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

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
- 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
- Использует оптимизацию: для маленьких подмассивов (< 1024) работает без создания новых потоков

3. Управление потоками oddEvenMergeSort рекурсивно удваивает число потоков до заданного количества

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

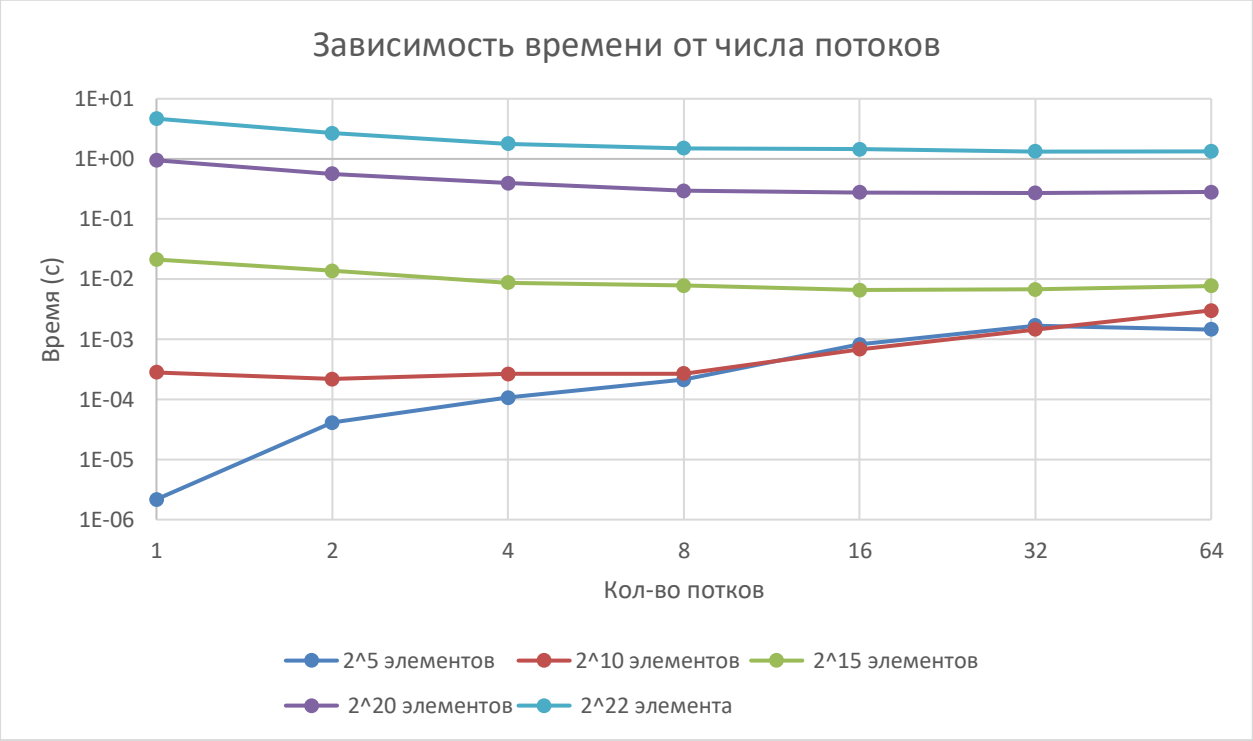


График ускорения (массив из 2^{15} элементов):

