2 =
            v27 != -1; ! (v38 && Compile`$1 &&
                Compile`$2) && (!(v38 && Compile`$1) && Compile`$2) ||
                v24 >= 5 || v26) && v25]]
```

Mathematica может добавить две новых переменных: `Compile`$1` и `Compile`$2`, значения которых будут использоваться в выражении несколько раз. Так что мы можем добавить две дополнительных переменных.

10.8.7. Мой план

- Разделить большие ф-ции (и не забывать о тестах). Иногда очень полезно формировать новые ф-ции из тел циклов.
- Проверяйте/устанавливайте тип данных для переменных, массивов, итд.
- Если вы видите странный результат, *висящую* переменную (которая используется перед инициализацией), попробуйте поменять инструкции вручную, перекомпилировать и снова подать на вход Hex-Rays-у.

10.8.8. Итог

Тем не менее, качество Hex-Rays 2.2.0 очень и очень хорошее. Он делает жизнь легче.

Глава 11

Что стоит почитать

11.1. Книги и прочие материалы

11.1.1. Reverse Engineering

Также, книги Криса Касперски.

Дмитрий Скляр — “Искусство защиты и взлома информации”.

- Eldad Eilam, *Reversing: Secrets of Reverse Engineering*, (2005)
- Bruce Dang, Alexandre Gazet, Elias Bachaalany, Sebastien Josse, *Practical Reverse Engineering: x86, x64, ARM, Windows Kernel, Reversing Tools, and Obfuscation*, (2014)
- Michael Sikorski, Andrew Honig, *Practical Malware Analysis: The Hands-On Guide to Dissecting Malicious Software*, (2012)
- Chris Eagle, *IDA Pro Book*, (2011)

11.1.2. Windows

- Mark Russinovich, *Microsoft Windows Internals*

Блоги:

- [Microsoft: Raymond Chen](#)
- [nynaeve.net](#)

11.1.3. Си/Си++

- Брайан Керниган, Деннис Ритчи, *Язык программирования Си*, второе издание, (1988, 2009)
- *ISO/IEC 9899:TC3 (C C99 standard)*, (2007)¹
- Bjarne Stroustrup, *The C++ Programming Language, 4th Edition*, (2013)
- Стандарт Си++11²
- Agner Fog, *Optimizing software in C++* (2015)³
- Marshall Cline, *C++ FAQ*⁴
- Денис Юричев, *Заметки о языке программирования Си/Си++*⁵
- JPL Institutional Coding Standard for the C Programming Language⁶

¹Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17274>

²Также доступно здесь: <http://www.open-std.org/jtc1/sc22/wg21/docs/papers/2013/n3690.pdf>.

³Также доступно здесь: http://agner.org/optimize/optimizing_cpp.pdf.

⁴Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17291>

⁵Также доступно здесь: <http://yurichev.com/C-book.html>

⁶Также доступно здесь: https://yurichev.com/mirrors/C/JPL_Coding_Standard_C.pdf

- Евгений Зуев — Редкая профессия⁷

11.1.4. x86 / x86-64

- Документация от Intel⁸
- Документация от AMD⁹
- Agner Fog, *The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs*, (2016)¹⁰
- Agner Fog, *Calling conventions* (2015)¹¹
- [Intel® 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual, (2014)]
- [Software Optimization Guide for AMD Family 16h Processors, (2013)]

Немного устарело, но всё равно интересно почитать:

Michael Abrash, *Graphics Programming Black Book*, 1997¹² (он известен своей работой над низкоуровневой оптимизацией в таких проектах как Windows NT 3.1 и id Quake).

11.1.5. ARM

- Документация от ARM¹³
- *ARM(R) Architecture Reference Manual, ARMv7-A and ARMv7-R edition*, (2012)
- [ARM Architecture Reference Manual, ARMv8, for ARMv8-A architecture profile, (2013)]¹⁴
- Advanced RISC Machines Ltd, *The ARM Cookbook*, (1994)¹⁵

11.1.6. Язык ассемблера

Richard Blum — Professional Assembly Language.

11.1.7. Java

[Tim Lindholm, Frank Yellin, Gilad Bracha, Alex Buckley, *The Java(R) Virtual Machine Specification / Java SE 7 Edition*] ¹⁶.

11.1.8. UNIX

Eric S. Raymond, *The Art of UNIX Programming*, (2003)

⁷Также доступно здесь: https://yurichev.com/mirrors/C++/Redkaya_professiya.pdf

⁸Также доступно здесь: <http://www.intel.com/content/www/us/en/processors/architectures-software-developer-manuals.html>

⁹Также доступно здесь: <http://developer.amd.com/resources/developer-guides-manuals/>

¹⁰Также доступно здесь: <http://agner.org/optimize/microarchitecture.pdf>

¹¹Также доступно здесь: http://www.agner.org/optimize/calling_conventions.pdf

¹²Также доступно здесь: <https://github.com/jagregory/abrash-black-book>

¹³Также доступно здесь: <http://infocenter.arm.com/help/index.jsp?topic=/com.arm.doc.subset.architecture.reference/index.html>

¹⁴Также доступно здесь: [http://yurichev.com/mirrors/ARMv8-A_Architecture_Reference_Manual_\(Issue_A.a\).pdf](http://yurichev.com/mirrors/ARMv8-A_Architecture_Reference_Manual_(Issue_A.a).pdf)

¹⁵Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17273>

¹⁶Также доступно здесь: <https://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/jvms7.pdf>; <http://docs.oracle.com/javase/specs/jvms/se7/html/>

11.1.9. Программирование

- Brian W. Kernighan, Rob Pike, *Practice of Programming*, (1999)
- Александр Шень¹⁷
- Henry S. Warren, *Hacker's Delight*, (2002). Некоторые люди говорят, что трюки и хаки из этой книги уже не нужны, потому что годились только для RISC-процессоров, где инструкции перехода слишком дорогие. Тем не менее, всё это здорово помогает лучше понять булеву алгебру и всю математику рядом.
- (Для хард-корных гиков от информатики и математики) Дональд Э. Кнут, *Искусство программирования*. Некоторые люди спорят, стоит ли среднему программисту читать этот довольно тяжелый фундаментальный труд. Но я бы сказал, что стоит просто пролистать, чтобы понять, из чего вообще состоит информатика.

11.1.10. Криптография

- Bruce Schneier, *Applied Cryptography*, (John Wiley & Sons, 1994)
- (Free) Ivh, *Crypto 101*¹⁸
- (Free) Dan Boneh, Victor Shoup, *A Graduate Course in Applied Cryptography*¹⁹.

¹⁷<http://imperium.lenin.ru/~verbit/Shen.dir/shen-progra.html>

¹⁸Также доступно здесь: <https://www.crypto101.io/>

¹⁹Также доступно здесь: <https://crypto.stanford.edu/~dabo/cryptobook/>

Глава 12

Сообщества

Имеются два отличных субреддита на reddit.com посвященных RE¹: reddit.com/r/ReverseEngineering/ и reddit.com/r/remath

Имеется также часть сайта Stack Exchange посвященная RE: reverseengineering.stackexchange.com.

На IRC есть канал ##re на FreeNode².

Русскоязычный форум: <https://forum.reverse4you.org>

¹Reverse Engineering

²freenode.net

Послесловие

12.1. Вопросы?

Совершенно по любым вопросам вы можете не раздумывая писать автору:

<dennis@yurichev.com> Есть идеи о том, что ещё можно добавить в эту книгу? Пожалуйста, присылайте мне информацию о замеченных ошибках (включая грамматические), итд.

Автор много работает над книгой, поэтому номера страниц, листингов, итд, очень часто меняются. Пожалуйста, в своих письмах мне не ссылайтесь на номера страниц и листингов. Есть метод проще: сделайте скриншот страницы, затем в графическом редакторе подчеркните место, где вы видите ошибку, и отправьте автору. Так он может исправить её намного быстрее. Ну а если вы знакомы с git и \LaTeX , вы можете исправить ошибку прямо в исходных текстах:

[GitHub](#).

Не бойтесь побеспокоить меня написав мне о какой-то мелкой ошибке, даже если вы не очень уверены. Я всё-таки пишу для начинающих, поэтому мнение и комментарии именно начинающих очень важны для моей работы.

Приложение

.1. x86

.1.1. Терминология

Общее для 16-bit (8086/80286), 32-bit (80386, итд), 64-bit.

byte 8-бит. Для определения переменных и массива байт используется директива ассемблера DB. Байты передаются в 8-битных частях регистров: AL/BL/CL/DL/AH/BH/CH/DH/SIL/DIL/R*L.

word 16-бит. —”—директива ассемблера DW. Слова передаются в 16-битных частях регистров: AX/BX/CX/DX/SI/DI/R*W.

double word («dword») 32-бит. —”—директива ассемблера DD. Двойные слова передаются в регистрах (x86) или в 32-битных частях регистров (x64). В 16-битном коде, двойные слова передаются в парах 16-битных регистров.

quad word («qword») 64-бит. —”—директива ассемблера DQ. В 32-битной среде, учетверенные слова передаются в парах 32-битных регистров.

tbyte (10 байт) 80-бит или 10 байт (используется для регистров IEEE 754 FPU).

paragraph (16 байт) — термин был популярен в среде MS-DOS.

Типы данных с той же шириной (BYTE, WORD, DWORD) точно такие же и в Windows [API](#).

.1.2. Регистры общего пользования

Ко многим регистрам можно обращаться как к частям размером в байт или 16-битное слово . .

Это всё — наследие от более старых процессоров Intel (вплоть до 8-битного 8080), все еще поддерживаемое для обратной совместимости.

Старые 8-битные процессоры 8080 имели 16-битные регистры, разделенные на две части.

Программы, написанные для 8080 имели доступ к младшему байту 16-битного регистра, к старшему байту или к целому 16-битному регистру.

Вероятно, эта возможность была оставлена в 8086 для более простого портирования. В [RISC](#) процессорах, такой возможности, как правило, нет.

Регистры, имеющие префикс R- появились только в x86-64, а префикс E- —в 80386.

Таким образом, R-регистры 64-битные, а E-регистры — 32-битные.

В x86-64 добавили еще 8 [GPR](#): R8-R15 . .

N.B.: В документации от Intel, для обращения к самому младшему байту к имени регистра нужно добавлять суффикс L: *R8L*, но [IDA](#) называет эти регистры добавляя суффикс B: *R8B* .

RAX/EAX/AX/AL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RAX ^{x64}							
				EAX			
						AX	
						AH	AL

[AKA](#) аккумулятор. Результат функции обычно возвращается через этот регистр .

RBX/EBX/BX/BL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RBX ^{x64}							
				EBX			
						BX	
						BH	BL

RCX/ECX/CX/CL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RCX ^{x64}							
				ECX			
						CX	
						CH	CL

AKA счетчик: используется в этой роли в инструкциях с префиксом REP и в инструкциях сдвига (SHL/SHR/RxL/RxR).

RDX/EDX/DX/DL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RDX ^{x64}							
				EDX			
						DX	
						DH	DL

RSI/ESI/SI/SIL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RSI ^{x64}							
				ESI			
						SI	
						SIL ^{x64}	

AKA «source index». Используется как источник в инструкциях REP MOVSp, REP CMPSp.

RDI/EDI/DI/DIL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RDI ^{x64}							
				EDI			
						DI	
						DIL ^{x64}	

AKA «destination index». Используется как указатель на место назначения в инструкции REP MOVSp, REP STOSp.

R8/R8D/R8W/R8L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R8							
				R8D			
						R8W	
						R8L	

R9/R9D/R9W/R9L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R9							
				R9D			
						R9W	
							R9L

R10/R10D/R10W/R10L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R10							
				R10D			
						R10W	
							R10L

R11/R11D/R11W/R11L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R11							
				R11D			
						R11W	
							R11L

R12/R12D/R12W/R12L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R12							
				R12D			
						R12W	
							R12L

R13/R13D/R13W/R13L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R13							
				R13D			
						R13W	
							R13L

R14/R14D/R14W/R14L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R14							
				R14D			
						R14W	
							R14L

R15/R15D/R15W/R15L

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
R15							
				R15D			
						R15W	
							R15L

RSP/ESP/SP/SPL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RSP							
				ESP			
						SP	
							SPL

AKA stack pointer. Обычно всегда указывает на текущий стек, кроме тех случаев, когда он не инициализирован.

RBP/EBP/BP/BPL

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RBP							
				EBP			
						BP	
							BPL

AKA frame pointer. Обычно используется для доступа к локальным переменным функции и аргументам, Больше о нем : (1.9.1 (стр. 68)).

RIP/EIP/IP

Номер байта:							
7-й	6-й	5-й	4-й	3-й	2-й	1-й	0-й
RIP ^{x64}							
				EIP			
						IP	

AKA «instruction pointer»³. Обычно всегда указывает на инструкцию, которая сейчас будет исполняться. Напрямую модифицировать регистр нельзя, хотя можно делать так (что равноценно):

```
MOV EAX, ...
JMP EAX
```

Либо:

```
PUSH value
RET
```

CS/DS/ES/SS/FS/GS

16-битные регистры, содержащие селектор кода (CS), данных (DS), стека (SS).

FS в win32 указывает на **TLS**, а в Linux на эту роль был выбран GS. Это сделано для более быстрого доступа к **TLS** и прочим структурам там вроде **TIB**.

В прошлом эти регистры использовались как сегментные регистры (10.6 (стр. 978)).

³Иногда называется также «program counter»

Регистр флагов

АКА EFLAGS.

Бит (маска)	Аббревиатура (значение)	Описание
0 (1)	CF (Carry)	Флаг переноса. Инструкции CLC/STC/CMC используются для установки/сброса/инвертирования этого флага
2 (4)	PF (Parity)	Флаг четности (1.19.7 (стр. 225)).
4 (0x10)	AF (Adjust)	Существует только для работы с BCD-числами
6 (0x40)	ZF (Zero)	Выставляется в 0 если результат последней операции был равен 0.
7 (0x80)	SF (Sign)	Флаг знака.
8 (0x100)	TF (Trap)	Применяется при отладке. Если включен, то после исполнения каждой инструкции будет сгенерировано исключение.
9 (0x200)	IF (Interrupt enable)	Разрешены ли прерывания. Инструкции CLI/STI используются для установки/сброса этого флага
10 (0x400)	DF (Direction)	Задается направление для инструкций REP MOVSB/CMPSB/LODSB/SCASB. Инструкции CLD/STD используются для установки/сброса этого флага См.также: 3.23 (стр. 614).
11 (0x800)	OF (Overflow)	Переполнение.
12, 13 (0x3000)	IOPL (I/O privilege level) ⁱ²⁸⁶	
14 (0x4000)	NT (Nested task) ⁱ²⁸⁶	
16 (0x10000)	RF (Resume) ⁱ³⁸⁶	Применяется при отладке. Если включить, CPU проигнорирует хардварную точку останова в DRx.
17 (0x20000)	VM (Virtual 8086 mode) ⁱ³⁸⁶	
18 (0x40000)	AC (Alignment check) ⁱ⁴⁸⁶	
19 (0x80000)	VIF (Virtual interrupt) ⁱ⁵⁸⁶	
20 (0x100000)	VIP (Virtual interrupt pending) ⁱ⁵⁸⁶	
21 (0x200000)	ID (Identification) ⁱ⁵⁸⁶	

Остальные флаги зарезервированы.

.1.3. FPU регистры

8 80-битных регистров работающих как стек: ST(0)-ST(7). N.B.: IDA называет ST(0) просто ST. Числа хранятся в формате IEEE 754.

Формат значения *long double*:

79	78	64	63	62	0
S	экспонента			I	мантисса

(S — знак, I — целочисленная часть)

Регистр управления

Регистр, при помощи которого можно задавать поведение FPU.

.1. X86

Бит	Аббревиатура (значение)	Описание
0	IM (Invalid operation Mask)	
1	DM (Denormalized operand Mask)	
2	ZM (Zero divide Mask)	
3	OM (Overflow Mask)	
4	UM (Underflow Mask)	
5	PM (Precision Mask)	
7	IEM (Interrupt Enable Mask)	Разрешение исключений, по умолчанию 1 (запрещено)
8, 9	PC (Precision Control)	Управление точностью 00 — 24 бита (REAL4) 10 — 53 бита (REAL8) 11 — 64 бита (REAL10)
10, 11	RC (Rounding Control)	Управление округлением 00 — (по умолчанию) округлять к ближайшему 01 — округлять к $-\infty$ 10 — округлять к $+\infty$ 11 — округлять к 0
12	IC (Infinity Control)	0 — (по умолчанию) считать $+\infty$ и $-\infty$ за беззнаковое 1 — учитывать и $+\infty$ и $-\infty$

Флагами PM, UM, OM, ZM, DM, IM задается, генерировать ли исключения в случае соответствующих ошибок .

Регистр статуса

Регистр только для чтения.

Бит	Аббревиатура (значение)	Описание
15	B (Busy)	Работает ли сейчас FPU (1) или закончил и результаты готовы (0)
14	C3	
13, 12, 11	TOP	указывает, какой сейчас регистр является нулевым
10	C2	
9	C1	
8	C0	
7	IR (Interrupt Request)	
6	SF (Stack Fault)	
5	P (Precision)	
4	U (Underflow)	
3	O (Overflow)	
2	Z (Zero)	
1	D (Denormalized)	
0	I (Invalid operation)	

Биты SF, P, U, O, Z, D, I сигнализируют об исключениях .

О C3, C2, C1, C0 читайте больше: (1.19.7 (стр. 224)).

N.B.: когда используется регистр ST(x), FPU прибавляет x к TOP по модулю 8 и получается номер внутреннего регистра.

Tag Word

Этот регистр отражает текущее содержимое регистров чисел .

Бит	Аббревиатура (значение)
15, 14	Tag(7)
13, 12	Tag(6)
11, 10	Tag(5)
9, 8	Tag(4)
7, 6	Tag(3)
5, 4	Tag(2)
3, 2	Tag(1)
1, 0	Tag(0)

Каждый тэг содержит информацию о физическом регистре FPU (R(x)), но не логическом (ST(x)).

Для каждого тэга:

.1. X86

- 00 — Регистр содержит ненулевое значение
- 01 — Регистр содержит 0
- 10 — Регистр содержит специальное число ([NaN⁴](#), ∞ , или денормализованное число)
- 11 — Регистр пуст

.1.4. SIMD регистры

MMX регистры

8 64-битных регистров: MM0..MM7.

SSE и AVX регистры

SSE: 8 128-битных регистров: XMM0..XMM7. В x86-64 добавлено еще 8 регистров: XMM8..XMM15.

AVX это расширение всех регистры до 256 бит .

.1.5. Отладочные регистры

Применяются для работы с т.н. hardware breakpoints.

- DR0 — адрес точки останова #1
- DR1 — адрес точки останова #2
- DR2 — адрес точки останова #3
- DR3 — адрес точки останова #4
- DR6 — здесь отображается причина останова
- DR7 — здесь можно задать типы точек останова

DR6

Бит (маска)	Описание
0 (1)	B0 — сработала точка останова #1
1 (2)	B1 — сработала точка останова #2
2 (4)	B2 — сработала точка останова #3
3 (8)	B3 — сработала точка останова #4
13 (0x2000)	BD — была попытка модифицировать один из регистров DRx. может быть выставлен если бит GD выставлен.
14 (0x4000)	BS — точка останова типа single step (флаг TF был выставлен в EFLAGS) . Наивысший приоритет. Другие биты также могут быть выставлены .
15 (0x8000)	BT (task switch flag)

N.B. Точка останова single step это срабатывающая после каждой инструкции . Может быть включена выставлением флага TF в EFLAGS ([1.2](#) (стр. [998](#))).

DR7

В этом регистре задаются типы точек останова.

⁴Not a Number

Бит (маска)	Описание
0 (1)	L0 — разрешить точку останова #1 для текущей задачи
1 (2)	G0 — разрешить точку останова #1 для всех задач
2 (4)	L1 — разрешить точку останова #2 для текущей задачи
3 (8)	G1 — разрешить точку останова #2 для всех задач
4 (0x10)	L2 — разрешить точку останова #3 для текущей задачи
5 (0x20)	G2 — разрешить точку останова #3 для всех задач
6 (0x40)	L3 — разрешить точку останова #4 для текущей задачи
7 (0x80)	G3 — разрешить точку останова #4 для всех задач
8 (0x100)	LE — не поддерживается, начиная с P6
9 (0x200)	GE — не поддерживается, начиная с P6
13 (0x2000)	GD — исключение будет вызвано если какая-либо инструкция MOV попытается модифицировать один из DRx-регистров
16,17 (0x30000)	точка останова #1: R/W — тип
18,19 (0xC0000)	точка останова #1: LEN — длина
20,21 (0x300000)	точка останова #2: R/W — тип
22,23 (0xC00000)	точка останова #2: LEN — длина
24,25 (0x3000000)	точка останова #3: R/W — тип
26,27 (0xC000000)	точка останова #3: LEN — длина
28,29 (0x30000000)	точка останова #4: R/W — тип
30,31 (0xC0000000)	точка останова #4: LEN — длина

Так задается тип точки останова (R/W):

- 00 — исполнение инструкции
- 01 — запись в память
- 10 — обращения к I/O-портам (недоступно из user-mode)
- 11 — обращение к памяти (чтение или запись)

N.B.: отдельного типа для чтения из памяти действительно нет .

Так задается длина точки останова (LEN):

- 00 — 1 байт
- 01 — 2 байта
- 10 — не определено для 32-битного режима, 8 байт для 64-битного
- 11 — 4 байта

.1.6. Инструкции

Инструкции, отмеченные как (M) обычно не генерируются компилятором: если вы видите её, очень может быть это вручную написанный фрагмент кода, либо это т.н. compiler intrinsic ([10.3](#) (стр. [974](#))).

Только наиболее используемые инструкции перечислены здесь . Обращайтесь к [11.1.4](#) (стр. [988](#)) для полной документации.

Нужно ли заучивать опкоды инструкций на память? Нет, только те, которые часто используются для модификации кода ([10.1.2](#) (стр. [973](#))). Остальные запоминать нет смысла.

Префиксы

LOCK используется чтобы предоставить эксклюзивный доступ к памяти в многопроцессорной среде . Для упрощения, можно сказать, что когда выполняется инструкция с этим префиксом, остальные процессоры в системе останавливаются. Чаще все это используется для критических секций, семафоров, мьютексов. Обычно используется с ADD, AND, BTR, BTS, CMPXCHG, OR, XADD, XOR. Читайте больше о критических секциях ([6.5.4](#) (стр. [766](#))).

REP используется с инструкциями MOVSx и STOSx: инструкция будет исполняться в цикле, счетчик расположен в регистре CX/ECX/RCX . Для более детального описания, читайте больше об инструкциях MOVSx ([.1.6](#) (стр. [1004](#))) и STOSx ([.1.6](#) (стр. [1006](#))).

Работа инструкций с префиксом REP зависит от флага DF, он задает направление .

REPE/REPNE (AKA REPZ/REPNZ) используется с инструкциями CMPSx и SCASx: инструкция будет исполняться в цикле, счетчик расположен в регистре CX/ECX/RCX. Выполнение будет прервано если ZF будет 0 (REPE) либо если ZF будет 1 (REPNE).

Для более детального описания, читайте больше об инструкциях CMPSx (.1.6 (стр. 1007)) и SCASx (.1.6 (стр. 1005)).

Работа инструкций с префиксами REPE/REPNE зависит от флага DF, он задает направление.

Наиболее часто используемые инструкции

Их можно заучить в первую очередь.

ADC (*add with carry*) сложить два значения, **инкремент** если выставлен флаг CF. ADC часто используется для складывания больших значений, например, складывания двух 64-битных значений в 32-битной среде используя две инструкции ADD и ADC, например:

```
; работа с 64-битными значениями: прибавить val1 к val2.  
; .lo означает младшие 32 бита, .hi – старшие  
ADD val1.lo, val2.lo  
ADC val1.hi, val2.hi ; использовать CF выставленный или очищенный в предыдущей инструкции
```

Еще один пример: 1.27 (стр. 386).

ADD сложить два значения

AND логическое «И»

CALL вызвать другую функцию:

```
PUSH address_after_CALL_instruction; JMP label
```

CMR сравнение значений и установка флагов, то же что и SUB, но только без записи результата

DEC **decrement**. В отличие от других арифметических инструкций, DEC не модифицирует флаг CF.

IMUL умножение с учетом знаковых значений IMUL часто используется вместо MUL, читайте об этом больше: 2.2.1.

INC **increment**. В отличие от других арифметических инструкций, INC не модифицирует флаг CF.

JCXZ, JECXZ, JRCXZ (M) переход если CX/ECX/RCX=0

JMP перейти на другой адрес. ОPCODE имеет т.н. **jump offset**.

Jcc (где cc — condition code)

Немало этих инструкций имеют синонимы (отмечены с AKA), это сделано для удобства. Синонимичные инструкции транслируются в один и тот же OPCODE. OPCODE имеет т.н. **jump offset**.

JAE AKA JNC: переход если больше или равно (беззнаковый): CF=0

JA AKA JNBE: переход если больше (беззнаковый): CF=0 и ZF=0

JBE переход если меньше или равно (беззнаковый): CF=1 или ZF=1

JB AKA JC: переход если меньше (беззнаковый): CF=1

JC AKA JB: переход если CF=1

JE AKA JZ: переход если равно или ноль: ZF=1

JGE переход если больше или равно (знаковый): SF=OF

JG переход если больше (знаковый): ZF=0 и SF=OF

JLE переход если меньше или равно (знаковый): ZF=1 или SF≠OF

JL переход если меньше (знаковый): SF≠OF

JNAE AKA JC: переход если не больше или равно (беззнаковый) CF=1

JNA переход если не больше (беззнаковый) CF=1 и ZF=1

JNBE переход если не меньше или равно (беззнаковый): CF=0 и ZF=0

JNB AKA JNC: переход если не меньше (беззнаковый): CF=0

JNC AKA JAE: переход если CF=0, синонимично JNB.

JNE AKA JNZ: переход если не равно или не ноль: $ZF=0$

JNGE переход если не больше или равно (знаковый): $SF \neq OF$

JNG переход если не больше (знаковый): $ZF=1$ или $SF \neq OF$

JNLE переход если не меньше (знаковый): $ZF=0$ и $SF=OF$

JNL переход если не меньше (знаковый): $SF=OF$

JNO переход если не переполнение: $OF=0$

JNS переход если флаг SF сброшен

JNZ AKA JNE: переход если не равно или не ноль: $ZF=0$

JO переход если переполнение: $OF=1$

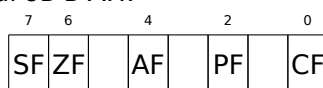
JPO переход если сброшен флаг PF (Jump Parity Odd)

JP AKA JPE: переход если выставлен флаг PF

JS переход если выставлен флаг SF

JZ AKA JE: переход если равно или ноль: $ZF=1$

LAHF скопировать некоторые биты флагов в AH:



Эта инструкция часто используется в коде работающем с [FPU](#).

LEAVE аналог команд `MOV ESP, EBP` и `POP EBP` — то есть возврат [указателя стека](#) и регистра EBP в первоначальное состояние.

LEA (*Load Effective Address*) сформировать адрес

Это инструкция, которая задумывалась вовсе не для складывания и умножения чисел, а для формирования адреса например, из указателя на массив и прибавления индекса к нему ⁵.

То есть, разница между `MOV` и `LEA` в том, что `MOV` формирует адрес в памяти и загружает значение из памяти, либо записывает его туда, а `LEA` только формирует адрес.

Тем не менее, её можно использовать для любых других вычислений.

`LEA` удобна тем, что производимые ею вычисления не модифицируют флаги [CPU](#). Это может быть очень важно для [OOE](#) процессоров (чтобы было меньше зависимостей между данными).

Помимо всего прочего, начиная минимум с Pentium, инструкция `LEA` выполняется за 1 такт.

