



# Как помочь и как помешать компилятору

Андрей Олейников,  
разработчик, Беспилотные автомобили Яндекса  
[andreyo1@yandex-team.ru](mailto:andreyo1@yandex-team.ru)

# Введение

- › Компиляторные оптимизации
- › Возможность на них повлиять

## Предупреждения

- › Clang/LLVM (6.0)
- › x64 (i7-8750H CPU)
- › Нестандартные расширения
- › Синтетические примеры

<https://github.com/duke-gh/CoreHard2019>

# Clang/LLVM



# План доклада

- › Inline
- › Loop unrolling
- › Instruction combining
- › Branching
- › LTO

Inline



# Inline cpp

```
double calc(int i) {  
    return std::sin(i / 100.0) + std::cos(i / 100.0);  
}
```

```
double get_res() {  
    const int it_count{1000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += calc(i);  
    }  
    return res;  
}
```

# Псевдокод после оптимизации

```
double calc(int i) {  
    return std::sin(i / 100.0) + std::cos(i / 100.0);  
}  
  
double get_res() {  
    const int it_count{1000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += std::sin(i / 100.0) + std::cos(i / 100.0);  
    }  
    return res;  
}
```

# Inline в Clang

- › Passes: AlwaysInlinerPass, InlinerPass
- › inline
- › `__attribute__((always_inline))`
- › `__attribute__((noinline))`



# Inline пример 1

```
double calc_value(int i, int branch) {  
    switch (i) {...}  
    ...  
    switch (i) {...}  
    double di = static_cast<double>(i);  
    if (branch) {  
        return i + di * di + di * di * di + di * di * di * 0.2 + i % 2;  
    } else {  
        return i * 0.1 + di * di / 2.0 + di * di * di * 0.3  
            + di * di * di * 0.4 + i / 2.0;  
    }  
}
```

```
double get_first_value(int i, int branch) {  
    return calc_value(i, branch);  
}  
  
double get_second_value(int i, int branch) {  
    return calc_value(i, branch);  
}  
  
double get_res() {  
    const int it_count{1000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += get_first_value(i, 0) + get_second_value(i, 0);  
    }  
    return res;  
}
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -c calc.cpp
calc.cpp:87:12: remark: _Z15get_first_valuei inlined into
    _Z7get_resv with cost=0 (threshold=337) [-Rpass=inline]
    res += get_first_value(i, 0) + get_second_value(i, 0) ;
           ^
calc.cpp:87:37: remark: _Z16get_second_valuei inlined into
    _Z7get_resv with cost=0 (threshold=337) [-Rpass=inline]
    res += get_first_value(i, 0) + get_second_value(i, 0) ;
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -Rpass-missed=inline -c calc.cpp
calc.cpp:76:10: remark: _Z10calc_valueii not inlined into
    _Z15get_first_valueii because too costly to inline
    (cost=320, threshold=225) [-Rpass-missed=inline]
    return calc_value(i, branch);
           ^
calc.cpp:80:10: remark: _Z10calc_valueii not inlined into
    _Z16get_second_valueii because too costly to inline
    (cost=320, threshold=225) [-Rpass-missed=inline]
    return calc_value(i, branch);

...
```

```
$ sudo perf stat -B ./a.out
Spent 1109395529 ns
Performance counter stats for './a.out':
```

1	111,60	msec	task-clock
	3		context-switches
	0		cpu-migrations
	117		page-faults
4	261	552	332
			cycles
4	604	496	295
			instructions
1	100	771	723
			branches
	25	792	
			branch-misses

```
1,112127349 seconds time elapsed
```

```
1,112106000 seconds user
```

```
0,000000000 seconds sys
```

```
inline double calc_value(int i, int branch) {  
    ...  
}
```

```
// llvm/lib/Analysis/InlineCost.cpp:916
    if (Callee.hasFnAttribute(Attribute::InlineHint))
        Threshold = MaxIfValid(Threshold, Params.HintThreshold);
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -c calc.cpp
calc.cpp:76:10: remark: _Z10calc_valueii inlined into
    _Z15get_first_valueii with cost=320 (threshold=325)
    [-Rpass=inline]
    return calc_value(i, branch);
           ^

calc.cpp:80:10: remark: _Z10calc_valueii inlined into
    _Z16get_second_valueii with cost=320 (threshold=325)
    [-Rpass=inline]
    return calc_value(i, branch);
           ^
```



```
$ sudo perf stat -B ./a.out
Spent 1823334387 ns
Performance counter stats for './a.out':
```

