Московский Авиационный Институт

(Национальный Исследовательский Университет)

Институт №8 “Компьютерные науки и прикладная математика”

Кафедра №806 “Вычислительная математика и программирование”

Лабораторная работа №2 по курсу

«Операционные системы»

Группа: М8О-215Б-23

Студент: Самарский Я.В.

Преподаватель: Миронов Е.С.

Оценка: _____

Дата: 14.11.24

Москва, 2024

Постановка задачи

Вариант 5.

Составить программу на языке Си, обрабатывающую данные в многопоточном режиме. При обработки использовать стандартные средства создания потоков операционной системы (Windows/Unix). Ограничение максимального количества потоков, работающих в один момент времени, должно быть задано ключом запуска вашей программы.

Отсортировать массив целых чисел при помощи четно-нечетной сортировки Бетчера

Общий метод и алгоритм решения

Использованные системные вызовы:

- pthread_create(pthread_t *thread, const pthread_attr_t *attr, void *(*start_routine) (void *), void *arg); – создает новый поток, возвращает 0 при успехе
- pthread_join(pthread_t thread, void **retval); - ожидает завершения указанного потока. Блокирует вызывающий поток до завершения целевого потока
- pthread_mutex_init(&thread_count_mutex, nullptr); - инициализация мьютекса для синхронизации доступа к глобальной переменной current_threads.
- pthread_mutex_lock(&thread_count_mutex); - блокировка мьютекса для безопасного доступа к переменной current_threads.
- pthread_mutex_unlock(&thread_count_mutex); - разблокировка мьютекса после завершения доступа к переменной current_threads.
- pthread_mutex_destroy(&thread_count_mutex); - уничтожение мьютекса после завершения работы программы.

Ключевые особенности:

1. Размер массива должен быть степенью двойки
2. Количество потоков также должно быть степенью двойки
3. Использует многопоточность через POSIX threads (pthread)

Работа:

1. Инициализация:

- Принимает два параметра: размер массива и максимальное число потоков
- Создается мьютекс для контроля доступа к числу потоков
- Создает случайный массив заданного размера

2. Четно-нечетная сортировка:

oddEvenMergeSort:

- Разделяет массив на две части
- Рекурсивно сортирует левую половину
- Рекурсивно сортирует правую половину
- После этого объединяет части используя bitonicMerge

oddEvenMerge:

- Рекурсивно сливает массив, увеличивая промежуток между сортируемыми элементами в два раза
- Рекурсивно обрабатывает получившиеся подпоследовательности

3. Управление потоками осуществляется с помощью счетчика потоков, доступ к которому контролируется с помощью мьютекса. oddEvenMergeSort запрашивает у счетчика возможность создать новый поток для сортировки левого подмассива.

4. Проверка результатов:

- После сортировки проверяется корректность (каждый следующий элемент должен быть больше предыдущего)
- Измеряется время выполнения сортировки

Замеры эффективности

Замеры проводились для 5 разных длин массивов. Количество потоков было от 1 до 64. Массив заполняется случайными значениями. Для каждого количества потоков проводилось 7 замеров, убирались минимальный и максимальный результат и бралось среднее значение времени.
На моем процессоре доступно 6 физических ядер и 12 логических ядер.