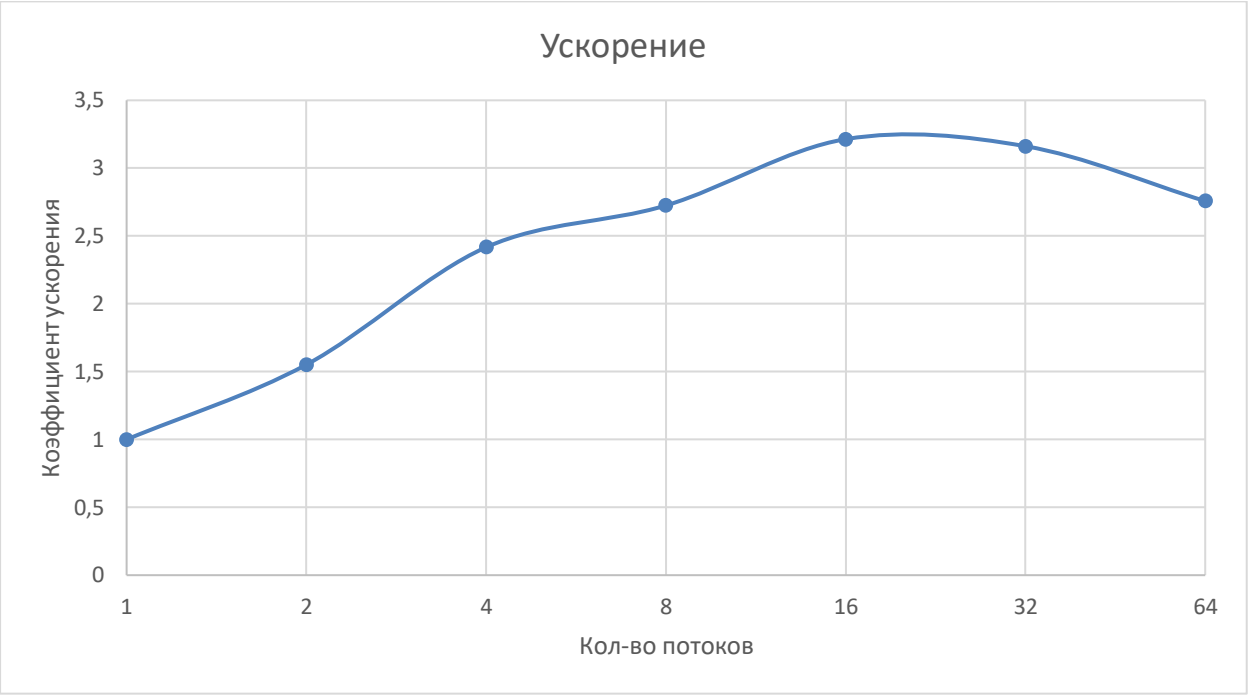
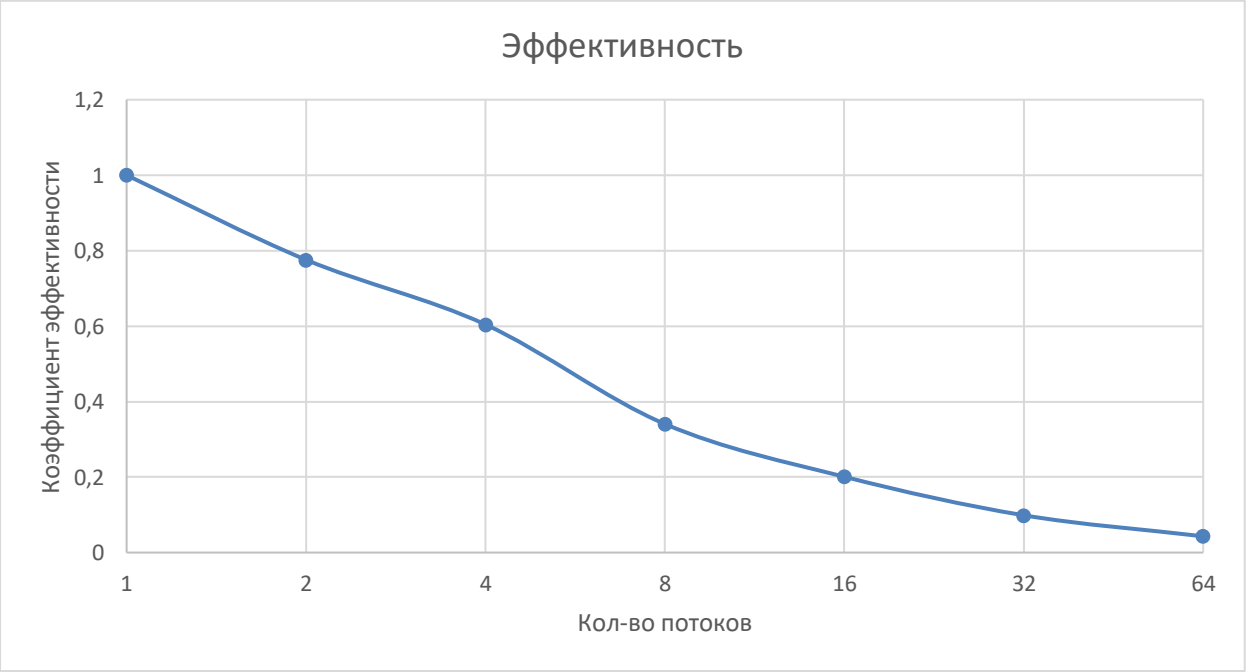