```
int f(int a, int b)
{
    return a*8+b;
};
```

Листинг 1: Оптимизирующий MSVC 2010

```
_a$ = 8      ; size = 4
_b$ = 12     ; size = 4
_f          PROC
    mov     eax, DWORD PTR _b$[esp-4]
    mov     ecx, DWORD PTR _a$[esp-4]
    lea     eax, DWORD PTR [eax+ecx*8]
    ret     0
_f          ENDP
```

Intel C++ использует `LEA` даже больше:

```
int f1(int a)
{
    return a*13;
};
```

⁵См. также: [wikipedia](#)

```

_f1    PROC NEAR
mov     ecx, DWORD PTR [4+esp]      ; ecx = a
lea     edx, DWORD PTR [ecx+ecx*8]  ; edx = a*9
lea     eax, DWORD PTR [edx+ecx*4]  ; eax = a*9 + a*4 = a*13
ret

```

Эти две инструкции вместо одной IMUL будут работать быстрее.

MOVSБ/MOVSW/MOVSД/MOVSQ скопировать байт/ 16-битное слово/ 32-битное слово/ 64-битное слово на который указывает SI/ESI/RSI куда указывает DI/EDI/RDI.

Вместе с префиксом REP, инструкция выполняется в цикле, счетчик находится в регистре CX/ECX/RCX: это работает как memcpy() в Си. Если размер блока известен компилятору на стадии компиляции, memcpy() часто компилируется в короткий фрагмент кода использующий REP MOVSB, иногда даже несколько инструкций.

Эквивалент memcpy(EDI, ESI, 15):

```

; скопировать 15 байт из ESI в EDI
CLD      ; установить направление на вперед
MOV ECX, 3
REP MOVSD ; скопировать 12 байт
MOVSW    ; скопировать еще 2 байта
MOVSB    ; скопировать оставшийся байт

```

(Должно быть, так быстрее чем копировать 15 байт используя просто одну REP MOVSB).

MOVSX загрузить с расширением знака см. также: (1.17.1 (стр. 191))

MOVZX загрузить и очистить все остальные биты см. также: (1.17.1 (стр. 192))

MOV загрузить значение. эта инструкция была названа неудачно (данные не перемещаются, а копируются), что является результатом путаницы: в других архитектурах эта же инструкция называется «LOAD» и/или «STORE» или что-то в этом роде.

Важно: если в 32-битном режиме при помощи MOV записывать младшую 16-байтную часть регистра, то старшие 16 бит останутся такими же. Но если в 64-битном режиме модифицировать 32-битную часть регистра, то старшие 32 бита обнуляются.

Вероятно, это сделано для упрощения портирования кода под x86-64.

MUL умножение с учетом беззнаковых значений. IMUL часто используется вместо MUL, читайте об этом больше: 2.2.1.

NEG смена знака: $op = -op$ То же что и NOT op / ADD op, 1.

NOP NOP. Её опкод 0x90, что на самом деле это холостая инструкция XCHG EAX, EAX. Это значит, что в x86 (как и во многих RISC) нет отдельной NOP-инструкции. В этой книге есть по крайней мере один листинг, где GDB отображает NOP как 16-битную инструкцию XCHG: 1.8.1 (стр. 48).

Еще примеры подобных операций: (1.7 (стр. 1013)).

NOP может быть сгенерировать компилятором для выравнивания меток по 16-байтной границе. Другое очень популярное использование NOP это вставка её вручную (патчинг) на месте какой-либо инструкции вроде условного перехода, чтобы запретить её исполнение.

NOT op1: $op1 = \neg op1$. логическое «НЕ» Важная особенность — инструкция не меняет флаги.

OR логическое «ИЛИ»

POP взять значение из стека: $value = SS:[ESP]$; $ESP = ESP + 4$ (или 8)

PUSH записать значение в стек: $ESP = ESP - 4$ (или 8); $SS:[ESP] = value$

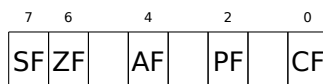
RET возврат из процедуры: POP tmp; JMP tmp.

В реальности, RET это макрос ассемблера, в среде Windows и *NIX транслирующийся в RETN («return near») ибо, во времена MS-DOS, где память адресовалась немного иначе (10.6 (стр. 978)), в RETF («return far»).

RET может иметь операнд. Тогда его работа будет такой:

POP tmp; ADD ESP op1; JMP tmp. RET с операндом обычно завершает функции с соглашением о вызовах stdcall, см. также : 6.1.2 (стр. 713).

SAHF скопировать биты из AH в флаги CPU:



Эта инструкция часто используется в коде работающем с [FPU](#).

SBB (*subtraction with borrow*) вычесть одно значение из другого, [декремент](#) результата если флаг CF выставлен. SBB часто используется для вычитания больших значений, например, для вычитания двух 64-битных значений в 32-битной среде используя инструкции SUB и SBB, например:

```
; работа с 64-битными значениями: вычесть val2 из val1
; .lo означает младшие 32 бита, .hi – старшие
SUB val1.lo, val2.lo
SBB val1.hi, val2.hi ; использовать CF выставленный или очищенный в предыдущей инструкции
```

Еще один пример: [1.27](#) (стр. [386](#)).

SCASB/SCASW/SCASD/SCASQ (M) сравнить байт/ 16-битное слово/ 32-битное слово/ 64-битное слово, записанное в AX/EAX/RAX со значением, адрес которого находится в DI/EDI/RDI. Выставить флаги так же, как это делает CMP.

Эта инструкция часто используется с префиксом REPNE: продолжать сканировать буфер до тех пор, пока не встретится специальное значение, записанное в AX/EAX/RAX. Отсюда «NE» в REPNE: продолжать сканирование если сравниваемые значения не равны и остановиться если равны.

Она часто используется как стандартная функция Си strlen(), для определения длины [ASCIIZ](#)-строки:

Пример:

```
lea    edi, string
mov     ecx, 0FFFFFFFFh ; сканировать 232 – 1 байт, т.е., почти бесконечно
xor     eax, eax        ; конец строки это 0
repne scasb
add     edi, 0FFFFFFFFh ; скорректировать

; теперь EDI указывает на последний символ в ASCIIZ-строке.

; узнать длину строки
; сейчас ECX = -1-strlen

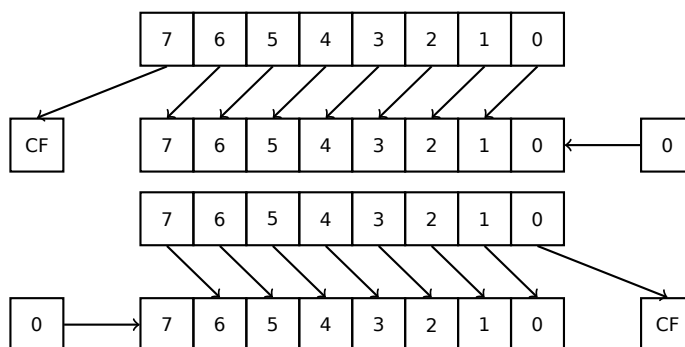
not     ecx
dec     ecx

; теперь в ECX хранится длина строки
```

Если использовать другое значение AX/EAX/RAX, функция будет работать как стандартная функция Си memchr(), т.е. для поиска определенного байта.

SHL сдвинуть значение влево

SHR сдвинуть значение вправо:



Эти инструкции очень часто применяются для умножения и деления на 2^n . Еще одно очень частое применение это работа с битовыми полями: [1.22](#) (стр. [295](#)).

SHRD *op1, op2, op3*: сдвинуть значение в *op2* вправо на *op3* бит, подтягивая биты из *op1* .

Пример: 1.27 (стр. 386).

STOSB/STOSW/STOSD/STOSQ записать байт/ 16-битное слово/ 32-битное слово/ 64-битное слово из AX/EAX/RAX в место, адрес которого находится в DI/EDI/RDI.

Вместе с префиксом REP, инструкция будет исполняться в цикле, счетчик будет находится в регистре CX/ECX/RCX : это работает как `memset()` в Си. Если размер блока известен компилятору на стадии компиляции, `memset()` часто компилируется в короткий фрагмент кода использующий REP STOSx, иногда даже несколько инструкций .

Эквивалент `memset(EDI, 0xAA, 15)`:

```
; записать 15 байт 0xAA в EDI
CLD                ; установить направление на вперед
MOV EAX, 0AAAAAAAh
MOV ECX, 3
REP STOSD          ; записать 12 байт
STOSW              ; записать еще 2 байта
STOSB              ; записать оставшийся байт
```

(Вероятно, так быстрее чем заполнять 15 байт используя просто одну REP STOSB).

SUB вычесть одно значение из другого. часто встречающийся вариант SUB *reg, reg* означает обнуление *reg*.

TEST то же что и AND, но без записи результатов, см. также: 1.22 (стр. 295)

XOR *op1, op2*: XOR⁶ значений. $op1 = op1 \oplus op2$. Часто встречающийся вариант XOR *reg, reg* означает обнуление регистра *reg*. См. также: 2.6 (стр. 452).

Реже используемые инструкции

BSF *bit scan forward*, см. также: 1.28.2 (стр. 410)

BSR *bit scan reverse*

BSWAP (*byte swap*), смена порядка байт в значении.

BTC *bit test and complement*

BTR *bit test and reset*

BTS *bit test and set*

BT *bit test*

CBW/CWD/CWDE/CDQ/CDQE Расширить значение учитывая его знак:

CBW конвертировать байт в AL в слово в AX

CWD конвертировать слово в AX в двойное слово в DX:AX

CWDE конвертировать слово в AX в двойное слово в EAX

CDQ конвертировать двойное слово в EAX в четверное слово в EDX:EAX

CDQE (x64) конвертировать двойное слово в EAX в четверное слово в RAX

Эти инструкции учитывают знак значения, расширяя его в старшую часть выходного значения. См. также: 1.27.5 (стр. 395).

Интересно узнать, что эти инструкции назывались SEX (*Sign EXtend*), как Stephen P. Morse (один из создателей Intel 8086 CPU) пишет в [Stephen P. Morse, *The 8086 Primer*, (1980)]⁷:

The process of stretching numbers by extending the sign bit is called sign extension. The 8086 provides instructions (Fig. 3.29) to facilitate the task of sign extension. These instructions were initially named SEX (sign extend) but were later renamed to the more conservative CBW (convert byte to word) and CWD (convert word to double word).

⁶Exclusive OR (исключающее «ИЛИ»)

⁷Также доступно здесь: <https://archive.org/details/The8086Primer>

.1. X86

CLD сбросить флаг DF.

CLI (M) сбросить флаг IF

CMC (M) инвертировать флаг CF

CMOVcc условный MOV: загрузить значение если условие верно. Коды точно такие же, как и в инструкциях Jcc ([1.6](#) (стр. 1002)).

CMPSB/CMPSW/CMPSD/CMPSQ (M) сравнить байт/ 16-битное слово/ 32-битное слово/ 64-битное слово из места, адрес которого находится в SI/ESI/RSI со значением, адрес которого находится в DI/EDI/RDI. Выставить флаги так же, как это делает CMP.

Вместе с префиксом REPE, инструкция будет исполняться в цикле, счетчик будет находится в регистре CX/ECX/RCX, процесс будет продолжаться пока флаг ZF=0 (т.е. до тех пор, пока все сравниваемые значения равны, отсюда «E» в REPE) .

Это работает как memcmp() в Си.

Пример из ядра Windows NT ([WRK v1.2](#)):

Листинг 3: base\ntos\rtl\i386\movemem.asm

```
; ULONG
; RtlCompareMemory (
;   IN PVOID Source1,
;   IN PVOID Source2,
;   IN ULONG Length
; )
;
; Routine Description:
;
;   This function compares two blocks of memory and returns the number
;   of bytes that compared equal.
;
; Arguments:
;
;   Source1 (esp+4) - Supplies a pointer to the first block of memory to
;   compare.
;
;   Source2 (esp+8) - Supplies a pointer to the second block of memory to
;   compare.
;
;   Length (esp+12) - Supplies the Length, in bytes, of the memory to be
;   compared.
;
; Return Value:
;
;   The number of bytes that compared equal is returned as the function
;   value. If all bytes compared equal, then the length of the original
;   block of memory is returned.
;
;--

RcmSource1      equ     [esp+12]
RcmSource2      equ     [esp+16]
RcmLength       equ     [esp+20]

CODE_ALIGNMENT
cPublicProc _RtlCompareMemory,3
cPublicFpo 3,0

        push     esi                ; save registers
        push     edi                ;
        cld                     ; clear direction
        mov      esi,RcmSource1     ; (esi) -> first block to compare
        mov      edi,RcmSource2     ; (edi) -> second block to compare

;
;   Compare dwords, if any.
;

rcm10:  mov      ecx,RcmLength       ; (ecx) = length in bytes
```



```

        shr     ecx,2                ; (ecx) = length in dwords
        jz      rcm20                ; no dwords, try bytes
        repe    cmpsd               ; compare dwords
        jnz     rcm40                ; mismatch, go find byte

;
;   Compare residual bytes, if any.
;
rcm20:  mov     ecx,RcmLength        ; (ecx) = length in bytes
        and     ecx,3                ; (ecx) = length mod 4
        jz      rcm30                ; 0 odd bytes, go do dwords
        repe    cmpsb               ; compare odd bytes
        jnz     rcm50                ; mismatch, go report how far we got

;
;   All bytes in the block match.
;
rcm30:  mov     eax,RcmLength        ; set number of matching bytes
        pop     edi                  ; restore registers
        pop     esi                  ;
        stdRET  _RtlCompareMemory

;
;   When we come to rcm40, esi (and edi) points to the dword after the
;   one which caused the mismatch. Back up 1 dword and find the byte.
;   Since we know the dword didn't match, we can assume one byte won't.
;
rcm40:  sub     esi,4                ; back up
        sub     edi,4                ; back up
        mov     ecx,5                ; ensure that ecx doesn't count out
        repe    cmpsb               ; find mismatch byte