График со всеми замерами. Оси с логарифмическими шкалами

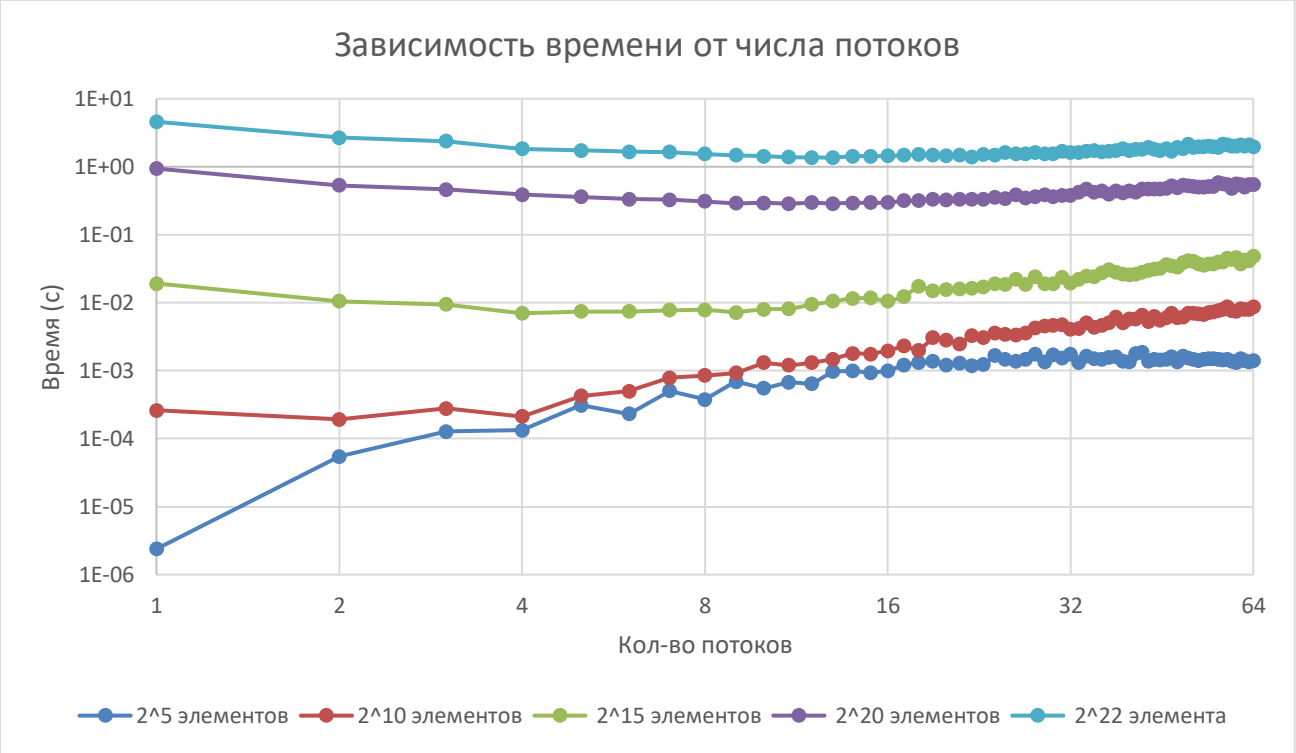
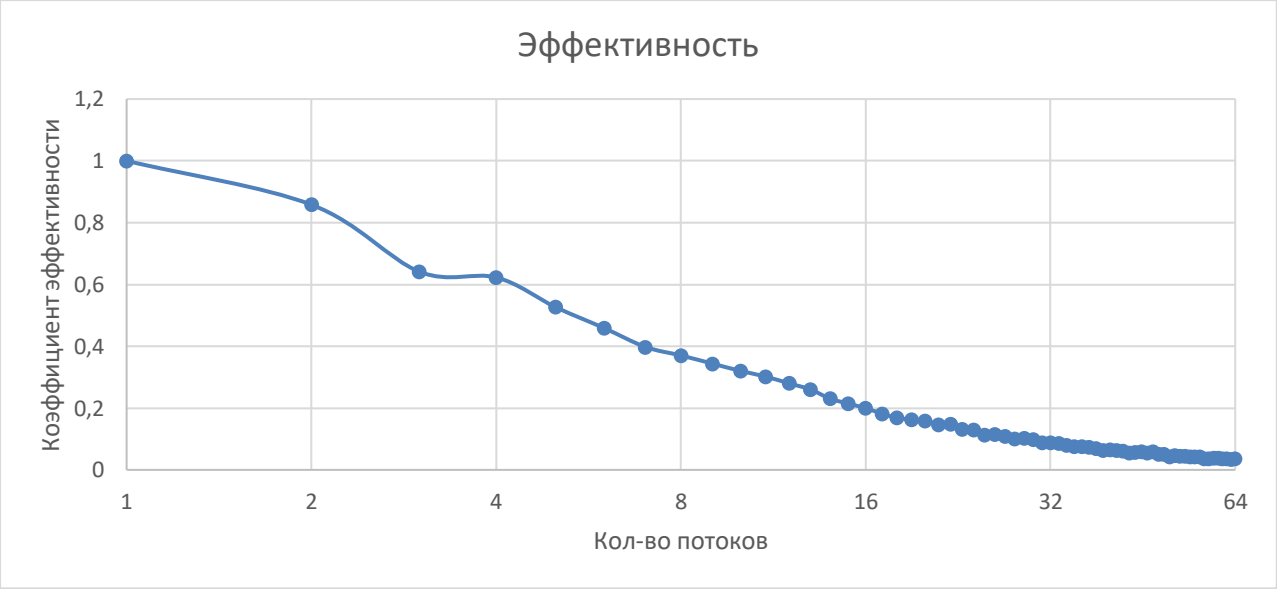


График ускорения (массив из 2^{22} элементов):

График эффективности (массив из 2^{22} элементов):



Ускорение показывает во сколько раз применение параллельного алгоритма уменьшает время решения задачи по сравнению с последовательным алгоритмом. Ускорение определяется величиной $S_N=T_1/T_N$, где T_1 - время выполнения на одном потоке, T_N - время выполнения на N потоках.

