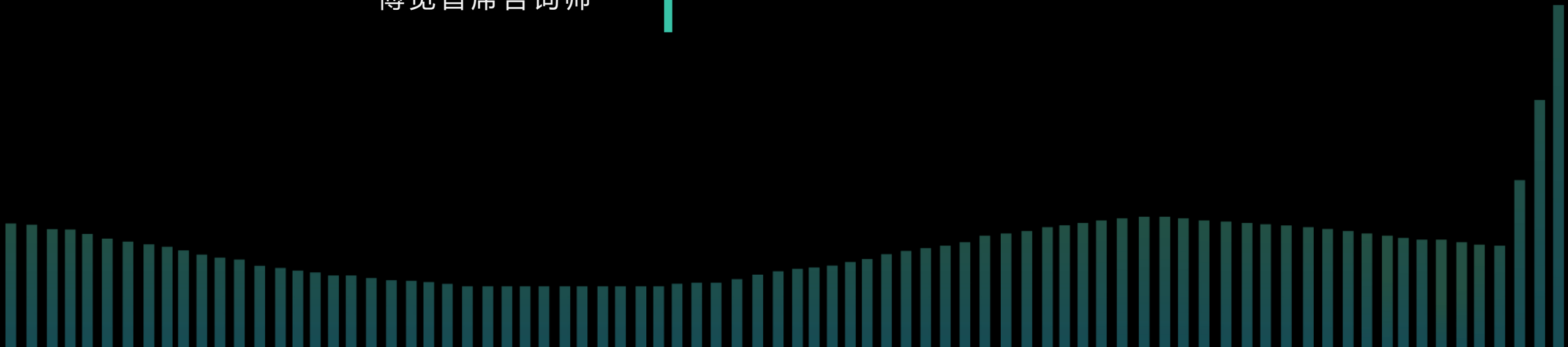
C++ Summit 2020

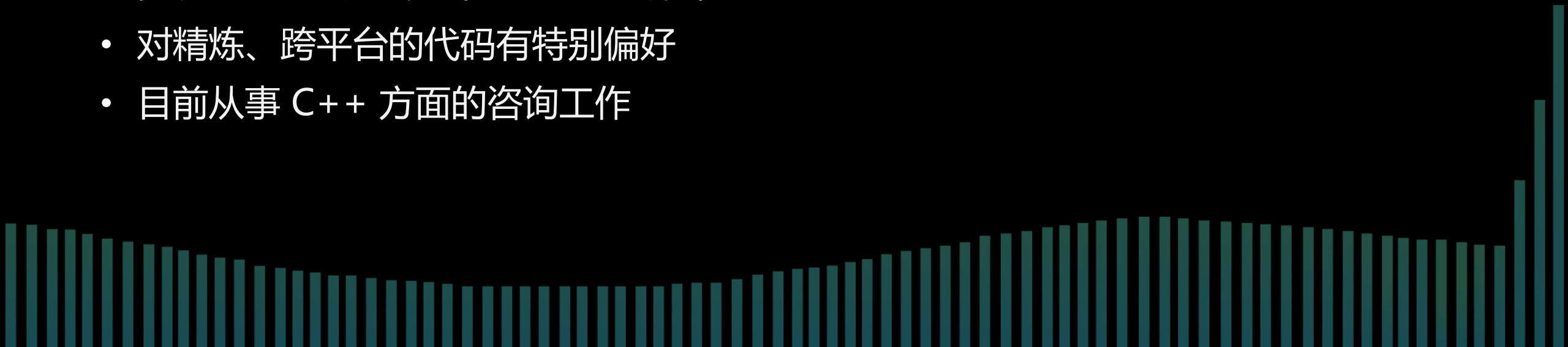
C++ 性能调优纵横谈

吴咏炜
博览首席咨询师

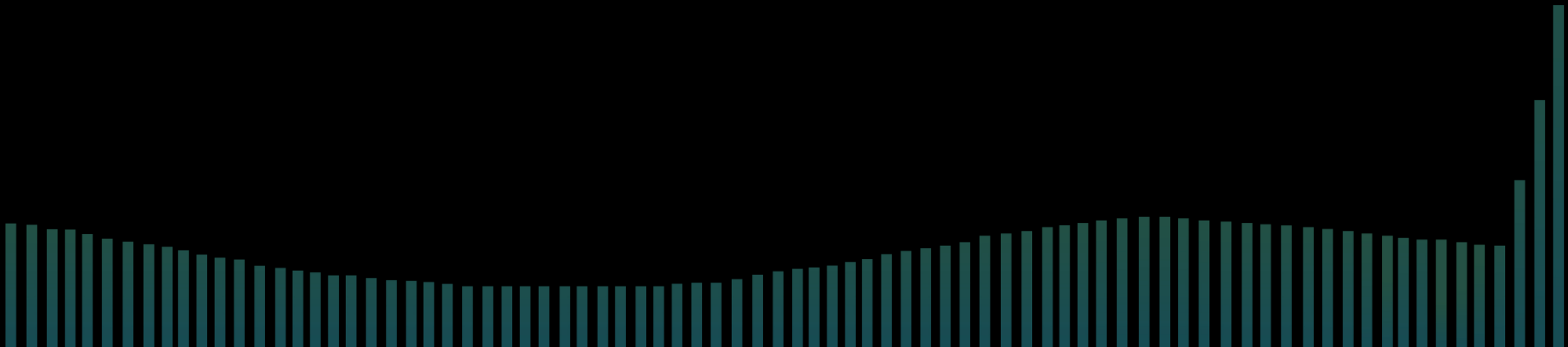


自我介绍

- 学编程超过 35 年
- 近 30 年 C++ 老兵
- 热爱 C++ 和开源技术
- 多次在 C++ 大会上推广 C++ 新特性
- 对精炼、跨平台的代码有特别偏好
- 目前从事 C++ 方面的咨询工作

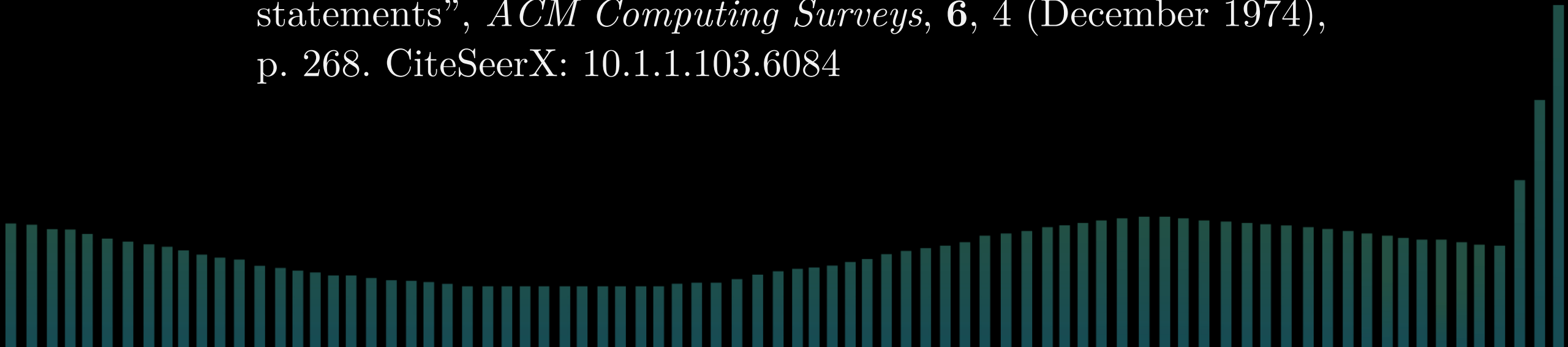


Premature optimization is the root of all evil.



We should forget about small efficiencies, say about 97 percent of the time: premature optimization is the root of all evil.

—Donald Knuth, “Structured programming with go to statements”, *ACM Computing Surveys*, **6**, 4 (December 1974), p. 268. CiteSeerX: 10.1.1.103.6084



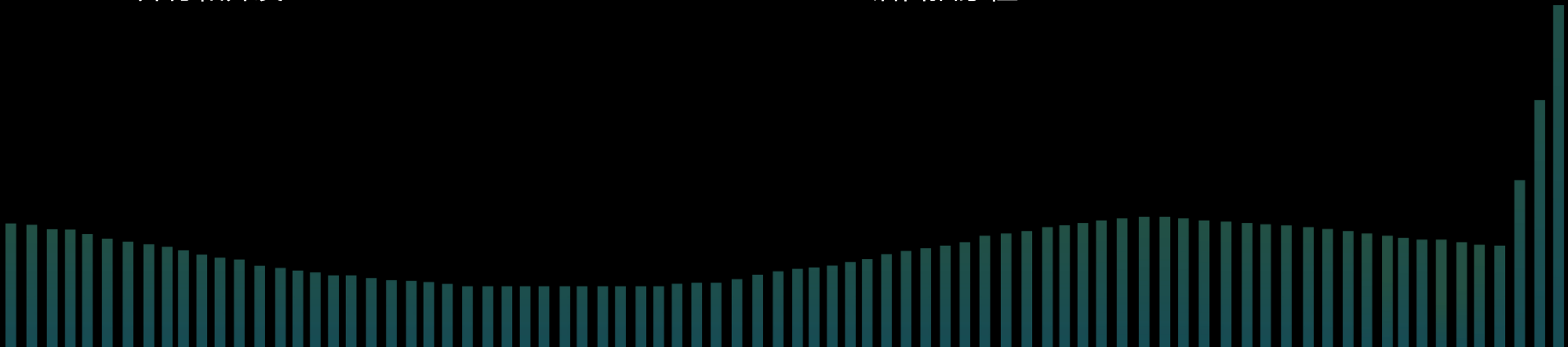
影响性能的架构因素

硬件

- 存储层次体系
- 处理器的乱序执行和流水线
- 并行和并发

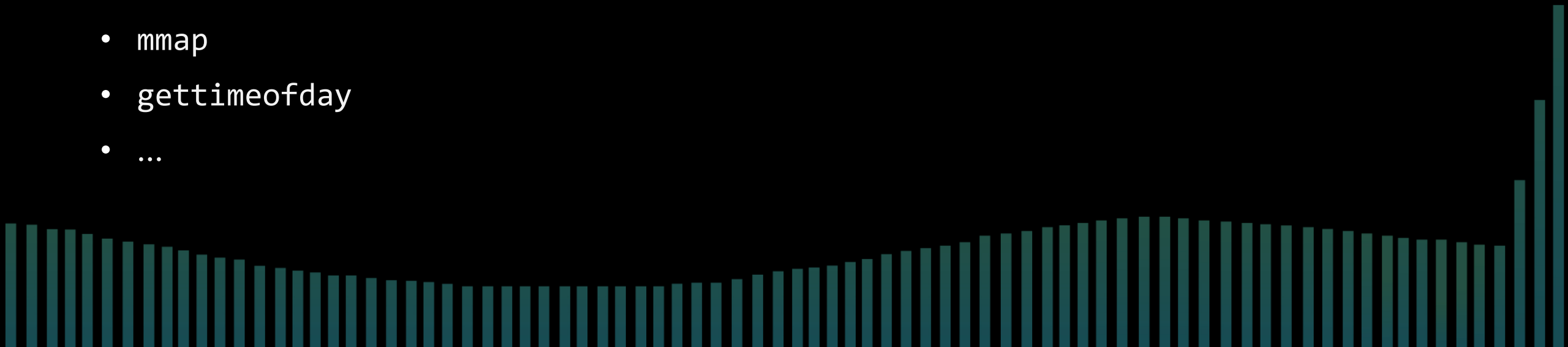
软件

- 系统调用开销
- 编译器优化
- 语言抽象性



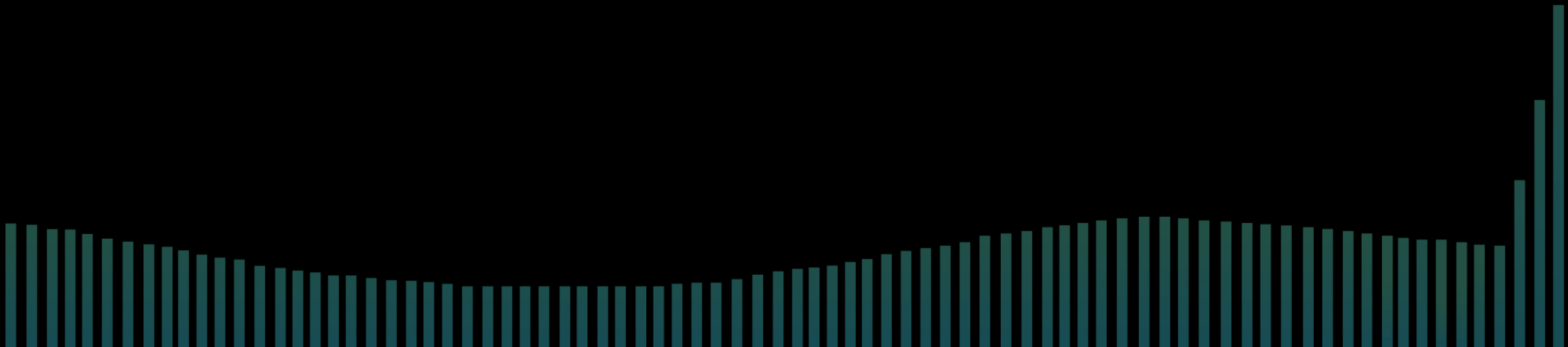
系统调用开销

- `read`
- `write`
- `open`
- `close`
- `mmap`
- `gettimeofday`
- …



编译器优化

后面细说……



语言抽象性

C

```
Obj obj;
```

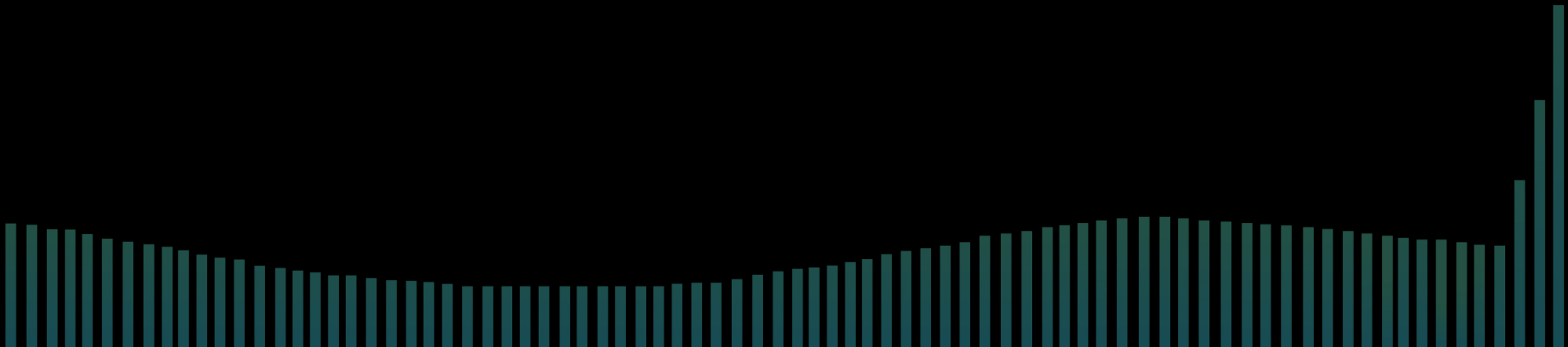
- 在栈上分配了 `sizeof(Obj)` 字节，$O(1)$ 开销

C++

```
Obj obj;
```

- 在栈上分配了 `sizeof(Obj)` 字节，$O(1)$ 开销
- 调用 `Obj` **构造函数**，$O(?)$
- 到达下面的 `}` 时调用**析构函数**，$O(?)$