График эффективности (массив из 2^{15} элементов):



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;
    }

    // Кол-во потоков должно быть степенью 2
    if ((threads & (threads - 1)) != 0) {
        std::cerr << "Threads count must be a power of 2\n";
        return 1;
    }

    int powerOfParallelism = 1;
    while (1 << powerOfParallelism != threads)
        powerOfParallelism++;

    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;

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

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

    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->powerOfParallelism);
    return nullptr;
}

void oddEvenMergeSort(std::vector<int> &a, int startIndex, int length, int
powerOfParallelism = 0) {
    if (length <= 1)
        return;

    int halfLength = length / 2;

    if (powerOfParallelism > 0) {
        ParallelSortArg parallelArg{
                &a,
                startIndex,
                halfLength,
                powerOfParallelism - 1
        };

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

        oddEvenMergeSort(a, startIndex + halfLength, halfLength, powerOfParallelism -
1);
        pthread_join(thread, nullptr);
    } else {
        oddEvenMergeSort(a, startIndex, halfLength);
        oddEvenMergeSort(a, startIndex + halfLength, halfLength);
    }

    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;
}
```

sort.h

```
#pragma once

#include <iostream>
#include <vector>

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

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;
    int powerOfParallelism;
};
```

Протокол работы программы

```
user@DESKTOP-KC5QDB8:~/projects/mai_os/lab2$ ./cmake-build-release/mai_os 32768 4
Starting sorting array with length: 32768
Max threads: 4
Time taken: 0.00694654 seconds
Sorting successful!
```

Strace:

```
$ strace -f ./cmake-build-release/mai_os 32768 4
```

```
user@DESKTOP-KC5QDB8:~/projects/mai_os/lab2$ strace -f ./cmake-build-release/mai_os
32768 4
execve("./cmake-build-release/mai_os", ["./cmake-build-release/mai_os", "32768", "4"],
0x7ffed1df5f98 /* 32 vars */) = 0
brk(NULL)                               = 0x556459f65000
arch_prctl(0x3001 /* ARCH_??? */, 0x7ffcbc1cd2a0) = -1 EINVAL (Invalid argument)
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7fb522e84000
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) = 0x7fb522e7f000
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\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=2260296, ...}, AT_EMPTY_PATH) = 0
mmap(NULL, 2275520, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_DENYWRITE, 3, 0) = 0x7fb522c53000
mprotect(0x7fb522ced000, 1576960, PROT_NONE) = 0
mmap(0x7fb522ced000, 1118208, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x9a000) = 0x7fb522ced000
mmap(0x7fb522dfe000, 454656, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x1ab000) = 0x7fb522dfe000
mmap(0x7fb522e6e000, 57344, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x21a000) = 0x7fb522e6e000
mmap(0x7fb522e7c000, 10432, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_ANONYMOUS,
-1, 0) = 0x7fb522e7c000
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\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) = 0x7fb522c33000
mmap(0x7fb522c36000, 94208, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x3000) = 0x7fb522c36000
mmap(0x7fb522c4d000, 16384, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3, 0x1a000)
= 0x7fb522c4d000
mmap(0x7fb522c51000, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x1d000) = 0x7fb522c51000
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"..., 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) = 0x7fb522a0a000
mprotect(0x7fb522a32000, 2023424, PROT_NONE) = 0
mmap(0x7fb522a32000, 1658880, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x28000) = 0x7fb522a32000
mmap(0x7fb522bc7000, 360448, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x1bd000) = 0x7fb522bc7000
mmap(0x7fb522c20000, 24576, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0x215000) = 0x7fb522c20000
mmap(0x7fb522c26000, 52816, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_ANONYMOUS,
-1, 0) = 0x7fb522c26000
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) = 0x7fb522923000
mmap(0x7fb522931000, 507904, PROT_READ|PROT_EXEC, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0xe000) = 0x7fb522931000
mmap(0x7fb5229ad000, 372736, PROT_READ, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE, 3,
0x8a000) = 0x7fb5229ad000
mmap(0x7fb522a08000, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_FIXED|MAP_DENYWRITE,
3, 0xe4000) = 0x7fb522a08000
close(3)                                = 0
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7fb522921000
arch_prctl(ARCH_SET_FS, 0x7fb5229223c0) = 0
set_tid_address(0x7fb522922690)         = 45891
set_robust_list(0x7fb5229226a0, 24)     = 0
rseq(0x7fb522922d60, 0x20, 0, 0x53053053) = 0
mprotect(0x7fb522c20000, 16384, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7fb522a08000, 4096, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7fb522c51000, 4096, PROT_READ) = 0
mmap(NULL, 8192, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7fb52291f000
mprotect(0x7fb522e6e000, 45056, PROT_READ) = 0
mprotect(0x5564585c0000, 4096, PROT_READ) = 0
mprotect(0x7fb522ebe000, 8192, PROT_READ) = 0
prlimit64(0, RLIMIT_STACK, NULL, {rlim_cur=8192*1024, rlim_max=RLIM64_INFINITY}) = 0
munmap(0x7fb522e7f000, 18463)           = 0
getrandom("\xd4\x7d\x12\xbe\x41\xc5\xac\x2a", 8, GRND_NONBLOCK) = 8
brk(NULL)                               = 0x556459f65000
brk(0x556459f86000)                     = 0x556459f86000
futex(0x7fb522e7c77c, FUTEX_WAKE_PRIVATE, 2147483647) = 0
mmap(NULL, 135168, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7fb5228fe000
```

```
mmap(NULL, 135168, PROT_READ|PROT_WRITE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS, -1, 0) =
0x7fb5228dd000
newfstatat(1, "", {st_mode=S_IFCHR|0620, st_rdev=makedev(0x88, 0x3), ...},
AT_EMPTY_PATH) = 0
write(1, "Starting sorting array with leng"..., 42Starting sorting array with length:
32768
) = 42
write(1, "Max threads: 4\n", 15Max threads: 4
)        = 15
rt_sigaction(SIGRT_1, {sa_handler=0x7fb522a9b870, sa_mask=[],
sa_flags=SA_RESTORER|SA_ONSTACK|SA_RESTART|SA_SIGINFO, sa_restorer=0x7fb522a4c520},
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) =
0x7fb5220dc000
mprotect(0x7fb5220dd000, 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=0x7fb5228dc910,
parent_tid=0x7fb5228dc910, exit_signal=0, stack=0x7fb5220dc000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7fb5228dc640}strace: Process 45892 attached
 => {parent_tid=[45892]}, 88) = 45892
[pid 45892] rseq(0x7fb5228dcfe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 45891] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 45892] <... rseq resumed>)         = 0
[pid 45891] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 45892] set_robust_list(0x7fb5228dc920, 24 <unfinished ...>
[pid 45891] mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0
<unfinished ...>
[pid 45892] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 45891] <... mmap resumed>)         = 0x7fb5218db000
[pid 45892] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 45891] mprotect(0x7fb5218dc000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 45892] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 45891] <... mprotect resumed>)     = 0
[pid 45892] mmap(NULL, 8392704, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_STACK, -1, 0
<unfinished ...>
[pid 45891] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[],  <unfinished ...>
[pid 45892] <... mmap resumed>)         = 0x7fb5210da000
[pid 45891] <... rt_sigprocmask resumed>[QUIT], 8) = 0
[pid 45892] mprotect(0x7fb5210db000, 8388608, PROT_READ|PROT_WRITE <unfinished ...>
[pid 45891]
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=0x7fb5220db910,
parent_tid=0x7fb5220db910, exit_signal=0, stack=0x7fb5218db000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7fb5220db640} <unfinished ...>
[pid 45892] <... mprotect resumed>)     = 0
strace: Process 45893 attached
[pid 45892] mmap(NULL, 134217728, PROT_NONE, MAP_PRIVATE|MAP_ANONYMOUS|MAP_NORESERVE, -
1, 0 <unfinished ...>
[pid 45891] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[45893]}, 88) = 45893
[pid 45893] rseq(0x7fb5220dbfe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 45891] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 45892] <... mmap resumed>)         = 0x7fb5190da000
[pid 45891] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 45893] <... rseq resumed>)         = 0
[pid 45892] munmap(0x7fb5190da000, 49438720 <unfinished ...>
[pid 45893] set_robust_list(0x7fb5220db920, 24 <unfinished ...>
[pid 45892] <... munmap resumed>)       = 0
[pid 45893] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 45892] munmap(0x7fb520000000, 17670144 <unfinished ...>
[pid 45893] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 45892] <... munmap resumed>)       = 0
[pid 45893] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 45892] mprotect(0x7fb51c000000, 135168, PROT_READ|PROT_WRITE) = 0
[pid 45892] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[], [QUIT], 8) = 0
```