Эффективность - величина $E_N = S_N/N$, где S_N - ускорение, N - количество используемых потоков.

Выводы:

Параллельная сортировка имеет смысл на достаточно больших данных, где время на создание потоков компенсируется сэкономленным временем на сортировку. Число потоков больше кол-ва логических ядер также не даёт прироста производительности, а наоборот увеличивает время сортировки из-за того, что созданные потоки не могут выполняться одновременно.

Код программы

main.cpp

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <chrono>

#include "sort.h"

int main(int argc, char* argv[]) {
    if (argc != 3) {
        std::cerr << "Usage: " << argv[0] << " <array_size> <threads_count>\n";
        return 1;
    }

    int arraySize = std::atoi(argv[1]);
    int threads = std::atoi(argv[2]);

    // Размер массива должен быть степенью 2
    if ((arraySize & (arraySize - 1)) != 0) {
        std::cerr << "Array size must be a power of 2\n";
        return 1;
    }

    std::vector<int> originalArray = createRandomValuesVector(arraySize);
    std::vector<int> oeSorted = originalArray;

    std::cout << "Starting sorting array with length: " << arraySize << "\n";
    std::cout << "Max threads: " << threads << std::endl;

    ThreadsLimiter threadsLimiter(threads);

    auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now();

    oddEvenMergeSort(oeSorted, 0, oeSorted.size(), threadsLimiter);

    auto end = std::chrono::high_resolution_clock::now();
    std::chrono::duration<double> duration = end - start;

    std::cout << "Time taken: " << duration.count() << " seconds\n";

    for (int i = 1; i < arraySize; i++) {
        if (oeSorted[i] < oeSorted[i-1]) {
            std::cout << "Sorting failed!\n";
            return 0;
        }
    }
    std::cout << "Sorting successful!\n";

    return 0;
}
```

sort.cpp

```
#include "sort.h"

void *parallelSort(void *u_arg) {
    auto *arg = static_cast<ParallelSortArg *>(u_arg);
    oddEvenMergeSort(arg->vector, arg->left, arg->right, arg->threadsLimiter);
    arg->threadsLimiter.releaseThread();
    return nullptr;
}

void oddEvenMergeSort(std::vector<int> &a, int startIndex, int length,
ThreadsLimiter& threadsLimiter) {
    if (length <= 1)
        return;

    int halfLength = length / 2;

    if (threadsLimiter.lockThread()) {
        ParallelSortArg parallelArg{
                a,
                startIndex,
                halfLength,
                threadsLimiter
        };

        pthread_t thread;
        pthread_create(&thread, nullptr, parallelSort, &parallelArg);

        oddEvenMergeSort(a, startIndex + halfLength, halfLength, threadsLimiter);
        pthread_join(thread, nullptr);
    } else {
        oddEvenMergeSort(a, startIndex, halfLength, threadsLimiter);
        oddEvenMergeSort(a, startIndex + halfLength, halfLength, threadsLimiter);
    }

    oddEvenMerge(a, startIndex, length, 1);
}

void oddEvenMerge(std::vector<int> &a, int startIndex, int length, int step) {
    int doubleStep = step * 2;
    if (doubleStep < length) {
        oddEvenMerge(a, startIndex, length, doubleStep);
        oddEvenMerge(a, startIndex + step, length, doubleStep);
        for (int i = startIndex + step; i + step < startIndex + length; i +=
doubleStep) {
            compareAndExchange(a, i, i + step);
        }
    } else {
        compareAndExchange(a, startIndex, startIndex + step);
    }
}

void compareAndExchange(std::vector<int> &vector, int aIndex, int bIndex) {
    if (vector[aIndex] > vector[bIndex]) {
        std::swap(vector[aIndex], vector[bIndex]);
    }
}

std::vector<int> createRandomValuesVector(size_t size) {
    std::vector<int> array(size);
    for (size_t i = 0; i < size; i++) {
        array[i] = std::rand() % 1024;
    }
    return array;
}
```