;
;   When we come to rcm50, esi points to the byte after the one that
;   did not match, which is TWO after the last byte that did match.
;
rcm50:  dec     esi                  ; back up
        sub     esi,RcmSource1       ; compute bytes that matched
        mov     eax,esi              ;
        pop     edi                  ; restore registers
        pop     esi                  ;
        stdRET  _RtlCompareMemory

stdENDP _RtlCompareMemory

```

N.B.: эта функция использует сравнение 32-битных слов (CMPSD) если длина блоков кратна 4-м байтам, либо побайтовое сравнение (CMPSB) если не кратна .

CPUID получить информацию о доступных возможностях [CPU](#) . см. также: (1.24.6 (стр. 360)).

DIV деление с учетом беззнаковых значений

IDIV деление с учетом знаковых значений

INT (M): INT х аналогична PUSHF; CALL dword ptr [x*4] в 16-битной среде. Она активно использовалась в MS-DOS, работая как сисколл. Аргументы записывались в регистры AX/BX/CX/DX/SI/DI и затем происходил переход на таблицу векторов прерываний (расположенную в самом начале адресного пространства) . Она была очень популярна потому что имела короткий опкод (2 байта) и программе использующая сервисы MS-DOS не нужно было заморачиваться узнавая адреса всех функций этих сервисов . Обработчик прерываний возвращал управление назад при помощи инструкции IRET .

Самое используемое прерывание в MS-DOS было 0x21, там была основная часть его [API](#) . См. также: [Ralf Brown *Ralf Brown's Interrupt List*], самый крупный список всех известных прерываний и вообще там много информации о MS-DOS .

Во времена после MS-DOS, эта инструкция все еще использовалась как сискол, и в Linux и в

Windows (6.3 (стр. 726)), но позже была заменена инструкцией SYSENTER или SYSCALL .

INT 3 (M): эта инструкция стоит немного в стороне от INT, она имеет собственный 1-байтный опкод (0xCC), и активно используется в отладке. Часто, отладчик просто записывает байт 0xCC по адресу в памяти где устанавливается точка останова, и когда исключение поднимается, оригинальный байт будет восстановлен и оригинальная инструкция по этому адресу исполнена заново.

В **Windows NT**, исключение EXCEPTION_BREAKPOINT поднимается, когда CPU исполняет эту инструкцию. Это отладочное событие может быть перехвачено и обработано отладчиком, если он загружен . Если он не загружен, Windows предложит запустить один из зарегистрированных в системе отладчиков . Если **MSVS**⁸ установлена, его отладчик может быть загружен и подключен к процессу. В целях защиты от **reverse engineering**, множество анти-отладочных методов проверяют целостность загруженного кода.

В **MSVC** есть **compiler intrinsic** для этой инструкции: `__debugbreak()`⁹.

В win32 также имеется функция в kernel32.dll с названием `DebugBreak()`¹⁰, которая также исполняет INT 3.

IN (M) получить данные из порта. Эту инструкцию обычно можно найти в драйверах OS либо в старом коде для MS-DOS, например (8.5.3 (стр. 810)).

IRET : использовалась в среде MS-DOS для возврата из обработчика прерываний, после того как он был вызван при помощи инструкции INT . Эквивалентна `POP tmp; POPF; JMP tmp`.

LOOP (M) **декремент** CX/ECX/RCX, переход если он всё еще не ноль.

Инструкцию LOOP очень часто использовали в DOS-коде, который работал внешними устройствами. Чтобы сделать небольшую задержку, делали так:

	MOV	CX, nnnn
LABEL:	LOOP	LABEL

Недостаток очевиден: длительность задержки сильно зависит от скорости CPU.

OUT (M) послать данные в порт. Эту инструкцию обычно можно найти в драйверах OS либо в старом коде для MS-DOS, например (8.5.3 (стр. 810)).

POPA (M) восстанавливает значения регистров (R|E)DI, (R|E)SI, (R|E)BP, (R|E)BX, (R|E)DX, (R|E)CX, (R|E)AX из стека.

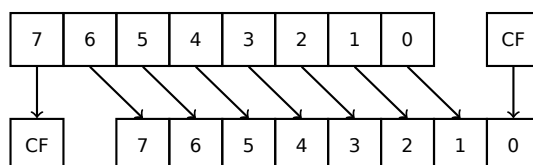
POPCNT population count. Считает количество бит выставленных в 1 в значении .

POPF восстановить флаги из стека (**AKA** регистр EFLAGS)

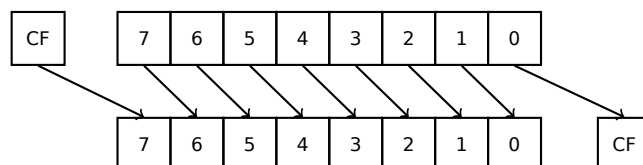
PUSHA (M) сохраняет значения регистров (R|E)AX, (R|E)CX, (R|E)DX, (R|E)BX, (R|E)BP, (R|E)SI, (R|E)DI в стеке.

PUSHF сохранить в стеке флаги (**AKA** регистр EFLAGS)

RCL (M) вращать биты налево через флаг CF:



RCR (M) вращать биты направо через флаг CF:



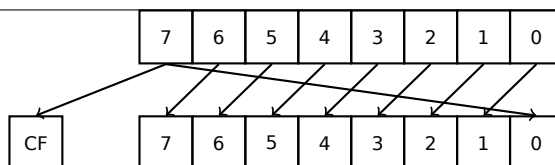
ROL/ROR (M) циклический сдвиг

ROL: вращать налево:

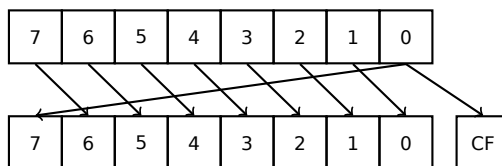
⁸Microsoft Visual Studio

⁹MSDN

¹⁰MSDN



ROR: вращать направо:

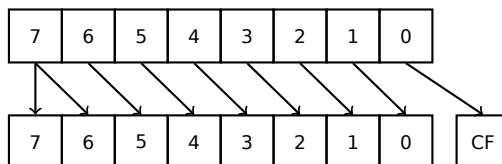


Не смотря на то что многие CPU имеют эти инструкции, в Си/Си++ нет соответствующих операций, так что компиляторы с этих ЯП обычно не генерируют код использующий эти инструкции.

Чтобы программисту были доступны эти инструкции, в MSVC есть псевдофункции (compiler intrinsics) `_rotl()` и `_rotr()`¹¹, которые транслируются компилятором напрямую в эти инструкции

SAL Арифметический сдвиг влево, синонимично SHL

SAR Арифметический сдвиг вправо



Таким образом, бит знака всегда остается на месте MSB.

SETcc ор: загрузить 1 в ор (только байт) если условие верно или 0 если наоборот . Коды точно такие же, как и в инструкциях Jcc (.1.6 (стр. 1002)).

STC (M) установить флаг CF

STD (M) установить флаг DF. Эта инструкция не генерируется компиляторами и вообще редкая. Например, она может быть найдена в файле `ntoskrnl.exe` (ядро Windows) в написанных вручную функциях копирования памяти.

STI (M) установить флаг IF

SYSCALL (AMD) вызов сисколла (6.3 (стр. 726))

SYSENTER (Intel) вызов сисколла (6.3 (стр. 726))

UD2 (M) неопределенная инструкция, вызывает исключение. Применяется для тестирования.

XCHG (M) обменять местами значения в операндах

Это редкая инструкция: компиляторы её не генерируют, потому что начиная с Pentium, XCHG с адресом в памяти в операнде выполняется так, как если имеет префикс LOCK (см.[Michael Abrash, *Graphics Programming Black Book*, 1997 глава 19]). Вероятно, в Intel так сделали для совместимости с синхронизирующими примитивами. Таким образом, XCHG начиная с Pentium может быть медленной. С другой стороны, XCHG была очень популярна у программистов на ассемблере. Так что, если вы видите XCHG в коде, это может быть знаком, что код написан вручную. Впрочем, по крайней мере компилятор Borland Delphi генерирует эту инструкцию.

Инструкции FPU

Суффикс -R в названии инструкции обычно означает, что операнды поменяны местами, суффикс -P означает что один элемент выталкивается из стека после исполнения инструкции, суффикс -PP означает, что выталкиваются два элемента.

-P инструкции часто бывают полезны, когда нам уже больше не нужно хранить значение в FPU-стеке после операции.

FABS заменить значение в ST(0) на абсолютное значение ST(0)

¹¹MSDN

FADD op: $ST(0) = op + ST(0)$

FADD ST(0), ST(i): $ST(0) = ST(0) + ST(i)$

FADDP ST(1)=ST(0)+ST(1); вытолкнуть один элемент из стека, таким образом, складываемые значения в стеке заменяются суммой

FCHS ST(0)=-ST(0)

FCOM сравнить ST(0) с ST(1)

FCOM op: сравнить ST(0) с op

FCOMP сравнить ST(0) с ST(1); вытолкнуть один элемент из стека

FCOMPP сравнить ST(0) с ST(1); вытолкнуть два элемента из стека

FDIVR op: $ST(0) = op / ST(0)$

FDIVR ST(i), ST(j): $ST(i) = ST(j) / ST(i)$

FDIVRP op: $ST(0) = op / ST(0)$; вытолкнуть один элемент из стека

FDIVRP ST(i), ST(j): $ST(i) = ST(j) / ST(i)$; вытолкнуть один элемент из стека

FDIV op: $ST(0) = ST(0) / op$

FDIV ST(i), ST(j): $ST(i) = ST(i) / ST(j)$

FDIVP ST(1)=ST(0)/ST(1); вытолкнуть один элемент из стека, таким образом, делимое и делитель в стеке заменяются частным

FILD op: сконвертировать целочисленный op и затолкнуть его в стек .

FIST op: конвертировать ST(0) в целочисленное op

FISTP op: конвертировать ST(0) в целочисленное op; вытолкнуть один элемент из стека

FLD1 затолкнуть 1 в стек

FLDCW op: загрузить FPU control word (.1.3 (стр. 998)) из 16-bit op.

FLDZ затолкнуть ноль в стек

FLD op: затолкнуть op в стек.

FMUL op: $ST(0) = ST(0) * op$

FMUL ST(i), ST(j): $ST(i) = ST(i) * ST(j)$

FMULP op: $ST(0) = ST(0) * op$; вытолкнуть один элемент из стека

FMULP ST(i), ST(j): $ST(i) = ST(i) * ST(j)$; вытолкнуть один элемент из стека

FSINCOS : tmp=ST(0); ST(1)=sin(tmp); ST(0)=cos(tmp)

FSQRT : $ST(0) = \sqrt{ST(0)}$

FSTCW op: записать FPU control word (.1.3 (стр. 998)) в 16-bit op после проверки ожидающих исключений.

FNSTCW op: записать FPU control word (.1.3 (стр. 998)) в 16-bit op.

FSTSW op: записать FPU status word (.1.3 (стр. 999)) в 16-bit op после проверки ожидающих исключений.

FNSTSW op: записать FPU status word (.1.3 (стр. 999)) в 16-bit op.

FST op: копировать ST(0) в op

FSTP op: копировать ST(0) в op; вытолкнуть один элемент из стека

FSUBR op: $ST(0) = op - ST(0)$

FSUBR ST(0), ST(i): $ST(0) = ST(i) - ST(0)$

FSUBRP ST(1)=ST(0)-ST(1); вытолкнуть один элемент из стека, таким образом, складываемые значения в стеке заменяются разностью

FSUB op: $ST(0) = ST(0) - op$

FSUB ST(0), ST(i): $ST(0) = ST(0) - ST(i)$

FSUBP ST(1)=ST(1)-ST(0); вытолкнуть один элемент из стека, таким образом, складываемые значения в стеке заменяются разностью

FUCOM ST(i): сравнить ST(0) и ST(i)

FUCOM сравнить ST(0) и ST(1)

FUCOMP сравнить ST(0) и ST(1); вытолкнуть один элемент из стека.

FUCOMPP сравнить ST(0) и ST(1); вытолкнуть два элемента из стека.

Инструкция работает так же, как и FCOM, за тем исключением что исключение срабатывает только если один из операндов SNaN, но числа QNaN нормально обрабатываются.

FXCH ST(i) обменять местами значения в ST(0) и ST(i)

FXCH обменять местами значения в ST(0) и ST(1)

Инструкции с печатаемым ASCII-опкодом

(В 32-битном режиме).

Это может пригодиться для создания шеллкодов. См. также: [8.11.1](#) (стр. 886).

ASCII-символ	шестнадцатеричный код	x86-инструкция
0	30	XOR
1	31	XOR
2	32	XOR
3	33	XOR
4	34	XOR
5	35	XOR
7	37	AAA
8	38	CMP
9	39	CMP
:	3a	CMP
;	3b	CMP
<	3c	CMP
=	3d	CMP
?	3f	AAS
@	40	INC
A	41	INC
B	42	INC
C	43	INC
D	44	INC
E	45	INC
F	46	INC
G	47	INC
H	48	DEC
I	49	DEC
J	4a	DEC
K	4b	DEC
L	4c	DEC
M	4d	DEC
N	4e	DEC
O	4f	DEC
P	50	PUSH
Q	51	PUSH
R	52	PUSH
S	53	PUSH
T	54	PUSH
U	55	PUSH
V	56	PUSH
W	57	PUSH
X	58	POP
Y	59	POP
Z	5a	POP
[	5b	POP

.1. X86

\	5c	POP
]	5d	POP
^	5e	POP
▾	5f	POP
▾	60	PUSHA
a	61	POPA
f	66	(в 32-битном режиме) переключиться на 16-битный размер операнда
g	67	(в 32-битном режиме) переключиться на 16-битный размер адреса
h	68	PUSH
i	69	IMUL
j	6a	PUSH
k	6b	IMUL
p	70	JO
q	71	JNO
r	72	JB
s	73	JAЕ
t	74	JE
u	75	JNE
v	76	JBE
w	77	JA
x	78	JS
y	79	JNS
z	7a	JP

В итоге: AAA, AAS, CMP, DEC, IMUL, INC, JA, JAE, JB, JBE, JE, JNE, JNO, JNS, JO, JP, JS, POP, POPA, PUSH, PUSHA, XOR.

.1.7. npad

Это макрос в ассемблере, для выравнивания некоторой метки по некоторой границе.

Это нужно для тех *нагруженных* меток, куда чаще всего передается управление, например, начало тела цикла. Для того чтобы процессор мог эффективнее вытягивать данные или код из памяти, через шину с памятью, кэширование, итд.

Взято из listing.inc (MSVC):

Это, кстати, любопытный пример различных вариантов NOP-ов. Все эти инструкции не дают никакого эффекта, но отличаются разной длиной.

Цель в том, чтобы была только одна инструкция, а не набор NOP-ов, считается что так лучше для производительности CPU.