1	824,14	msec	task-clock
	4		context-switches
	0		cpu-migrations
	117		page-faults
7	239	846	942
			cycles
8	405	174	671
			instructions
2	100	884	626
			branches
	28	842	
			branch-misses

```
1,824386069 seconds time elapsed
```

```
1,824351000 seconds user
```

```
0,000000000 seconds sys
```

```
double get_first_value(int i, int branch) {  
    return calc_value(i, branch);  
}  
  
double get_second_value(int i, int branch) {  
    return calc_value(i, branch);  
}  
  
double get_res() {  
    const int it_count{1000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += get_first_value(i, 0) + get_second_value(i, 0);  
    }  
    return res;  
}
```

# Inline пример 2

```
double calc_value(int i, int branch) {  
    switch (i) {...}  
    ...  
    switch (i) {...}  
    double di = static_cast<double>(i);  
    if (branch) {  
        return i + di * di + di * di * di + di * di * di * 0.2 + i % 2;  
    } else {  
        return i * 0.1 + di * di / 2.0 + di * di * di * 0.3 + di * di * di * 0.4 + i  
            / 2.0;  
    }  
}
```

```
double get_first_value(int i) {  
    return calc_value(i, 0);  
}  
  
double get_second_value(int i) {  
    return calc_value(i, 1);  
}  
  
double get_res() {  
    const int it_count{1000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += get_first_value(i) + get_second_value(i);  
    }  
    return res;  
}
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -c calc.cpp
calc.cpp:89:12: remark: _Z15get_first_valuei inlined into
    _Z7get_resv with cost=5 (threshold=337) [-Rpass=inline]
    res += get_first_value(i) + get_second_value(i);
           ^
calc.cpp:89:33: remark: _Z16get_second_valuei inlined into
    _Z7get_resv with cost=5 (threshold=337) [-Rpass=inline]
    res += get_first_value(i) + get_second_value(i);
```

```

$ sudo perf stat -B ./a.out
Spent 1691298621 ns
Performance counter stats for './a.out':
      1 692,13 msec task-clock
              2      context-switches
              0      cpu-migrations
            119      page-faults
  6 762 472 189      cycles
  8 405 218 118      instructions
  2 100 883 212      branches
            27 518      branch-misses

1,692417574 seconds time elapsed

1,692363000 seconds user
0,000000000 seconds sys

```

```
inline double calc_value(int i, int branch) {  
    ...  
}
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -c calc.cpp
calc.cpp:78:10: remark: _Z10calc_valueii inlined into
    _Z15get_first_valuei with cost=265 (threshold=325) [-
Rpass=inline]
    return calc_value(i, 0);
           ^

calc.cpp:82:10: remark: _Z10calc_valueii inlined into
    _Z16get_second_valuei with cost=255 (threshold=325) [-
Rpass=inline]
    return calc_value(i, 1);
           ^
```



```
$ sudo perf stat -B ./a.out
Spent 1690155986 ns
Performance counter stats for './a.out':
      1 691,02 msec task-clock
              3      context-switches
              0      cpu-migrations
            116      page-faults
  6 763 570 064      cycles
  7 805 197 904      instructions
  1 900 880 186      branches
            28 067      branch-misses

1,691254028 seconds time elapsed

1,691260000 seconds user
0,000000000 seconds sys
```

```
inline double get_first_value(int i) { ... }
```

```
inline double get_second_value(int i) { ... }
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -c calc.cpp
calc.cpp:78:10: remark: _Z10calc_valuei inlined into
    _Z15get_first_valuei with cost=265 (threshold=325)
    return calc_value(i, 0);
           ^
...
calc.cpp:89:12: remark: _Z15get_first_valuei inlined into
    _Z7get_resv with cost=270 (threshold=325) [-Rpass=inline]
    res += get_first_value(i) + get_second_value(i);
           ^
...
```

```
$ sudo perf stat -B ./a.out
Spent 1823334387 ns
Performance counter stats for './a.out':
    424,66 msec task-clock
          0      context-switches
          0      cpu-migrations
        115      page-faults
  1 700 420 431      cycles
  7 203 660 181      instructions
  1 500 629 258      branches
        20 223      branch-misses

0,424871806 seconds time elapsed

0,424891000 seconds user
0,000000000 seconds sys
```

```
double calc_value(int i, int branch) {  
    switch (i) {...}  
    ...  
    switch (i) {...}  
    double di = static_cast<double>(i);  
    if (branch) {  
        return i + di * di + di * di * di + di * di * di * 0.2 + i % 2;  
    } else {  
        return i * 0.1 + di * di / 2.0 + di * di * di * 0.3 + di * di * di * 0.4 + i  
            / 2.0;  
    }  
}
```

```
__attribute__((always_inline)) double get_first_value(int i) { ... }
```

```
__attribute__((noinline)) double get_second_value(int i) { ... }
```

```
$ clang++ -O2 -Rpass=inline -Rpass-missed=inline -c calc.cpp
```

```
...
```

```
calc.cpp:89:12: remark: _Z15get_first_valuei inlined into  
    _Z7get_resv with cost=always [-Rpass=inline]  
    res += get_first_value(i) + get_second_value(i);  
           ^
```

```
...
```

```
calc.cpp:89:33: remark: _Z16get_second_valuei not inlined into  
    _Z7get_resv because it should never be inlined  
    (cost=never) [-Rpass-missed=inline]  
    res += get_first_value(i) + get_second_value(i);
```

```
double get_res( ) {  
    const int it_count{10000000000};  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += get_first_light_value(i) + get_second_light_value(i + 1);  
        if (i < 10) {  
            res += get_first_heavy_value(i, res);  
            res += get_second_heavy_value(i, res);  
        }  
        res += get_second_light_value(i) + get_first_light_value(i - 1);  
    }  
    return res;  
}
```