```
bool ThreadsLimiter::lockThread() {
    bool result = false;

    pthread_mutex_lock(&mutex);
    if (currentCount < maxCount) {
        currentCount++;
        result = true;
    }
    pthread_mutex_unlock(&mutex);

    return result;
}

void ThreadsLimiter::releaseThread() {
    pthread_mutex_lock(&mutex);
    currentCount--;
    pthread_mutex_unlock(&mutex);
}

ThreadsLimiter::ThreadsLimiter(int maxCount) : maxCount(maxCount) {
    pthread_mutex_init(&mutex, nullptr);
}

ThreadsLimiter::~ThreadsLimiter() {
    if (disposed)
        return;

    pthread_mutex_destroy(&mutex);
    disposed = true;
}
```

sort.h

```
#pragma once

#include <iostream>
#include <vector>
#include <pthread.h>

struct ThreadsLimiter {
    int currentCount = 1; // Первый поток - основной (который использует этот класс)
    int maxCount;

    bool lockThread();

    void releaseThread();

    [[maybe_unused]] explicit ThreadsLimiter(int maxCount);

    ~ThreadsLimiter();

private:
    pthread_mutex_t mutex{};
    bool disposed = false;
};

void oddEvenMergeSort(std::vector<int> &a, int startIndex, int length,
ThreadsLimiter& threadsLimiter);

void oddEvenMerge(std::vector<int> &a, int startIndex, int length, int step);

void compareAndExchange(std::vector<int> &vector, int aIndex, int bIndex);

std::vector<int> createRandomValuesVector(size_t size);
```

```
struct ParallelSortArg {
    std::vector<int> &vector;
    int left;
    int right;
    ThreadsLimiter &threadsLimiter;
};
```

Протокол работы программы

```
user@DESKTOP-KC5QDB8:~/projects/mai_os/lab2$ ./cmake-build-release/mai_os 128 4
Starting sorting array with length: 128
Max threads: 4
Time taken: 0.000348404 seconds
Sorting successful!
```

Strace:

```
$ strace -f ./cmake-build-release/mai_os 128 4
```

```
user@DESKTOP-KC5QDB8:~/projects/mai_os/lab2$ strace -f ./cmake-build-release/mai_os 128
4
execve("./cmake-build-release/mai_os", ["./cmake-build-release/mai_os", "128", "4"],
0x7ffcd5748a48 /* 32 vars */) = 0
brk(NULL)                               = 0x55ea6f0f9000
arch_prctl(0x3001 /* ARCH_??? */, 0x7fffcf6d6330) = -1 EINVAL (Invalid argument)
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7f96a202a000
access("/etc/ld.so.preload", R_OK)      = -1 ENOENT (No such file or directory)
openat(AT_FDCWD, "/etc/ld.so.cache", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
newfstatat(3, "", {st_mode=S_IFREG|0644, st_size=18463, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
mmap(NULL, 18463, PROT_READ, MAP_PRIVATE, 3, 0) = 0x7f96a2025000
close(3)                                = 0
openat(AT_FDCWD, "/lib/x86_64-linux-gnu/libstdc++.so.6", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
read(3, "\177ELF\2\1\1\3\0\0\0\0\0\0\0\0\3\0>\0\1\0\0\0\0\0\0\0\0\0\0"..., 832) = 832
newfstatat(3, "", {st_mode=S_IFREG|0644, st_size=2260296, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
mmap(NULL, 2275520, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0x7f96a1df9000
mprotect(0x7f96a1e93000, 1576960, PROT_NONE) = 0
mmap(0x7f96a1e93000, 1118208, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x9a000) = 0x7f96a1e93000
mmap(0x7f96a1fa4000, 454656, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x1ab000) = 0x7f96a1fa4000
mmap(0x7f96a2014000, 57344, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x21a000) = 0x7f96a2014000
mmap(0x7f96a2022000, 10432, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_ANONYMOUS,
-1, 0) = 0x7f96a2022000
close(3)                                = 0
openat(AT_FDCWD, "/lib/x86_64-linux-gnu/libgcc_s.so.1", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
read(3, "\177ELF\2\1\1\0\0\0\0\0\0\0\0\3\0>\0\1\0\0\0\0\0\0\0\0\0\0"..., 832) = 832
newfstatat(3, "", {st_mode=S_IFREG|0644, st_size=125488, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
mmap(NULL, 127720, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0x7f96a1dd9000
mmap(0x7f96a1ddc000, 94208, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x3000) = 0x7f96a1ddc000
mmap(0x7f96a1df3000, 16384, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3, 0x1a000)
= 0x7f96a1df3000
mmap(0x7f96a1df7000, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x1d000) = 0x7f96a1df7000
close(3)                                = 0
openat(AT_FDCWD, "/lib/x86_64-linux-gnu/libc.so.6", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
read(3, "\177ELF\2\1\1\3\0\0\0\0\0\0\0\0\3\0>\0\1\0\0\0P\237\2\0\0\0\0\0"..., 832) =
832
pread64(3, "\6\0\0\0\4\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0"..., 784, 64)
= 784
pread64(3, "\4\0\0\0 \0\0\0\5\0\0\0GNU\0\2\0\0\300\4\0\0\0\3\0\0\0\0\0\0\0"..., 48,
848) = 48
```

