Курс «Архитектурно-ориентированная оптимизация кода»

Оптимизация кода для суперскалярного ядра Intel 64

Михаил Курносов

Оптимизация кода для эффективной загрузки CPU Frontend (IF, ID)

- **Минимизация количества условных переходов** (меньше записей в BTB)
  - Раскрутка циклов, инструкции cmov, setcc, SIMD masked operations
- **Минимизация промахов при доступе к кеш-памяти инструкций**
- **Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual**
  - Код и данные следует размещать на разных страницах памяти
  - Организация кода в соответствии с логикой работы алгоритма статического предсказания переходов
  - Раскручивание многократно выполняемых циклов (unroll), так чтобы в них оставалось 16 или менее итераций
  - Избегать множественных условных переходов на общий блок кода, выровненный на границу в 8 байт (ограничение устранено начиная с Ice Lake)

Ветвления в программах C/C++

```
if (x == 0)
else if (x == 1)
else
```

```
switch (x) {
   case 0:
        break;
   case 1:
        break; default:
}
```

```
for (i = 0; i < 10; i++) {
}
```

```
while (data > 0) {
   data--;
}
```

```
do {
   data--;
} while (data > 0);
```

Ветвления и базовые блоки

```
int a = 1, b = 3, c = 0;

if (a < b) {
    c = 4;  // basic block
}
```



```
movl    $1, -8(%rbp)    # a
movl    $3, -4(%rbp)    # b
movl    $0, -12(%rbp)   # c

movl    -8(%rbp), %eax
cmpl    -4(%rbp), %eax
jge .L2
movl    $4, -12(%rbp)  # c = 4, basic block
.L2:
```

- **Базовый блок** (basic block) — последовательность инструкций с единственным входом потока управления (control flow) и единственным выходом (jmp, jXX, call, ret)
- Базовый блок может содержать переход только в конце, каждая инструкция блока выполняется один раз
- Базовые блоки — это узлы графа потока управления (control flow graph — CFG)

Ветвления в программах (gcc 11.2)

```c
if (a > 2) {
    printf("A\n");
} else {
    printf("B\n");
}
```

```
$ gcc ./prog.c --save-temps
```

```
    cmpl    $2, -4(%rbp)
    jle .L5             # jmp if a <= 2
    # true, a > 2
    leaq    .LC0(%rip), %rax
    movq    %rax, %rdi
    call    puts@PLT
    jmp .L6
.L5:
    # false
    leaq    .LC1(%rip), %rax
    movq    %rax, %rdi
    call    puts@PLT
.L6:
```

```
$ gcc -O2 ./prog.c --save-temps
```

```
    cmpl    $2, %edi
    jle .L4             # jmp if a <= 2
    # true, a > 2
    leaq    .LC0(%rip), %rdi
    call    puts@PLT
.L5:
    xorl    %eax, %eax
    addq    $8, %rsp
    ret
.L4:
    # false
    leaq    .LC1(%rip), %rdi
    call    puts@PLT
    jmp .L5
```

Ветвления в программах (gcc 11.2)

```c
for (int i = 0; i < N; i++) {
    printf("%d\n", i);
}
```

```
$ gcc -O2 ./prog.c --save-temps
```

```
    testl   %edi, %edi          # N
    jle .L6
    # ...
    movl    %edi, %ebp          # N
    xorl    %ebx, %ebx
.L3:
    movl    %ebx, %edx
    movq    %r12, %rsi
    movl    $1, %edi
    xorl    %eax, %eax
    call    __printf_chk@PLT
    addl    $1, %ebx
    cmpl    %ebx, %ebp
    jne .L3
.L6:
```

Ветвления в программах (gcc 11.2)

```c
switch (a) {
    case 1:
        printf("1\n");
        break;
    case 2:
        printf("2\n");
        break;
    case 3:
    case 4:
        printf("3-4\n");
        break;
    default:
        printf("default\n");
}
```

```
$ gcc -O2 ./prog.c --save-temps
```

```
.LFB23:
    cmpl    $2, %edi
    je  .L2
    jg  .L3
    cmpl    $1, %edi
    jne .L5
    leaq    .LC0(%rip), %rdi    # a=1
    call    puts@PLT
.L7:
    xorl    %eax, %eax          # return
    addq    $8, %rsp
    ret
.L3:
    subl    $3, %edi
    cmpl    $1, %edi
    ja  .L5
    leaq    .LC2(%rip), %rdi    # a=3
    call    puts@PLT
    jmp .L7
.L2:
    leaq    .LC1(%rip), %rdi    # a=2
    call    puts@PLT
    jmp .L7
.L5:
    leaq    .LC3(%rip), %rdi    # a>=4
    call    puts@PLT
    jmp .L7
```

Предсказание переходов (branch prediction)

- **Модуль предсказания условных переходов**
  (Branch Prediction Unit, BPU) – модуль процессора, определяющий по физическому адресу инструкции ветвления *надо ли выполнять переход* и *по какому адресу*
- Предсказывает условные переходы, вызовы/возвраты из функций
- Вероятность правильного предсказания
  переходов в современных процессорах превышает 0.9
- После предсказания процессор начинает спекулятивно выполнять инструкции
  с предсказанного адреса (speculative execution)
- **Альтернативный подход (без BPU)** – спекулятивно выполнять обе ветви ветвления, пока не будет вычислено управляющее выражение (условие)

Статическое предсказание переходов (static prediction)

Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual

- Косвенные переходы
- **Section 3.4.1 Branch Prediction Optimization [*]**
  - Predict forward conditional branches to be NOT taken
  - Predict backward conditional branches to be taken
  - Predict indirect branches to be NOT taken (switch, call funcptr)

```
Begin:  mov   eax,  mem32
        and   eax, ebx
        imul  eax, edx
        shld  eax, 7
        jc    Begin
```

Статическое предсказание: обратный переход выполняется

```
        mov   eax, mem32
        and   eax, ebx
        imul  eax, edx
        shld  eax, 7
        jc    Begin
        mov   eax, 0
Begin:  call  Convert
```

Статическое предсказание: прямой переход не выполняется (fall-through)

```
//Forward condition branches not taken (fall through)
    IF<condition> {....
    ↓
    }

IF<condition> {...
    ↓
    }

//Backward conditional branches are taken
    LOOP {...
    ↑ — }<condition>

//Unconditional branches taken
    JMP
    ------→
```

Наиболее вероятный блок следует размещать сразу после if

Статическое предсказание переходов (static prediction)

- **Косвенные переходы** (indirect branches) могу иметь несколько целевых адресов, по которым осуществляются переходы
  - `jmp rax` — переход по адресу в регистре rax
  - адрес в регистре rax может меняться на каждой итерации цикла
- В BTB (Branch Target Buffer) с адресом инструкции перехода связан один целевой адрес, что осложняет прогнозирование косвенных переходов

Intel 64 and IA-32 Architectures Optimization Reference Manual

Динамическое предсказание переходов

- **Динамическое предсказание основано на** хранение и анализе истории условных переходов
- **BTB (Branch Target Buffer)** – ассоциативный массив (хеш-таблица), сопоставляющий адресу инструкции ветвления историю переходов и целевой адрес перехода (target)

```
0xFF01 l1:  movl %ebx, %eax
0xFF02      cmpl $0x10, %eax
0xFF03      jne  l2
0xFF04      movl  %eax, %ecx
0xFF05      jmp  l3
0xFF06  l2: movl  $-0x1, %ecx
0xFF07  l3:
0xFF08      cmpl $0xFF, %ebx
0xFF09      jne  l1
```

Instr. Address (low bits)	History	Target Address
0xFF03	1	0xFF06
0xFF09	0	

Динамическое предсказание переходов

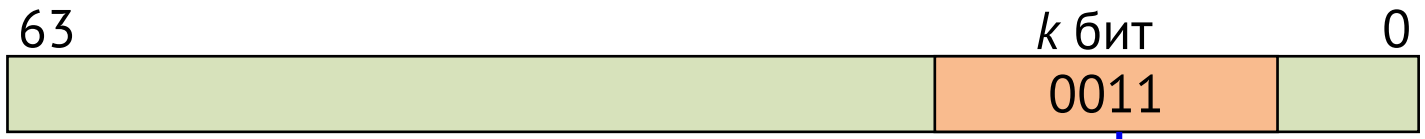
- На этапе выборке инструкции условного перехода происходит обращение в BTB:
  - Если запись для адреса инструкции перехода (%IP) присутствует в BTB, значит сохранены история и целевой адрес перехода (target address)
  - На основе истории ветвлений строится прогноз:
    - осуществлять переход (to be taken) – BTB возвращает target address
    - не осуществлять переход (not to be taken) – BTB возвращает %IP + <instr-width>

```
0xFF01 l1:  movl %ebx, %eax
0xFF02      cmpl $0x10, %eax
0xFF03      jne  l2
0xFF04      movl  %eax, %ecx
0xFF05      jmp  l3
0xFF06 l2:  movl  $-0x1, %ecx
0xFF07 l3:
0xFF08      cmpl $0xFF, %ebx
0xFF09      jne  l1
```

Instr. Address (low bits)	History	Target Address
0xFF03	1	0xFF06
0xFF09	0	

1-bit dynamic predictor

Адрес инструкции перехода (IP):



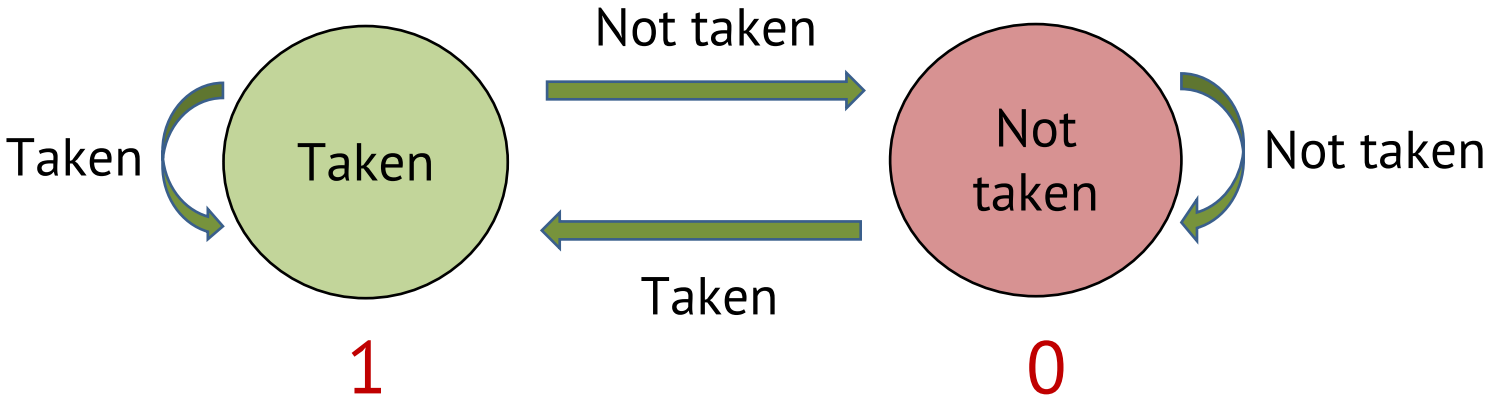
Branch Target Buffer (BTB)