Результаты за 10 запусков с `always_inline` и без:

	среднее, мс	p90	p10
по умолчанию	3567.6	3584.4	3555.1
<code>always_inline</code>	3701.5	3714.5	3691.9

# Итого, inline

- › Позволяет делать подсказки только у вызываемой функции.
- › Можно облегчить компилятору работу указав явно как поступать.
- › Потенциально руками можно обогнать эвристики.

# Loop unroll

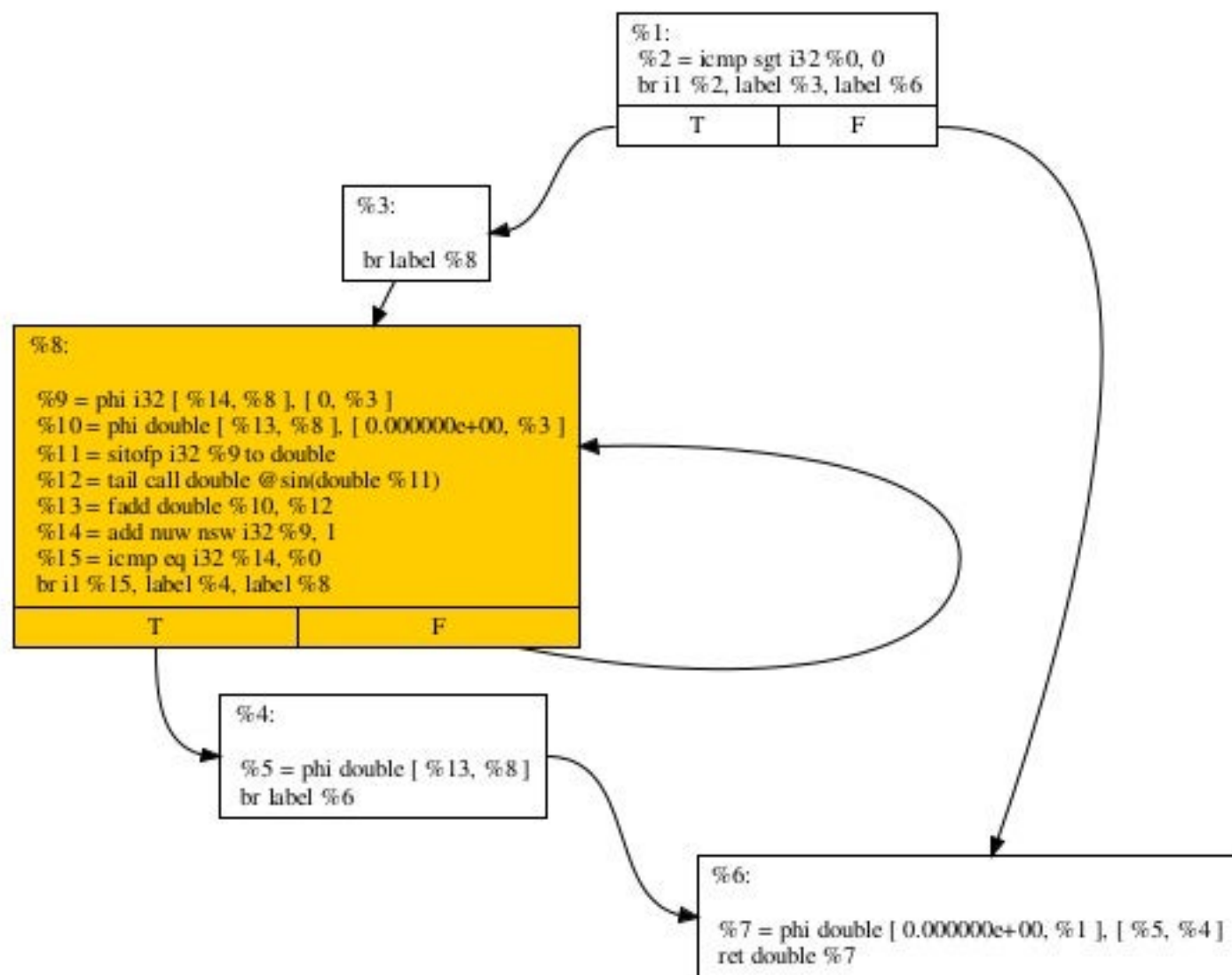


# Loop unroll

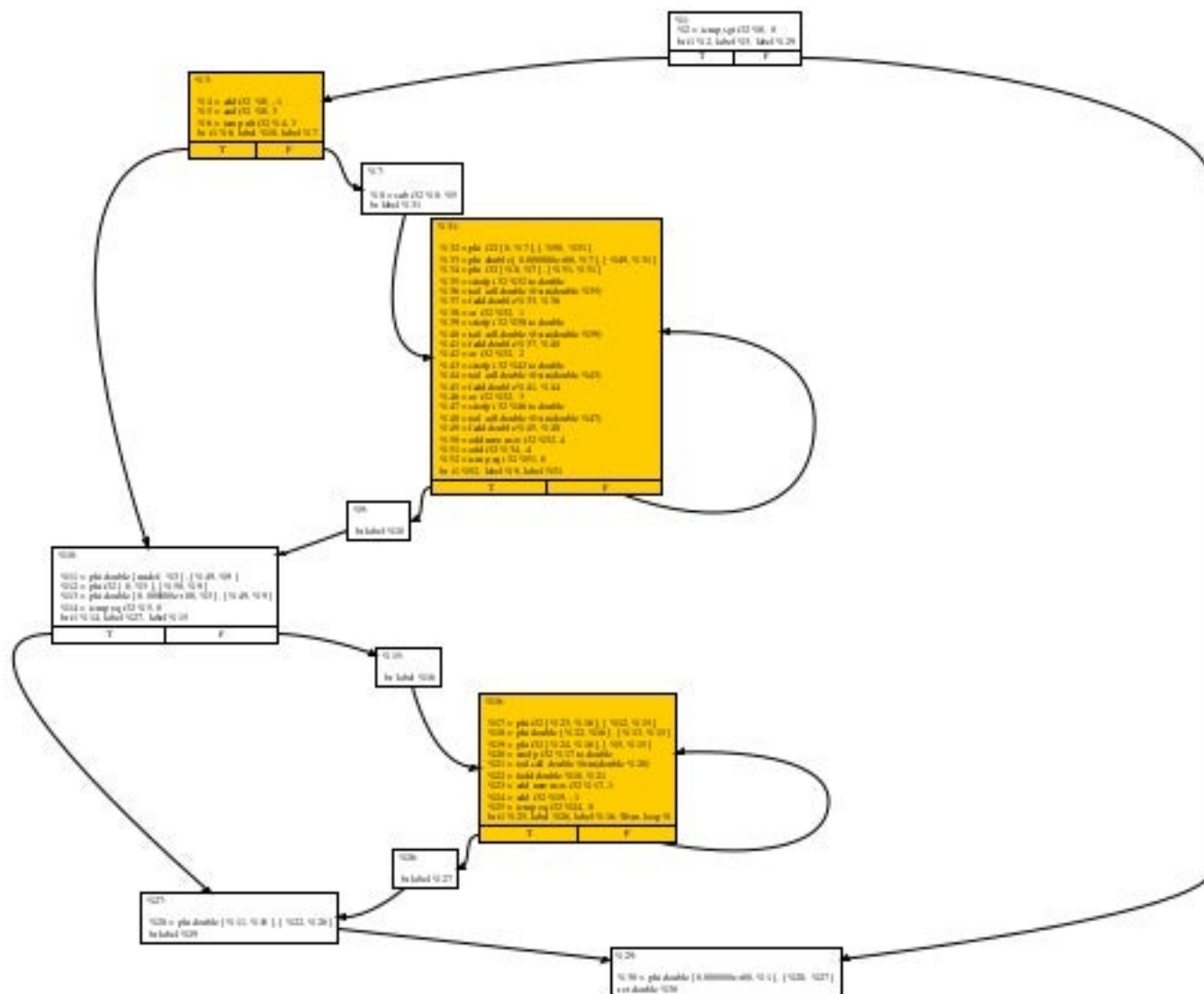
```
double calc(int i) {  
    return std::sin(i);  
}
```

```
double get_res(int it_count) {  
    double res{0.0};  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += calc(i);  
    }  
    return res;  
}
```

# IR перед оптимизацией



## IR после оптимизации



// before

```
for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
    res += calc(i);  
}
```

// after

```
int i = 0;  
for (; it_count - i > 3; i += 4) {  
    res += calc(i);  
    res += calc(i + 1);  
    res += calc(i + 2);  
    res += calc(i + 3);  
}  
for (; i < it_count; i++) {  
    res += calc(i);  
}
```