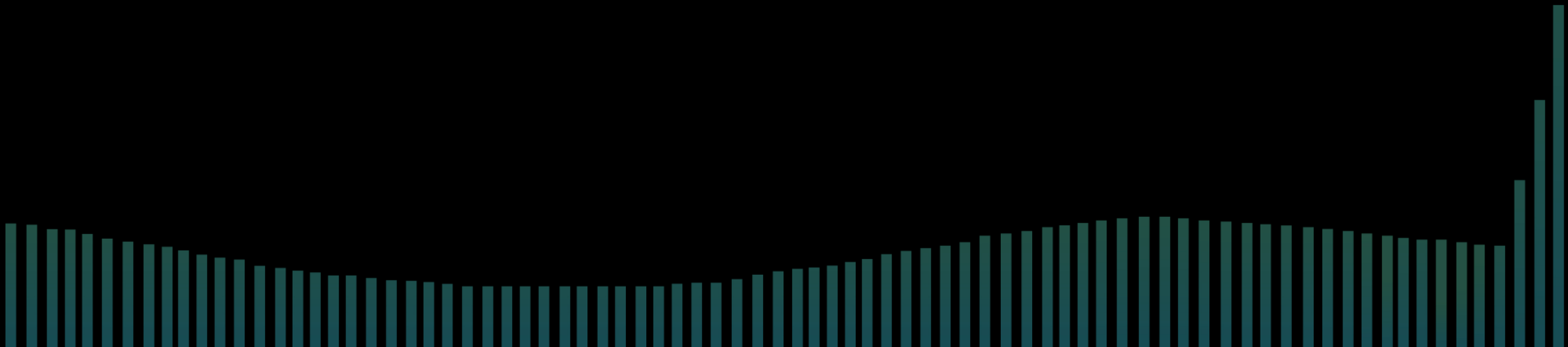
为什么要用 C++？



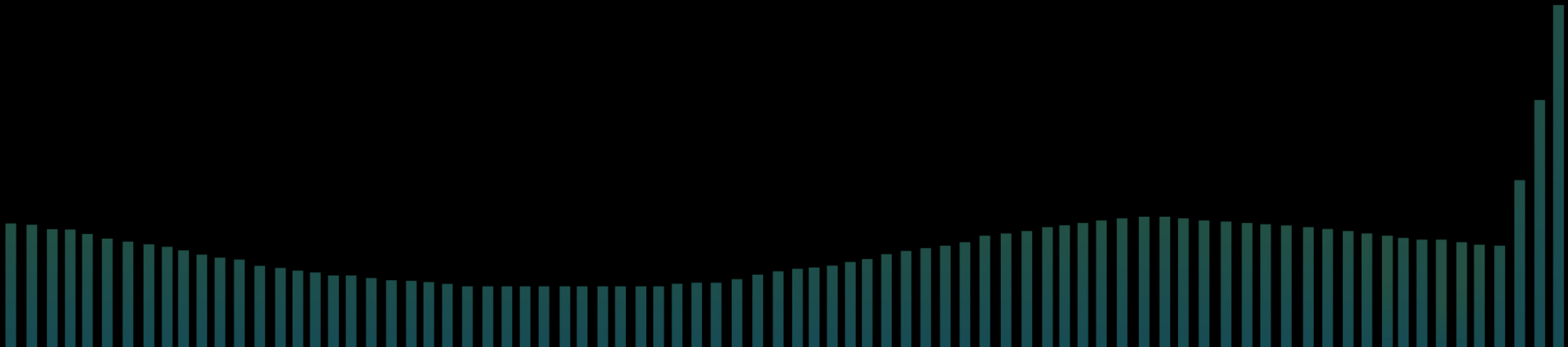
优化领域的阿姆达尔定律

$$S = \frac{1}{1 - P + \frac{P}{S_P}}$$

性能需要测试！



测不准问题……



你知道结果吗？

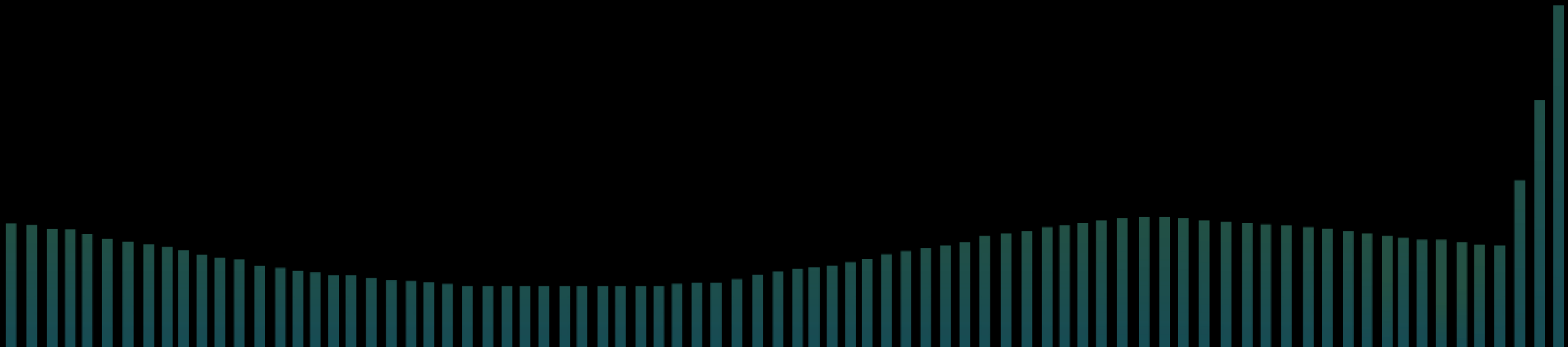
```
char buffer[80];
auto t1 = clock();
for (auto i = 0; i < LOOPS; ++i) {
  memset(buffer, 0, sizeof buffer);
}
auto t2 = clock();
printf("%g\n",
       (t2 - t1) * 1.0 / CLOCKS_PER_SEC);
```

```
char buffer[80];
auto t1 = clock();
for (auto i = 0; i < LOOPS; ++i) {
  for (size_t j = 0; j < sizeof buffer;
       ++j) {
    buffer[j] = 0;
  }
}
auto t2 = clock();
printf("%g\n",
       (t2 - t1) * 1.0 / CLOCKS_PER_SEC);
```

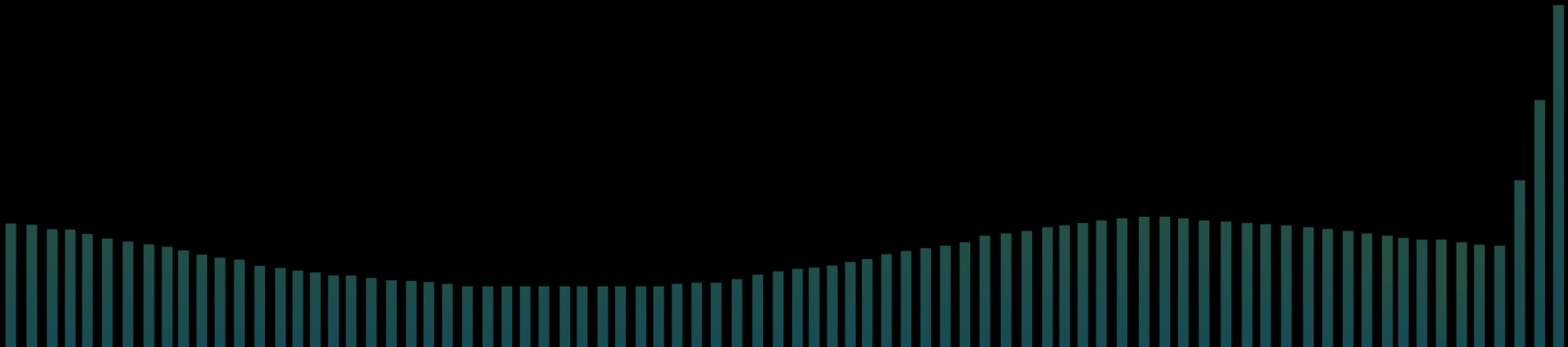
GCC 8 的测试结果

编译选项	memset:手工循环（时间）
-O0	1:55
-O1	1:5
-O2	100000:1

原因：对 buffer 的写入被优化没了！



volatile ?



GCC 8 的测试结果（volatile）

编译选项	memset:手工循环（时间）
-O0	1:25
-O1	1:5
-O2	1:5

volatile 本身会妨碍优化……

```
volatile char buffer[80];
…
for (size_t j = 0; j < sizeof buffer; ++j) {
    buffer[j] = 0;
}

; GCC 10 下可能产生的汇编（x86-64）
    xor     eax, eax
.L2:
    mov     BYTE PTR buffer[rax], 0
    add     rax, 1
    cmp     rax, 80
    jne     .L2
    ret
```

```
char buffer[80];
…
for (size_t j = 0; j < sizeof buffer; ++j) {
    buffer[j] = 0;
}

; GCC 10 下可能产生的汇编（x86-64）
    pxor    xmm0, xmm0
    movaps  XMMWORD PTR buffer[rip], xmm0
    movaps  XMMWORD PTR buffer[rip+16], xmm0
    movaps  XMMWORD PTR buffer[rip+32], xmm0
    movaps  XMMWORD PTR buffer[rip+48], xmm0
    movaps  XMMWORD PTR buffer[rip+64], xmm0
    ret
```

https://godbolt.org/z/vnbEaT

编译器的优化魔法

在没有同步原语的情况下，编译器可以（通常为了性能）在（当前线程）结果不变的情况下自由地调整执行顺序

- 同步原语包括互斥锁操作、内存屏障、原子操作等
- 例子：`x = a; y = 2;` 可以变为 `y = 2; x = a;` https://godbolt.org/z/rbq1q9
- 例子：`x = y + 1; y = x + 2;` 可以变为 `t = y; y += 3; x = t + 1;` ↴ https://godbolt.org/z/GEqxEs
- 局部变量可能被完全消除
- 全局变量只保证在下一个同步点到来之前写回到内存里
- `volatile` 声明会禁止编译器进行相关的优化

C++

```
1   int x;
2   int y;
3   int a;
4
5   int main()
6   {
7       x = a;
8       y = 2;
9   }
10
```

x86-64 gcc 4.4.7 -O2

```
1   main:
2           mov     eax, DWORD PTR a[rip]
3           mov     DWORD PTR y[rip], 2
4           mov     DWORD PTR x[rip], eax
5           xor     eax, eax
6           ret
7   x:
8           .zero   4
9   y:
10          .zero   4
11  a:
12          .zero   4
```

C++

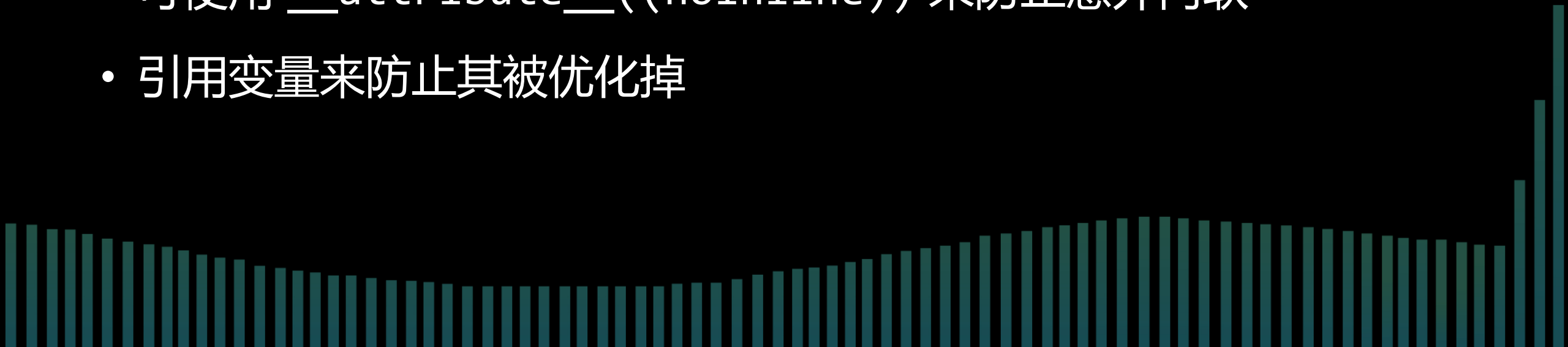
```
1   int x;
2   int y;
3
4   int main()
5   {
6       x = y + 1;
7       y = x + 2;
8   }
9
```

x86-64 gcc 4.4.7 -O2

```
1   main:
2           mov     eax, DWORD PTR y[rip]
3           lea     edx, [rax+1]
4           add     eax, 3
5           mov     DWORD PTR y[rip], eax
6           xor     eax, eax
7           mov     DWORD PTR x[rip], edx
8           ret
9   x:
10          .zero   4
11  y:
12          .zero   4
```