```
;; LISTING.INC
;;
;; This file contains assembler macros and is included by the files created
;; with the -FA compiler switch to be assembled by MASM (Microsoft Macro
;; Assembler).
;;
;; Copyright (c) 1993-2003, Microsoft Corporation. All rights reserved.

;; non destructive nops
npad macro size
if size eq 1
    nop
else
    if size eq 2
        mov edi, edi
    else
        if size eq 3
            ; lea ecx, [ecx+00]
            DB 8DH, 49H, 00H
        else
```

```
if size eq 4
    ; lea esp, [esp+00]
    DB 8DH, 64H, 24H, 00H
else
    if size eq 5
        add eax, DWORD PTR 0
    else
        if size eq 6
            ; lea ebx, [ebx+00000000]
            DB 8DH, 9BH, 00H, 00H, 00H, 00H
        else
            if size eq 7
                ; lea esp, [esp+00000000]
                DB 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H
            else
                if size eq 8
                    ; jmp .+8; .npad 6
                    DB 0EBH, 06H, 8DH, 9BH, 00H, 00H, 00H, 00H
                else
                    if size eq 9
                        ; jmp .+9; .npad 7
                        DB 0EBH, 07H, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H
                    else
                        if size eq 10
                            ; jmp .+A; .npad 7; .npad 1
                            DB 0EBH, 08H, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 90H
                        else
                            if size eq 11
                                ; jmp .+B; .npad 7; .npad 2
                                DB 0EBH, 09H, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 8BH, 0FFH
                            else
                                if size eq 12
                                    ; jmp .+C; .npad 7; .npad 3
                                    DB 0EBH, 0AH, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 8DH, 49H, 00H
                                else
                                    if size eq 13
                                        ; jmp .+D; .npad 7; .npad 4
                                        DB 0EBH, 0BH, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 8DH, 64H, 24H, 00H
                                    else
                                        if size eq 14
                                            ; jmp .+E; .npad 7; .npad 5
                                            DB 0EBH, 0CH, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 05H, 00H, 00H, 00H, 00H
                                        else
                                            if size eq 15
                                                ; jmp .+F; .npad 7; .npad 6
                                                DB 0EBH, 0DH, 8DH, 0A4H, 24H, 00H, 00H, 00H, 00H, 8DH, 9BH, 00H, 00H, 00H, 00H
                                            else
                                                %out error: unsupported npad size
                                                .err
                                            endif
                                        endif
                                    endif
                                endif
                            endif
                        endif
                    endif
                endif
            endif
        endif
    endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
endif
```

.2. ARM

.2.1. Терминология

ARM изначально разрабатывался как 32-битный [CPU](#), поэтому *слово* здесь, в отличие от x86, 32-битное.

byte 8-бит. Для определения переменных и массива байт используется директива ассемблера DCB .

halfword 16-бит. —”—директива ассемблера DCW .

word 32-бит. —”—директива ассемблера DCD .

doubleword 64-бит.

quadword 128-бит.

.2.2. Версии

- ARMv4: появился режим Thumb.
- ARMv6: использовался в iPhone 1st gen., iPhone 3G (Samsung 32-bit RISC ARM 1176JZ(F)-S поддерживающий Thumb-2)
- ARMv7: появился Thumb-2 (2003). Использовался в iPhone 3GS, iPhone 4, iPad 1st gen. (ARM Cortex-A8), iPad 2 (Cortex-A9), iPad 3rd gen.
- ARMv7s: Добавлены новые инструкции. Использовался в iPhone 5, iPhone 5c, iPad 4th gen. (Apple A6).
- ARMv8: 64-битный процессор, [AKA](#) ARM64 [AKA](#) AArch64. Использовался в iPhone 5S, iPad Air (Apple A7). В 64-битном режиме, режима Thumb больше нет, только режим ARM (4-байтные инструкции).

.2.3. 32-битный ARM (AArch32)

Регистры общего пользования

- R0 — результат функции обычно возвращается через R0
- R1...R12 — [GPRs](#)
- R13 — [AKA](#) SP ([stack pointer](#))
- R14 — [AKA](#) LR ([link register](#))
- R15 — [AKA](#) PC (program counter)

R0-R3 называются также «scratch registers»: аргументы функции обычно передаются через них, и эти значения не обязательно восстанавливать перед выходом из функции .

Current Program Status Register (CPSR)

Бит	Описание
0..4	M — processor mode
5	T — Thumb state
6	F — FIQ disable
7	I — IRQ disable
8	A — imprecise data abort disable
9	E — data endianness
10..15, 25, 26	IT — if-then state
16..19	GE — greater-than-or-equal-to
20..23	DNM — do not modify
24	J — Java state
27	Q — sticky overflow
28	V — overflow
29	C — carry/borrow/extend
30	Z — zero bit
31	N — negative/less than

Регистры VFP (для чисел с плавающей точкой) и NEON

0..31 ^{bits}	32..64	65..96	97..127
Q0 ^{128 bits}			
D0 ^{64 bits}		D1	
S0 ^{32 bits}	S1	S2	S3

S-регистры 32-битные, используются для хранения чисел с одинарной точностью .

D-регистры 64-битные, используются для хранения чисел с двойной точностью .

D- и S-регистры занимают одно и то же место в памяти CPU — можно обращаться к D-регистрам через S-регистры (хотя это и бессмысленно) .

Точно также, **NEON** Q-регистры имеют размер 128 бит и занимают то же физическое место в памяти CPU что и остальные регистры, предназначенные для чисел с плавающей точкой .

В VFP присутствует 32 S-регистров: S0..S31 .

В VFPv2 были добавлены 16 D-регистров, которые занимают то же место что и S0..S31 .

В VFPv3 (**NEON** или «Advanced SIMD») добавили еще 16 D-регистров, в итоге это D0..D31, но регистры D16..D31 не делят место с другими S-регистрами.

В **NEON** или «Advanced SIMD» были добавлены также 16 128-битных Q-регистров, делящих место с регистрами D0..D31.

.2.4. 64-битный ARM (AArch64)**Регистры общего пользования**

Количество регистров было удвоено со времен AArch32.

- X0 — результат функции обычно возвращается через X0
- X0...X7 — Здесь передаются аргументы функции.
- X8
- X9...X15 — временные регистры, вызываемая функция может их использовать и не восстанавливать их.
- X16
- X17
- X18

.3. MIPS

- X19...X29 — вызываемая функция может их использовать, но должна восстанавливать их по завершению.
- X29 — используется как **FP** (как минимум в GCC)
- X30 — «Procedure Link Register» **AKA LR** (**link register**).
- X31 — регистр, всегда содержащий ноль **AKA XZR** или «Zero Register». Его 32-битная часть называется WZR.
- **SP**, больше не регистр общего пользования.

См.также: [*Procedure Call Standard for the ARM 64-bit Architecture (AArch64)*, (2013)]¹².

32-битная часть каждого X-регистра также доступна как W-регистр (W0, W1, итд).

Старшие 32 бита	младшие 32 бита
X0	
	W0

.2.5. Инструкции

В ARM имеется также для некоторых инструкций суффикс -S, указывающий, что эта инструкция будет модифицировать флаги. Инструкции без этого суффикса не модифицируют флаги. Например, инструкция ADD в отличие от ADDS сложит два числа, но флаги не изменит. Такие инструкции удобно использовать между CMP где выставляются флаги и, например, инструкциями перехода, где флаги используются. Они также лучше в смысле анализа зависимостей данных (data dependency analysis) (потому что меньшее количество регистров модифицируется во время исполнения).

Таблица условных кодов

Код	Описание	Флаги
EQ	равно	Z == 1
NE	не равно	Z == 0
CS AKA HS (Higher or Same)	перенос / беззнаковое, больше или равно	C == 1
CC AKA LO (LOwer)	нет переноса / беззнаковое, меньше чем	C == 0
MI	минус, отрицательный знак / меньше чем	N == 1
PL	плюс, положительный знак или ноль / больше чем или равно	N == 0
VS	переполнение	V == 1
VC	нет переполнения	V == 0
HI	беззнаковое, больше чем /	C == 1 и Z == 0
LS	беззнаковое, меньше или равно /	C == 0 или Z == 1
GE	знаковое, больше чем или равно /	N == V
LT	знаковое, меньше чем /	N != V
GT	знаковое, больше чем /	Z == 0 и N == V
LE	знаковое, меньше чем или равно /	Z == 1 или N != V
None / AL	Всегда	Любые

.3. MIPS

.3.1. Регистры

(Соглашение о вызовах O32)

¹²Также доступно здесь: <http://go.yurichev.com/17287>

Регистры общего пользования **GPR**

Номер	Псевдоимя	Описание
\$0	\$ZERO	Всегда ноль. Запись в этот регистр это как NOP .
\$1	\$AT	Используется как временный регистр для ассемблерных макросов и псевдоинструкций.
\$2 ...\$3	\$V0 ...\$V1	Здесь возвращается результат функции.
\$4 ...\$7	\$A0 ...\$A3	Аргументы функции.
\$8 ...\$15	\$T0 ...\$T7	Используется для временных данных.
\$16 ...\$23	\$S0 ...\$S7	Используется для временных данных*.
\$24 ...\$25	\$T8 ...\$T9	Используется для временных данных.
\$26 ...\$27	\$K0 ...\$K1	Зарезервировано для ядра OC .
\$28	\$GP	Глобальный указатель**.
\$29	\$SP	SP *.
\$30	\$FP	FP *.
\$31	\$RA	RA .
n/a	PC	PC .
n/a	HI	старшие 32 бита результата умножения или остаток от деления***.
n/a	LO	младшие 32 бита результата умножения или результат деления***.

Регистры для работы с числами с плавающей точкой

Название	Описание
\$F0..\$F1	Здесь возвращается результат функции.
\$F2..\$F3	Не используется.
\$F4..\$F11	Используется для временных данных.
\$F12..\$F15	Первые два аргумента функции.
\$F16..\$F19	Используется для временных данных.
\$F20..\$F31	Используется для временных данных*.

* — **Callee** должен сохранять.

** — **Callee** должен сохранять (кроме **PIC**-кода).

*** — доступны используя инструкции **MFHI** и **MFL0**.

.3.2. Инструкции

Есть три типа инструкций:

- Тип R: имеющие 3 регистра. R-инструкции обычно имеют такой вид:

```
instruction destination, source1, source2
```

Важно помнить, что если первый и второй регистр один и тот же, IDA может показать инструкцию в сокращенной форме:

```
instruction destination/source1, source2
```

Это немного напоминает Интеловский синтаксис ассемблера x86.

- Тип I: имеющие 2 регистра и 16-битное «immediate»-значение.
- Тип J: инструкции перехода, имеют 26 бит для кодирования смещения.

Инструкции перехода

Какая разница между инструкциями начинающихся с B- (**BEQ**, **B**, итд) и с J- (**JAL**, **JALR**, итд)?

B-инструкции имеют тип I, так что, смещение в этих инструкциях кодируется как 16-битное значение. Инструкции **JR** и **JALR** имеют тип R, и они делают переход по абсолютному адресу указанному в регистре. **J** и **JAL** имеют тип J, так что смещение кодируется как 26-битное значение.

Коротко говоря, в B-инструкциях можно кодировать условие (**B** на самом деле это псевдоинструкция для **BEQ \$ZERO, \$ZERO, LABEL**), а в J-инструкциях нельзя.

.4. Некоторые библиотечные функции GCC

имя	значение
__divdi3	знаковое деление
__moddi3	остаток от знакового деления
__udivdi3	беззнаковое деление
__umoddi3	остаток от беззнакового деления

.5. Некоторые библиотечные функции MSVC

ll в имени функции означает «long long», т.е. 64-битный тип данных .

имя	значение
__alldiv	знаковое деление
__allmul	умножение
__allrem	остаток от знакового деления
__allshl	сдвиг влево
__allshr	знаковый сдвиг вправо
__alldiv	беззнаковое деление
__allrem	остаток от беззнакового деления
__allshr	беззнаковый сдвиг вправо

Процедуры умножения и сдвига влево, одни и те же и для знаковых чисел, и для беззнаковых, поэтому здесь только одна функция для каждой операции . .

Исходные коды этих функций можно найти в установленной [MSVS](#), в VC/crt/src/intel/*.asm VC/crt/src/

.6. Cheatsheets

.6.1. IDA

Краткий справочник горячих клавиш:

клавиша	значение
Space	переключать между листингом и просмотром кода в виде графа
C	конвертировать в код
D	конвертировать в данные
A	конвертировать в строку
*	конвертировать в массив
U	сделать неопределенным
O	сделать смещение из операнда
H	сделать десятичное число
R	сделать символ
B	сделать двоичное число
Q	сделать шестнадцатеричное число
N	переименовать идентификатор
?	калькулятор
G	переход на адрес
:	добавить комментарий
Ctrl-X	показать ссылки на текущую функцию, метку, переменную (в т.ч., в стеке)
X	показать ссылки на функцию, метку, переменную, итд
Alt-I	искать константу
Ctrl-I	искать следующее вхождение константы
Alt-B	искать последовательность байт
Ctrl-B	искать следующее вхождение последовательности байт
Alt-T	искать текст (включая инструкции, итд.)
Ctrl-T	искать следующее вхождение текста
Alt-P	редактировать текущую функцию
Enter	перейти к функции, переменной, итд.
Esc	вернуться назад
Num -	свернуть функцию или отмеченную область
Num +	снова показать функцию или область

Сворачивание функции или области может быть удобно чтобы прятать те части функции, чья функция вам стала уже ясна . . это используется в моем скрипте¹³ для сворачивания некоторых очень часто используемых фрагментов inline-кода . .

.6.2. OllyDbg

Краткий справочник горячих клавиш:

хот-кей	значение
F7	трассировать внутрь
F8	сделать шаг, не входя в функцию
F9	запуск
Ctrl-F2	перезапуск

.6.3. MSVC

Некоторые полезные опции, которые были использованы в книге . .

опция	значение
/O1	оптимизация по размеру кода
/Ob0	не заменять вызовы inline-функций их кодом
/Ox	максимальная оптимизация
/GS-	отключить проверки переполнений буфера
/Fa(file)	генерировать листинг на ассемблере
/Zi	генерировать отладочную информацию
/Zp(n)	паковать структуры по границе в <i>n</i> байт
/MD	выходной исполняемый файл будет использовать MSVC*.DLL MSVC*.DLL

Кое-как информация о версиях MSVC: [5.1.1](#) (стр. 678).

¹³[GitHub](#)

.6.4. GCC

Некоторые полезные опции, которые были использованы в книге.

опция	значение
-Os	оптимизация по размеру кода
-O3	максимальная оптимизация
-regparm=	как много аргументов будет передаваться через регистры
-o file	задать имя выходного файла
-g	генерировать отладочную информацию в итоговом исполняемом файле
-S	генерировать листинг на ассемблере
-masm=intel	генерировать листинг в синтаксисе Intel
-fno-inline	не вставлять тело функции там, где она вызывается

.6.5. GDB

Некоторые команды, которые были использованы в книге:

опция	значение
break filename.c:number	установить точку останова на номере строки в исходном файле
break function	установить точку останова на функции
break *address	установить точку останова на адресе
b	—” —
p variable	вывести значение переменной
run	запустить
r	—” —
cont	продолжить исполнение
c	—” —
bt	вывести стек
set disassembly-flavor intel	установить Intel-синтаксис
disas	disassemble current function
disas function	дизассемблировать функцию
disas function,+50	disassemble portion
disas \$eip,+0x10	—” —
disas/r	дизассемблировать с опкодами
info registers	вывести все регистры
info float	вывести FPU-регистры
info locals	вывести локальные переменные (если известны)
x/w ...	вывести память как 32-битные слова
x/w \$rdi	вывести память как 32-битные слова по адресу в RDI
x/10w ...	вывести 10 слов памяти
x/s ...	вывести строку из памяти
x/i ...	трактовать память как код
x/10c ...	вывести 10 символов
x/b ...	вывести байты
x/h ...	вывести 16-битные полуслова
x/g ...	вывести 64-битные слова
finish	исполнять до конца функции
next	следующая инструкция (не заходить в функции)
step	следующая инструкция (заходить в функции)
set step-mode on	не использовать информацию о номерах строк при использовании команды step
frame n	переключить фрейм стека
info break	список точек останова
del n	удалить точку останова
set args ...	установить аргументы командной строки

Список принятых сокращений

ОС Операционная Система	xvi
ООП Объектно-Ориентированное Программирование	534
ЯП Язык Программирования	xiii
ГПСЧ Генератор псевдослучайных чисел	ix
ПЗУ Постоянное запоминающее устройство	vii
АЛУ Арифметико-логическое устройство	26
PID ID программы/процесса	785
LF Line feed (подача строки) (10 или '\n' в Си/Си++)	516
CR Carriage return (возврат каретки) (13 или '\r' в Си/Си++)	516
LIFO Last In First Out (последним вошел, первым вышел)	30
MSB Most significant bit (самый старший бит)	308
LSB Least significant bit (самый младший бит)	
АНБ Агентство национальной безопасности	455
CFB Режим обратной связи по шифротексту (Cipher Feedback)	848
CSPRNG Криптографически стойкий генератор псевдослучайных чисел (cryptographically secure pseudorandom number generator)	848
SICP Структура и интерпретация компьютерных программ (Structure and Interpretation of Computer Programs)	xvi
RA Адрес возврата	6
PE Portable Executable	5
SP stack pointer . SP/ESP/RSP в x86/x64. SP в ARM.	19
DLL Dynamic-Link Library	736
PC Program Counter. IP/EIP/RIP в x86/64. PC в ARM.	20
LR Link Register	6
IDA Интерактивный дизассемблер и отладчик, разработан Hex-Rays	6
IAT Import Address Table	736
INT Import Name Table	736

RVA Relative Virtual Address.....	736
VA Virtual Address.....	736
OEP Original Entry Point	725
MSVC Microsoft Visual C++	
MSVS Microsoft Visual Studio.....	1009
ASLR Address Space Layout Randomization.....	599
MFC Microsoft Foundation Classes.....	740
TLS Thread Local Storage	274
AKA - (Также известный как)	30
CRT C Runtime library	10
CPU Central Processing Unit.....	xvi
GPU Graphics Processing Unit.....	858
FPU Floating-Point Unit	v
CISC Complex Instruction Set Computing	20
RISC Reduced Instruction Set Computing.....	2
GUI Graphical User Interface	732
RTTI Run-Time Type Information.....	549
BSS Block Started by Symbol.....	25
SIMD Single Instruction, Multiple Data	185
BSOD Blue Screen of Death	726
DBMS Database Management Systems	443
ISA Instruction Set Architecture (Архитектура набора команд)	x
HPC High-Performance Computing	508
SEH Structured Exception Handling	37
ELF Формат исполняемых файлов, использующийся в Linux и некоторых других *NIX	79
TIB Thread Information Block	274

PIC Position Independent Code.....	530
NAN Not a Number	1000
NOP No Operation.....	6
BEQ (PowerPC, ARM) Branch if Equal	96
BNE (PowerPC, ARM) Branch if Not Equal	200
BLR (PowerPC) Branch to Link Register	794
XOR eXclusive OR (исключающее «ИЛИ»)	1006
MCU Microcontroller Unit	486
RAM Random-Access Memory.....	417
GCC GNU Compiler Collection	3
EGA Enhanced Graphics Adapter	978
VGA Video Graphics Array	978
API Application Programming Interface	608
ASCII American Standard Code for Information Interchange	284
ASCIIZ ASCII Zero (ASCII-строка заканчивающаяся нулем).....	93
IA64 Intel Architecture 64 (Itanium)	456
EPIC Explicitly Parallel Instruction Computing	976
OOE Out-of-Order Execution.....	457
MSDN Microsoft Developer Network.....	601
STL (Си++) Standard Template Library	556
PODT (Си++) Plain Old Data Type	567
HDD Hard Disk Drive.....	579
VM Virtual Memory (виртуальная память)	
WRK Windows Research Kernel.....	695
GPR General Purpose Registers (регистры общего пользования)	2
SSDT System Service Dispatch Table	726

RE Reverse Engineering	990
RAID Redundant Array of Independent Disks.....	vii
BCD Binary-Coded Decimal.....	438
BOM Byte Order Mark.....	684
GDB GNU Debugger	48
FP Frame Pointer.....	24
MBR Master Boot Record	690
JPE Jump Parity Even (инструкция x86)	229
CIDR Classless Inter-Domain Routing.....	475
STMTD Store Multiple Full Descending (инструкция ARM)	
LDMFD Load Multiple Full Descending (инструкция ARM)	
STMED Store Multiple Empty Descending (инструкция ARM).....	31
LDMED Load Multiple Empty Descending (инструкция ARM)	31
STMFA Store Multiple Full Ascending (инструкция ARM).....	31
LDMFA Load Multiple Full Ascending (инструкция ARM)	31
STMEA Store Multiple Empty Ascending (инструкция ARM)	31
LDMEA Load Multiple Empty Ascending (инструкция ARM).....	31
APSR (ARM) Application Program Status Register.....	252
FPSCR (ARM) Floating-Point Status and Control Register.....	252
RFC Request for Comments	689
TOS Top of Stack (вершина стека).....	639
LVA (Java) Local Variable Array (массив локальных переменных)	645
JVM Java Virtual Machine.....	ix
JIT Just-In-Time compilation.....	638
CDFS Compact Disc File System	701
CD Compact Disc	

ADC Analog-to-Digital Converter	697
EOF End of File (конец файла)	85
MMU Memory Management Unit	598
DES Data Encryption Standard	439
MIME Multipurpose Internet Mail Extensions	439
DBI Dynamic Binary Instrumentation	515
XML Extensible Markup Language	612
JSON JavaScript Object Notation	612
URL Uniform Resource Locator	4
ISP Internet Service Provider	931
IV Initialization Vector	xi
RSA Rivest Shamir Adleman	940
CPRNG Cryptographically secure PseudoRandom Number Generator	941
GiB Gibibyte	955

Glossary

heap (куча) обычно, большой кусок памяти предоставляемый [ОС](#), так что прикладное ПО может делить его как захочет. `malloc()`/`free()` работают с кучей . [31](#), [339](#), [553](#), [555](#), [568](#), [570](#), [585](#), [586](#), [614](#), [736](#), [737](#)

вещественное число числа, которые могут иметь точку. в Си/Си++ это *float* и *double* . [208](#)

декремент Уменьшение на 1 . [174](#), [193](#), [432](#), [1004](#), [1007](#), [1011](#)

инкремент Увеличение на 1 . [16](#), [174](#), [178](#), [181](#), [193](#), [834](#), [1004](#)

интегральный тип данных обычные числа, но не вещественные. могут использоваться для передачи булевых типов и перечислений (enumerations) . [222](#)

произведение Результат умножения . [98](#), [217](#), [397](#), [423](#), [446](#), [447](#)

среднее арифметическое сумма всех значений, разделенная на их количество . [511](#)