Record	Branch History	Target
0	**1**	0xAF06
1	**0**	0x1134
2	**1**	0x01FC
3	**0**	0xFF06
…		
$2^k - 1$	**1**	0xBEAF

Branch History (1 bit)

- **0** – ветвление не состоялось, не осуществлять переход
- **1** – ветвление состоялось, осуществлять переход
- Неправильный прогноз — отмена операций по ложной ветви
- История корректируется после выполнения операции сравнения (cmp)

1-bit dynamic predictor




```
for (i = 0; i < 6; i++) {
    if ((i % 2) == 0)
        /* Even */
    else
        /* Odd */
}
```

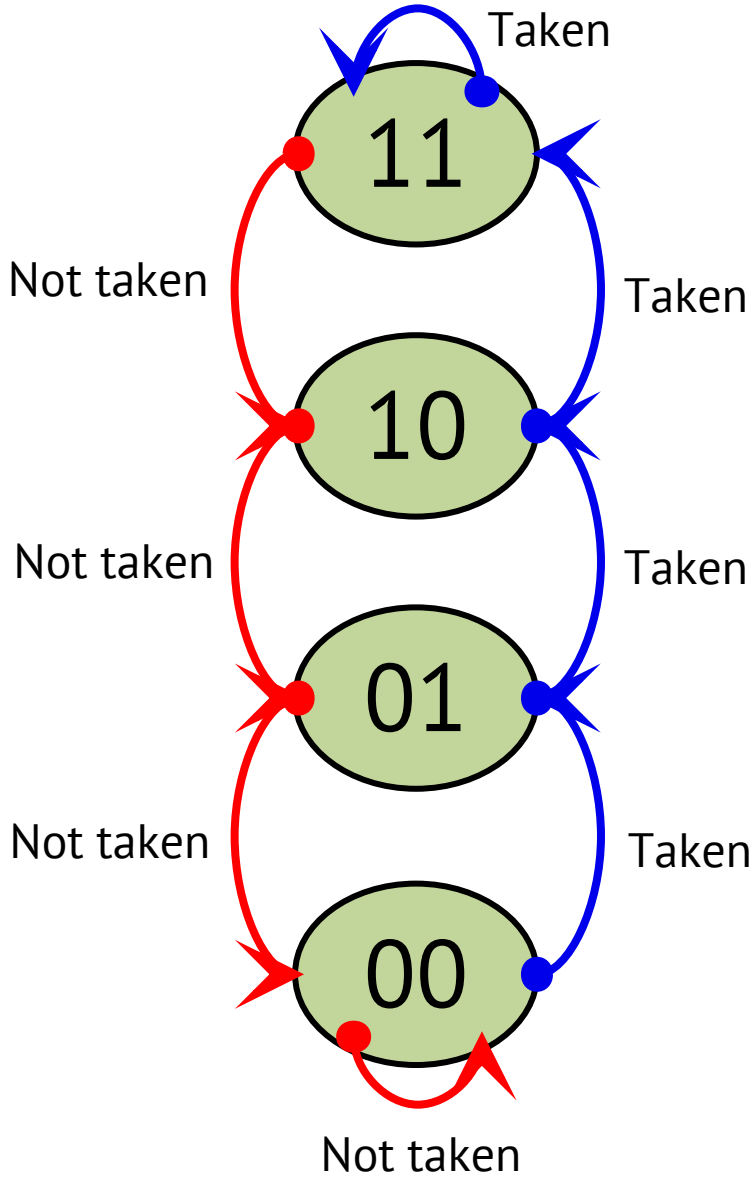
Точность 0%

Iter, i	Predicted	Real
0	0 (NOT TAKEN)	1 (TAKEN)
1	1	0
2	0	1
3	1	0
4	0	1
5	1	0

Saturating 2-bit counter (bimodal predictor)

- **Корректировка счетчика (после выполнения сравнения)**
  - переход выполнен: счетчик увеличивается на 1
    counter = min(3, counter + 1)
  - переход не выполнен: счетчик уменьшается на 1
    counter = max(0, counter - 1)
- **Предсказание:**
  - counter < 2: переход не выполняется
  - counter >= 2: переход выполняется

- Использовался в Intel Pentium
- *n*-битный предсказатель
  если counter >= 2^n / 2, то ветвление выполняется



Реализации BTB

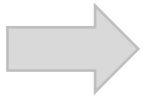
- **Intel Pentium**: saturating 2-bit counter
- **Intel Pentium** {MMX, Pro, II, III}:
  two-level adaptive branch predictor (4-bit history)
- **Pentium 4**: Agree predictor (16-bit global history)
- **Intel Atom**: two-level adaptive branch predictor
- **Intel Nehalem**: two-level branch predictor, misprediction penalty
  is at least 17 clock cycles

Agner Fog. **The microarchitecture of Intel, AMD and VIA CPUs**
(an optimization guide for assembly programmers and compiler makers)
http://www.agner.org/optimize/microarchitecture.pdf

Размещение блоков кода с учетом статического предсказания

- Наиболее вероятный блок следует размещать сразу после if
  - Согласуется с алгоритмом статического предсказания
  - Учитывая возможную аппаратную предвыборку инструкций из памяти (instruction cache prefetching)

```
p = malloc(size);
if (p == NULL) {
    error();
    break;
} else {
    process(p);
    free(p);
}
```



```
p = malloc(size);
if (p != NULL) {
    process(p);
    free(p);
} else {
    error();
    break;
}
```

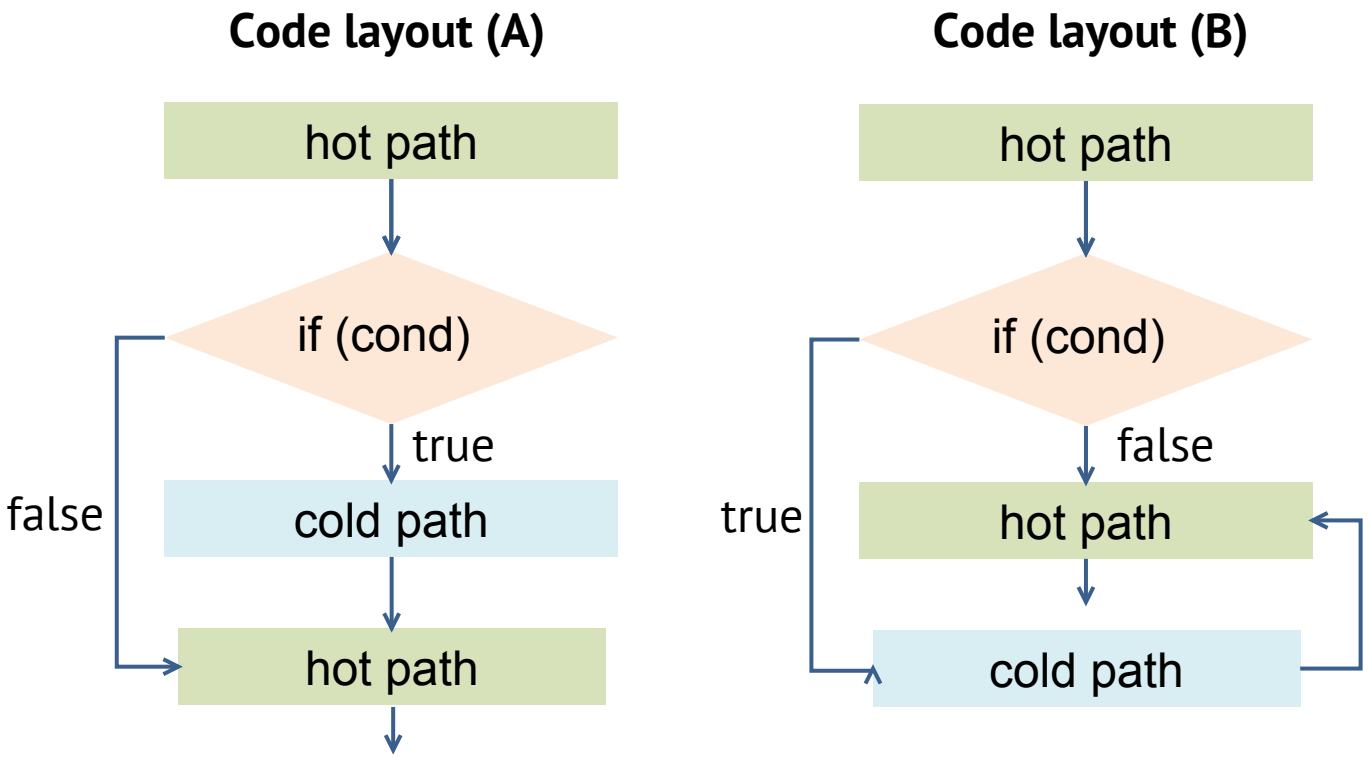
Predict forward conditional branches to be NOT taken (fall-through)

Размещение блоков кода

- **"Горячий путь" (hot code path)** — путь в графе управления, на котором программа проводит больше всего времени (содержит вычислительно сложные базовые блоки, часто выполняется)

```
// hot code path
if (cond) {
    // cold code path
}
// hot code path
```

- Какой вариант предпочтительнее — A или B?
- Если cond вероятнее всего true, то эффективнее A — меньше переходов, предвыборка в L1i
- Если cond вероятнее всего false, то эффективнее B