防优化技巧

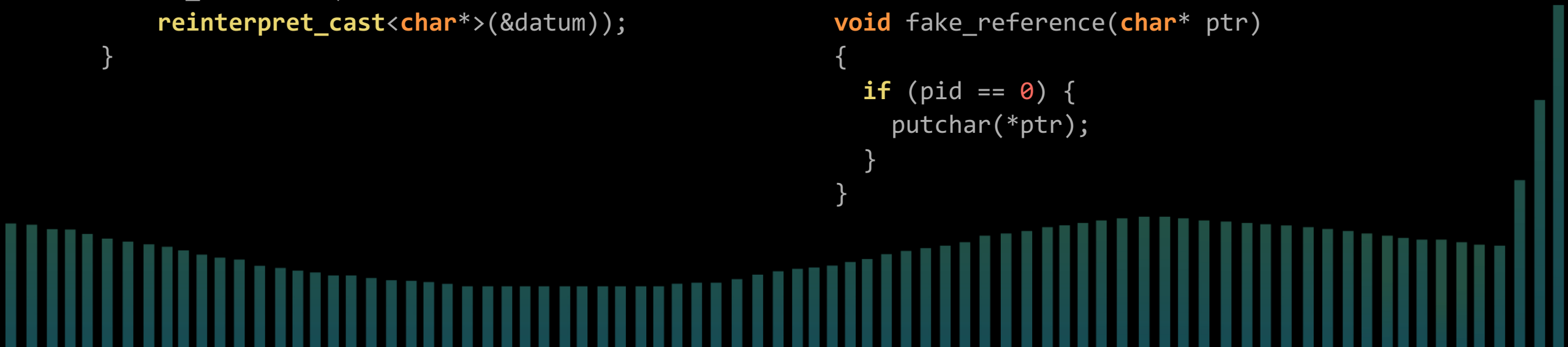
- 使用全局变量
- 使用锁来当作简单的内存屏障
- 可使用 `__attribute__((noinline))` 来防止意外内联
- 引用变量来防止其被优化掉



dont_optimize_away

```cpp
// dont_optimize_away.h

void fake_reference(char* ptr);

template <typename T>
inline void dont_optimize_away(T&& datum)
{
  fake_reference(
    reinterpret_cast<char*>(&datum));
}
```

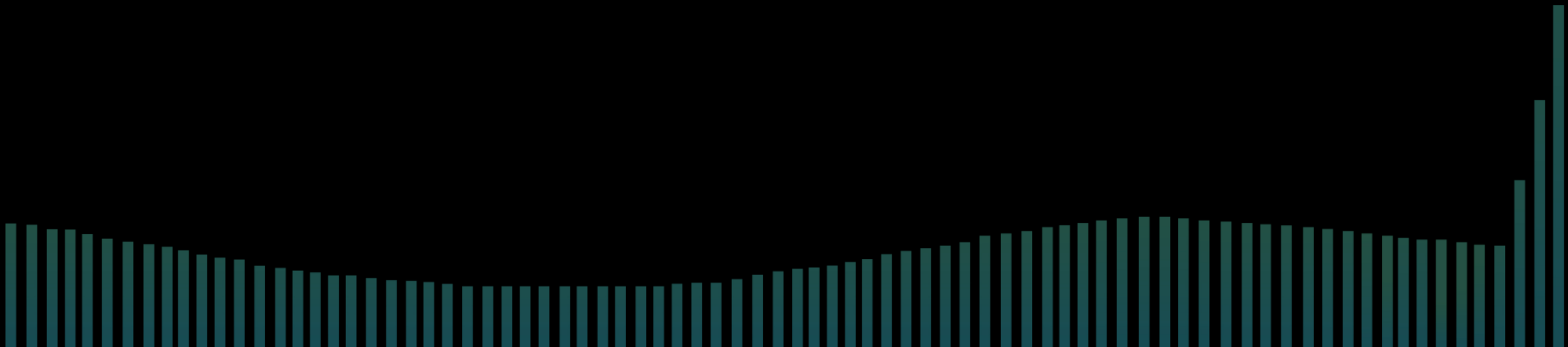
```cpp
// dont_optimize_away.cpp

#include "dont_optimize_away.h"
#include <stdio.h>   // putchar
#include <unistd.h>  // getpid

static auto pid = getpid();

void fake_reference(char* ptr)
{
  if (pid == 0) {
    putchar(*ptr);
  }
}
```



GCC 10 的测试结果（dont_optimize_away）

编译选项	memset:手工循环（时间）
-O0	1:16
-O1	1:4
-O2	1:1

锁和额外函数调用的开销问题……



Linux 的时钟函数：某平台某环境的某次测试结果

函数	精度（微秒）	耗时（时钟周期）
clock	1	~1800
gettimeofday	1	~69
clock_gettime	0.0265(38)	~67
std::chrono::system_clock	0.0274(38)	~68
std::chrono::steady_clock	0.0272(28)	~68
std::chrono::high_resolution_clock	0.0275(20)	~69
rdtsc	0.00965(48)	~24

Windows 的时钟函数：某平台某环境的某次测试结果

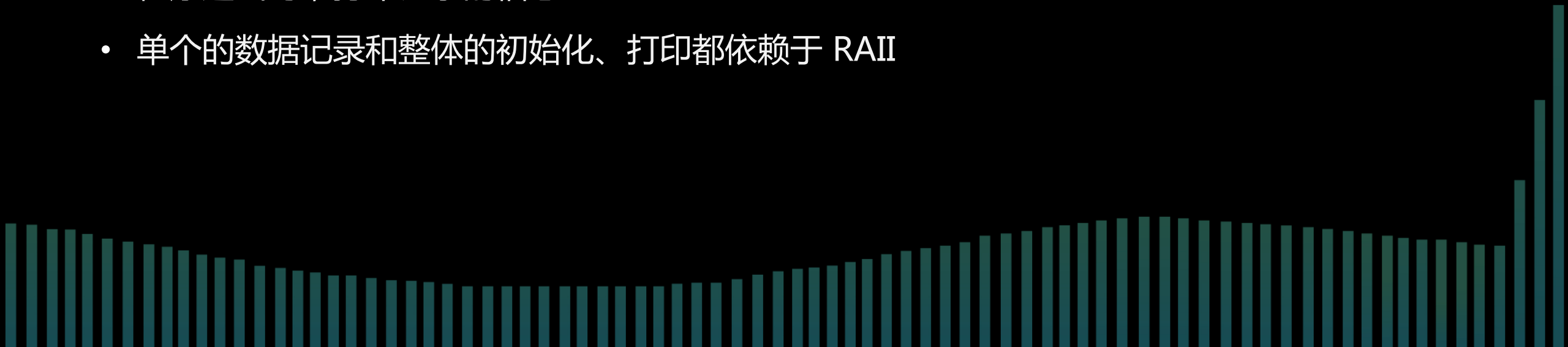
函数	精度（微秒）	耗时（时钟周期）
clock	1（毫秒）	~160
GetTickCount	15.63(49)（毫秒）	~10
GetPerformanceCounter	0.1	~61
GetSystemTimeAsFileTime	15.63(49)（毫秒）	~20
GetSystemTimePreciseAsFileTime	0.1	~100
std::chrono::system_clock	0.1	~100
std::chrono::steady_clock	0.1	~160
std::chrono::high_resolution_clock	0.1	~160
rdtsc	0.00973(93)	~25

RDTSC 指令（Read Time Stamp Counter）

- x86 和 x64 系统上的的首选计时方式
- MSVC 和 GCC 都提供内置函数 `__rdtsc`，开发者不再需要自行用内联汇编实现
- 较新的 CPU 一般提供 constant_tsc 功能，CPU 频率变化不会影响 TSC 计时
- 较新的 CPU 一般提供 nonstop_tsc 功能，休眠不影响 TSC 计时
- 多核 CPU 一般能同步 TSC，但多 CPU 插槽的系统该指令可能仍有不一致问题
- TSC 频率和 CPU 参考主频不一定一致
    - 自行测量或使用 `dmesg | grep 'tsc.*MHz'`

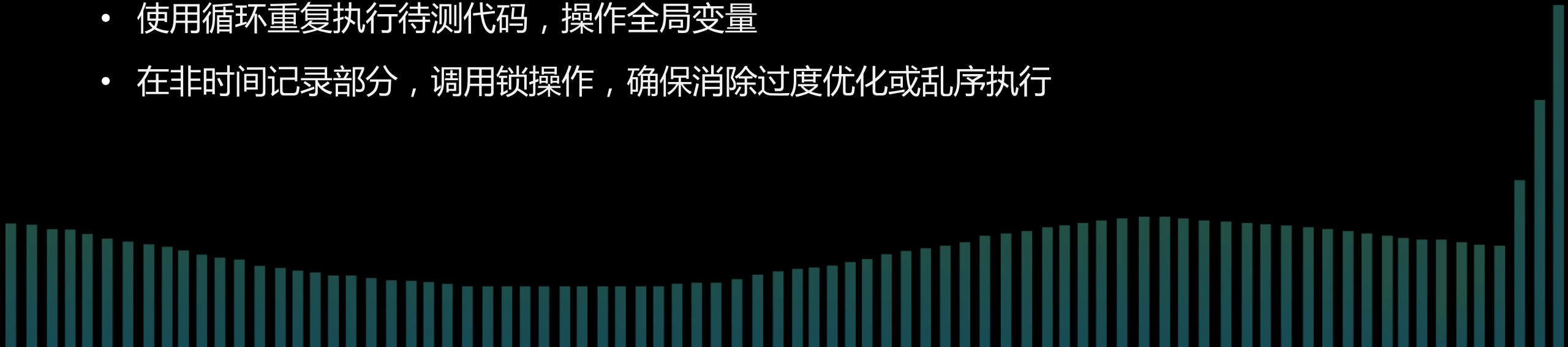
实现一个小性能分析器（profiler）

- 在构造时记录时间
- 在析构时再记录时间，并记录这次函数调用的内部消耗时间到全局变量里
- 程序退出时，打印记录的信息
- 单个的数据记录和整体的初始化、打印都依赖于 RAII



小性能分析器的使用

- 使用枚举 profiled_functions 记录所有需要分析的函数的编号
- 使用全局变量 g_name_map 记录函数编号和名称的映射关系
- 在函数内用宏 PROFILE_CHECK 记录函数的开销
- 使用循环重复执行待测代码，操作全局变量
- 在非时间记录部分，调用锁操作，确保消除过度优化或乱序执行

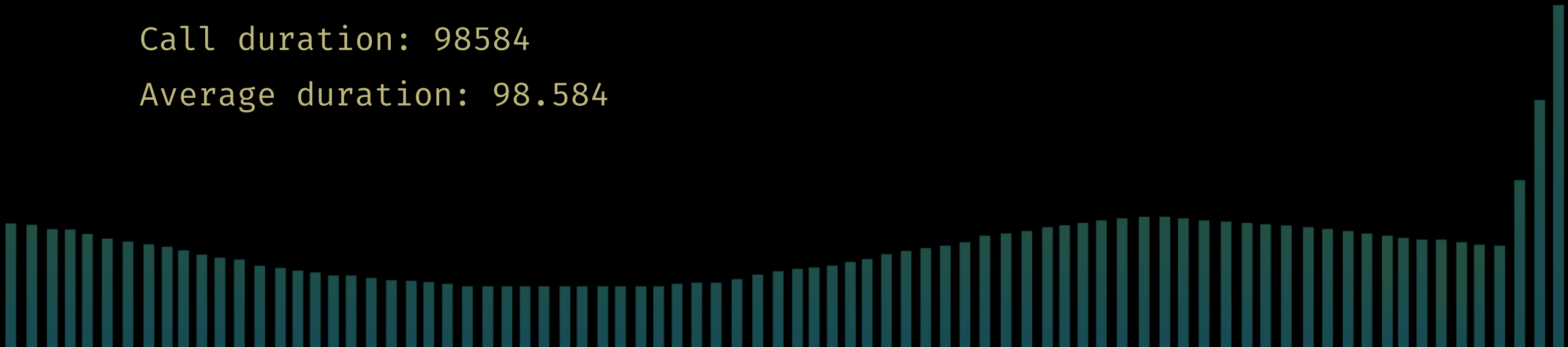


示例：测量时钟的开销

```
enum profiled_functions { PF_MEASURE_CLOCK_OVERHEAD_SINGLE };
name_mapper g_name_map[] = {
    {PF_MEASURE_CLOCK_OVERHEAD_SINGLE, "measure_clock_overhead_single"},
    {-1, NULL}};
void measure_clock_overhead_single()
{
    PROFILE_CHECK(PF_MEASURE_CLOCK_OVERHEAD_SINGLE);
    now = std::chrono::high_resolution_clock::now();
}
…
for (int i = 0; i < LOOPS; ++i) {
    std::lock_guard guard{mutex};
    measure_clock_overhead_single();
}
```

示例：测量时钟的开销

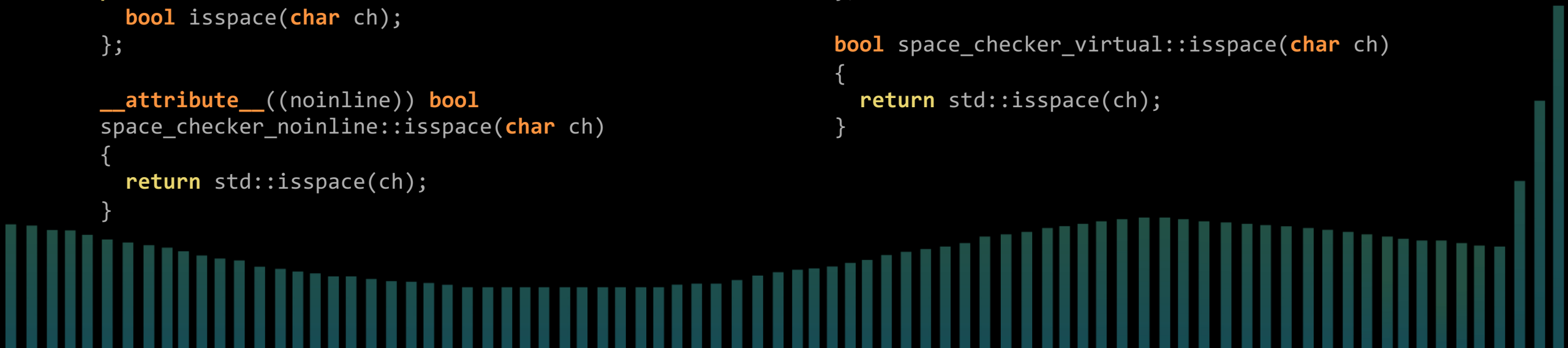
```
high_resolution_clock takes 94 cycles on average
0 measure_clock_overhead_single:
  Call count: 1000
  Call duration: 98584
  Average duration: 98.584
```