# Разворачивание циклов в Clang

- › Pass: LoopUnrollPass
- › `#pragma unroll`
- › `#pragma nounroll`
- › `#pragma clang loop unroll(full)`
- › `#pragma clang loop unroll_count(12)`



```

// llvm/lib/Transforms/Scalar/LoopUnrollPass.cpp:960
    if (HasUnrollDisablePragma(L))
        return LoopUnrollResult::Unmodified;
    ...

// llvm/lib/Transforms/Scalar/LoopUnrollPass.cpp:747
    if (ExplicitUnroll && TripCount != 0) {
        // If the loop has an unrolling pragma, we want to be more aggressive with
        // unrolling limits. Set thresholds to at least the PragmaThreshold value
        // which is larger than the default limits.
        UP.Threshold = std::max<unsigned>(UP.Threshold, PragmaUnrollThreshold);
        UP.PartialThreshold =
            std::max<unsigned>(UP.PartialThreshold, PragmaUnrollThreshold);
    }

```

# Loop unroll пример

```
double calc(int i) {  
    return std::sin(i);  
}
```

```
double get_res_unroll_12(int it_count) {  
    double res{0.0};  
    #pragma clang loop unroll_count(12)  
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {  
        res += calc(i);  
    }  
    return res;  
}
```



Результаты за 10 запусков с различными прагмами:

	branches	average	p90	p10
nounroll	1001796322	1045.3	1067.3	1028.5
unroll	250920668	1038.6	1057.2	1019.8
unroll_count(12)	84168844	1023.7	1053.4	1009.9

# Итого, разворачивание циклов

- › Можно делать подсказки у конкретного цикла.
- › Не является обязующей директивой.
- › Потенциально руками можно обогнать эвристики.

# Instruction combining



# Instruction combining

```
int get_res(int a, int b, int c) {  
    return a * b + a * c + a + a + a + c - a;  
}
```

.

# Instruction combining: результаты

Было:

$$ab + ac + a + a + a + c - a$$

Стало:

$$(b + 2 + c)a + c$$



# Instruction combining в Clang

- › Passes: InstCombinePass, ReassociatePass
- › -ffast-math
  - › -fno-honor-infinities
  - › -fno-honor-nans
  - › -fno-math-errno
  - › -ffinite-math
  - › -fassociative-math
  - › -freciprocal-math
  - › -fno-signed-zeros
  - › -fno-trapping-math
  - › -ffp-contract=fast

```
float get_res(float a, float b, float c, float d, float e) {  
    return a * d + b * e + c * e;  
}
```

```
int main() {  
    float a = 5000000000.0f;  
    float b = -5000000000.0f;  
    float c = 1.0f;  
    std::cout << get_res(a, b, c, 1.0f, 1.0f) << std::endl;  
    return 0;  
}
```

```
$ clang++ -O2 main.cpp
```

```
$ ./a.out
```

```
1
```

```
$ clang++ -ffast-math -O2 main.cpp
```

```
$ ./a.out
```

```
0
```

```
// a = 5000000000.0f;  
// b = -5000000000.0f;  
// c, d, e = 1.0f;
```

```
float get_res(float a, float b, float c, float d, float e) {  
    return a * d + b * e + c * e;  
}
```

```
float get_res_opt(float a, float b, float c, float d, float e) {  
    return a * d + (b + c) * e;  
}
```

# Итого, упрощение выражений

- › Ключ для сборки - влияет на всю единицу трансляции.
- › Говорит компилятору быть менее консервативным.

# Branching



# Branching

```
void function(bool should_fail) {  
    if (should_fail) {  
        ...  
        // Some long, rarely used error handling  
        ...  
    } else {  
        ...  
        // Main execution path  
        ...  
    }  
}
```