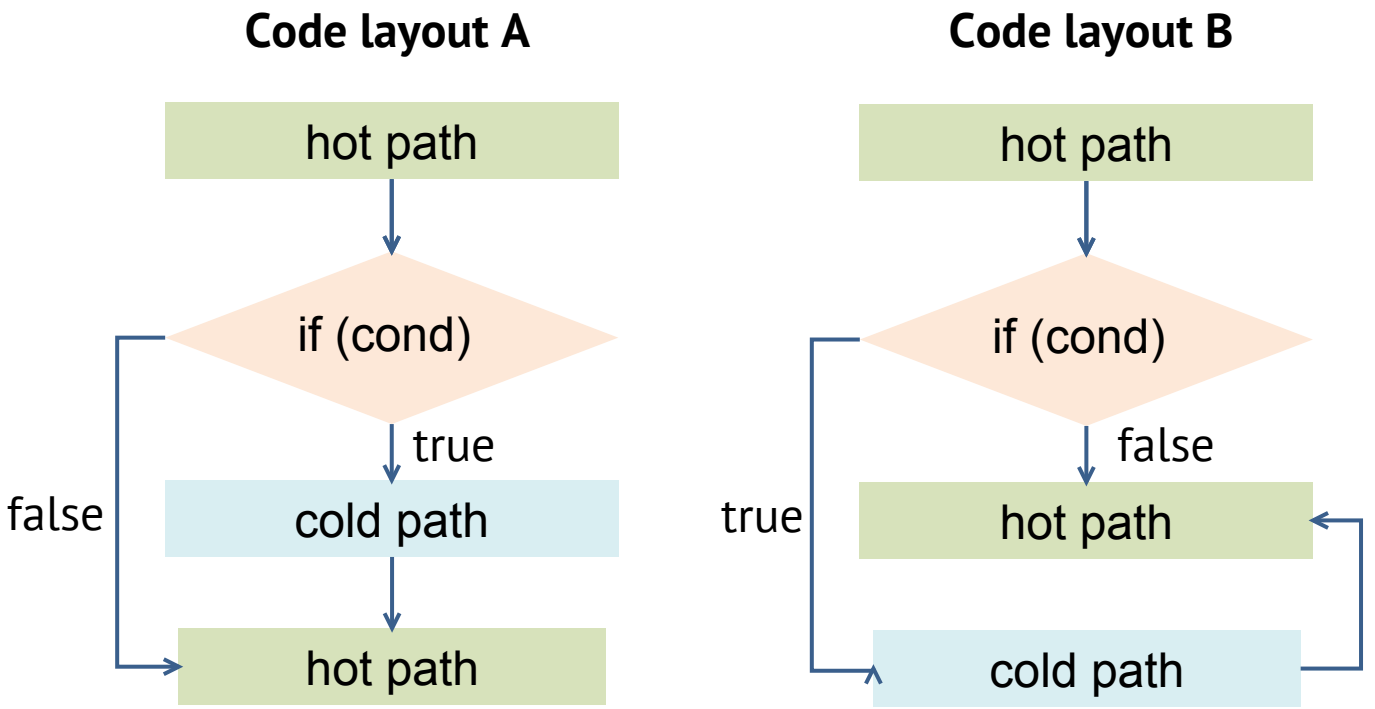
Аннотирование вероятности ветвлений (likely/unlikely)

- **GCC __builtin_expect()**

```
#define likely(expr) __builtin_expect((expr), 1)
#define unlikely(expr) __builtin_expect((expr), 0)

if (likely(p != NULL)) {
    // process p
}
```

- **C++20**

```
if (p != NULL) [[likely]] {
    // process p
}
```



Аннотирование ветвлений (likely/unlikely)

```c
// V1
int f(int n, int k)
{
    int s = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        if ((k % 2) == 0)
            s += pop(i);
        else
            s -= pop(i);
    }
    return s;
}

// V2 с аннотированием
int f(int n, int k)
{
    int s = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        if (unlikely((k % 2) == 0))
            s += pop(i);
        else
            s -= pop(i);
    }
    return s;
}
```

```
# V1 – без аннотирования условий
f:
.LFB41:
    testl   %edi, %edi
    jle .L12
    andl    $1, %esi
    xorl    %ecx, %ecx
    xorl    %r8d, %r8d


.L11:
    movl    %ecx, %edx
    movl    %ecx, %eax
    shrl    %edx
    andl    $1431655765, %edx
    ...
    subl    %eax, %r8d
    testl   %esi, %esi
    cmove   %edx, %r8d
    addl    $1, %ecx
    cmpl    %ecx, %edi
    jne .L11
    movl    %r8d, %eax
    ret
.L12:
    xorl    %r8d, %r8d
    movl    %r8d, %eax
    ret
```

```
# V2 – с аннотацией unlikely
f:
.LFB41:
    testl   %edi, %edi
    jle .L12
    notl    %esi
    xorl    %ecx, %ecx
    xorl    %r8d, %r8d
    andl    $1, %esi

.L11:
    movl    %ecx, %edx
    movl    %ecx, %eax
    shrl    %edx
    andl    $1431655765, %edx
    ...
    subl    %eax, %r8d
    testl   %esi, %esi
    cmovne  %edx, %r8d
    addl    $1, %ecx
    cmpl    %ecx, %edi
    jne .L11
    movl    %r8d, %eax
    ret
.L12:
    xorl    %r8d, %r8d
    movl    %r8d, %eax
    ret
```

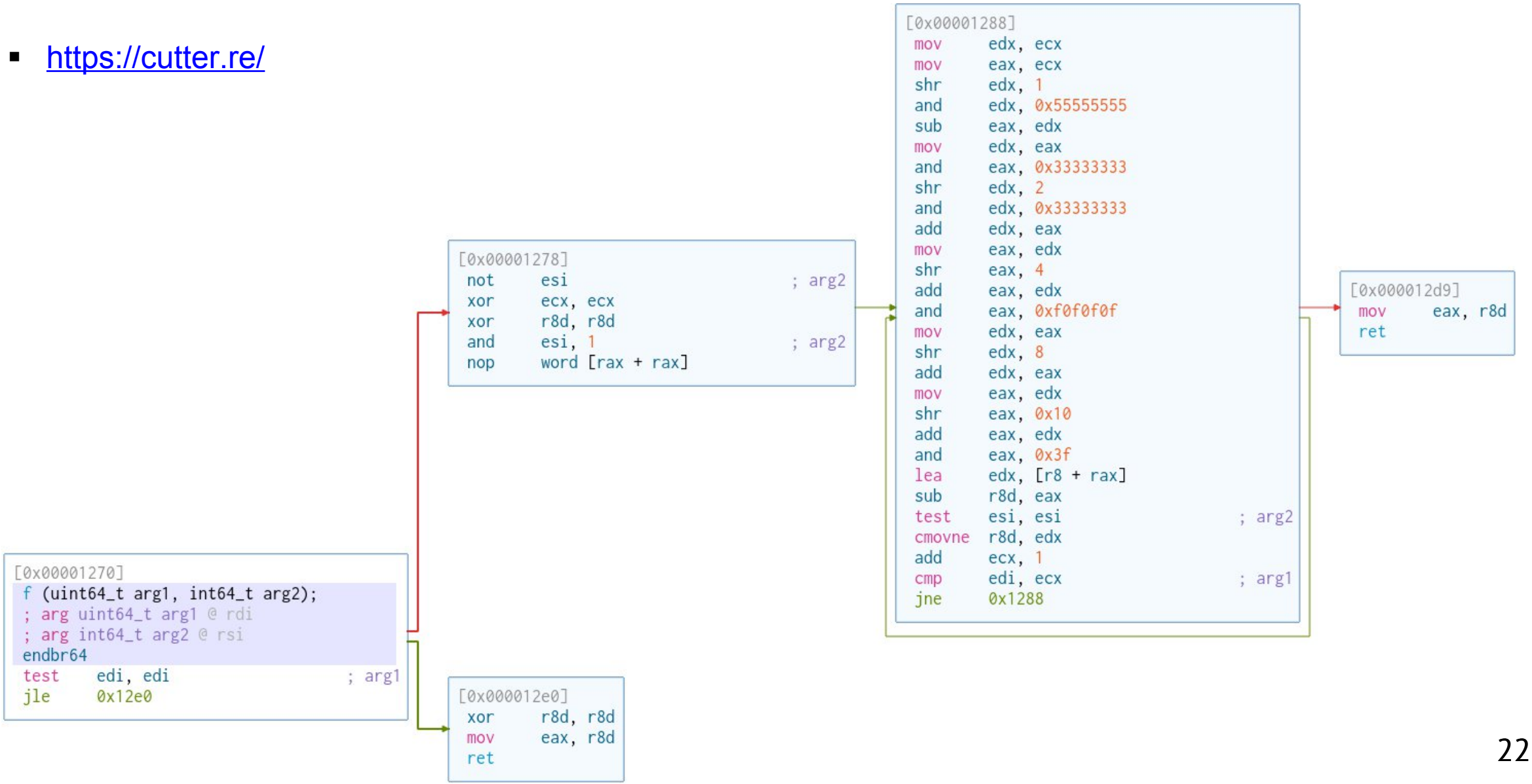
```
$ gcc -O2 --save-temps ./prog.c
```

Дизассемблирование с помощью dgb

```
$ gdb -batch -ex "file ./prog" -ex "disassemble f"

Dump of assembler code for function f:
   0x0000000000001274 <+4>:     test   %edi,%edi
   0x0000000000001276 <+6>:     jle    0x12e0 <f+112>
   0x0000000000001278 <+8>:     not    %esi
   0x000000000000127a <+10>:    xor    %ecx,%ecx
   0x000000000000127c <+12>:    xor    %r8d,%r8d
   0x000000000000127f <+15>:    and    $0x1,%esi

   0x0000000000001282 <+18>:    nopw   0x0(%rax,%rax,1)
   0x0000000000001288 <+24>:    mov    %ecx,%edx
   0x000000000000128a <+26>:    mov    %ecx,%eax
   0x000000000000128c <+28>:    shr    %edx
   0x000000000000128e <+30>:    and    $0x55555555,%edx
   ...
   0x00000000000012c9 <+89>:    sub    %eax,%r8d
   0x00000000000012cc <+92>:    test   %esi,%esi
   0x00000000000012ce <+94>:    cmovne %edx,%r8d
   0x00000000000012d2 <+98>:    add    $0x1,%ecx
   0x00000000000012d5 <+101>:   cmp    %ecx,%edi
   0x00000000000012d7 <+103>:   jne    0x1288 <f+24>
   ...
   0x00000000000012e3 <+115>:   mov    %r8d,%eax
   0x00000000000012e6 <+118>:   ret
End of assembler dump.
```

Дизассемблирование с помощью cutter + rizin

- https://cutter.re/



Профилирование программы с помощью gcc/gcov

```
# 1) Компиляция программы для сбора статистики выполнения ветвлений
$ gcc -g -fprofile-generate -fprofile-arcs -ftest-coverage -O2 -o prog ./prog.c

# 2) Запуск программы и сборка профиля
$ ./prog                # => prog.gcda, prog.gcno
```

```
# 3) Обработка профиля и генерация отчета
$ gcov -b ./prog.c
File 'prog.c'
Lines executed:92.00% of 25
Branches executed:100.00% of 5
Taken at least once:60.00% of 5
Calls executed:100.00% of 4
Creating 'prog.c.gcov'
```

```
# 4) Просмотр аннотированного исходного кода
$ cat prog.c.gcov
...
function f called 2 returned 100% blocks executed 75%
        2:   23:int f(int n, int k)
        -:   24:{
        2:   25:    int s = 0;
200000002:   26:    for (int i = 0; i < n; i++) {
branch  0 taken 100%
branch  1 taken 1% (fallthrough)
200000000:   27:        if (k == 0 || k == 2 || k == 4 || k == 8)
branch  0 taken 0%
branch  1 taken 100%
branch  2 taken 0%
    #####:   28:            s += pop(i);
        -:   29:        else if (k == 1 || k == 3 || k == 5 || k == 7)
200000000:   30:            s -= pop(i);
        -:   31:        else
    #####:   32:            s += 1;
        -:   33:    }
        2:   34:    return s;
        -:   35:}
```

Профилирование программ с помощью clang/llvm-cov

```
# Компиляция программы для сбора статистики выполнения
$ clang -fprofile-instr-generate -fcoverage-mapping -O2 -o prog ./prog.c

$ ./prog      # Запуск программы на типовых входных данных

# Объединение отчетов профилирования
$ llvm-profdata merge -sparse *.profraw -o profdata.prof

$ llvm-cov show --show-branches=count --show-expansions \
                ./prog -instr-profile=profdata.prof
```