示例：测量函数调用和虚函数调用的额外开销

```cpp
class space_checker {
public:
  bool isspace(char ch)
  {
    return std::isspace(ch);
  }
};

class space_checker_noinline {
public:
  bool isspace(char ch);
};

__attribute__((noinline)) bool
space_checker_noinline::isspace(char ch)
{
  return std::isspace(ch);
}
```

```cpp
class space_checker_intf {
public:
  virtual ~space_checker_intf() = default;
  virtual bool isspace(char ch) = 0;
};

class space_checker_virt : public space_checker_intf {
public:
  bool isspace(char ch) override;
};

bool space_checker_virtual::isspace(char ch)
{
  return std::isspace(ch);
}
```



示例：测量函数调用和虚函数调用的额外开销

```
0 count_space:
  Call count: 10000
  Call duration: 1724452
  Average duration: 172.445
1 count_space_noinline:
  Call count: 10000
  Call duration: 2902176
  Average duration: 290.218
2 count_space_virtual:
  Call count: 10000
  Call duration: 4300125
  Average duration: 430.012
```

每次函数调用的开销：

$$\frac{290 - 172}{47} \approx 2.5$$

每次虚函数调用的开销：

$$\frac{430 - 172}{47} \approx 5.5$$

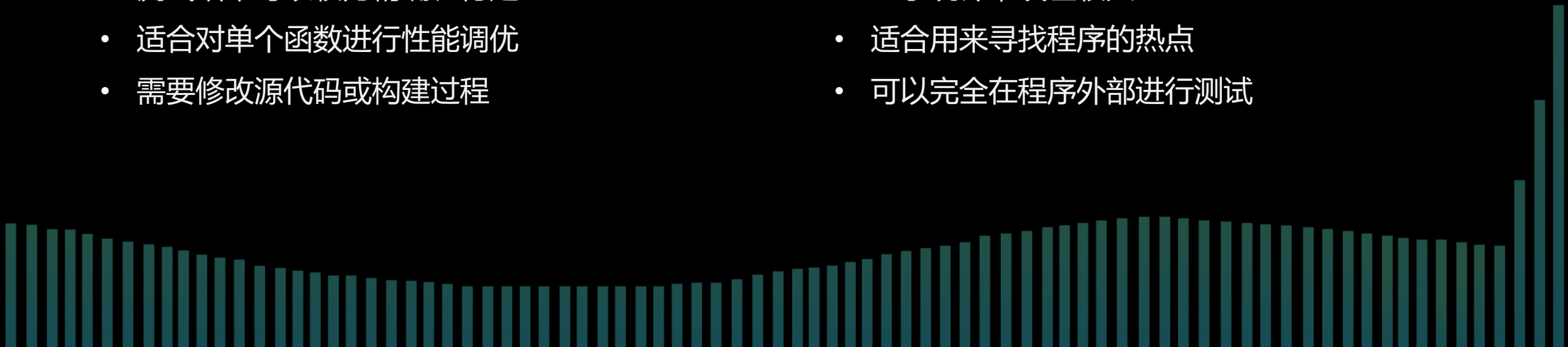
两种性能测试方式

插桩测试

- 开销随测试范围而变
- 插桩本身可能影响测试结果
- 测试结果可以较为精确、稳定
- 适合对单个函数进行性能调优
- 需要修改源代码或构建过程

采样测试

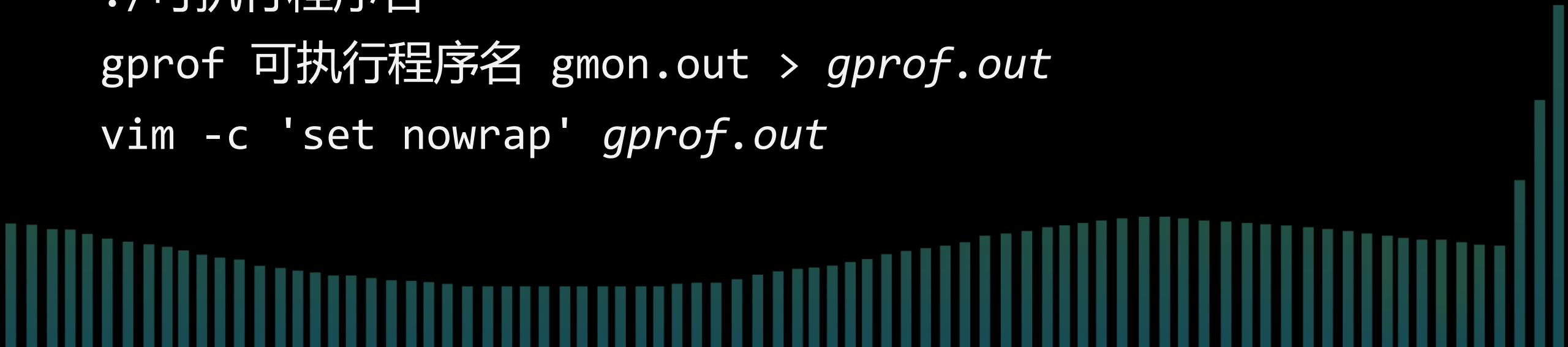
- 总体开销可控
- 一般不影响程序“热点”
- 基于统计，误差较大
- 适合用来寻找程序的热点
- 可以完全在程序外部进行测试



gprof 简介

基本使用

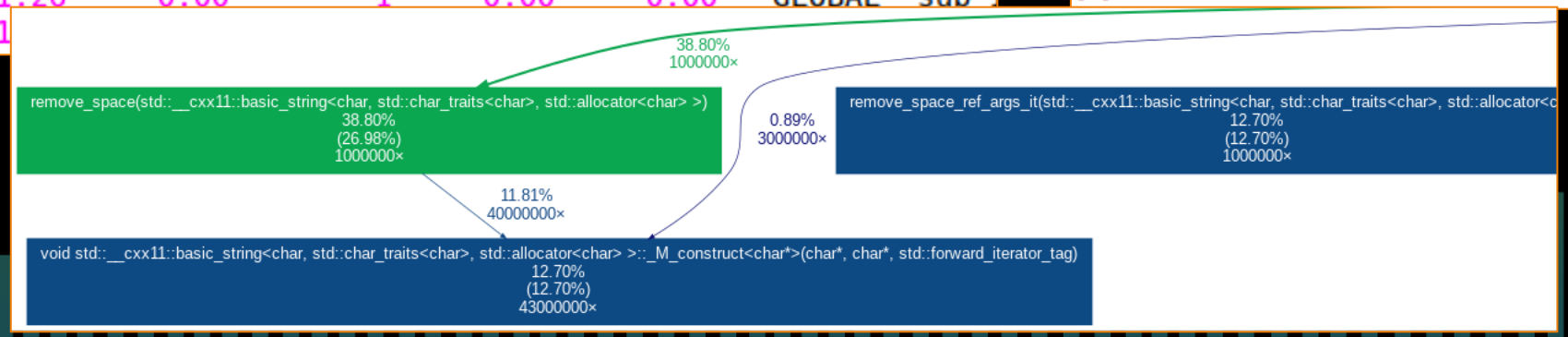
```
g++ -O1 -g -pg …
./可执行程序名
gprof 可执行程序名 gmon.out > gprof.out
vim -c 'set nowrap' gprof.out
```



gprof 的输出

```
Flat profile:

Each sample counts as 0.01 seconds.
  %   cumulative   self              self     total
 time   seconds   seconds    calls  ns/call  ns/call  name
 27.03      0.34     0.34  1000000   340.64   489.76  remove_space(
 12.72      0.50     0.16 43000000     3.73     3.73  void std::__c
 12.72      0.66     0.16  1000000   160.30   160.30  remove_space_
 11.93      0.81     0.15  1000000   150.28   150.28  remove_space_
  9.54      0.93     0.12  1000000   120.23   120.23  remove_space_
  8.75      1.04     0.11  1000000   110.21   110.21  remove_space_
  7.95      1.14     0.10  1000000   100.19   100.19  remove_space_
  5.57      1.21     0.07  1000000    70.13    70.13  remove_space_
  1.59      1.23     0.02  1000000    20.04    20.04  remove_space_
  1.59      1.25     0.02                             main
  0.80      1.26     0.01                             nvwa::fast_mu
  0.00      1.26     0.00        1     0.00     0.00   GLOBAL__sub_
  0.00      1
```

```
index % time    self  children    called     name
                                                 <spontaneous>
[1]     99.2    0.02    1.23                 main [1]
                0.34    0.15 1000000/1000000     remove_space
                0.16    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.15    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.12    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.11    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.10    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.07    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.02    0.00 1000000/1000000     remove_space
                0.01    0.00 3000000/43000000     void std::_
-----------------------------------------------
                0.34    0.15 1000000/1000000     main [1]
[2]     38.8    0.34    0.15 1000000         remove_space(std
                0.15    0.00 40000000/43000000     void std::
-----------------------------------------------
                0.01    0.00 3000000/43000000     main [1]
                0.15    0.00 40000000/43000000     remove_spa
[3]     12.7    0.16    0.00 43000000         void std::__cxx
-----------------------------------------------
                0.16    0.00 1000000/1000000     main [1]
[4]     12.7    0.16    0.00 1000000         remove_space_ref
-----------------------------------------------
                0.15    0.00 1000000/1000000     main [1]
[5]     11.9    0.15    0.00 1000000         remove_space_ref
-----------------------------------------------
                0.12    0.00 1000000/1000000     main [1]
[6]      9.5    0.12    0.00 1000000         remove_space_all
-----------------------------------------------
                0.11    0.00 1000000/1000000     main [1]
[7]      8.7    0.11    0.00 1000000         remove_space_res
```



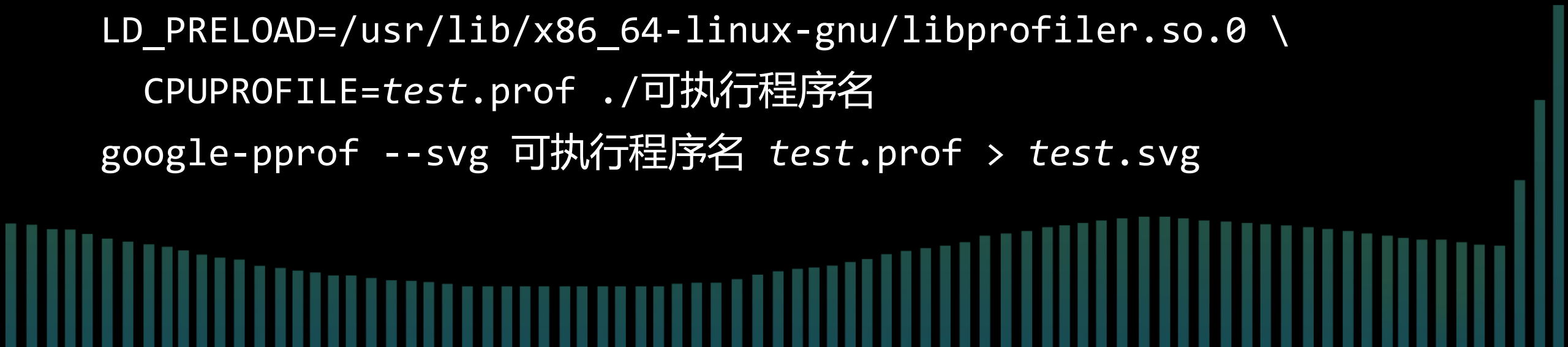
gperftools 简介

安装（Ubuntu）

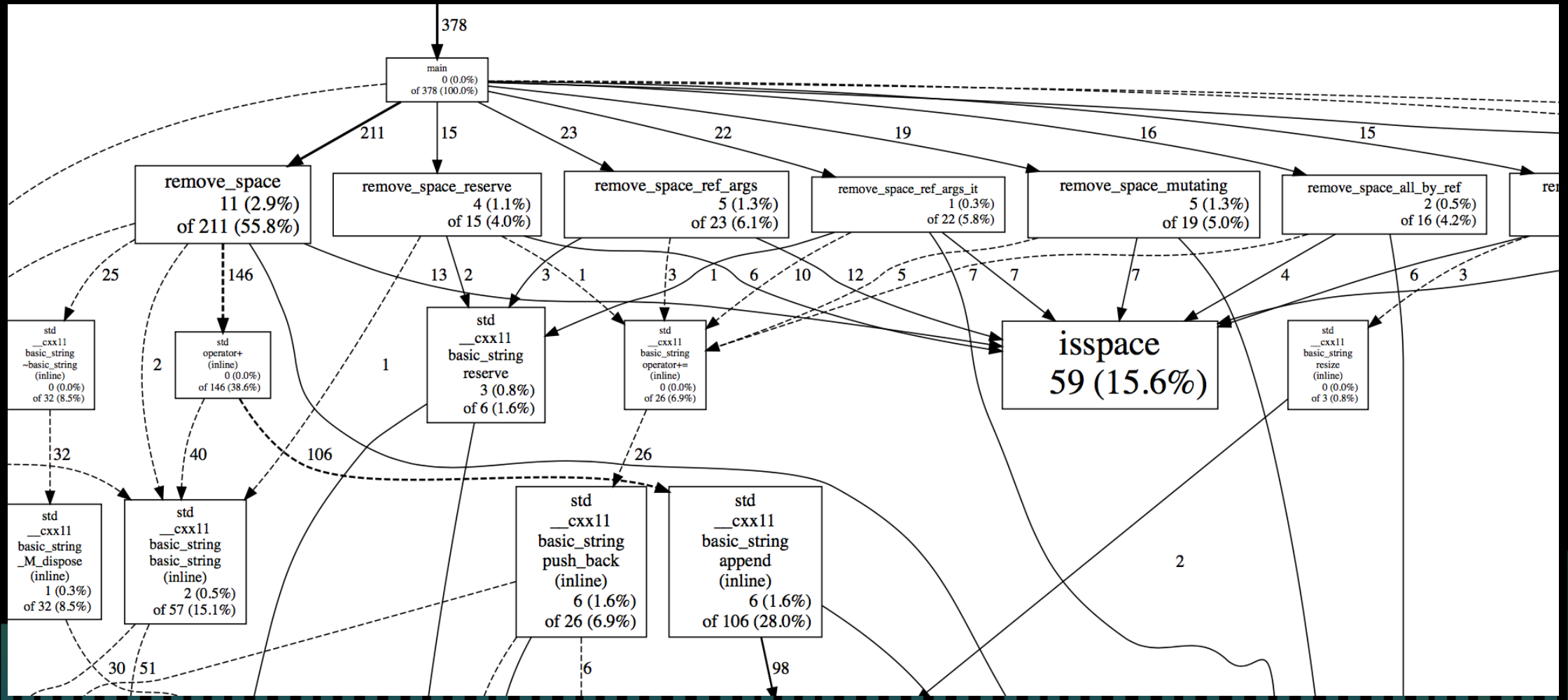
```
sudo apt install google-perftools
```