# Branching в Clang

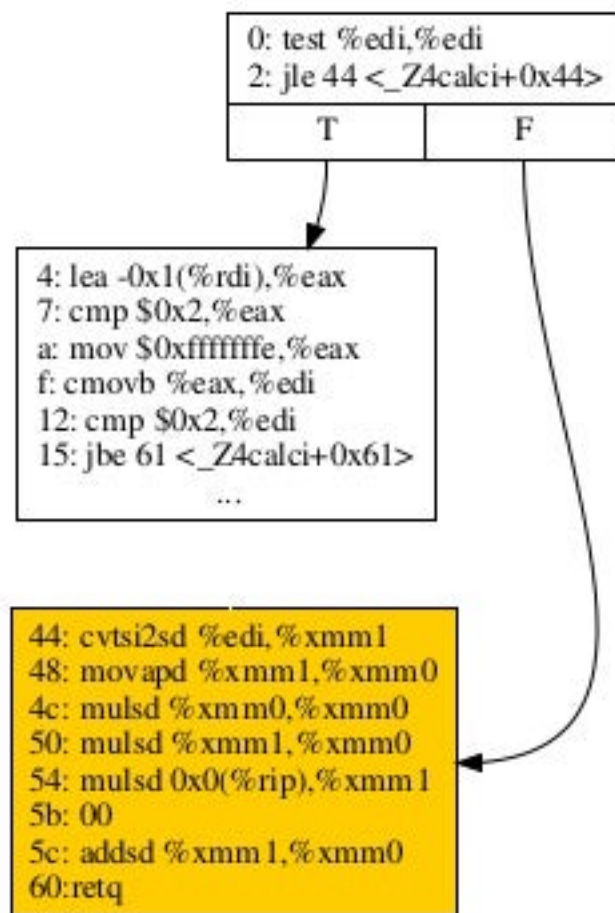
› `__builtin_expect(long exp, long c)`



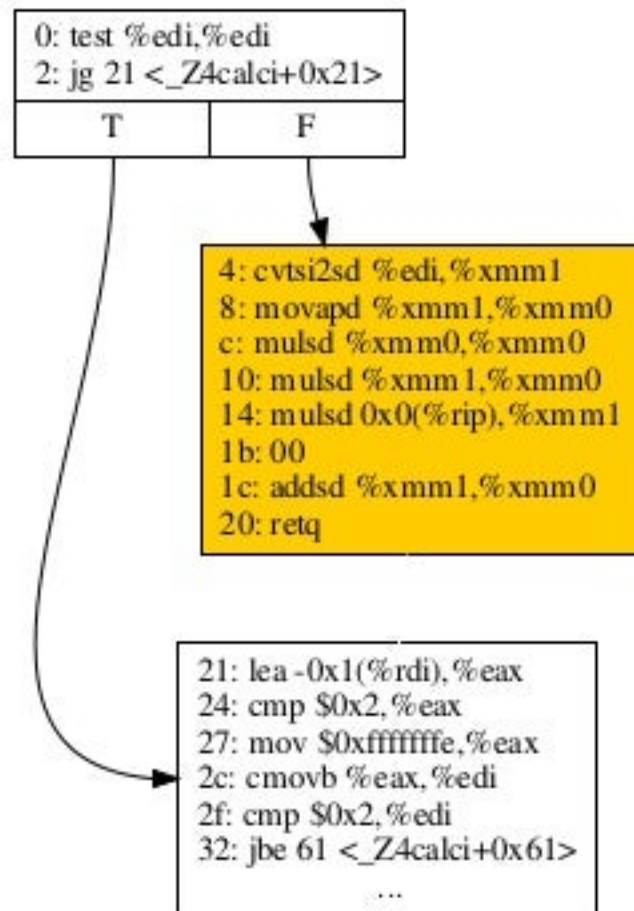
# Branching пример

```
double calc(int i) {  
    if (__builtin_expect(i>0, 0)) {  
        switch (i) { ... }  
        switch (i) { ... }  
        double di = static_cast<double>(i);  
        return di * di + di * 0.1;  
    } else {  
        double di = static_cast<double>(i);  
        return di * di * di + di * 0.3;  
    }  
}
```