указатель стека Регистр указывающий на место в стеке . [10](#), [11](#), [20](#), [30](#), [31](#), [35](#), [42](#), [54](#), [55](#), [73](#), [100](#), [628](#), [714–717](#), [999](#), [1005](#), [1017](#), [1025](#)

хвостовая рекурсия Это когда компилятор или интерпретатор превращает рекурсию (с которой возможно это проделать, т.е. *хвостовую*) в итерацию для эффективности : [wikipedia](#) . [472](#)

частное Результат деления . [208](#), [210](#), [212](#), [213](#), [217](#), [422](#), [489](#), [512](#)

anti-pattern Нечто широко известное как плохое решение . [33](#), [75](#), [458](#)

atomic operation «*ατομικος*» означает «неделимый» в греческом языке, так что атомарная операция — это операция которая гарантированно не будет прервана другими тредами . [625](#), [768](#)

basic block группа инструкций, не имеющая инструкций переходов, а также не имеющая переходов в середину блока извне. В [IDA](#) он выглядит как просто список инструкций без строк-разрывов . [669](#), [980](#), [981](#)

callee Вызываемая функция . [66](#), [100](#), [102](#), [458](#), [716](#), [719](#), [720](#), [1020](#)

caller Функция вызывающая другую функцию . [6](#), [8](#), [46](#), [101](#), [458](#), [715](#), [720](#)

compiler intrinsic Специфичная для компилятора функция не являющаяся обычной библиотечной функцией. Компилятор вместо её вызова генерирует определенный машинный код. Нередко, это псевдофункции для определенной инструкции [CPU](#). Читайте больше: ([10.3](#) (стр. [974](#))) . [1011](#)

CP/M Control Program for Microcomputers: очень простая дисковая [ОС](#) использовавшаяся перед [MS-DOS](#). [887](#)

dongle Небольшое устройство подключаемое к LPT-порту для принтера (в прошлом) или к USB . Исполняло функции security token-а, имела память и, иногда, секретную (крипто-)хеширующую функцию . [794](#)

endianness Порядок байт: [2.8](#) (стр. [455](#)). [22](#), [78](#), [337](#), [1008](#)

GiB Гибибайт: 2^{30} или 1024 мегабайт или 1073741824 байт . [15](#)

jump offset Часть опкода JMP или Jcc инструкции, просто прибавляется к адресу следующей инструкции, и так вычисляется новый [PC](#). Может быть отрицательным . [123](#), [1004](#)

kernel mode Режим CPU с неограниченными возможностями в котором он исполняет ядро OS и драйвера. ср. [user mode](#). [1031](#)

leaf function Функция не вызывающая больше никаких функций . [29](#), [32](#)

link register (RISC) Регистр в котором обычно записан адрес возврата. Это позволяет вызывать leaf-функции без использования стека, т.е. быстрее . [32](#), [795](#), [1017](#), [1019](#)

loop unwinding Это когда вместо организации цикла на n итераций, компилятор генерирует n копий тела цикла, для экономии на инструкциях, обеспечивающих сам цикл . [176](#)

name mangling применяется как минимум в Си++, где компилятору нужно закодировать имя класса, метода и типы аргументов в одной строке, которая будет внутренним именем функции. читайте также здесь : [3.18.1](#) (стр. [534](#)). [535](#), [679](#), [680](#)

NaN не число: специальные случаи чисел с плавающей запятой, обычно сигнализирующие об ошибках . [225](#), [247](#), [979](#)

NEON AKA «Advanced SIMD» — [SIMD](#) от ARM . [1018](#)

NOP «no operation», холостая инструкция . [705](#)

NTAPI [API](#) доступное только в линии Windows NT. Большею частью не документировано Microsoft-ом . [773](#)

padding *Padding* в английском языке означает набивание подушки чем-либо для придания ей желаемой (большей) формы. В компьютерных науках, *padding* означает добавление к блоку дополнительных байт, чтобы он имел нужный размер, например, 2^n байт. . [687](#), [688](#)

PDB (Win32) Файл с отладочной информацией, обычно просто имена функций, но иногда имена аргументов функций и локальных переменных . [678](#), [739](#), [773](#), [775](#), [781](#), [782](#), [870](#)

POKE Инструкция языка BASIC записывающая байт по определенному адресу . [705](#)

register allocator Функция компилятора распределяющая локальные переменные по регистрам процессора . [192](#), [297](#), [411](#)

reverse engineering процесс понимания как устроена некая вещь, иногда, с целью клонирования оной . [iv](#), [1011](#)

security cookie Случайное значение, разное при каждом исполнении. Читайте больше об этом тут : [1.20.3](#) (стр. [273](#)). [758](#)

stack frame Часть стека, в которой хранится информация, связанная с текущей функцией: локальные переменные, аргументы функции, [RA](#), итд. . [68](#), [98](#), [99](#), [469](#), [758](#)

stdout standard output. [22](#), [36](#), [145](#)

thunk function Крохотная функция делающая только одно: вызывающая другую функцию . [23](#), [383](#), [795](#), [804](#)

tracer Моя простейшая утилита для отладки. Читайте больше об этом тут : [7.2.3](#) (стр. [768](#)). [179](#)–[181](#), [683](#), [693](#), [696](#), [754](#), [763](#), [872](#), [878](#), [882](#), [883](#), [885](#), [974](#)

user mode Режим CPU с ограниченными возможностями в котором он исполняет прикладное ПО. ср. [kernel mode](#). [811](#), [1031](#)

Windows NT Windows NT, 2000, XP, Vista, 7, 8, 10. [283](#), [408](#), [627](#), [686](#), [727](#), [738](#), [767](#), [890](#), [1011](#)

word (слово) тип данных помещающийся в [GPR](#). В компьютерах старше персональных, память часто измерялась не в байтах, а в словах . [439](#)–[442](#), [447](#), [559](#), [615](#)

xoring нередко применяемое в английском языке, означает применение операции [XOR](#) . [758](#), [806](#), [809](#)

Предметный указатель

.NET, 744

Ada, 107

AES, 847

Alpha AXP, 2

AMD, 719

Angry Birds, 253, 254

Apollo Guidance Computer, 202

ARM, 199, 708, 795, 1017

ARM1, 442

armel, 218

armhf, 218

Condition codes, 126

D-регистры, 217, 1018

Data processing instructions, 491

DCB, 20

hard float, 218

if-then block, 253

Leaf function, 32

Optional operators

ASR, 324, 491

LSL, 262, 290, 324, 433

LSR, 324, 491

ROR, 324

RRX, 324

S-регистры, 217, 1018

soft float, 218

Инструкции

ADC, 389

ADD, 21, 106, 126, 182, 312, 324, 491, 1019

ADDAL, 126

ADDCC, 164

ADDS, 104, 389, 1019

ADR, 20, 126

ADRcc, 126, 153, 458

ADRP/ADD pair, 24, 55, 82, 280, 294, 434

ANDcc, 529

ASR, 327

ASRS, 306, 491

B, 54, 126, 127

Bcc, 96, 97, 138

BCS, 127, 255

BEQ, 95, 153

BGE, 127

BIC, 306, 311, 329

BL, 20–24, 126, 435

BLcc, 126

BLE, 127

BLS, 127

BLT, 182

BLX, 22

BNE, 127

BX, 104, 166

CMP, 95, 96, 126, 153, 164, 182, 324, 1019

CSEL, 135, 140, 142, 325

EOR, 311

FCMPE, 255

FCSEL, 255

FMOV, 433

FMRS, 312

FSTP, 236

IT, 142, 253, 276

LDMccFD, 126

LDMEA, 31

LDMED, 31

LDMFA, 31

LDMFD, 20, 31, 126

LDP, 25

LDR, 56, 73, 81, 262, 279, 431

LDRB, 355

LDRB.W, 199

LDRSB, 199

LSL, 324, 327

LSL.W, 324

LSLR, 529

LSLS, 263, 311, 529

LSR, 327

LSRS, 311

MADD, 104

MLA, 103, 104

MOV, 8, 20, 21, 324, 491

MOVcc, 138, 142

MOVK, 433

MOVT, 21, 491

MOVT.W, 22

MOVW, 22

MUL, 106

MULS, 104

MVNS, 200

NEG, 498

ORR, 306

POP, 19–21, 30, 32

PUSH, 21, 30, 32

RET, 25

RSB, 132, 290, 324, 498

SBC, 389

SMMUL, 491

STMEA, 31

STMED, 31

STMFA, 31, 57

STMFD, 19, 31

STMIA, 56

STMIB, 57

STP, 24, 55

STR, 55, 262

SUB, 55, 290, 324

- SUBcc, 529
- SUBEQ, 200
- SUBS, 389
- SXTB, 356
- SXTW, 294
- TEST, 192
- TST, 299, 324
- VADD, 217
- VDIV, 217
- VLDR, 217
- VMOV, 217, 252
- VMOVT, 252
- VMRS, 252
- VMUL, 217
- XOR, 132, 312
- Конвейер, 164
- Переключение режимов, 104, 166
- Регистры
 - APSR, 252
 - FPSCR, 252
 - Link Register, 20, 32, 54, 166, 1017
 - R0, 107, 1017
 - scratch registers, 199, 1017
 - X0, 1018
 - Z, 96, 1018
- Режим ARM, 2
- Режим Thumb-2, 2, 166, 253, 254
- Режим Thumb, 2, 127, 166
- Режимы адресации, 431
- переключение режимов, 22
- ARM64
 - lo12, 55
- ASLR, 738
- AWK, 695
- base32, 688
- Base64, 687
- base64, 690, 844, 943
- base64scanner, 456, 688
- bash, 108
- BASIC
 - POKE, 705
- BeagleBone, 854
- binary grep, 693, 770
- BIND.EXE, 743
- binutils, 371
- Binwalk, 935
- Bitcoin, 621, 854
- Borland C++, 597
- Borland C++Builder, 680
- Borland Delphi, 680, 684, 974, 1012
- BSoD, 727
- BSS, 739
- C11, 722
- Callbacks, 374
- Canary, 273
- cdecl, 42, 714
- COFF, 802
- column-major order, 285
- Compiler intrinsic, 36, 446, 975
- Cray-1, 442
- CRC32, 458, 473
- CRT, 733, 755
- CryptoMiniSat, 417
- CryptoPP, 847
- Cygwin, 679, 683, 744, 770
- Data general Nova, 207
- DES, 397, 411
- dlopen(), 731
- dlsym(), 731
- DOSBox, 890
- DosBox, 696
- double, 209, 720
- Doubly linked list, 454
- dtruss, 770
- Duff's device, 485
- EICAR, 887
- ELF, 79
- Entropy, 931
- Error messages, 689
- fastcall, 14, 34, 66, 297, 715
- fetchmail, 440
- FidoNet, 688
- float, 209, 720
- Forth, 661
- FORTRAN, 23
- FreeBSD, 692
- Function epilogue, 30, 54, 56, 126, 356, 695
- Function prologue, 11, 30, 32, 55, 273, 695
- Fused multiply-add, 104
- Fuzzing, 498
- GCC, 679, 1021, 1023
- GDB, 29, 47, 51, 272, 383, 384, 769, 1023
- GeolIP, 932
- Glibc, 383, 615, 727
- GnuPG, 942
- HASP, 692
- Heartbleed, 614, 854
- Hex-Rays, 108, 188, 295, 604, 982
- Hiew, 93, 123, 683, 689, 739, 740, 744, 974
- Honeywell 6070, 440
- IDA, 87, 371, 507, 672, 686, 964, 1021
 - var_?, 56, 73
- IEEE 754, 208, 308, 367, 418, 996
- Inline code, 183, 305, 499, 541, 572
- Integer overflow, 107
- Intel
 - 8080, 199
 - 8086, 199, 305, 811
 - Модель памяти, 635, 979
 - 8253, 889
 - 80286, 811, 980
 - 80386, 305, 980
 - 80486, 208
 - FPU, 208
- Intel 4004, 439
- Intel C++, 10, 398, 976, 980, 1005
- iPod/iPhone/iPad, 19
- Itanium, 977
- JAD, 4
- Java, 441, 639
- John Carmack, 517
- JPEG, 940

jump table, 158, 166

Keil, 19

kernel panic, 727

kernel space, 727

LAPACK, 23

LD_PRELOAD, 731

Linux, 298, 728, 874

libc.so.6, 297, 383

LISP, vii, 592

LLVM, 19

long double, 209

Loop unwinding, 176

LZMA, 935

Mac OS Classic, 794

Mac OS X, 770

Mathematica, 587, 791

MD5, 459, 691

memfrob(), 846

MFC, 741, 862

Microsoft Word, 614

MIDI, 691

MinGW, 679

minifloat, 433

MIPS, 2, 699, 710, 739, 795, 939

Branch delay slot, 8

Global Pointer, 290

Load delay slot, 156

O32, 61, 65, 66, 1019

Глобальный указатель, 25

Инструкции

ADD, 107

ADD.D, 220

ADDIU, 26, 84, 85

ADDU, 107

AND, 307

BC1F, 257

BC1T, 257

BEQ, 97, 128

BLTZ, 133

BNE, 128

BNEZ, 167

BREAK, 492

C.LT.D, 257

DIV.D, 220

J, 6, 8, 26

JAL, 107

JALR, 26, 107

JR, 156

LB, 187

LBU, 187

LI, 435

LUI, 26, 84, 85, 220, 310, 435

LW, 26, 74, 85, 156, 436

LWC1, 220

MFC1, 223

MFHI, 106, 492, 1020

MFLO, 106, 492, 1020

MTC1, 373

MUL.D, 220

MULT, 106

NOR, 202

OR, 29

ORI, 307, 435

SB, 187

SLL, 167, 203, 326

SLLV, 326

SLT, 128

SLTIU, 167

SLTU, 128, 130, 167

SRL, 208

SUBU, 133

SW, 61

Псевдоинструкции

B, 185

BEQZ, 130

L.D, 220

LA, 28

LI, 8

MOVE, 26, 83

NEGU, 133

NOP, 29, 83

NOT, 202

Регистры

FCCR, 256

HI, 492

LO, 492

MS-DOS, 34, 274, 597, 631, 691, 696, 705, 737, 811, 887, 888, 944, 974, 979, 996, 1006, 1010, 1011

DOS extenders, 980

MSVC, 1021, 1022

Name mangling, 535

Native API, 738

NEC V20, 890

Notepad, 936

objdump, 371, 730, 744

octet, 440

OEP, 737, 744

OllyDbg, 44, 69, 78, 99, 117, 159, 178, 194, 211, 226, 237, 260, 267, 270, 285, 315, 337, 354, 355, 360, 363, 378, 740, 769, 1022

opaque predicate, 532

OpenMP, 621, 681

OpenSSL, 614, 854

OpenWatcom, 680, 716

Oracle RDBMS, 10, 397, 689, 746, 874, 882, 883, 957, 966, 976, 980

Page (memory), 408

Pascal, 684

PDP-11, 431

PGP, 688

Phrack, 688

Pin, 516

PNG, 938

PowerPC, 2, 25, 794

puts() вместо printf(), 21, 71, 107, 124

Python, 516, 586

Quake, 517