[*] https://clang.llvm.org/docs/SourceBasedCodeCoverage.html

Оптимизация по результатам профилирования в Clang/LLVM (profile-guided optimization)

```
 23|       |int f(int n, int k)
 24|      1|{
 25|      1|    int s = 0;
 26|   100M|    for (int i = 0; i < n; i++) {
------------------
|  Branch (26:21): [True: 100M, False: 1]
------------------
 27|   100M|        if (k == 0 || k == 2 || k == 4 || k == 8)
------------------
|  Branch (27:13): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (27:23): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (27:33): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (27:43): [True: 0, False: 100M]
------------------
 28|      0|            s += pop(i);
 29|   100M|        else if (k == 1 || k == 3 || k == 5 || k == 7)
------------------
|  Branch (29:18): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (29:28): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (29:38): [True: 0, False: 100M]
|  Branch (29:48): [True: 100M, False: 0]
------------------
 30|   100M|            s -= pop(i);
 31|      0|        else
 32|      0|            s += 1;
 33|   100M|    }
 34|      1|    return s;
 35|      1|}
```

https://clang.llvm.org/docs/SourceBasedCodeCoverage.html

Оптимизация по результатам профилирования в GCC (profile-guided optimization)

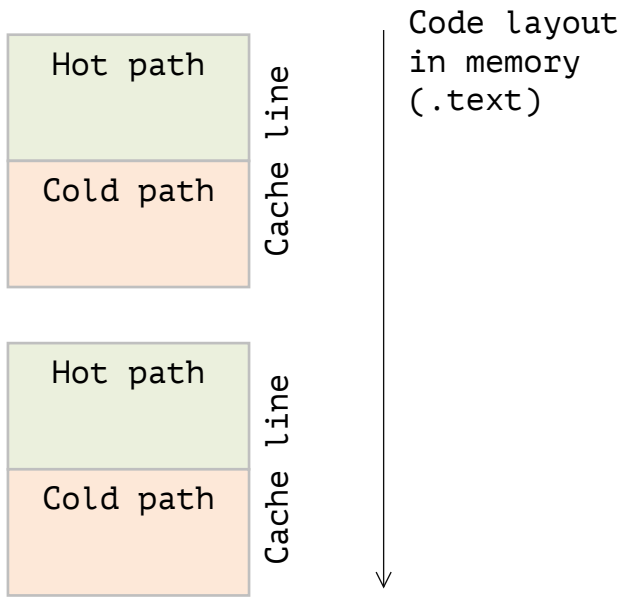
```
# Компиляция программы для сбора статистики выполнения
$ gcc -g -fprofile-generate -fprofile-arcs -ftest-coverage \
      -O2 -o prog ./prog.c

$ ./prog      # Запуск программы на типовых входных данных

# Компиляция и оптимизация программы с использованием собранной
# статистики
$ gcc -fprofile-use -O2 -o prog ./prog.c
```

Оптимизация по результатам профилирования в Clang/LLVM (profile-guided optimization)

```
# Компиляция программы для сбора статистики выполнения
$ clang -fprofile-instr-generate -O2 -o prog ./prog.c

$ ./prog      # Запуск программы на типовых входных данных

# Объединение отчетов профилирования
$ llvm-profdata merge -output=profdata.prof *.profraw

# Компиляция и оптимизация программы с использованием собранной
# статистики
$ clang -fprofile-instr-use=profdata.prof -O2 -o prog ./prog.c
```

Разбиение больших функций (function splitting)

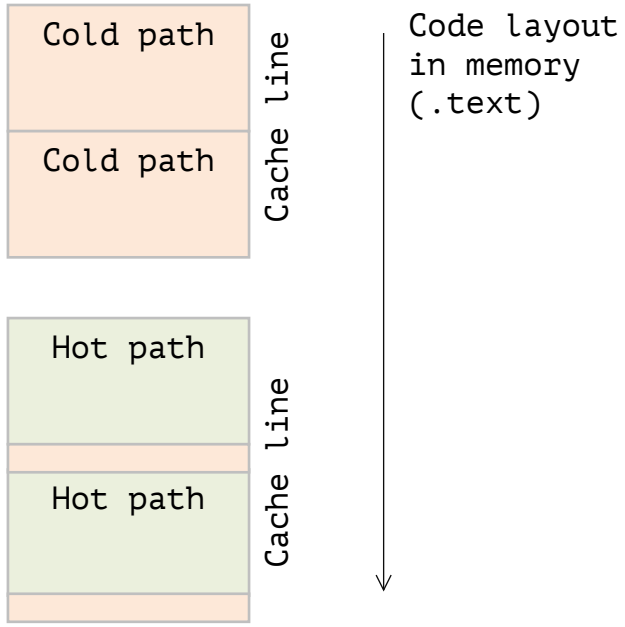
```
void process(void *data)
{
    // Hot code block
    if (error) {
        // Large cold code block (restoring, saving data)
    }

    // Hot code block
    if (error) {
        // Large cold code (restoring, saving data)
    }
}
```



- В больших функциях базовые блоки "горячего" и "холодного" путей могут попадать в одну и туже строку кеш-памяти инструкций, что приводит к увеличению числа промахов
- Целесообразно плотнее размешать базовые блоки на горячем пути

Разбиение больших функций (function splitting)

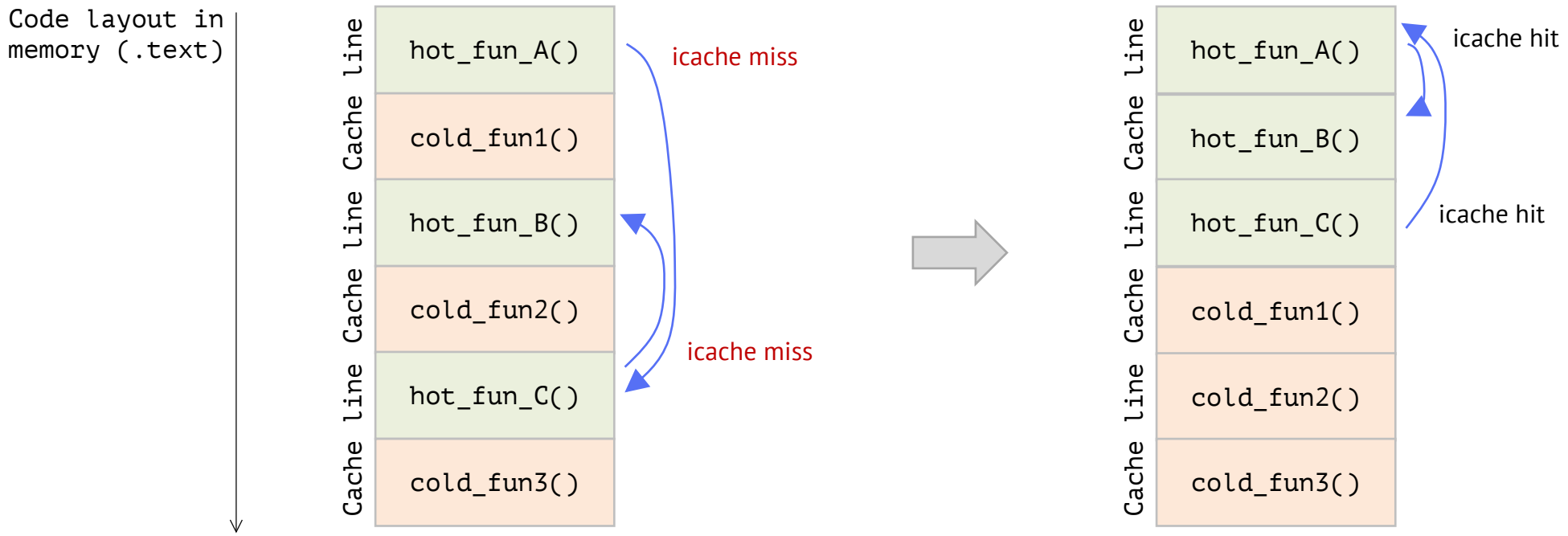
```
void process_error() __attribute__((noinline))
{ // Cold code ... }

void exit_error() __attribute__((noinline))
{ // Cold code ... }

void process(void *data)
{
    // Hot code path
    if (error)
        process_error();

    // Hot code path
    if (error)
        exit_error();
}
```



- Блоки холодного кода вынесены в отдельные функции (встраивание функций отключено)
- Код функции process() в основном состоит из блоков горячего пути, что приводит к более эффективному использованию кеш-памяти инструкций (предвыборка, промахи)

Оптимизация размещения кода функций в памяти

- Небольшие функции с блоками кода на горячем пути можно объединить в одну функцию для более эффективного использования кеш-памяти инструкций (grouping)
- При компоновке функции с блоками кода на горячем пути можно разместить в объектном файле последовательно, чтобы сократить возможные промахи кеш-памяти инструкций (reordering)
  - LLVM LLD: `--symbol-ordering-file`
  - LLD поддерживает упорядочивание размещения функций по результатам профилирования (HFSort)
  - Profile-based relinking: BOLT, Google Propeller



Оптимизация размещения кода функций в памяти

```
void fun1(int *a, int n) {
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        a[i] = 2 * a[i];
    }
}

int cold_fun1(uint32_t x) { ... }

void fun2(int *a, int n) {
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        a[i] = a[i] * a[i];
    }
}

int cold_fun2(uint32_t x) { ... }

void fun3(int *a, int n) {
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        a[i] = a[i] * a[i] * a[i];
    }
}

int cold_fun3(uint32_t x) { ... }
```

```
void comp(int *a, int n) {
    int x = 0;

    for (int i = 0; i < 100; i++) {
        fun1(a, n);
        x = cold_fun1(a[i]);

        fun2(a, n);
        x += cold_fun2(a[i]);

        fun3(a, n);
        x += cold_fun3(a[i]);
    }
    a[0] = x;
}
```

Оптимизация размещения кода функций в памяти

```
00000000000012c0 <fun1> size = 32B:                    # адрес 0x12c0 % 64 == 0, выравнен на границу строки L1i
    12c0:   f3 0f 1e fa             endbr64
    ...
    12d9:   75 f5                   jne    12d0 <fun1+0x10>
    12db:   c3                      ret
    12dc:   0f 1f 40 00             nopl   0x0(%rax)
00000000000012e0 <cold_fun1> size = 64B:               # адрес 0x12e0 % 8 == 0, выравнен на границу 8 байт
    ...
    131f:   c3                      ret
0000000000001320 <fun2> size = 48B:                    # адрес 0x1320 % 8 == 0, выравнен на границу 8 байт
    1320:   f3 0f 1e fa             endbr64
    ...
    133f:   75 ef                   jne    1330 <fun2+0x10>
    1341:   c3                      ret
    1342:   66 66 2e 0f 1f 84 00    data16 cs nopw 0x0(%rax,%rax,1)
    1349:   00 00 00 00
    134d:   0f 1f 00                nopl   (%rax)
0000000000001350 <cold_fun2> size = 64B:
    ...
    138f:   c3                      ret
0000000000001390 <fun3> size = 48B:
    1390:   f3 0f 1e fa             endbr64
    ...
    13b4:   75 ea                   jne    13a0 <fun3+0x10>
    13b6:   c3                      ret
    13b7:   66 0f 1f 84 00 00 00    nopw   0x0(%rax,%rax,1)
    13be:   00 00
00000000000013c0 <cold_fun3> size = 64B:
    ...
    13ff:   c3                      ret
```