# Ассемблер без подсказок



# Ассемблер с подсказками



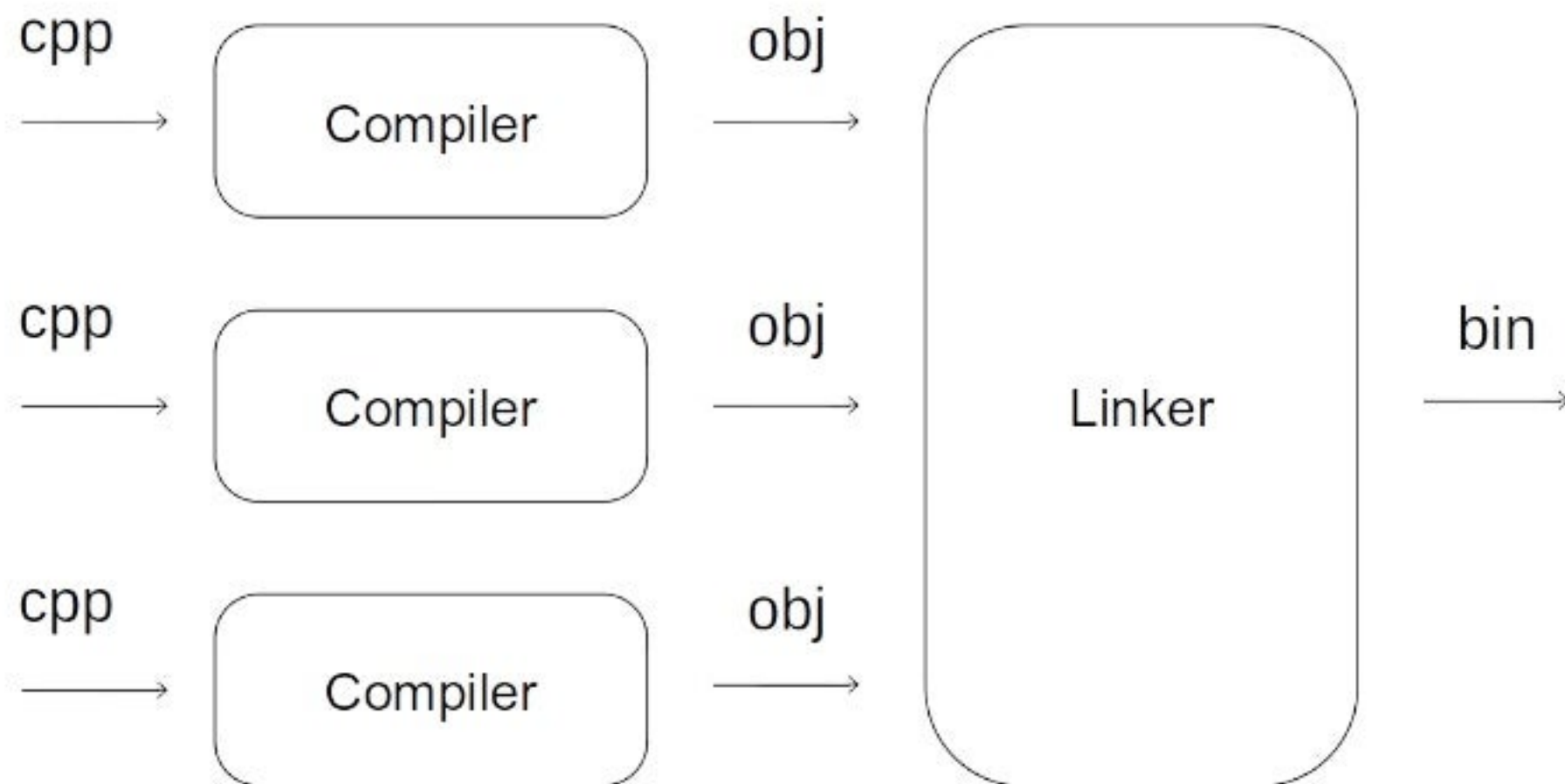
# Итого, подсказки при ветвлении

- › Можно делать подсказки у каждого отдельного условного оператора.
- › Компилятор не знает на каких данных будет запускаться программа.