基本使用

```
LD_PRELOAD=/usr/lib/x86_64-linux-gnu/libprofiler.so.0 \
  CPUPROFILE=test.prof ./可执行程序名
google-pprof --svg 可执行程序名 test.prof > test.svg
```



gperftools 的 SVG 输出



编译器选项 – 汇编代码生成

GCC

- `-S`
- `-masm=intel`（可选）

- 使用 `c++filt` 转换函数名
  - Vim 里 `:%!c++filt`

MSVC

- `/Fa`

浏览器里的汇编代码生成

Compiler Explorer: https://godbolt.org/

- 多种编译器（GCC，Clang，MSVC，等等）
- 多种平台（x86-64，ARM，等等）
- 可自行设定编译（优化）选项
- 友好的过滤设置，一眼看到关注的内容
- 可在线运行，在浏览器里看到文本输出
- 允许使用常用 C++ 库（Boost，Catch2，fmt，GSL，range-v3，spdlog，等等）
- ……

C++

```
1  int x;
2  int y;
3
4  int main()
5  {
6      x = y + 1;
7      y = x + 2;
8  }
9
```

x86-64 gcc 4.4.7 -O2

```
1  main:
2          mov     eax, DWORD PTR y[rip]
3          lea     edx, [rax+1]
4          add     eax, 3
5          mov     DWORD PTR y[rip], eax
6          xor     eax, eax
7          mov     DWORD PTR x[rip], edx
8          ret
9  x:
10         .zero   4
11 y:
12         .zero   4
```

未过滤的 GCC 汇编输出超过 30 行

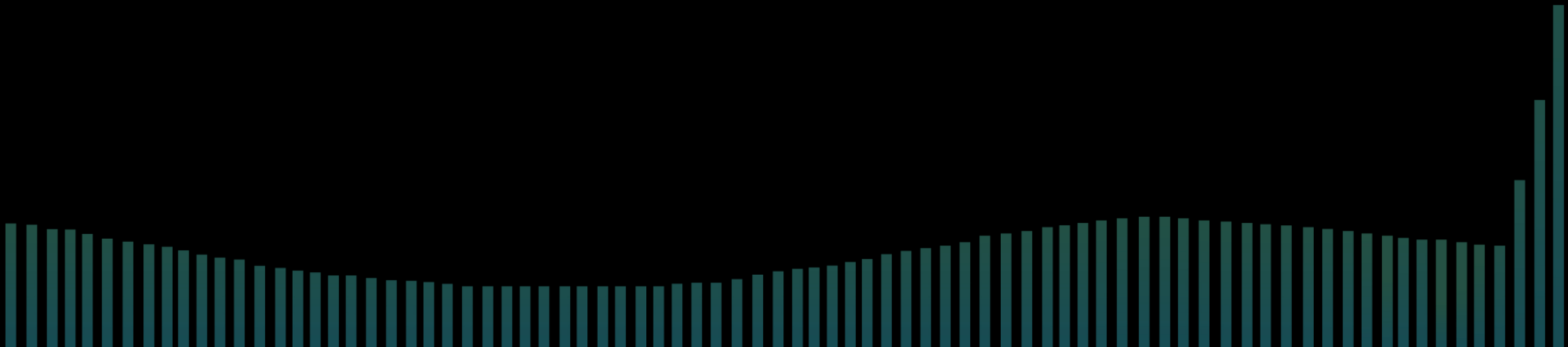
Compiler Explorer 示例

- C 的 Hello world： https://godbolt.org/z/vns4n8
- C++ 的 Hello world： https://godbolt.org/z/bP9KTa
- 简单循环和 `strlen`： https://godbolt.org/z/5sb8bj
- Ranges 和编译期优化：https://godbolt.org/z/foj6bq

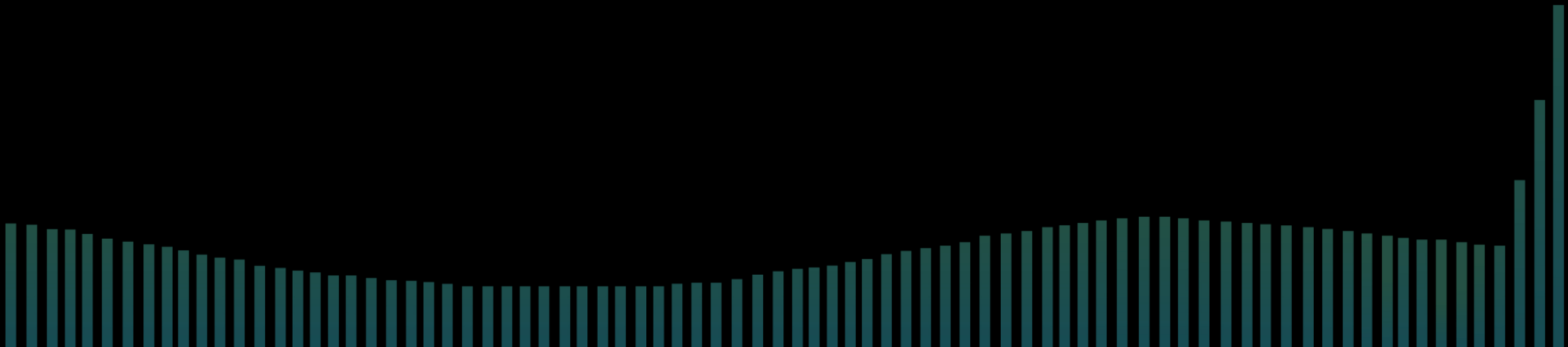
编译器选项 – 优化级别

- -O0（默认）：不开启优化，方便功能调试
- -Og：方便调试的优化选项（比 -O1 更保守）
- -O1：保守的优化选项
  - 当前 GCC 上打开了 45 个优化选项
- -Os：产生小代码的优化选项（比 -O2 更保守，并往产生较小代码的方向优化）
- -O2：常用的发布优化选项（对错误编码容忍度低）
  - 当前 GCC 上比 -O1 额外打开 48 个优化选项
  - 包括自动内联函数和严格别名规则
- -O3：较为激进的优化选项（对错误编码容忍度最低）
  - 当前 GCC 上比 -O2 额外打开 16 个优化选项
- -Ofast：打开可导致不符合 IEEE 浮点数等标准的性能优化选项

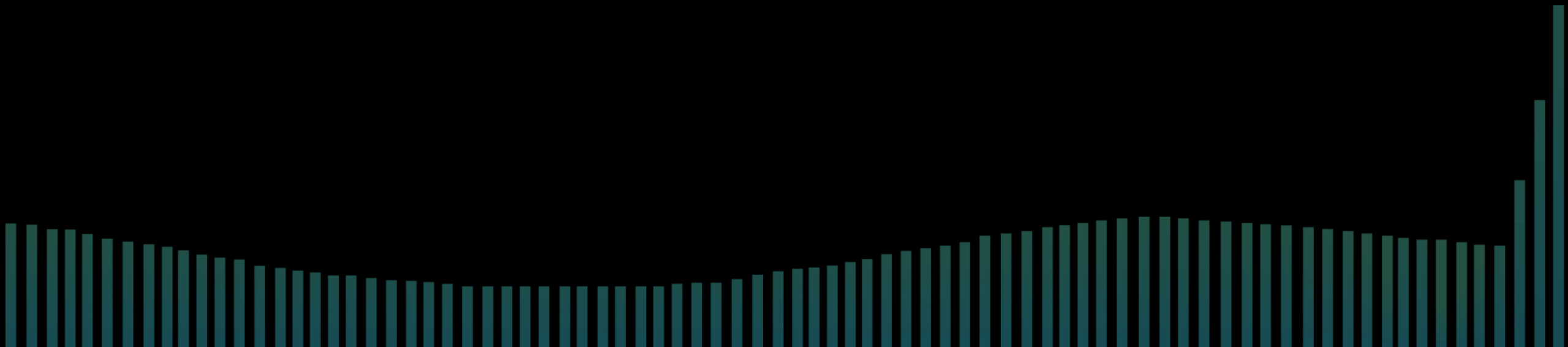
std::sort 比 qsort 更快！



快多少？



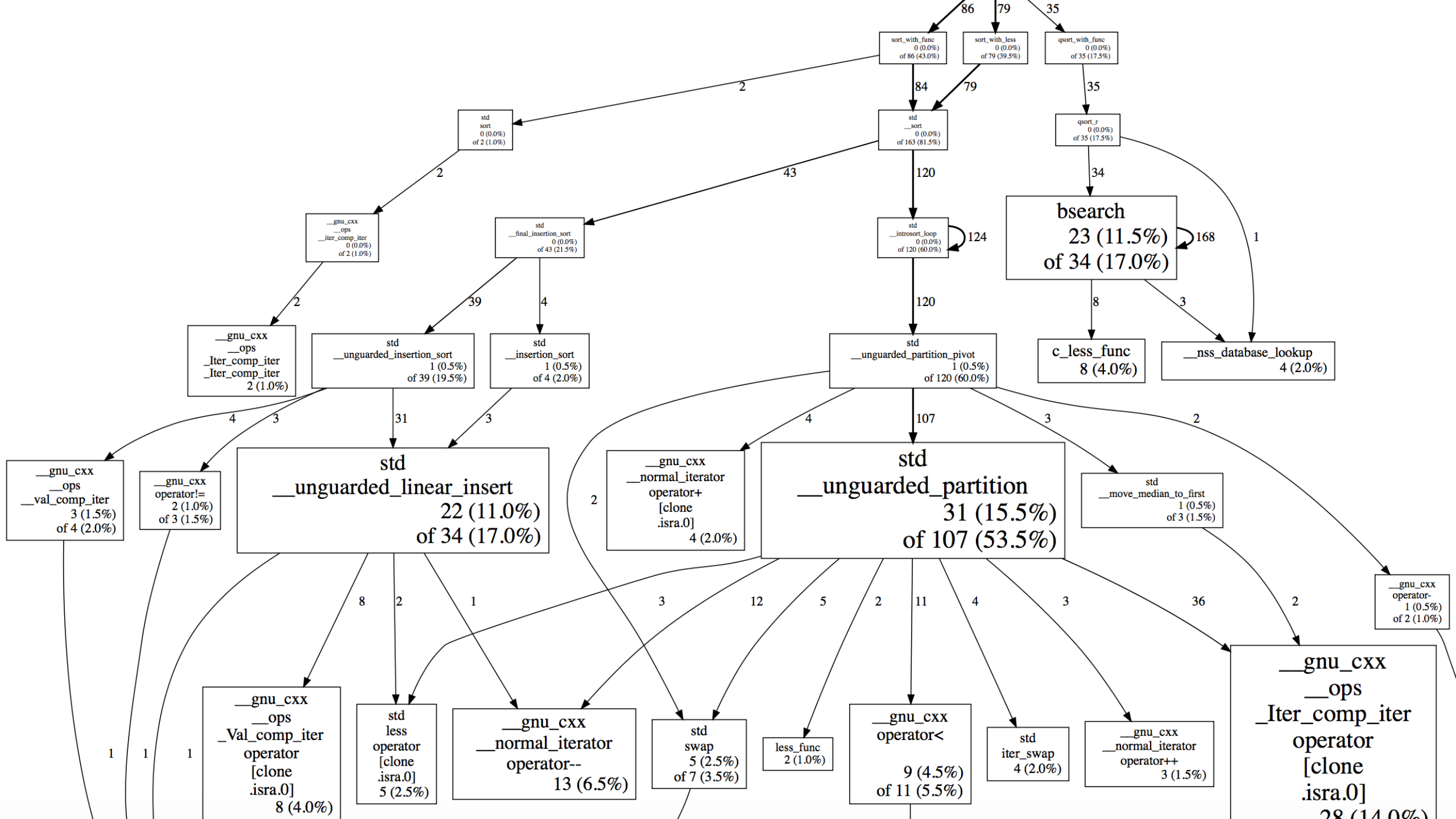
It depends. . . .