L1i cace line 64B:

fun1 (32B)	cold_fun1 (32B из 64)

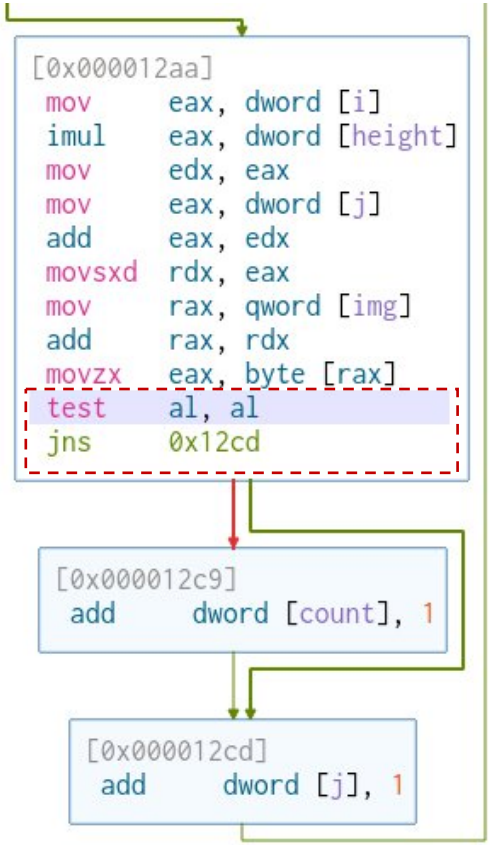
Устранение ветвлений (branchless code)

Устранение ветвлений (branchless code)

- Вынос инвариантных ветвлений за цикл
- Замена ветвлений арифметическими выражениями
- Устраннение ветвлений с использованием операций условной установки и копирования
  (setcc, movcc)
- Устраннение ветвлений с использованием векторных операций — маскирование
- Раскрутка циклов

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (expr >= scalar)

```
enum {W = 15360, H = 8640};

int image_is_dark(uint8_t *img, int width, int height)
{
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            if (img[i * width + j] >= 128) {    // test + jns (SF=0)
                count++;
            }
        }
    }
    return count < width * height / 2;
}
```

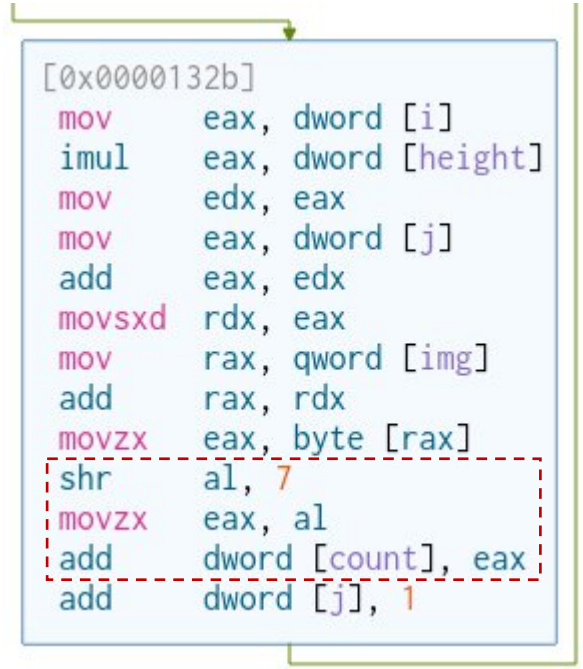


- Ветвление JNS на каждой итерации цикла (width * height условных переходов)
- Цель — устранить ветвление для минимизации ошибок предсказания переходов

```
$ gcc -g -o prog ./prog.c
$ perf stat -e branch-misses -- taskset --cpu-list 0 ./prog
Time 0.747575, dark 0

 Performance counter stats for 'taskset --cpu-list 0 ./prog':
       70 721 638      branch-misses
```

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (shr)

```
int image_is_dark_v2(uint8_t *img, int width, int height)
{
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            count += (img[i * width + j] >> 7); // shr al, 7; деление на 2^7
        }
    }
    return count < width * height / 2;
}
```



- **Условное выражение заменено на арифметическое**
- Значение типа пикселя img[i][j] в диапазоне [0, 255], поэтому целочисленное деление на 128 дает 0 либо 1 (округление вниз, floor)

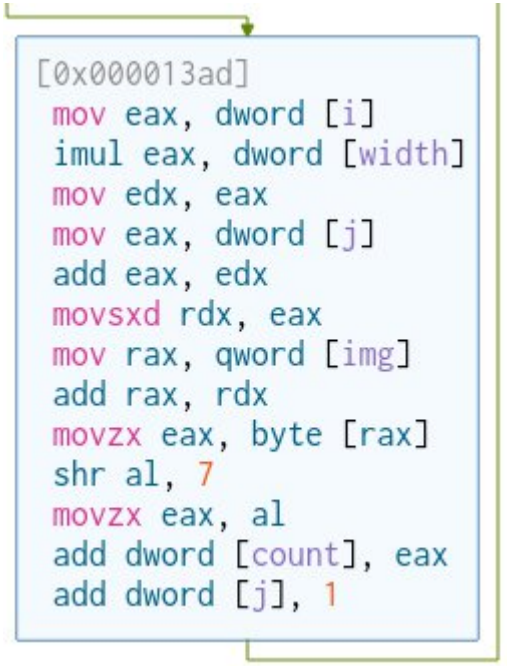
```
counter += img[i * width + j] / 128
```

```
$ perf stat -e branch-misses -- taskset --cpu-list 0 ./prog
Time 0.280183, dark 0

 Performance counter stats for 'taskset --cpu-list 0 ./prog':
         4 364 970      branch-misses
# Ускорение 2.7
```

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (shr)

```
int image_is_dark_v3(uint8_t *img, int width, int height)
{
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            count += (img[i * width + j] >= 128);
        }
    }
    return count < width * height / 2;
}
```

Сгенерированный gcc код совпадает с v2 (shr al, 7)



- **Условное выражение заменено на арифметическое**
- Значение типа пикселя в диапазоне [0, 255], поэтому целочисленное деление на 128 дает 0 либо 1 (округление вниз)

- На уровне оптимизации -O2 компилятор gcc автоматически устраняет простые ветвления (сравнение со скаляром) — заменил на арифметическое выражение

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (setcc)

- **Если при делении на скаляр частное больше единицы, то можно применять инструкции установки и копирования с условием (setcc)**

```
int count = 0;
for (int i = 0; i < height; i++) {
    for (int j = 0; j < width; j++) {
        count += (img[i * width + j] >= 50);
    }
}
```

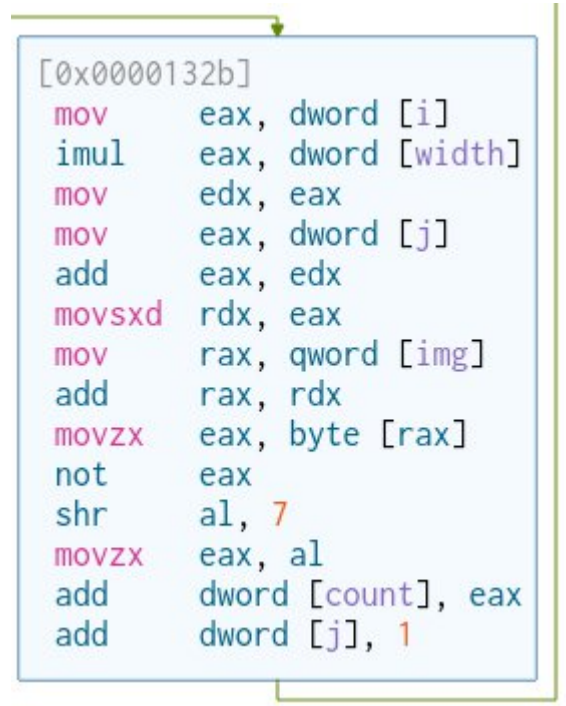
```
movzx   eax, byte [rax]
cmp     al, 0x31            # сравнение img[i][j] с 49
seta    al                  # al = (img[i][j] > 49) ? 1 : 0
movzx   eax, al
```

```
[0x000013ad]
mov     eax, dword [i]
imul    eax, dword [width]
mov     edx, eax
mov     eax, dword [j]
add     eax, edx
movsxd  rdx, eax
mov     rax, qword [img]
add     rax, rdx
movzx   eax, byte [rax]
cmp     al, 0x31
seta    al
movzx   eax, al
add     dword [count], eax
add     dword [j], 1
```

- **`seta`** – set byte if above (CF=0 and ZF=0)
- Set byte if above {above, below, equal, greater, less, not above, not below, not less, not equal, zero, overflow, parity, parity odd, parity even, sign, not zero, sign, not sign, ...}

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (expr < scalar)

```
int image_is_light_v2(uint8_t *img, int width, int height)
{
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            count += (img[i * width + j] < 128);
        }
    }
    return count < width * height / 2;
}
```



- **Ветвление заменено на арифметическое выражение**

```
# img[i][j] >= 128
movzx   eax, byte [rax]
shr     al, 7
movzx   eax, al
add     dword [count], eax
```

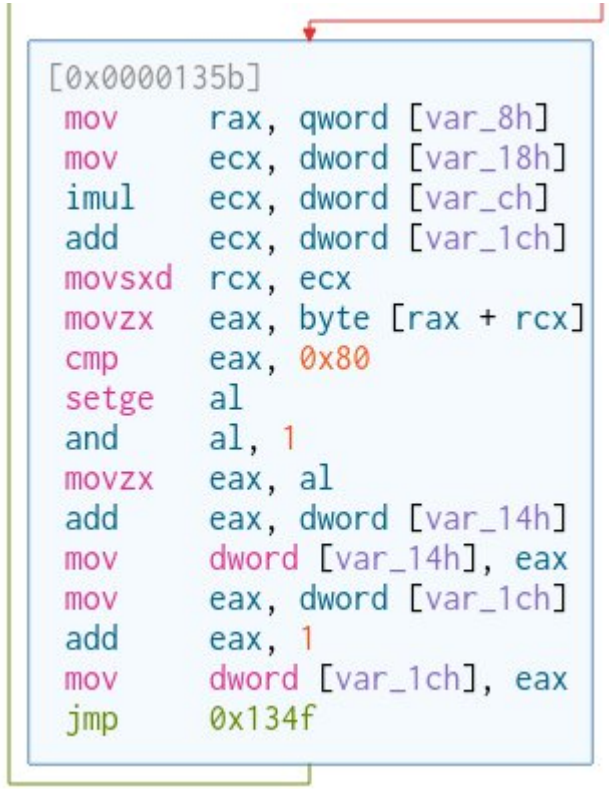
Пример: img[i][j] = 129
eax = 129 = 1000001_2
shr al, 7 => al = 00000001_2
eax = 1

```
# img[i][j] < 128
movzx   eax, byte [rax]
not     eax
shr     al, 7
movzx   eax, al
add     dword [count], eax
```