```
pread64(3,
"\4\0\0\0\24\0\0\0\3\0\0\0GNU\0I\17\357\204\3$\f\221\2039x\324\224\323\236S"..., 68,
896) = 68
newfstatat(3, "", {st_mode=S_IFREG|0755, st_size=2220400, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
pread64(3, "\6\0\0\0\4\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0@\0\0\0\0\0\0\0"..., 784, 64)
= 784
mmap(NULL, 2264656, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0x7f96a1bb0000
mprotect(0x7f96a1bd8000, 2023424, PROT_NONE) = 0
mmap(0x7f96a1bd8000, 1658880, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x28000) = 0x7f96a1bd8000
mmap(0x7f96a1d6d000, 360448, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x1bd000) = 0x7f96a1d6d000
mmap(0x7f96a1dc6000, 24576, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x215000) = 0x7f96a1dc6000
mmap(0x7f96a1dcc000, 52816, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_ANONYMOUS,
-1, 0) = 0x7f96a1dcc000
close(3)                                = 0
openat(AT_FDCWD, "/lib/x86_64-linux-gnu/libm.so.6", O_RDONLY|O_CLOEXEC) = 3
read(3, "\177ELF\2\1\1\3\0\0\0\0\0\0\0\0\3\0>\0\1\0\0\0\0\0\0\0\0\0\0\0"..., 832) = 832
newfstatat(3, "", {st_mode=S_IFREG|0644, st_size=940560, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
mmap(NULL, 942344, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0x7f96a1ac9000
mmap(0x7f96a1ad7000, 507904, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0xe000) = 0x7f96a1ad7000
mmap(0x7f96a1b53000, 372736, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x8a000) = 0x7f96a1b53000
mmap(0x7f96a1bae000, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0xe4000) = 0x7f96a1bae000
close(3)                                = 0
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7f96a1ac7000
arch_prctl(ARCH_SET_FS, 0x7f96a1ac83c0) = 0
set_tid_address(0x7f96a1ac8690)         = 125299
set_robust_list(0x7f96a1ac86a0, 24)     = 0
rseq(0x7f96a1ac8d60, 0x20, 0, 0x53053053) = 0
mprotect(0x7f96a1dc6000, 16384, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7f96a1bae000, 4096, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7f96a1df7000, 4096, PROT_READ) = 0
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7f96a1ac5000
mprotect(0x7f96a2014000, 45056, PROT_READ) = 0
mprotect(0x55ea6e766000, 4096, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7f96a2064000, 8192, PROT_READ) = 0
prlimit64(0, RLIMIT_STACK, NULL, {rlim_cur=8192*1024, rlim_max=RLIM64_INFINITY}) = 0
munmap(0x7f96a2025000, 18463)           = 0
getrandom("\xaa\x34\xe6\xa0\xb8\x62\x9d\x53", 8, GRND_NONBLOCK) = 8
brk(NULL)                               = 0x55ea6f0f9000
brk(0x55ea6f11a000)                     = 0x55ea6f11a000
futex(0x7f96a202277c, FUTEX_WAKE_PRIVATE, 2147483647) = 0
newfstatat(1, "", {st_mode=S_IFCHR|0620, st_rdev=makedev(0x88, 0x3), ...},
AT_EMPTY_PATH) = 0
write(1, "Starting sorting array with leng"..., 40Starting sorting array with length:
128
) = 40
write(1, "Max threads: 4\n", 15Max threads: 4
)        = 15
rt_sigaction(SIGRT_1, {sa_handler=0x7f96a1c41870, sa_mask=[],
sa_flags=SA_RESTORER|SA_ONSTACK|SA_RESTART|SA_SIGINFO, sa_restorer=0x7f96a1bf2520},
NULL, 8) = 0
rt_sigprocmask(SIG_UNBLOCK, [RTMIN RT_1], NULL, 8) = 0
mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0) =
0x7f96a12c4000
mprotect(0x7f96a12c5000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE) = 0
rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[], [QUIT], 8) = 0
clone3({flags=CLONE_VM|CLONE_FS|CLONE_FILES|CLONE_SIGHAND|CLONE_THREAD|CLONE_SYSVSEM|CL
ONE_SETTLS|CLONE_PARENT_SETTID|CLONE_CHILD_CLEARTID, child_tid=0x7f96a1ac4910,
parent_tid=0x7f96a1ac4910, exit_signal=0, stack=0x7f96a12c4000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7f96a1ac4640}strace: Process 125300 attached
```