优化和内联的影响

	-O0	-O2 -fno-inline	-O2	-O2 对 -O0 的提升
sort_with_less	340981(1717)	197830(675)	24414(333)	14x
sort_with_func	334601(1843)	209241(609)	46384(220)	7.2x
qsort_with_func	133801(1814)	87014(790)	85323(535)	1.6x

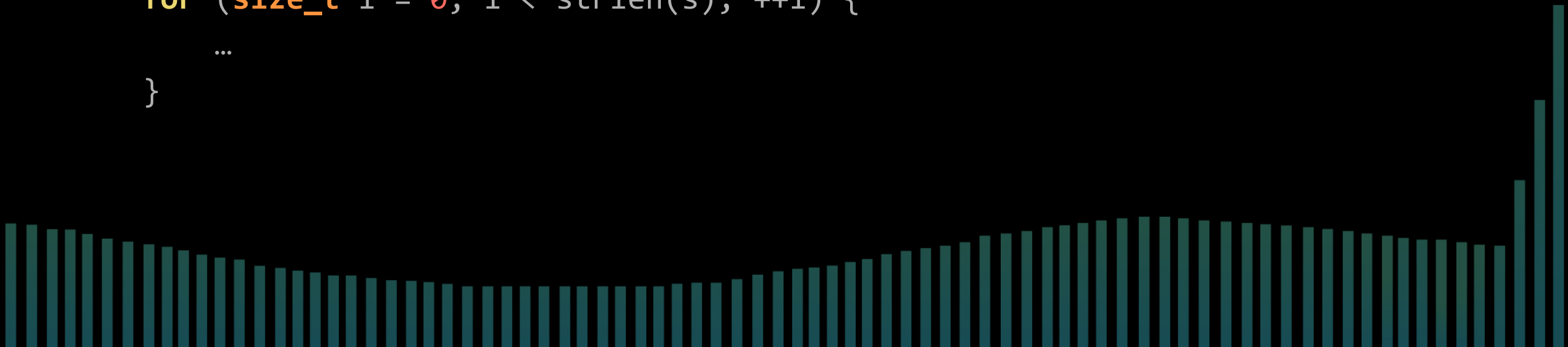
单单内联即可产生一个数量级的性能差异！


sort_with_func
0 (0.0%)
of 86 (43.0%)
sort_with_less
0 (0.0%)
of 79 (39.5%)
qsort_with_func
0 (0.0%)
of 35 (17.5%)
std
sort
0 (0.0%)
of 2 (1.0%)
std
__sort
0 (0.0%)
of 163 (81.5%)
qsort_r
0 (0.0%)
of 35 (17.5%)
__gnu_cxx
__ops
__iter_comp_iter
0 (0.0%)
of 2 (1.0%)
std
__final_insertion_sort
0 (0.0%)
of 43 (21.5%)
std
__introsort_loop
0 (0.0%)
of 120 (60.0%)
bsearch
23 (11.5%)
of 34 (17.0%)
__gnu_cxx
__ops
_Iter_comp_iter
_Iter_comp_iter
2 (1.0%)
std
__unguarded_insertion_sort
1 (0.5%)
of 39 (19.5%)
std
__insertion_sort
1 (0.5%)
of 4 (2.0%)
std
__unguarded_partition_pivot
1 (0.5%)
of 120 (60.0%)
c_less_func
8 (4.0%)
__nss_database_lookup
4 (2.0%)
__gnu_cxx
__ops
__val_comp_iter
3 (1.5%)
of 4 (2.0%)
__gnu_cxx
operator!=
2 (1.0%)
of 3 (1.5%)
std
__unguarded_linear_insert
22 (11.0%)
of 34 (17.0%)
__gnu_cxx
__normal_iterator
operator+
[clone
.isra.0]
4 (2.0%)
std
__unguarded_partition
31 (15.5%)
of 107 (53.5%)
std
__move_median_to_first
1 (0.5%)
of 3 (1.5%)
__gnu_cxx
operator-
1 (0.5%)
of 2 (1.0%)
__gnu_cxx
__ops
_Val_comp_iter
operator
[clone
.isra.0]
8 (4.0%)
std
less
operator
[clone
.isra.0]
5 (2.5%)
__gnu_cxx
__normal_iterator
operator--
13 (6.5%)
std
swap
5 (2.5%)
of 7 (3.5%)
less_func
2 (1.0%)
__gnu_cxx
operator<
9 (4.5%)
of 11 (5.5%)
std
iter_swap
4 (2.0%)
__gnu_cxx
__normal_iterator
operator++
3 (1.5%)
__gnu_cxx
__ops
_Iter_comp_iter
operator
[clone
.isra.0]
28 (14.0%)

循环优化（热点优化）

- 循环会放大代码中的低效率
- 把不必要的反复执行的代码提到循环外面

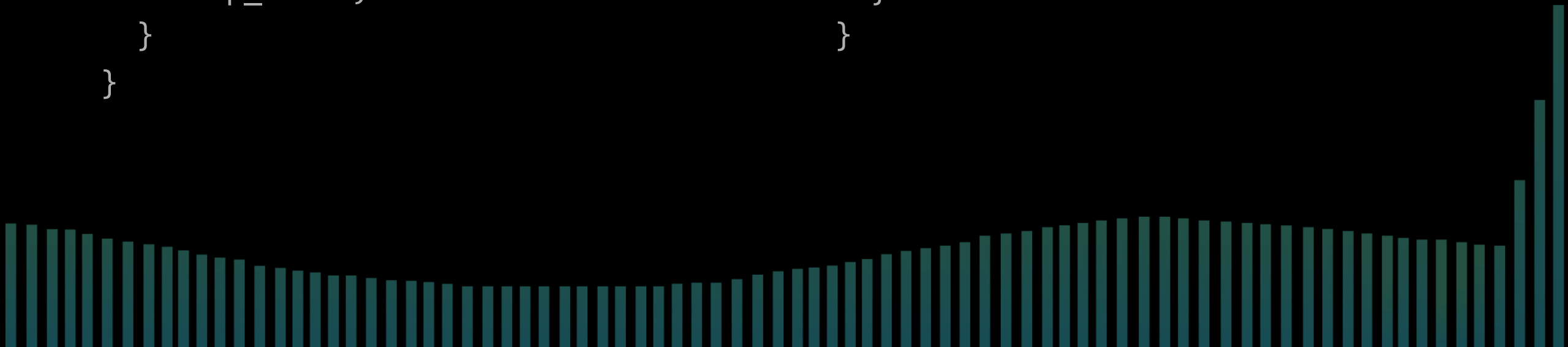
```
for (size_t i = 0; i < strlen(s); ++i) {
    …
}
```



优化 I – 长度不变的情况

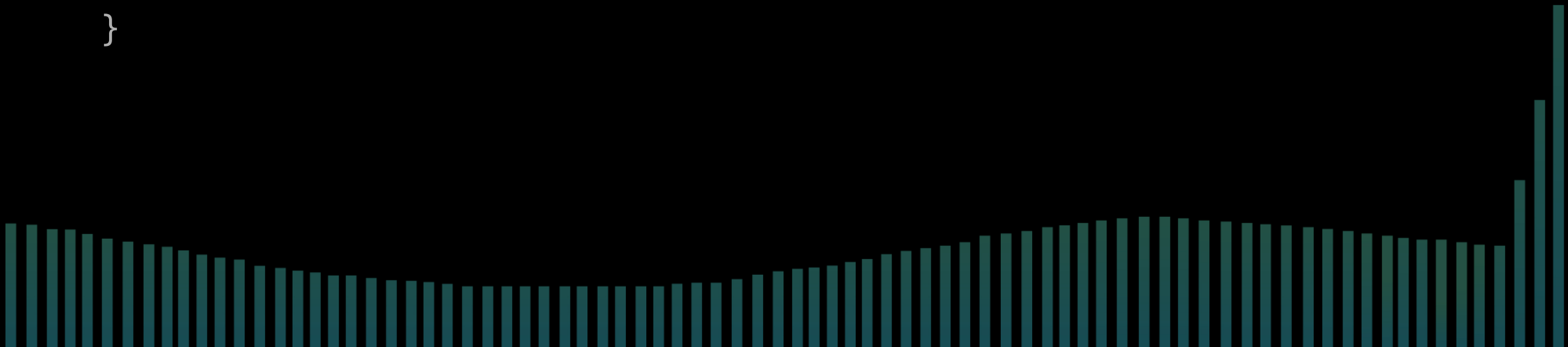
```
int sp_count = 0;
for (size_t i = 0,
       len = strlen(s);
     i < len; ++i) {
  if (isspace(s[i])) {
    ++sp_count;
  }
}
```

```
int sp_count = 0;
// 如果 s 是字符数组或 string
for (char ch : s) {
  if (isspace(ch)) {
    ++sp_count;
  }
}
```



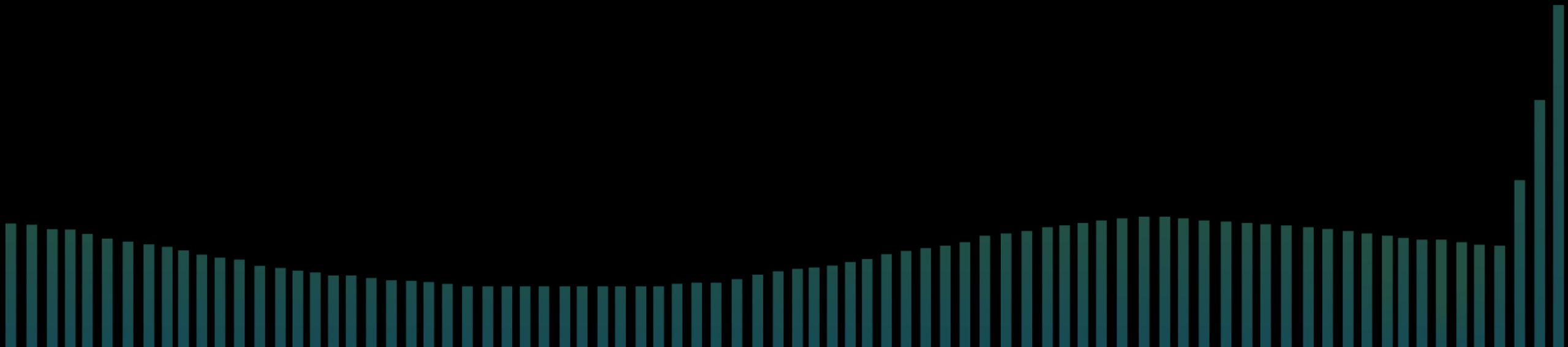
优化 II – 长度可变的情况

```
for (size_t i = 0, len = strlen(s); i < len; ++i) {
    if (isspace(s[i])) {
        memmove(&s[i], &s[i + 1], len - i);
        len--;
    }
}
```



如果使用 std::string 的话

```
for (auto it = s.begin(); it != s.end(); ++it) {
    if (isspace(*it)) {
        s.erase(it);
    }
}
```



注意隐藏开销

- 构造
- 析构
- 值参数的拷贝构造
- ……

```
std::string remove_space(std::string s)
{
    …
}
```

对象参数的一般原则

- 如果不修改对象的话，使用 const Obj&
- 如果需要修改对象的话，使用 Obj&
- 如果需要在对象的新拷贝上进行操作的话，使用 Obj
  - 可以利用对象移动的可能性

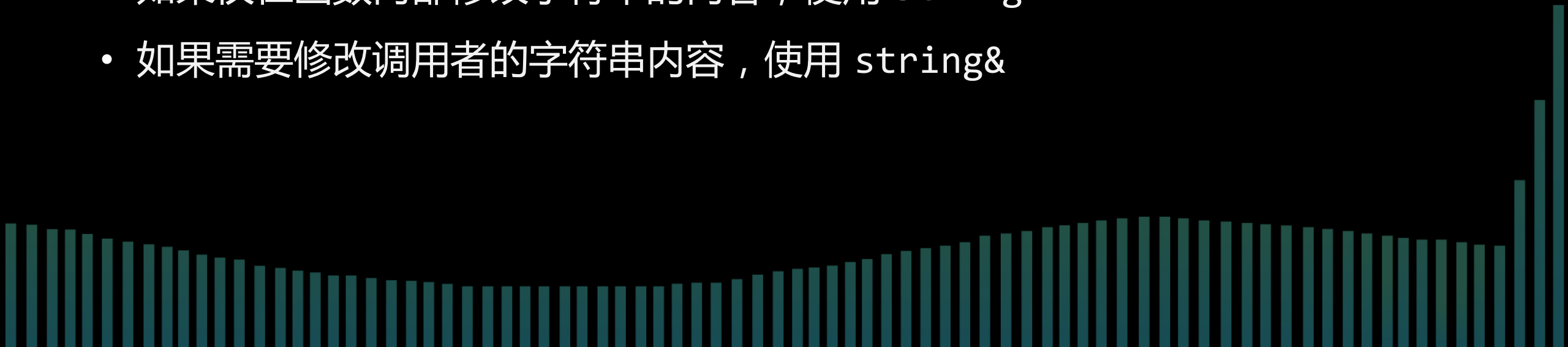
```
// 如果返回新对象的话
string remove_space(const string& s);
```

```
// 如果修改既有对象的话
void remove_space(std::string& s);
```

```
// 从传入的对象生成结果
string greet(string name)
{
  name += ", nice to meet your!";
  return name;
}
```

string 接口使用建议

- 不推荐使用 `const string&`（除非调用方确保有现成的 `string` 对象）
- 如果不需要修改字符串内容，使用 `string_view` 或 `const char*`
- 如果仅在函数内部修改字符串的内容，使用 `string`
- 如果需要修改调用者的字符串内容，使用 `string&`



消除不必要的反复构造和析构

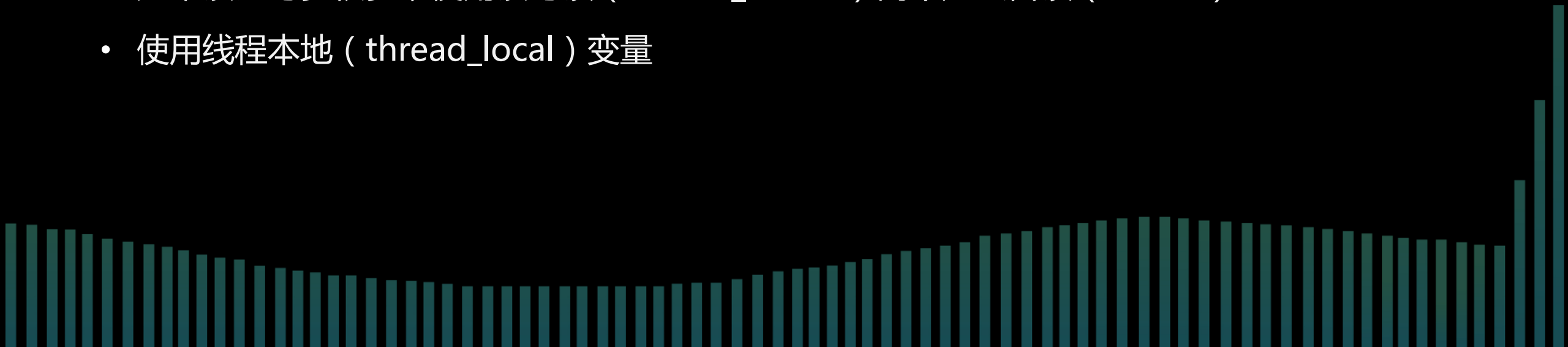
```
for (…) {
  std::string s;
  s += "Hi, ";
  …
  s += "Best regards,";
  process(s);
}
```

```
std::string s;
for (…) {
  s.clear();
  s += "Hi, ";
  …
  s += "Best regards,";
  process(s);
}
```