Пример: img[i][j] = 100
eax = 100 = 01100100_2
not eax = 1111...10011011_2, al = 10011011_2
shr al, 7 => al = 00000001_2 = 1
eax = 1

Устранение ветвлений: сравнение со скаляром (clang/llvm)

```
int image_is_dark_v3(uint8_t *img, int width, int height)
{
    int count = 0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            count += (img[i * width + j] >= 128);
        }
    }
    return count < width * height / 2;
}
```



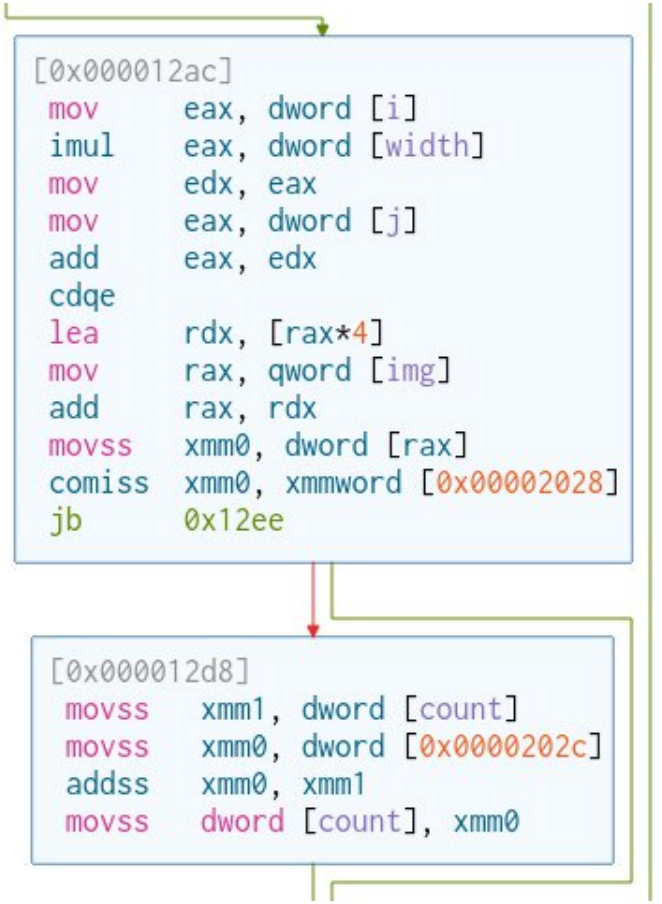
- **clang** -g -o prog ./prog.c
- Условное выражение заменено на инструкцию setge

```
movzx   eax, byte [rax + rcx]
cmp     eax, 0x80
setge   al
and     al, 1
movzx   eax, al
add     eax, dword [var_14h]
```

- В версии v2 (img[i * width + j] >> 7) Clang/LLVM заменяет условное выражение на операцию (sar eax, 7)

Устранение ветвлений: сравнение с вещественным скаляром IEEE 754 (float, double)

```
float image_is_dark(float *img, int width, int height)
{
    float count = 0.0;
    for (int i = 0; i < height; i++) {
        for (int j = 0; j < width; j++) {
            if (img[i * width + j] >= 128.0) {
                count += 2;
            }
        }
    }
    return count < width * height / 2.0;
}
```

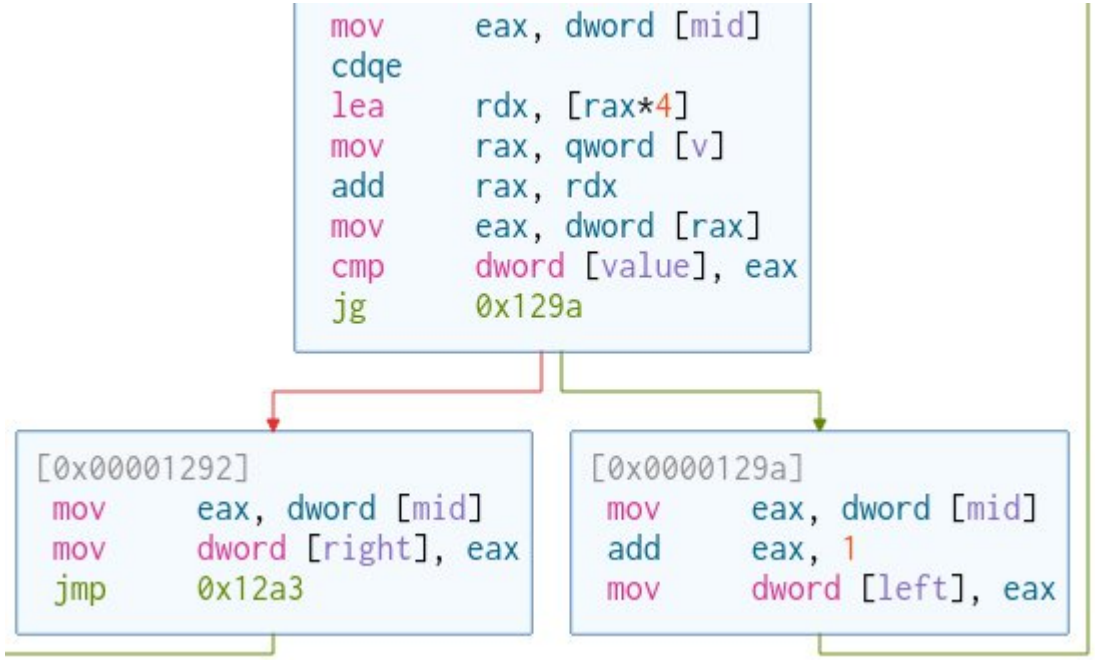


float 128.0
binary: 0x43 = 67 = 01000011_2

- Ветвление не устранено!
- comiss — сравнение векторного регистра xmm0 и константы 128.0 (константа (4 байта) хранится в секции .rodata)
- jb — условный переход по результату сравнения
- Включение оптимизаций -O2 компилятора gcc не приводит к устранению условного выражения со скаляром типа float

Устранение ветвлений: бинарный поиск

```c
/* lower_bound: Returns the first elem not less than value */
int lower_bound(int *v, int n, int value)
{
    int left = 0, right = n - 1;
    while (left < right) {
        int mid = (left + right) / 2;
        if (v[mid] >= value)
            right = mid;
        else
            left = mid + 1;
    }
    return v[left];
}
```



- jb — условный переход по результату сравнения
- Включение оптимизаций -O2 компилятора gcc не приводит к устранению условного выражения со скаляром типа float

Устранение ветвлений: бинарный поиск (branchless)

```
int lower_bound_v2(int *v, int n, int value)
{
    int left = 0, right = n - 1;
    while (left < right) {
        int mid = (left + right) / 2;
        int ftrue = (v[mid] >= value);
        int ffalse = ftrue ^ 1;
        right = ftrue * mid + ffalse * right;
        left = ftrue * left + ffalse * (mid + 1);
    }
    return v[left];
}
```

```
mov     dword [mid], eax
mov     eax, dword [mid]
cdqe
lea     rdx, [rax*4]
mov     rax, qword [v]
add     rax, rdx
mov     eax, dword [rax]
cmp     dword [value], eax
setle   al
movzx   eax, al
mov     dword [ftrue], eax
mov     eax, dword [ftrue]
xor     eax, 1
mov     dword [ffalse], eax
mov     eax, dword [ftrue]
imul    eax, dword [mid]
mov     edx, eax
mov     eax, dword [ffalse]
imul    eax, dword [right]
add     eax, edx
mov     dword [right], eax
mov     eax, dword [ftrue]
imul    eax, dword [left]
mov     edx, eax
mov     eax, dword [mid]
add     eax, 1
imul    eax, dword [ffalse]
add     eax, edx
mov     dword [left], eax
```

- **Замена условного выражения предикатом (predication)**
- ftrue устанавливается с использованием инстуркции setle

```
if (cond) then          a = cond * x +      // Установить новое значение
  a = x                     (cond - 1) * a // Сохранить старое
```

Устранение ветвлений: бинарный поиск (gcc -O2)

```c
int lower_bound_v2(int *v, int n, int value)
{
    int left = 0, right = n - 1;
    while (left < right) {
        int mid = (left + right) / 2;
        int ftrue = (v[mid] >= value);
        int ffalse = ftrue ^ 1;
        right = ftrue * mid + ffalse * right;
        left = ftrue * left + ffalse * (mid + 1);
    }
    return v[left];
}
```

```
[0x000012e8]
lea ecx, [rdx + rsi]
mov eax, ecx
shr eax, 0x1f
add eax, ecx
sar eax, 1
movsxd rcx, eax
mov ecx, dword [rdi + rcx*4]       ; arg1
cmp ecx, r9d
setge r8b  # ftrue
cmovge esi, r10d
movzx r8d, r8b
imul r8d, eax
add esi, r8d
cmp ecx, r9d
cmovl edx, r10d
add eax, 1
cmp ecx, r9d
setl cl     # ffalse
movzx ecx, cl
imul eax, ecx
add edx, eax
cmp esi, edx
jg 0x12e8
```

- **Условное выражение заменено на арифметические**
  - ftrue устанавливается с использованием инстуркции setge
  - ffalse устанавливается инструкцией setl

- cmov — условное копирование (conditional move)
  - `cmovge dest, src` — conditional move if greater or equal
  - `cmovl dest, src` — conditional move if less

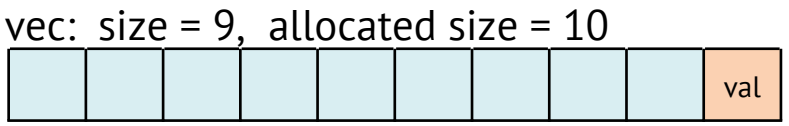
Устранение условного выражения цикла for

```
// find: Returns 1 if val is present in array vec
int find(int *vec, size_t size, int val)
{
    for (size_t i = 0; i < size; i++) {      // cmp + je
        if (val == vec[i])                   // cmp + jne
            return 1;
    }
    return 0;
}
```

- Функция find выполняет линейный поиск элемента в массиве
- 2 * size условных переходов (je, jne)

Устранение условного выражения цикла for

```
// find: Returns 1 if val is present in array vec
int find_sentinel(int *vec, size_t size, int val)
{
    // Real size of vec is size + 1
    vec[size] = val;
    for (size_t i = 0; ; i++) {
        if (val == vec[i]) {                    // cmp + jne
            if (i == size - 1) {                // cmp + setne
                return 0;
            } else {
                return 1;
            }
        }
    }
}
```



- Если имеется возможность выделить в конце массива vec дополнительный элемент, то его содержимое можно использовать как *сигнальный элемент* о достижении конца массива (элемент "страж", sentinel)
- Цикл for заменяется на бесконечный, устраняется необходимость условного перехода (je)
- size условных переходов (jne)