```
 => {parent_tid=[125300]}, 88) = 125300
[pid 125300] rseq(0x7f96a1ac4fe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 125299] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... rseq resumed>)        = 0
[pid 125299] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125300] set_robust_list(0x7f96a1ac4920, 24 <unfinished ...>
[pid 125299] mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0
<unfinished ...>
[pid 125300] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 125299] <... mmap resumed>)        = 0x7f96a0ac3000
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125299] mprotect(0x7f96a0ac4000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 125300] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125299] <... mprotect resumed>)    = 0
[pid 125300] mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0
<unfinished ...>
[pid 125299] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... mmap resumed>)        = 0x7f96a02c2000
[pid 125299] <... rt_sigprocmask resumed>[QUIT], 8) = 0
[pid 125300] mprotect(0x7f96a02c3000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 125299]
clone3({flags=CLONE_VM|CLONE_FS|CLONE_FILES|CLONE_SIGHAND|CLONE_THREAD|CLONE_SYSVSEM|CL
ONE_SETTLS|CLONE_PARENT_SETTID|CLONE_CHILD_CLEARTID, child_tid=0x7f96a12c3910,
parent_tid=0x7f96a12c3910, exit_signal=0, stack=0x7f96a0ac3000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7f96a12c3640} <unfinished ...>
[pid 125300] <... mprotect resumed>)    = 0
strace: Process 125301 attached
[pid 125300] mmap(NULL, 134217728, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_NORESERVE,
-1, 0 <unfinished ...>
[pid 125299] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[125301]}, 88) = 125301
[pid 125301] rseq(0x7f96a12c3fe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 125299] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... mmap resumed>)        = 0x7f96982c2000
[pid 125299] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125301] <... rseq resumed>)        = 0
[pid 125299] futex(0x7f96a12c3910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 125301,
NULL, FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 125300] munmap(0x7f96982c2000, 64217088 <unfinished ...>
[pid 125301] set_robust_list(0x7f96a12c3920, 24 <unfinished ...>
[pid 125300] <... munmap resumed>)      = 0
[pid 125301] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 125300] munmap(0x7f96a0000000, 2891776 <unfinished ...>
[pid 125301] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... munmap resumed>)      = 0
[pid 125301] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125300] mprotect(0x7f969c000000, 135168, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 125301] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... mprotect resumed>)    = 0
[pid 125301] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[],  <unfinished ...>
[pid 125301] madvise(0x7f96a0ac3000, 8368128, MADV_DONTNEED <unfinished ...>
[pid 125300] <... rt_sigprocmask resumed>[QUIT], 8) = 0
[pid 125301] <... madvise resumed>)     = 0
[pid 125300]
clone3({flags=CLONE_VM|CLONE_FS|CLONE_FILES|CLONE_SIGHAND|CLONE_THREAD|CLONE_SYSVSEM|CL
ONE_SETTLS|CLONE_PARENT_SETTID|CLONE_CHILD_CLEARTID, child_tid=0x7f96a0ac2910,
parent_tid=0x7f96a0ac2910, exit_signal=0, stack=0x7f96a02c2000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7f96a0ac2640} <unfinished ...>
[pid 125301] exit(0strace: Process 125302 attached
)                       = ?
[pid 125302] rseq(0x7f96a0ac2fe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 125301] +++ exited with 0 +++
[pid 125300] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[125302]}, 88) = 125302
[pid 125299] <... futex resumed>)       = 0
[pid 125302] <... rseq resumed>)        = 0
[pid 125299] futex(0x7f96a1ac4910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 125300,
NULL, FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
```