大幅减少了对内存管理器的调用次数

多线程优化

- 多线程加锁和竞争是性能杀手
- 能使用 atomic 就不要使用 mutex
- 如果读比写多很多，使用读写锁（shared_mutex）而不是独占锁（mutex）
- 使用线程本地（thread_local）变量

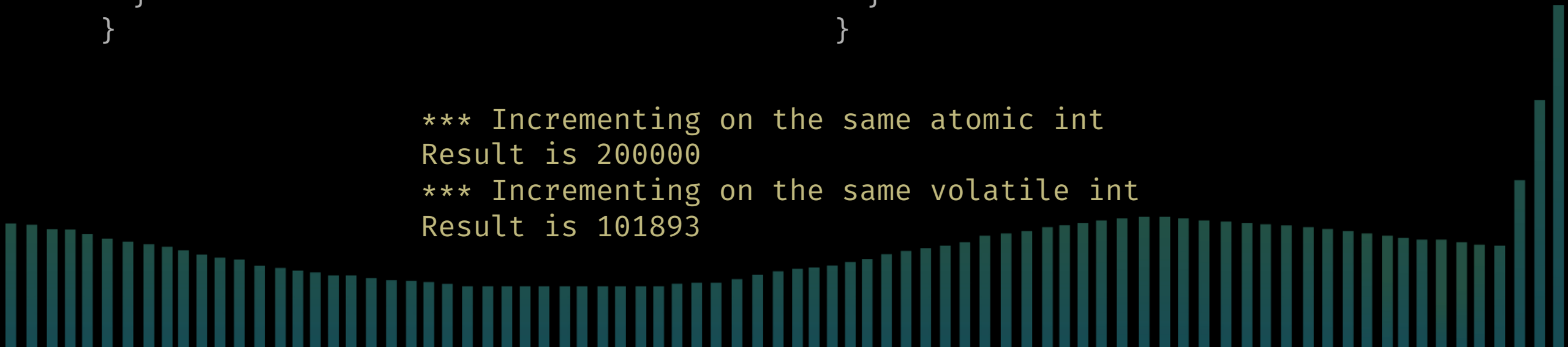


volatile vs atomic

```
std::atomic<int> a;

void increment_atomic(
  std::atomic<int>& n)
{
  for (int i = 0; i < LOOPS; ++i) {
    ++n;
  }
}
```

```
volatile int v;

void increment_volatile(
  volatile int& n)
{
  for (int i = 0; i < LOOPS; ++i) {
    ++n;
  }
}
```

```
*** Incrementing on the same atomic int
Result is 200000
*** Incrementing on the same volatile int
Result is 101893
```



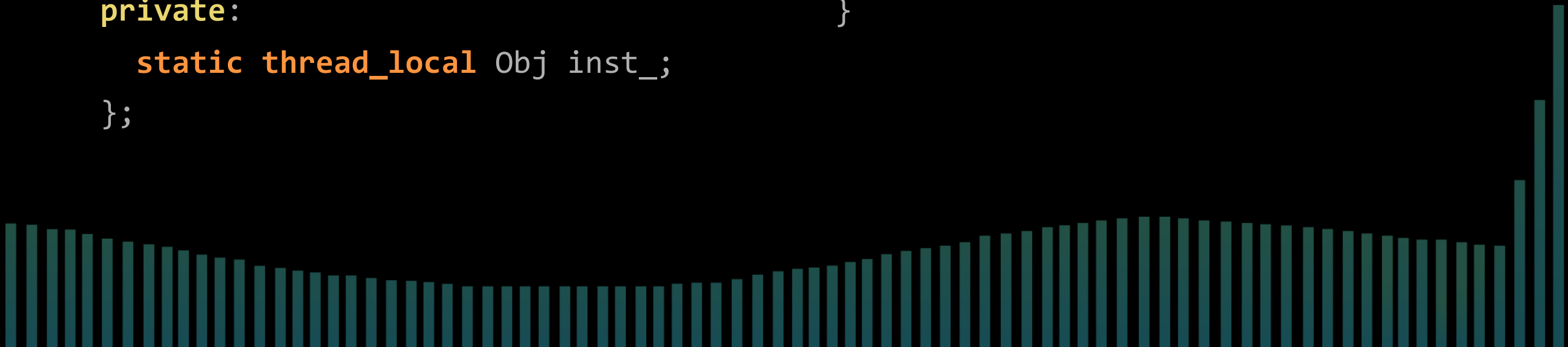
简单增一、原子增一和加锁增一

	单线程（时钟周期数）	双线程（时钟周期数）
increment_volatile	~7	~7
increment_atomic	~19	~116
increment_with_lock	~72	~18000

thread_local 成员变量

```
class Obj {
  …
public:
  static Obj& get_instance();

private:
  static thread_local Obj inst_;
};
```

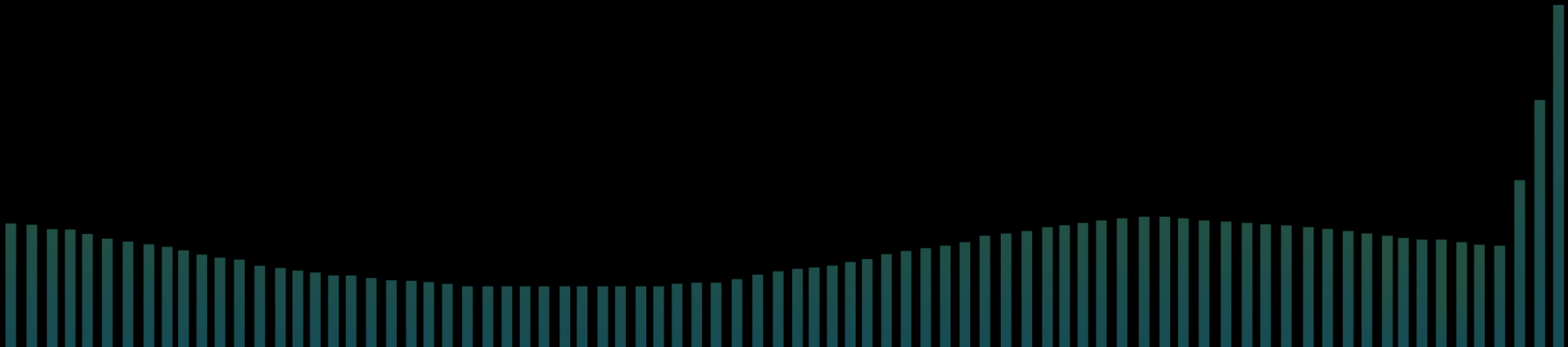
```
thread_local Obj Obj::inst_;

Obj& Obj::get_instance()
{
  return inst_;
}
```



thread_local 变量

```
class Obj {
  …
public:
  static Obj& get_instance();
};
```

```
Obj& Obj::get_instance()
{
  thread_local Obj inst;
  return inst;
}
```



算数表达式优化

$$x \cdot a \cdot b \cdot c = x \cdot (a \cdot b \cdot c)?$$

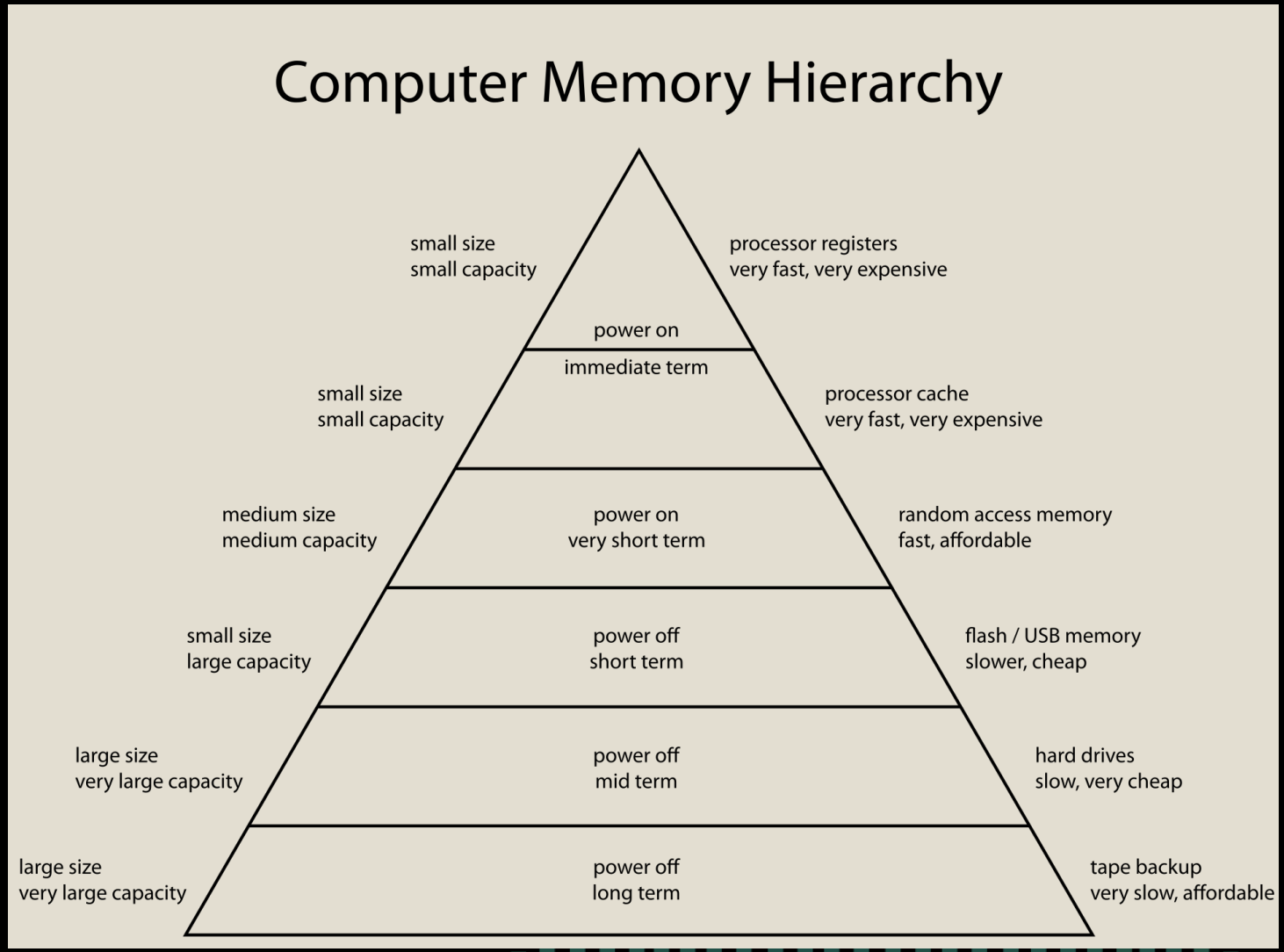
https://godbolt.org/z/3Y15Es

浮点数表达式优化

- 把常量归并到一起
  - $a \cdot x \cdot b \Longrightarrow (a \cdot b) \cdot x$
- 手工简化表达式
  - $a \cdot x^2 + b \cdot x + c \Longrightarrow (a \cdot x + b) \cdot x + c$
- 除法优化
  - $x \,/\, a \Longrightarrow x \cdot (1 \,/\, a)$
- 注意在有硬件浮点运算单元的机器上可能 double 比 float 要快
- 关键代码上使用性能测试进行检查

缓存和性能

- 内存分级和访问性能
- 相邻数据访问较快
- 占用内存少 == 快
- 缓存竞争问题

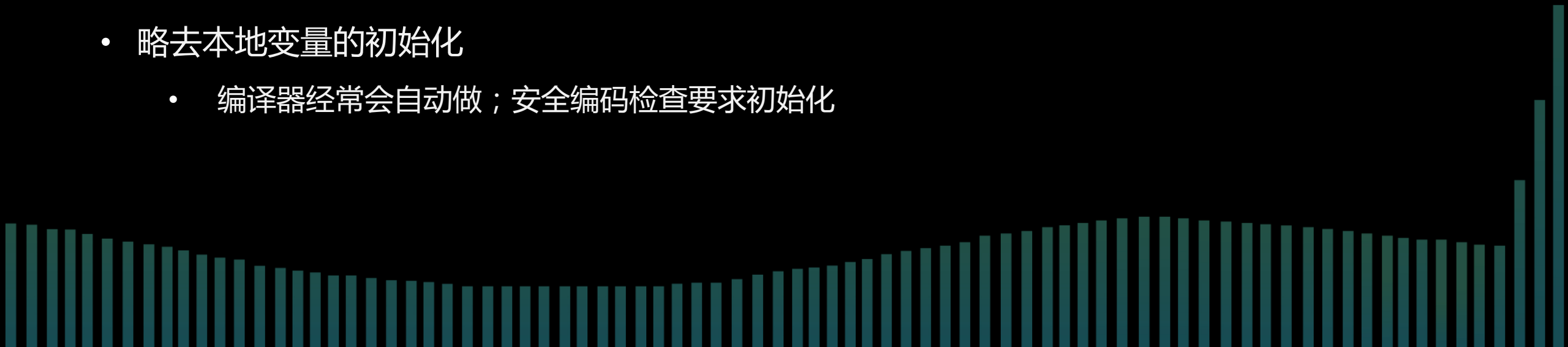


矩阵转置中的缓存竞争

矩阵大小	内存占用（KB）	每元素耗时（时钟周期）	优化后耗时（时钟周期）
63x63	31	1.2	—
64x64	32	1.2	—
65x65	33	1.2	—
127x127	126	1.3	—
128x128	128	4.8	1.4
129x129	130	1.3	—
255x255	508	1.7	—
256x256	512	11.6	1.9
257x257	516	1.8	—
511x511	2040	2.5	—
512x512	2048	16.3	3.6
513x513	2056	3.9	—