Таблицы поиска (lookup table)

```
enum {
    BLOCK_T1, BLOCK_T2, BLOCK_T3, BLOCK_T4, BLOCK_T5, BLOCK_COUNT
}

int get_block_type(int block)
{
    if (block >= 0 && block <= 64) return BLOCK_T1;
    if (block > 64  && block <= 128) return BLOCK_T2;
    if (block > 128 && block <= 150) return BLOCK_T3;
    if (block > 150 && block < 190) return BLOCK_T4;
    if (block >= 190 && block < 256) return BLOCK_T5;
    return -1;
}

void blocks(int *blocks, int n, int *freq)
{
    int i = 0;
    while (i < n) {
        int type = get_block_type(blocks[i++]);
        freq[type]++;
    }
}
```

```
$ perf record -e branch-misses ./blocks
```

```
Samples: 9K of event 'branch-misses', Event count (approx.): 95226104
Overhead  Command  Shared Object     Symbol
  75,93%  blocks   blocks            [.] blocks
  20,59%  blocks   blocks            [.] get_block_type
   3,36%  blocks   libc.so.6         [.] __vfscanf_internal
   0,04%  blocks   blocks            [.] main
   0,02%  blocks   [unknown]         [k] 0xffffffff93769655
   0,01%  blocks   [unknown]         [k] 0xffffffff937052c3
   0,00%  blocks   [unknown]         [k] 0xffffffff937206ee
```

```
  8,18      cmpl    $0xbd,-0x4(%rbp)
          ↓ jg      66
 16,93      mov     $0x3,%eax
  0,12    ↓ jmp     84
          if (block >= 190 && block < 256) return BLOCK_T5;
 21,69  66: cmpl    $0xbd,-0x4(%rbp)
          ↓ jle     7f
  6,32      cmpl    $0xff,-0x4(%rbp)
          ↓ jg      7f
```

Замена ветвлений таблицей поиска (lookup table)

```
int block_types[256] = {
    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,
    1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
    1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1,
    2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 2,
    3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3,
    3, 3, 3, 3, 3,
    4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4,
    4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4, 4,
};

int get_block_type(int block)
{
    if (block < (sizeof(block_types) / sizeof(block_types[0])))
        return block_types[block];
    return -1;
}

void blocks(int *blocks, int n, int *freq)
{
    int i = 0;
    while (i < n) {
        int type = get_block_type(blocks[i++]);
        freq[type]++;
    }
}
```

- Boost: boost::icl::interval_map
- LLVM: IntervalMap

Оптимизация инвариантных ветвлений

```
for (i = 0; i < 10; i++) {
    if (value > 10)
        data++;
    else
        data--;
}
```

- **Инвариантное ветвление** — ветвление, направления которого не зависит от индуктивных переменных цикла (от счетчика цикла)

Сколько будет выполнено условных переходов?

Оптимизация инвариантных ветвлений

```
for (i = 0; i < 10; i++) {
    if (value > 10)
        data++;
    else
        data--;
}
```

1. 0 < 10
2. value > 10
3. 1 < 10
4. value > 10
5. 2 < 10
6. value > 10
7. 3 < 10
8. value > 10
9. 4 < 10
10. value > 10
11. 5 < 10
12. value > 10
13. 6 < 10
14. value > 10
15. 7 < 10
16. value > 10
17. 8 < 10
18. value > 10
19. 9 < 10
20. value > 10
21. 10 < 10

21 условный переход

Вынос инвариантных ветвлений из цикла

```
for (i = 0; i < 10; i++) {
    if (value > 10)
        data++;
    else
        data--;
}
```

```
if (value > 10) {
    for (i = 0; i < 10; i++)
        data++;
} else {
    for (i = 0; i < 10; i++)
        data--;
}
```

20 условных переходов
(условие цикла и ветвление в его теле)

value > 10 — инвариантное условие
(не зависит от параметра цикла i)

12 условных переходов
Меньше обращений к модулю предсказания переходов

- value > 10
- 0 < 10
- 1 < 10
- …
- 10 < 10

Вынос инвариантных ветвлений из цикла

```
void blend(int size, int blend, float *src, float *dest, float *src_1)
{
    for (int j = 0; j < size; j++) {
        if (blend == 255)
            dest[j] = src_1[j];
        else if ( blend == 0 )
            dest[j] = src_2[j];
        else
            dest[j] = (src_1[j] * blend + src_2[j] * (255 - blend)) / 256;
    }
}
```

Вынос инвариантных ветвлений из цикла

```
void blend(int size, int blend, float *src, float *dest, float *src_1)
{
    if (blend == 255)
        for (int j = 0; j < size; j++)
            dest[j] = src_1[j];

    else if (blend == 0)
        for (int j = 0; j < size; j++)
            dest[j]= src_2[j];

    else
        for (int j = 0; j < size; j++)
            dest[j] = (src_1[j] * blend + src_2[j] * (255 - blend)) / 256;
}
```

- Инвариантное ветвление вынесли за цикл
- Сократили число переходов + возможность векторизации кода

Раскрутка цикла (loop unrolling)

- **Раскрутка цикла** на *k* итераций — тиражирование тела цикла *k* раз
- **Плюсы**:
  - Сокращается количество условных переходов (вычисления условного выражения)
  - Позволяет обеспечить параллельное выполнение инстуркций нового тела цикла на суперскалярном ядре (если инструкции не зависимы по данным)
- **Минусы**: увеличивает размер кода и количество используемых регистров процессора

```
// Исходный цикл
for (int i = 0; i < n; i++) {
    z[i] = a * x[i] + y[i]
}
```

```
// Раскрученный цикл из n / k итераций
int i;
for (i = 0; i + k - 1 < n; i += k) {
    z[i] = a * x[i] + y[i]
    z[i + 1] = a * x[i + 1] + y[i + 1]
    z[i + 2] = a * x[i + 2] + y[i + 2]
    ...
    z[i + k - 1] = a * x[i + k - 1] + y[i + k - 1]
}

// Остаток итераций n % k
for (; i < n; i++) {
    z[i] = a * x[i] + y[i]
}
```

Раскрутка цикла (loop unrolling)

```c
int vec_sum(int *vec, int n)
{
    int s = 0;
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        s += vec[i];
    }
    return s;
}
```

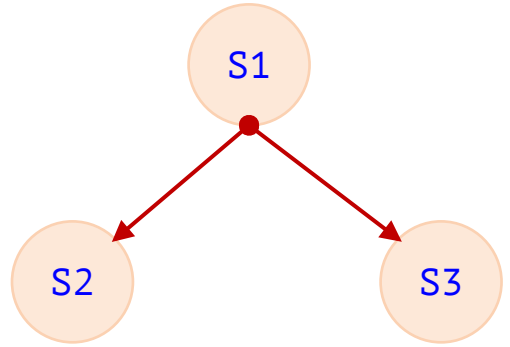
```c
int vec_sum_v2(int *vec, int n)
{
    unsigned int i;
    int s = 0;

    for (i = 0; i + 3 < n; i += 4) {
        s = s + vec[i];
        s = s + vec[i + 1];
        s = s + vec[i + 2];
        s = s + vec[i + 3];
    }

    for (; i < n; i++) {
        s += vec[i];
    }
    return s;
}
```

Конфликты данных (Data Hazards)

- Текущий шаг конвейера не может быть выполнен, так как зависит от результатов выполнения предыдущего шага
- Возможные причины:
  - **Read after Write (RAW)** – True dependency
    i1: R2 = R1 + R3
    i2: R4 = R2 + R3
  - **Write after Read (WAR)** – Anti-dependency
    R4 = R1 + R3
    R3 = R1 + R2
  - **Write after Write (WAW)** – Output dependency
    R2 = R4 + R7
    R2 = R1 + R3

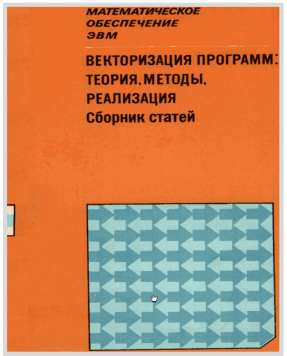
Конфликты данных (Data Hazards)

```
S1: A = B + C
S2: D = A + 2
S3: E = A + 3
```



Граф зависимостей по данным
(data-dependence graph)

- **S2 зависит от S1** – S1 и S2 нельзя выполнять параллельно
- **S3 зависит от S1** – S1 и S3 нельзя выполнять параллельно
- S2 и S3 можно выполнять параллельно



Векторизация программ. Теория, методы, реализация
(сборник статей). – М.: Мир, 1991. – 275 с.

Раскрутка цикла (loop unrolling)

```
int vec_sum_v2(int *vec, int n)
{
    unsigned int i;
    int s = 0;

    for (i = 0; i + 3 < n; i += 4) {
        s = s + vec[i];
        s = s + vec[i + 1];
        s = s + vec[i + 2];
        s = s + vec[i + 3];
    }

    for (; i < n; i++) {
        s += vec[i];
    }
    return s;
}
```

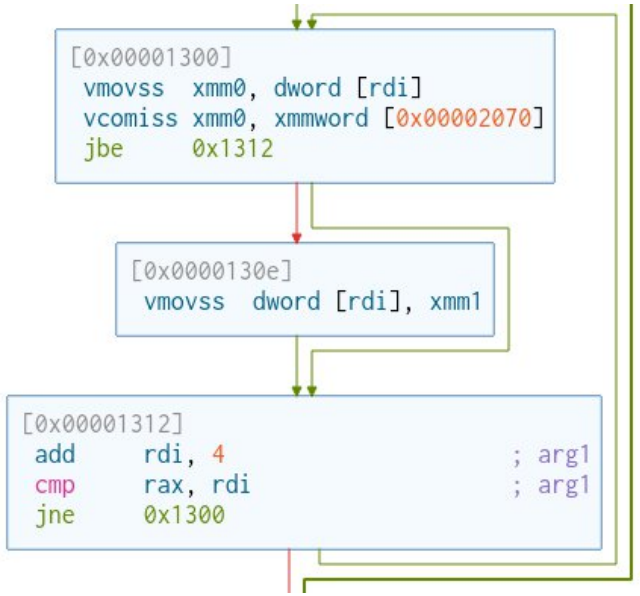
```
int vec_sum_v3(int *vec, int n)
{
    unsigned int i;
    int s = 0, t1 = 0, t2 = 0, t3 = 0;

    for (i = 0; i + 3 < n; i += 4) {
        s = s + vec[i];
        t1 = t1 + vec[i + 1];
        t2 = t2 + vec[i + 2];
        t3 = t3 + vec[i + 3];
    }
    t1 += t2 + t3;
    for (; i < n; i++) {
        s += vec[i];
    }
    return s + t1;
}
```

- Зависимость по данным (переменная s) препятствует параллельному выполнению сложения на независимых АЛУ
- Зависимость по данным устранена суммированием во временные переменные t1, t2, t3

Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций

```
enum { N = 10000007 };

void vtrunc(float *v, int n)
{
    for (int i = 0; i < n; i++) {
        if (v[i] > 1000.0) {
            v[i] = 1000.0;
        }
    }
}

double run()
{
    float *v = malloc(sizeof(*v) * N);
    vtrunc(v, N);

    // ...
}
```