Quake III Arena, 374

Racket, 986

rada.re, 13

radare2, 941

- ul style="list-style-type: none; padding-left: 0;">
- rafind2, [711](#), [770](#)
 - RAID4, [453](#)
 - Raspberry Pi, [19](#)
 - ReactOS, [752](#)
 - Register allocation, [411](#)
 - Relocation, [23](#)
 - ROT13, [846](#)
 - row-major order, [284](#)
 - RSA, [5](#)
 - RVA, [737](#)
- SAP, [678](#), [870](#)
- Scheme, [986](#)
- SCO OpenServer, [801](#)
- Scratch space, [718](#)
- Security cookie, [273](#), [758](#)
- Security through obscurity, [690](#)
- SHA1, [459](#)
- SHA512, [622](#)
- Shadow space, [101](#), [102](#), [419](#)
- Shellcode, [531](#), [727](#), [738](#), [888](#), [1014](#)
- Signed numbers, [115](#), [445](#)
- SIMD, [418](#), [506](#)
- SQLite, [602](#)
- SSE, [418](#)
- SSE2, [418](#)
- stdcall, [714](#), [974](#)
- strace, [731](#), [770](#)
- strtoll(), [857](#)
- Stuxnet, [692](#)
- syscall, [297](#), [727](#), [770](#)
- Sysinternals, [689](#)
- TCP/IP, [457](#)
- thiscall, [535](#), [537](#), [717](#)
- thunk-функции, [23](#), [743](#), [795](#), [804](#)
- TLS, [274](#), [722](#), [739](#), [744](#), [999](#)
 - Callbacks, [744](#)
 - Коллбэки, [725](#)
- Tor, [688](#)
- tracer, [179](#), [380](#), [382](#), [683](#), [693](#), [696](#), [754](#), [763](#), [769](#), [847](#), [872](#), [878](#), [882](#), [883](#), [885](#), [974](#)
- Turbo C++, [597](#)
- uClibc, [615](#)
- UCS-2, [441](#)
- UFS2, [692](#)
- Unicode, [684](#)
- UNIX
 - chmod, [4](#)
 - fork, [616](#)
 - getopt, [857](#)
 - grep, [689](#), [975](#)
 - mmap(), [597](#)
 - strings, [688](#)
 - xxd, [919](#)
- Unrolled loop, [183](#), [276](#), [488](#), [503](#)
- uptime, [731](#)
- UPX, [942](#)
- USB, [796](#)
- UseNet, [688](#)
- user space, [727](#)
- UTF-16, [441](#)
- UTF-16LE, [684](#), [685](#)
- UTF-8, [684](#), [943](#)
- Uuencode, [943](#)
- Uuencoding, [688](#)
- VA, [737](#)
- Variance, [844](#)
- Watcom, [680](#)
- win32
 - FindResource(), [592](#)
 - GetProcAddress(), [602](#)
 - HINSTANCE, [602](#)
 - HMODULE, [602](#)
 - LoadLibrary(), [602](#)
 - MAKEINTRESOURCE(), [593](#)
- Windows, [767](#)
 - API, [996](#)
 - IAT, [737](#)
 - INT, [737](#)
 - KERNEL32.DLL, [296](#)
 - MSVCR80.DLL, [376](#)
 - NTAPI, [773](#)
 - ntoskrnl.exe, [874](#)
 - PDB, [678](#), [739](#), [773](#), [781](#), [870](#)
 - Structured Exception Handling, [37](#), [745](#)
 - TIB, [274](#), [745](#), [999](#)
 - Win32, [295](#), [685](#), [731](#), [737](#), [980](#)
 - GetProcAddress, [743](#)
 - LoadLibrary, [743](#)
 - MulDiv(), [447](#), [790](#)
 - Ordinal, [741](#)
 - RaiseException(), [745](#)
 - SetUnhandledExceptionFilter(), [746](#)
 - Windows 2000, [738](#)
 - Windows 3.x, [627](#), [980](#)
 - Windows NT4, [738](#)
 - Windows Vista, [737](#), [773](#)
 - Windows XP, [738](#), [744](#), [781](#)
- Wine, [752](#)
- Wolfram Mathematica, [913](#)
- x86
 - AVX, [397](#)
 - FPU, [1000](#)
 - MMX, [396](#)
 - SSE, [397](#)
 - SSE2, [397](#)
 - Инструкции
 - AAA, [1015](#)
 - AAS, [1015](#)
 - ADC, [388](#), [631](#), [1004](#)
 - ADD, [10](#), [42](#), [98](#), [493](#), [631](#), [1004](#)
 - ADDSD, [418](#)
 - ADDSS, [431](#)
 - ADRCc, [134](#)
 - AESDEC, [847](#)
 - AESENC, [847](#)
 - AESKEYGENASSIST, [850](#)
 - AND, [11](#), [296](#), [300](#), [314](#), [328](#), [362](#), [1004](#), [1008](#)
 - BSF, [410](#), [1008](#)
 - BSR, [1008](#)
 - BSWAP, [457](#), [1008](#)
 - BT, [1008](#)
 - BTC, [310](#), [1008](#)
 - BTR, [310](#), [768](#), [1008](#)
 - BTS, [310](#), [1008](#)

CALL, 10, 31, 706, 742, 932, 1004
 CBW, 446, 1008
 CDQ, 396, 446, 1008
 CDQE, 446, 1008
 CLD, 1008
 CLI, 1009
 CMC, 1009
 CMOVcc, 127, 134, 136, 138, 142, 458, 1009
 CMP, 86, 1004, 1015
 CMPSB, 691, 1009
 CMPSD, 1009
 CMPSQ, 1009
 CMPSW, 1009
 COMISD, 427
 COMISS, 431
 CPUID, 360, 1010
 CWD, 446, 632, 899, 1008
 CWDE, 446, 1008
 DEC, 193, 1004, 1015
 DIV, 446, 1010
 DIVSD, 418, 695
 FABS, 1012
 FADD, 1013
 FADDP, 210, 216, 1013
 FATRET, 322, 323
 FCHS, 1013
 FCMOVcc, 249
 FCOM, 236, 247, 1013
 FCOMP, 224, 1013
 FCOMPP, 1013
 FDIV, 210, 693, 694, 1013
 FDIVP, 210, 1013
 FDIVR, 216, 1013
 FDIVRP, 1013
 FDUP, 661
 FILD, 1013
 FIST, 1013
 FISTP, 1013
 FLD, 221, 224, 1013
 FLD1, 1013
 FLDCW, 1013
 FLDZ, 1013
 FMUL, 210, 1013
 FMULP, 1013
 FNSTCW, 1013
 FNSTSW, 224, 247, 1013
 FSINCOS, 1013
 FSQRT, 1013
 FST, 1013
 FSTCW, 1013
 FSTP, 221, 1013
 FSTSW, 1013
 FSUB, 1013
 FSUBP, 1013
 FSUBR, 1013
 FSUBRP, 1013
 FUCOM, 247, 1014
 FUCOMI, 249
 FUCOMP, 1014
 FUCOMPP, 247, 1014
 FWAIT, 208
 FXCH, 977, 1014
 IDIV, 446, 489, 1010
 IMUL, 98, 292, 446, 592, 1004, 1015
 IN, 706, 811, 889, 1011
 INC, 193, 974, 1004, 1015
 INT, 34, 887, 1010
 INT3, 683
 IRET, 1010, 1011
 JA, 115, 248, 445, 1004, 1015
 JAE, 115, 1004, 1015
 JB, 115, 445, 1004, 1015
 JBE, 115, 1004, 1015
 JC, 1004
 Jcc, 97, 137
 JCXZ, 1004
 JE, 144, 1004, 1015
 JECXZ, 1004
 JG, 115, 445, 1004
 JGE, 115, 1004
 JL, 115, 445, 1004
 JLE, 115, 1004
 JMP, 31, 54, 743, 974, 1004
 JNA, 1004
 JNAE, 1004
 JNB, 1004
 JNBE, 248, 1004
 JNC, 1004
 JNE, 86, 115, 1004, 1015
 JNG, 1004
 JNGE, 1004
 JNL, 1004
 JNLE, 1004
 JNO, 1004, 1015
 JNS, 1004, 1015
 JNZ, 1004
 JO, 1004, 1015
 JP, 225, 890, 1004, 1015
 JPO, 1004
 JRCXZ, 1004
 JS, 1004, 1015
 JZ, 96, 144, 976, 1004
 LAHF, 1005
 LEA, 68, 101, 342, 458, 463, 475, 493, 719, 777, 1005
 LEAVE, 11, 1005
 LES, 816, 898
 LOCK, 767
 LODSB, 889
 LOOP, 174, 190, 695, 898, 1011
 MAXSD, 427
 MOV, 8, 10, 12, 503, 706, 740, 932, 974, 1006
 MOVDQA, 400
 MOVDQU, 400
 MOVSB, 1006
 MOVSD, 426, 504, 831, 1006
 MOVSDX, 426
 MOVSQ, 1006
 MOVSS, 431
 MOVSW, 1006
 MOVSX, 191, 199, 354-356, 446, 1006
 MOVFXD, 278
 MOVZX, 192, 339, 795, 1006
 MUL, 446, 592, 1006
 MULSD, 418
 NEG, 497, 1006
 NOP, 475, 974, 1006, 1015
 NOT, 198, 200, 835, 1006

- OR, [300](#), [519](#), [1006](#)
- OUT, [706](#), [811](#), [1011](#)
- PADDD, [400](#)
- PCMPEQB, [409](#)
- PLMULHW, [397](#)
- PLMULLD, [397](#)
- PMOVMKB, [409](#)
- POP, [10](#), [30](#), [31](#), [1006](#), [1015](#)
- POPA, [1011](#), [1015](#)
- POPCNT, [1011](#)
- POPF, [889](#), [1011](#)
- PUSH, [10](#), [11](#), [30](#), [31](#), [68](#), [706](#), [932](#), [1006](#), [1015](#)
- PUSHA, [1011](#), [1015](#)
- PUSHF, [1011](#)
- PXOR, [409](#)
- RCL, [695](#), [1011](#)
- RCR, [1011](#)
- RET, [6](#), [8](#), [10](#), [31](#), [273](#), [537](#), [628](#), [974](#), [1006](#)
- ROL, [323](#), [975](#), [1011](#)
- ROR, [975](#), [1011](#)
- SAHF, [247](#), [1006](#)
- SAL, [1012](#)
- SALC, [890](#)
- SAR, [327](#), [446](#), [510](#), [898](#), [1012](#)
- SBB, [388](#), [1007](#)
- SCASB, [889](#), [890](#), [1007](#)
- SCASD, [1007](#)
- SCASQ, [1007](#)
- SCASW, [1007](#)
- SET, [460](#)
- SETALC, [890](#)
- SETcc, [128](#), [192](#), [248](#), [1012](#)
- SHL, [203](#), [259](#), [327](#), [1007](#)
- SHR, [207](#), [327](#), [362](#), [1007](#)
- SHRD, [395](#), [1007](#)
- STC, [1012](#)
- STD, [1012](#)
- STI, [1012](#)
- STOSB, [488](#), [1008](#)
- STOSD, [1008](#)
- STOSQ, [503](#), [1008](#)
- STOSW, [1008](#)
- SUB, [10](#), [11](#), [86](#), [144](#), [493](#), [1004](#), [1008](#)
- SYSCALL, [1010](#), [1012](#)
- SYSENTER, [728](#), [1010](#), [1012](#)
- TEST, [191](#), [296](#), [299](#), [328](#), [1008](#)
- UD2, [1012](#)
- XADD, [768](#)
- XCHG, [1006](#), [1012](#)
- XOR, [10](#), [86](#), [198](#), [510](#), [695](#), [806](#), [974](#), [1008](#), [1015](#)
- Префиксы
 - LOCK, [768](#), [1003](#)
 - REP, [1003](#), [1006](#), [1008](#)
 - REPE/REPNE, [1003](#)
 - REPNE, [1007](#)
- Регистры
 - AF, [439](#)
 - AH, [1005](#), [1006](#)
 - CS, [979](#)
 - DF, [615](#)
 - DR6, [1002](#)
 - DR7, [1002](#)
 - DS, [979](#)
 - EAX, [86](#), [107](#)
 - EBP, [68](#), [98](#)
 - ECX, [535](#)
 - ES, [898](#), [979](#)
 - ESP, [42](#), [68](#)
 - FS, [724](#)
 - GS, [274](#), [724](#), [727](#)
 - JMP, [163](#)
 - RIP, [730](#)
 - SS, [979](#)
 - ZF, [86](#), [296](#)
 - Флаги, [86](#), [117](#), [1000](#)
 - Флаги
 - CF, [34](#), [1004](#), [1007](#), [1009](#), [1011](#), [1012](#)
 - DF, [1008](#), [1012](#)
 - IF, [1009](#), [1012](#)
 - x86-64, [14](#), [15](#), [50](#), [67](#), [72](#), [94](#), [100](#), [410](#), [418](#), [708](#), [717](#), [730](#), [996](#), [1002](#)
 - Xcode, [19](#)
 - XML, [688](#), [843](#)
 - XOR, [849](#)
 - Z80, [440](#)
 - zlib, [616](#), [846](#)
 - ZX Spectrum, [450](#)
 - Алгоритм умножения Бута, [207](#)
 - Аномалии компиляторов, [137](#), [220](#), [293](#), [306](#), [323](#), [484](#), [524](#), [976](#)
 - Апофения, [711](#)
 - Базовый адрес, [737](#)
 - Глобальные переменные, [75](#)
 - Двоичное дерево, [575](#)
 - Двусвязный список, [559](#)
 - Динамически подгружаемые библиотеки, [22](#)
 - Дональд Э. Кнут, [442](#)
 - Использование grep, [181](#), [254](#), [678](#), [693](#), [696](#), [871](#)
 - Компоновщик, [81](#), [535](#)
 - Конвейер RISC, [127](#)
 - Луркмор, [711](#)
 - Не-числа (NaNs), [247](#)
 - ОЗУ, [81](#)
 - ООП
 - Полиморфизм, [535](#)
 - Обратная польская запись, [257](#)
 - ПЗУ, [81](#)
 - Парейдолия, [711](#)
 - Переполнение буфера, [265](#), [272](#), [758](#)
 - Перфокарты, [257](#)
 - Режим Thumb-2, [22](#)
 - Режим обратной связи по шифротексту, [849](#)
 - Рекурсия, [30](#), [32](#), [472](#)
 - Tail recursion, [472](#)
 - Розенкранц и Гильденстерн мертвы, [712](#)
 - Сборщик мусора, [663](#)
 - Си++, [873](#)
 - C++11, [568](#), [722](#)
 - ostream, [550](#)
 - References, [551](#)
 - RTTI, [550](#)
 - STL, [678](#)
 - std::forward_list, [568](#)
 - std::list, [559](#)
 - std::map, [575](#)
 - std::set, [575](#)

- std::string, 552
- std::vector, 568
- исключения, 750
- Синтаксис AT&T, 12, 37
- Синтаксис Intel, 12, 19
- Синтаксический сахар, 144
- Стандартная библиотека Си
 - alloca(), 35, 276, 458, 750
 - assert(), 282, 690
 - atexit(), 558
 - atoi(), 492, 861
 - calloc(), 827
 - close(), 731
 - exit(), 461
 - fread(), 611
 - free(), 458, 586
 - fseek(), 826
 - ftell(), 826
 - fwrite(), 611
 - getenv(), 862
 - localtime(), 636
 - localtime_r(), 346
 - longjmp, 616
 - longjmp(), 145
 - malloc(), 339, 458, 586
 - memchr(), 1007
 - memcmp(), 445, 506, 691, 1009
 - memcpy(), 12, 67, 503, 615, 1006
 - memmove(), 615
 - memset(), 257, 502, 882, 1008
 - open(), 731
 - pow(), 220
 - puts(), 21
 - qsort(), 375
 - rand(), 329, 682, 779, 781, 815
 - read(), 611, 731
 - realloc(), 458
 - scanf(), 66
 - setjmp, 616
 - strcat(), 507
 - strcmp(), 445, 500, 731
 - strcpy(), 12, 502, 816
 - strlen(), 190, 407, 502, 519, 1007
 - strstr(), 461
 - time(), 636
 - tolower(), 832
 - toupper(), 526
 - va_arg, 512
 - va_list, 515
 - vprintf, 515
 - write(), 611
- Стек, 30, 98, 144
 - Переполнение стека, 32
 - Стековый фрейм, 68
- Табуляционное хэширование, 455
- Тэггированные указатели, 592
- Фортран, 285, 507, 587, 679
- Хейзенбаги, 621
- Хеш-функции, 458
- Хорхе Луис Борхес, 712
- Хэширование Зобриста, 455
- Шахматы, 455
- Эдсгер Дейкстра, 587
- Элементы языка Си
 - C99, 109
 - bool, 295
 - restrict, 507
 - variable length arrays, 276
 - const, 9, 81
 - for, 174, 474
 - if, 114, 144
 - ptrdiff_t, 604
 - return, 10, 86, 109
 - Short-circuit, 518, 521, 986
 - switch, 142, 144, 153
 - while, 190
 - Запятая, 986
 - Пост-декремент, 431
 - Пост-инкремент, 431
 - Пре-декремент, 431
 - Пре-инкремент, 431
 - Указатели, 66, 73, 110, 374, 410, 589
- Энтропия, 913
- Ядро Linux, 711
- адресно-независимый код, 20, 728
- кластеризация, 940