不需要的优化

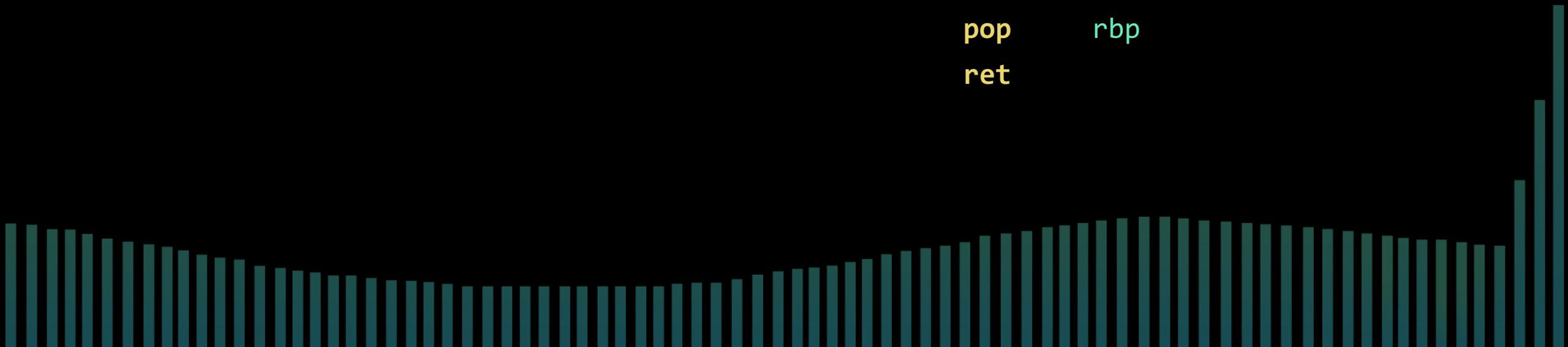
- 把 `x * 8` 写成 `x << 3`；或把 `x * 5` 写成 `(x << 2) + x`
  - 变乘为移位和加法是 GCC 在 `-O0` 时就会做的！
- 提取公共表达式
  - 编译器会自动做
- 略去本地变量的初始化
  - 编译器经常会自动做；安全编码检查要求初始化



x * 8 的非优化编译结果

```cpp
int calculate(int x)
{
  return x * 8;
}
```

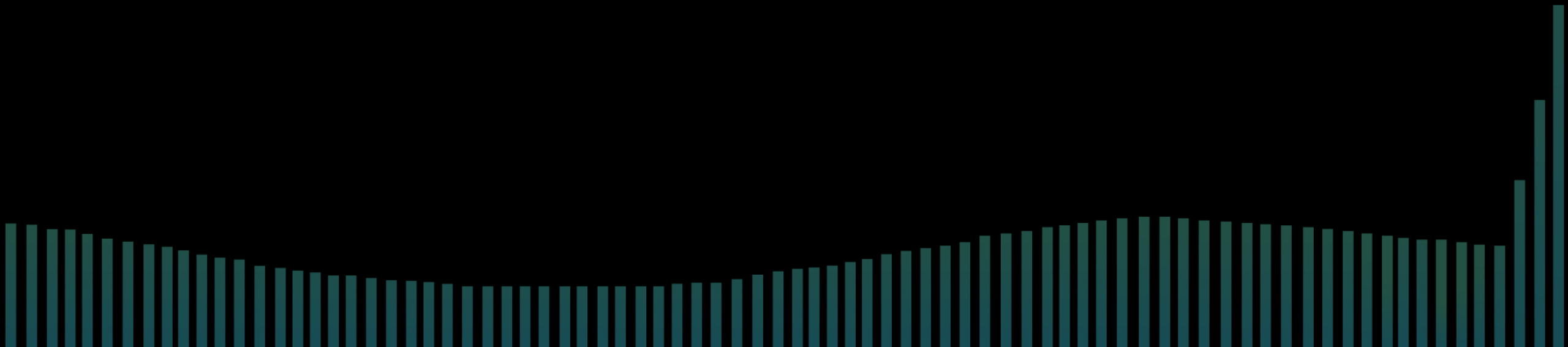
```asm
calculate(int):
        push    rbp
        mov     rbp, rsp
        mov     DWORD PTR [rbp-4], edi
        mov     eax, DWORD PTR [rbp-4]
        sal     eax, 3
        pop     rbp
        ret
```



x * 5 的优化编译结果

```cpp
int calculate(int x)
{
  return x * 5;
}
```

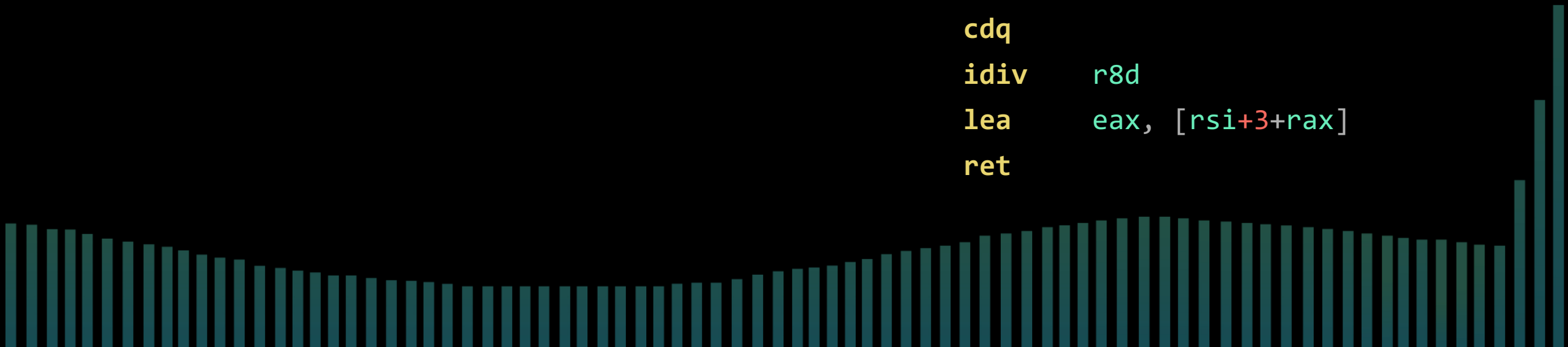
```asm
calculate(int):
        lea     eax, [rdi+rdi*4]
        ret
```



公共表达式提取示例

```
int calculate(int x, int y, int z)
{
  int a = (x * x + y * y) + 3;
  int b = (x * x + y * y) / z;
  return a + b;
}
```

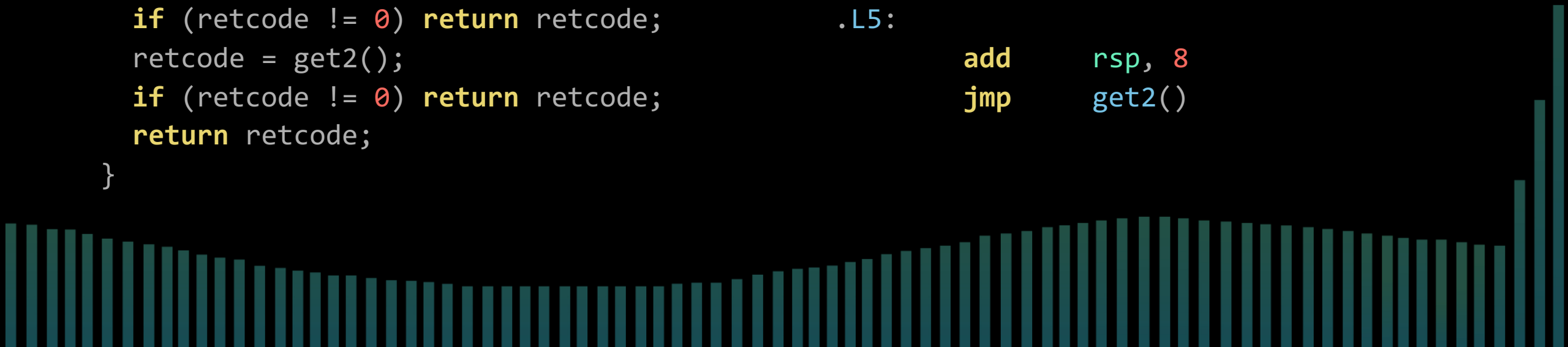
```
calculate(int, int, int):
        imul    edi, edi
        mov     r8d, edx
        imul    esi, esi
        add     esi, edi
        mov     eax, esi
        cdq
        idiv    r8d
        lea     eax, [rsi+3+rax]
        ret
```



消除无用的初始化 I

```
int get1();
int get2();

int test()
{
  int retcode = 0;
  retcode = get1();
  if (retcode != 0) return retcode;
  retcode = get2();
  if (retcode != 0) return retcode;
  return retcode;
}
```

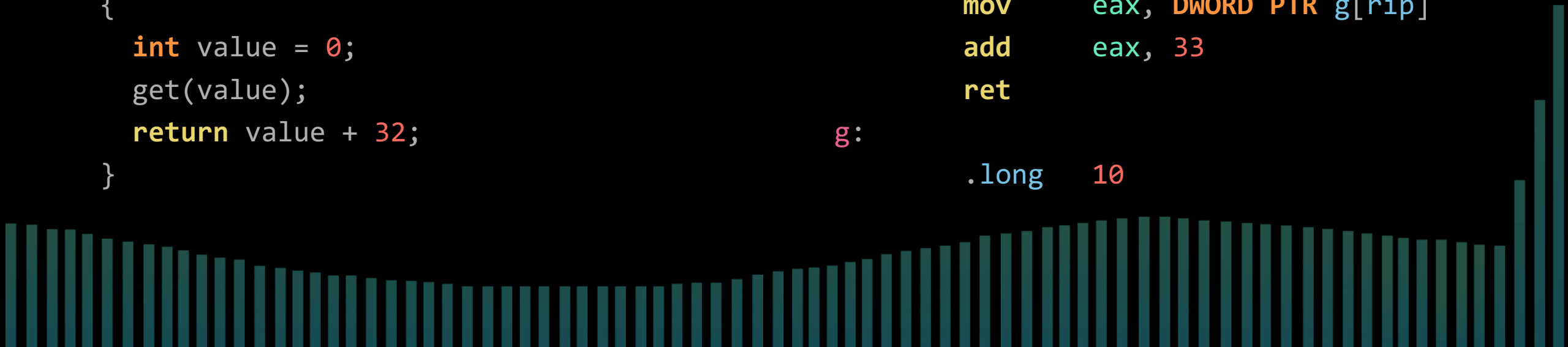
```
test():
        sub     rsp, 8
        call    get1()
        test    eax, eax
        je      .L5
        add     rsp, 8
        ret
.L5:
        add     rsp, 8
        jmp     get2()
```



消除无用的初始化 II

```
int g = 10;
void get(int& x)
{
  x = g + 1;
}
int test()
{
  int value = 0;
  get(value);
  return value + 32;
}
```

```
get(int&):
        mov     eax, DWORD PTR g[rip]
        add     eax, 1
        mov     DWORD PTR [rdi], eax
        ret
test():
        mov     eax, DWORD PTR g[rip]
        add     eax, 33
        ret
g:
        .long   10
```



无法消除初始化的情况

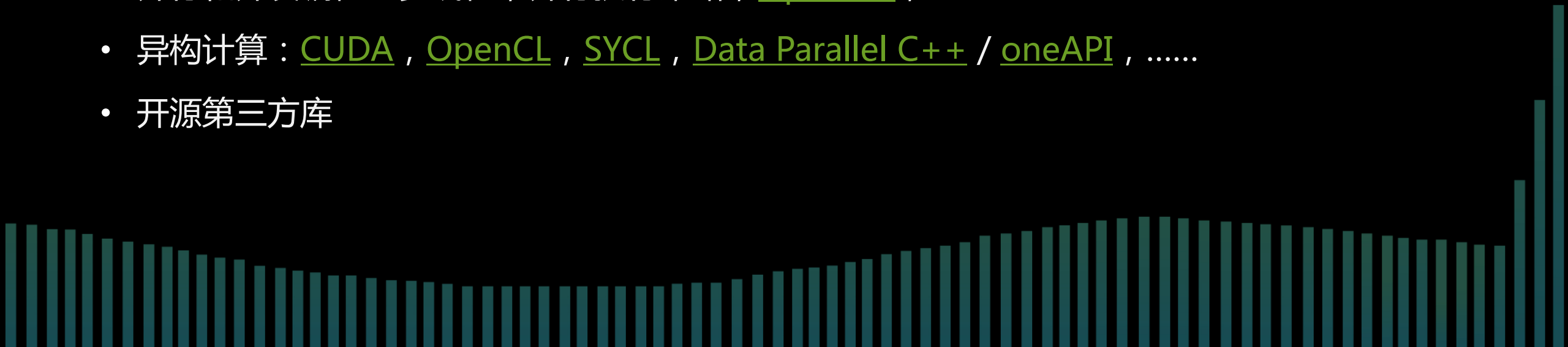
```cpp
void get(int& x);

int test()
{
  int value = 0;
  get(value);
  return value + 32;
}
```

```
test():
        sub     rsp, 24
        lea     rdi, [rsp+12]
        mov     DWORD PTR [rsp+12], 0
        call    get(int&)
        mov     eax, DWORD PTR [rsp+12]
        add     rsp, 24
        add     eax, 32
        ret
```

C++ 在语言上不区分出参和入参的结果

其他性能调优手段

- C++：控制流优化，输入输出优化，内存优化，算法优化，……
- 工具：Intel VTune Profiler，perf，……
- 编译器：Intel C++ Compiler，Clang，……
- 并行和并发编程：多线程，并行执行策略，OpenMP，……
- 异构计算：CUDA，OpenCL，SYCL，Data Parallel C++ / oneAPI，……
- 开源第三方库



参考资料

- Agner Fog, “Software optimization resources”. https://www.agner.org/optimize/.
- Kurt Guntheroth, Optimized C++. O’Reilly, 2016.

需要鉴别资料中的过时信息和错误

代码

https://github.com/adah1972/cpp_summit_2020