```
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125302] set_robust_list(0x7f96a0ac2920, 24 <unfinished ...>
[pid 125300] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125302] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[],  <unfinished ...>
[pid 125302] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125300] <... rt_sigprocmask resumed>[QUIT], 8) = 0
[pid 125302] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125300]
clone3({flags=CLONE_VM|CLONE_FS|CLONE_FILES|CLONE_SIGHAND|CLONE_THREAD|CLONE_SYSVSEM|CL
ONE_SETTLS|CLONE_PARENT_SETTID|CLONE_CHILD_CLEARTID, child_tid=0x7f96a12c3910,
parent_tid=0x7f96a12c3910, exit_signal=0, stack=0x7f96a0ac3000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7f96a12c3640} <unfinished ...>
[pid 125302] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], strace: Process 125303 attached
NULL, 8) = 0
[pid 125303] rseq(0x7f96a12c3fe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 125302] madvise(0x7f96a02c2000, 8368128, MADV_DONTNEED <unfinished ...>
[pid 125303] <... rseq resumed>)        = 0
[pid 125300] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[125303]}, 88) = 125303
[pid 125303] set_robust_list(0x7f96a12c3920, 24 <unfinished ...>
[pid 125302] <... madvise resumed>)     = 0
[pid 125303] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125303] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125302] exit(0 <unfinished ...>
[pid 125303] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125300] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125303] mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0
<unfinished ...>
[pid 125302] <... exit resumed>)        = ?
[pid 125303] <... mmap resumed>)        = 0x7f969b7ff000
[pid 125300] futex(0x7f96a12c3910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 125303,
NULL, FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 125303] mprotect(0x7f969b800000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 125302] +++ exited with 0 +++
[pid 125303] <... mprotect resumed>)    = 0
[pid 125303] mmap(NULL, 134217728, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_NORESERVE,
-1, 0) = 0x7f96937ff000
[pid 125303] munmap(0x7f96937ff000, 8392704) = 0
[pid 125303] munmap(0x7f9698000000, 58716160) = 0
[pid 125303] mprotect(0x7f9694000000, 135168, PROT_READ|PROT_WRITE) = 0
[pid 125303] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[], [QUIT], 8) = 0
[pid 125303]
clone3({flags=CLONE_VM|CLONE_FS|CLONE_FILES|CLONE_SIGHAND|CLONE_THREAD|CLONE_SYSVSEM|CL
ONE_SETTLS|CLONE_PARENT_SETTID|CLONE_CHILD_CLEARTID, child_tid=0x7f969bfff910,
parent_tid=0x7f969bfff910, exit_signal=0, stack=0x7f969b7ff000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7f969bfff640}strace: Process 125304 attached
 <unfinished ...>
[pid 125304] rseq(0x7f969bffffe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 125303] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[125304]}, 88) = 125304
[pid 125304] <... rseq resumed>)        = 0
[pid 125303] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 125304] set_robust_list(0x7f969bfff920, 24 <unfinished ...>
[pid 125303] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 125304] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 125303] futex(0x7f969bfff910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 125304,
NULL, FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 125304] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT], NULL, 8) = 0
[pid 125304] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 125304] madvise(0x7f969b7ff000, 8368128, MADV_DONTNEED) = 0
[pid 125304] exit(0)                    = ?
[pid 125304] +++ exited with 0 +++
[pid 125303] <... futex resumed>)       = 0
[pid 125303] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 125303] madvise(0x7f96a0ac3000, 8368128, MADV_DONTNEED) = 0
[pid 125303] exit(0)                    = ?
[pid 125303] +++ exited with 0 +++
```

```
[pid 125300] <... futex resumed>)       = 0
[pid 125300] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 125300] madvise(0x7f96a12c4000, 8368128, MADV_DONTNEED) = 0
[pid 125300] exit(0)                    = ?
[pid 125300] +++ exited with 0 +++
<... futex resumed>)                    = 0
write(1, "Time taken: 0.00536197 seconds\n", 31Time taken: 0.00536197 seconds
) = 31
write(1, "Sorting successful!\n", 20Sorting successful!
)   = 20
exit_group(0)                           = ?
+++ exited with 0 +++
```