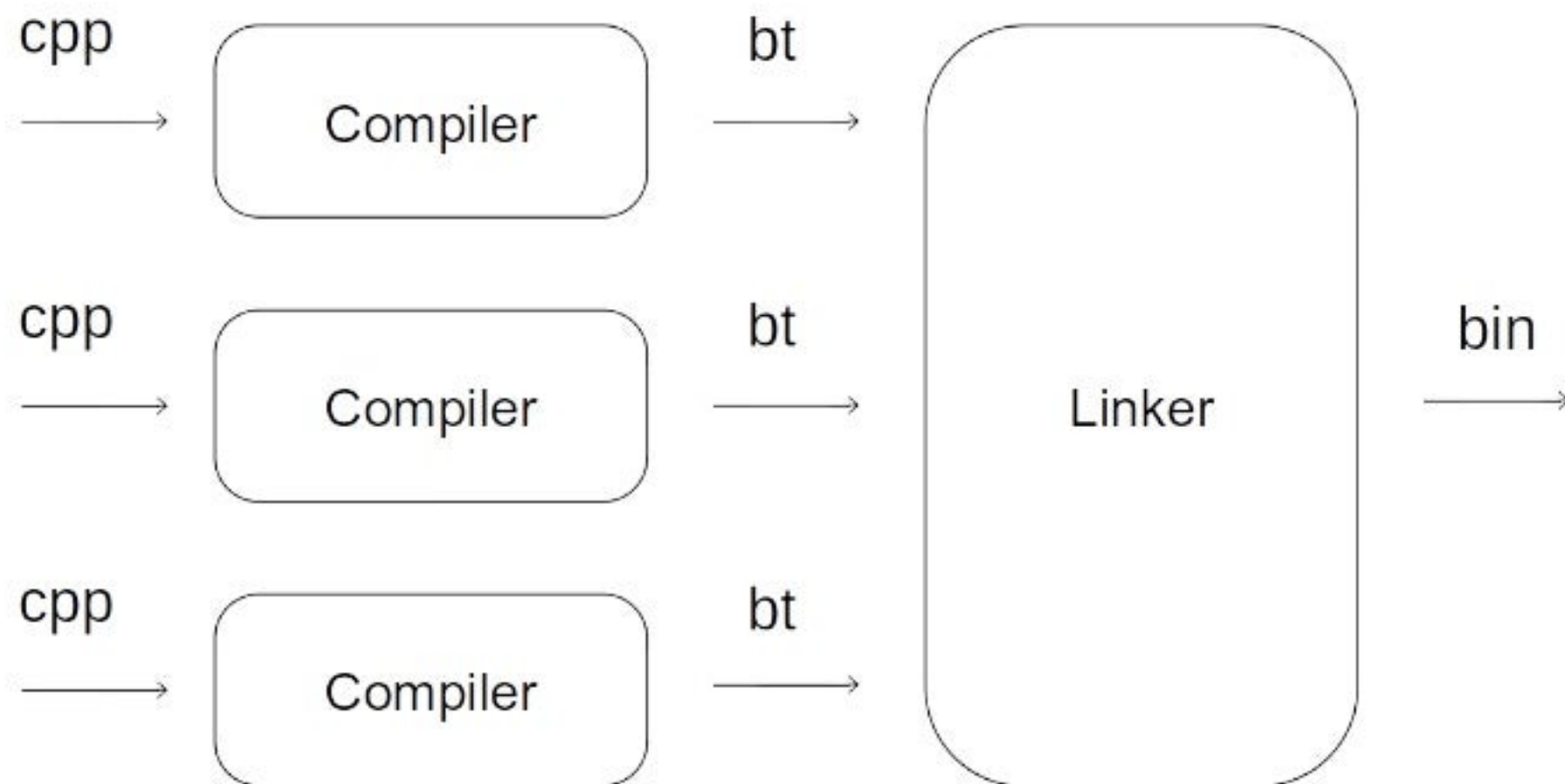
# Link-time optimization



# Сборка



# Сборка с LTO



```
// main.cpp
#include <iostream>
#include <chrono>
#include "source2.h"

int main() {
    double res{0.0};
    const auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now().time_since_epoch(
        ).count();
    res = get_res();
    const auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now().time_since_epoch(
        ).count();
    std::cout << "res = " << res << std::endl;
    ...
    return 0;
}
```



```
// source2.cpp
#include "source1.h"

double get_res() {
    const int it_count{10000000000};
    double res{0.0};
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {
        res += calc_value(i, 0);
    }
    return res;
}
```

```
// source1.cpp
int calc_value(int i, int branch) {
    int original_i = i;
    switch (i) { ... }
    switch (i) { ... }
    ...
    if (branch) {
        return i;
    } else {
        return original_i;
    }
}
```

```
$ clang++ -O2 main.cpp source1.cpp source2.cpp  
$ ./a.out  
res = 5e+17  
Spent 3536021382 ns (3536 ms)  
4.2.1 Compatible Clang 6.0.0 (tags/RELEASE_600/final)
```

```
$ clang++ -O2 -flto -c main.cpp source1.cpp source2.cpp
$ clang++ -O2 -flto main.o source1.o source2.o
$ ./a.out
res = 5e+17
Spent 1013128016 ns (1013 ms)
4.2.1 Compatible Clang 6.0.0 (tags/RELEASE_600/final)

$ ls -n a.out
-rwxr-xr-x 1 1000 1000 9072 ноя 19 11:53 a.out

$ llvm-dis-6.0 source1.o -o source1.ll
```

```
$ clang++ -O2 -flto=thin -c main.cpp source1.cpp source2.cpp
$ clang++ -O2 -flto=thin main.o source1.o source2.o
$ ./a.out
res = 5e+17
Spent 1013771808 ns (1013 ms)
4.2.1 Compatible Clang 6.0.0 (tags/RELEASE_600/final)

$ ls -ln a.out
-rwxr-xr-x 1 1000 1000 13248 ноя 19 03:03 a.out
```

```
// source2.cpp
#include "source1.h"

double get_res() {
    const int it_count{10000000000};
    double res{0.0};
    for (int i = 0; i < it_count; i++) {
        res += calc_value(i, 0);
    }
    return res;
}
```

```
// source1.cpp
int calc_value(int i, int branch) {
    int original_i = i;
    switch (i) { ... }
    switch (i) { ... }
    ...
    if (branch) {
        return i;
    } else {
        return original_i;
    }
}
```

# Итого, оптимизации на этапе линковки

- › Требуют изменения процесса сборки проекта.
- › Ограничивают возможные выбор линкера.
- › Увеличивают время сборки (особенно инкрементальной).
- › Дают компилятору больше контекста для оптимизаций.



# Заключение

- › LTO, если не жалко скорость сборки.
- › Подсказки компилятору, если есть время и желание проверять результат.
- › Стоит изучать свои инструменты

# Спасибо за внимание!

Андрей Олейников



[andreyol@yandex-team.ru](mailto:andreyol@yandex-team.ru)