- Элементы массива имею вещественный тип одинарной точности (float)
- Компилятор (gcc 11.2) генерирует код с ветвлением в цикле (сравнение скаляров vcomiss и переход jbe)
- `gcc -O2 -mavx -o prog ./prog.c`



сравнение скаляров v[i] > 1000.0

копирование скаляра v[i] = 1000.0

Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: AVX, float

1. **Формируем вектор из 8 скаляров 1000.0**
```
__m256 v1000 = _mm256_set1_ps(1000.0);
```
2. **Загружаем в векторный регистр 8 элементов v[i:i+7]**
```
__m256 val = _mm256_load_ps(&v[i]);
```
3. **Выполняем векторное сравнение: v[i:i+7] > [1000.0, 1000.0, …., 1000.0]**
```
__m256 mask = _mm256_cmp_ps(val, v1000, _CMP_GT_OQ)
```
результат сравнения – вектор mask[0:7], в котором
mask[i] = v[i] > 0 ? 0xFFFFFFFF : 0
4. **Формируем результат из элементов, для которых выполнено условие v[i] > 0, накладываем маску на вектор v1000 (AND)**
```
__m256 true_vec = _mm256_and_ps(mask, v1000)
```
5. **Формируем результат из элементов, для которых не выполнено условие v[i] <= 0, накладывем маску на вектор val (AND NOT)**
```
__m256 false_vec = _mm256_andnot_ps(mask, val)
```
6. **Объединяем результаты и записываем в вектор v[i:i+7]**
```
_mm256_store_ps(&v[i],
                _mm256_or_ps(true_vec, false_vec))
```

_mm256_set1_ps

v1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

_mm256_load_ps

val	940	2002	1100	23	3000	1900	1002	1000

_mm256_cmp_ps

mask	0	FF..FF	FF..FF	23	FF..FF	FF..FF	FF..FF	0

_mm256_and_ps
- true_vec[0] = 0x0 AND 1000 = 0
- true_vec[1] = 0xFF..FF AND 1000 = 1000

true_vec	0	1000	1000	0	1000	1000	1000	0

_mm256_andnot_ps
- true_vec[0] = NOT(0x0) AND 940 = 1 AND 940 = 940
- true_vec[1] = NOT(0xFF..FF) AND 2002 = 0

false_vec	940	0	0	23	0	0	0	1000

_mm256_or_ps
- v[i] = 0 OR 940 = 940
- v[i+1] = 1000 OR 0 = 1000

v[i:i+7]	940	1000	1000	23	1000	1000	1000	1000

Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: AVX, float

```
void vtrunc_avx(float *v, int n)
{
    __m256 *vec = (__m256 *)v;
    __m256 v1000 = _mm256_set1_ps(1000);
    int k = n / 8;

    for (int i = 0; i < k; i++) {
        __m256 val = _mm256_load_ps((float *)&vec[i]);
        __m256 mask = _mm256_cmp_ps(val, v1000, _CMP_GT_OQ);
        __m256 true_vec = _mm256_and_ps(mask, v1000);
        __m256 false_vec = _mm256_andnot_ps(mask, val);
        vec[i] = _mm256_or_ps(true_vec, false_vec);
    }

    for (int i = k * 8; i < n; i++) {
        if (v[i] > 1000) {
            v[i] = 1000;
        }
    }
}
```

- Адрес v должен быть выравнен на границу кратную размеру векторного регистра — 32 байта
- Выделение памяти с заданным выравниванием

```
float v[N] __attribute__((aligned(32)));
```

```
#include <malloc.h>
void *_mm_malloc(size_t size, size_t align)
void _mm_free(void *p)
```

```
#include <stdlib.h>
int posix_memalign(
    void **memptr, size_t alignment,
    size_t size);
```

```
#include <stdlib.h>
void *aligned_alloc(size_t alignment,
                    size_t size);
```

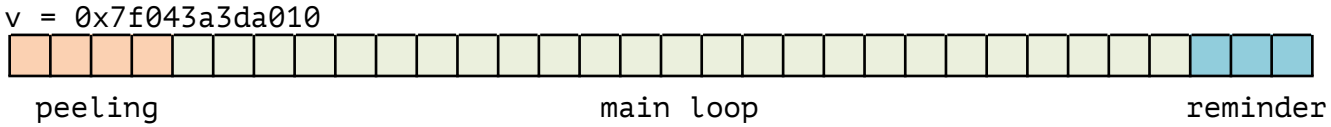
Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: loop peeling

- Peeling loop — скалярно вычисляет часть элементов для достижения корректного выравнивания

```
void vtrunc_avx_peeled(float *v, int n) {
  int simd_width_bytes = sizeof(__m256);                // Размер векторного регистра в байтах (32B)
  int simd_width_f32 = simd_width_bytes / sizeof(*v);   // Количество элементов типа float в векторном регистре (8)
  int misalign_bytes = (uintptr_t)v & (simd_width_bytes - 1); // Количество байт за границей выравнивания (v % 32)

  // Обрабатываем первые элементы скалярно, пока не достигнем элемента с корректно выровненным адресом
  int peeled_iters = 0;
  if (misalign_bytes > 0) {
    peeled_iters = (simd_width_bytes - misalign_bytes) / sizeof(*v);
    for (int i = 0; i < peeled_iters; i++) {
      if (v[i] > 1000) v[i] = 1000;
    }
  }

  int main_iters = n - ((n - peeled_iters) & (simd_width_f32 - 1));
  __m256 v1000 = _mm256_set1_ps(1000);
  for (int i = peeled_iters; i < main_iters; i += simd_width_f32) {
    __m256 val = _mm256_load_ps(&v[i]);
    __m256 mask = _mm256_cmp_ps(val, v1000, _CMP_GT_OQ);
    __m256 true_vec = _mm256_and_ps(mask, v1000);
    __m256 false_vec = _mm256_andnot_ps(mask, val);
    _mm256_store_ps(&v[i], _mm256_or_ps(true_vec, false_vec));
  }

  for (int i = main_iters; i < n; i++) {
    if (v[i] > 1000) v[i] = 1000;
  }
}
```

- # AVX, float (8 байт)
- n = 10000007
- v = malloc(sizeof(*v) * n);
- # malloc result: v % 32 == 16

- misalign_bytes = 16
- peeled_iters = 4
- main_iters = 10000004



Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: AVX, float + blendv

```
void vtrunc_avx_peeled(float *v, int n)
{
    // Alignment loop
    if (misalign_bytes > 0) {
      ...
    }

    // Main loop
    int main_iters = n - ((n - peeled_iters) & (simd_width_f32 - 1));
    __m256 v1000 = _mm256_set1_ps(1000);
    for (int i = peeled_iters; i < main_iters; i += simd_width_f32) {
        __m256 val = _mm256_load_ps((__mm256 *)&v[i]);
        __m256 mask = _mm256_cmp_ps(val, v1000, _CMP_GT_OQ);
        _mm256_store_ps((__mm256 *)&v[i],
                        _mm256_blendv_ps(val, v1000, mask));
                        // Слияние по маске
    }

    // Reminder loop
    for (int i = main_iters; i < n; i++) {
      ...
    }
}
```

_mm256_cmp_ps()

Architecture	Latency	Throughput (CPI)
Alderlake	4	0.5
Icelake Intel Core	4	0.5
Icelake Xeon	4	0.5
Skylake	4	0.5

_mm256_blendv_ps()

Architecture	Latency	Throughput (CPI)
Alderlake	3	1
Icelake Intel Core	-	1
Icelake Xeon	2	1
Skylake	2	0.66

_mm256_{and, andnot, or}_ps()

Architecture	Latency	Throughput (CPI)
Alderlake	1	0.33
Icelake Intel Core	1	0.33
Icelake Xeon	1	0.33
Skylake	1	0.33

[*] https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/

Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: AVX, float + min

```
void vtrunc_avx_peeled(float *v, int n)
{

    if (misalign_bytes > 0) {
        // Peeling loop
    }

    // Main loop
    int main_iters = n - ((n - peeled_iters) & (simd_width_f32 - 1));
    __m256 v1000 = _mm256_set1_ps(1000);

    for (int i = peeled_iters; i < main_iters; i += simd_width_f32) {
        __m256 val = _mm256_load_ps(&v[i]);
        _mm256_store_ps(&v[i], _mm256_min_ps(val, v1000));
    }

    // Reminder loop
    for (int i = main_iters; i < n; i++) {
        if (v[i] > 1000) {
            v[i] = 1000;
        }
    }
}
```

_mm256_min_ps()

Architecture	Latency	Throughput (CPI)
Alderlake	4	0.5
Icelake Intel Core	4	0.5
Icelake Xeon	4	0.5
Skylake	4	0.5

Устранение ветвлений с использованием SIMD-инструкций: AVX, int

```
void vtrunc_avx_peeled(int *v, int n)
{
    int simd_width_bytes = sizeof(__m256i);                    // 32
    int simd_width_i32 = simd_width_bytes / sizeof(*v);        // 8
    int misalign_bytes = (uintptr_t)v & (simd_width_bytes - 1); // v mod 32
    int peeled_iters = 0;
    // Peeling loop
    if (misalign_bytes > 0) {
        peeled_iters = (simd_width_bytes - misalign_bytes) / sizeof(*v);
        for (int i = 0; i < peeled_iters; i++) {
            if (v[i] > 1000)
                v[i] = 1000;
        }
    }

    // Main loop
    int main_iters = n - ((n - peeled_iters) & (simd_width_i32 - 1));
    __m256i v1000 = _mm256_set1_epi32(1000);                   // Broadcast 32-bit int 1000 to all 32 elements of v1000
    for (int i = peeled_iters; i < main_iters; i += simd_width_i32) {
        __m256i val = _mm256_load_si256((__m256i *)&v[i]);
        __m256i mask = _mm256_cmpgt_epi32(val, v1000);         // Compare val > v1000
        __m256i true_vec = _mm256_and_si256(mask, v1000);
        __m256i false_vec = _mm256_andnot_si256(mask, val);
        _mm256_store_si256((__m256i *)&v[i], _mm256_or_si256(true_vec, false_vec));
    }
    for (int i = main_iters; i < n; i++) {
        if (v[i] > 1000)
            v[i] = 1000;
    }
}
```

Литература

- Denis Bakhvalov. **Performance Analysis and Tuning on Modern CPUs: Squeeze the last bit of performance from your application** // easyperf.net
- Alexander Supalov. **Optimizing HPC Applications with Intel Cluster Tools: Hunting Petaflops**
- Fedor G. Pikus. **The Art of Writing Efficient Programs**
- Randal E. Bryant, David R. O'Hallaron. **Computer Systems: A Programmer's Perspective**
- Aart J.C. Bik. **Software Vectorization Handbook, The: Applying Intel Multimedia Extensions for Maximum Performance**
- **Intel Intrinsics Guide** // https://www.intel.com/content/www/us/en/docs/intrinsics-guide/
- https://www.agner.org/optimize/