```
[pid 45892]
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=0x7fb5218da910,
parent_tid=0x7fb5218da910, exit_signal=0, stack=0x7fb5210da000, stack_size=0x7fff00,
tls=0x7fb5218da640}strace: Process 45894 attached
 <unfinished ...>
[pid 45894] rseq(0x7fb5218dafe0, 0x20, 0, 0x53053053 <unfinished ...>
[pid 45892] <... clone3 resumed> => {parent_tid=[45894]}, 88) = 45894
[pid 45894] <... rseq resumed>)         = 0
[pid 45892] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT],  <unfinished ...>
[pid 45894] set_robust_list(0x7fb5218da920, 24 <unfinished ...>
[pid 45892] <... rt_sigprocmask resumed>NULL, 8) = 0
[pid 45894] <... set_robust_list resumed>) = 0
[pid 45894] rt_sigprocmask(SIG_SETMASK, [QUIT], NULL, 8) = 0
[pid 45891] futex(0x7fb5220db910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 45893, NULL,
FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 45893] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 45893] madvise(0x7fb5218db000, 8368128, MADV_DONTNEED <unfinished ...>
[pid 45892] futex(0x7fb5218da910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 45894, NULL,
FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 45893] <... madvise resumed>)      = 0
[pid 45893] exit(0)                     = ?
[pid 45891] <... futex resumed>)        = 0
[pid 45893] +++ exited with 0 +++
[pid 45894] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 45894] madvise(0x7fb5210da000, 8368128, MADV_DONTNEED) = 0
[pid 45894] exit(0)                     = ?
[pid 45894] +++ exited with 0 +++
[pid 45892] <... futex resumed>)        = 0
[pid 45891] futex(0x7fb5228dc910, FUTEX_WAIT_BITSET|FUTEX_CLOCK_REALTIME, 45892, NULL,
FUTEX_BITSET_MATCH_ANY <unfinished ...>
[pid 45892] rt_sigprocmask(SIG_BLOCK, ~[RT_1], NULL, 8) = 0
[pid 45892] madvise(0x7fb5220dc000, 8368128, MADV_DONTNEED) = 0
[pid 45892] exit(0)                     = ?
[pid 45891] <... futex resumed>)        = 0
[pid 45892] +++ exited with 0 +++
write(1, "Time taken: 0.0126096 seconds\n", 30Time taken: 0.0126096 seconds
) = 30
write(1, "Sorting successful!\n", 20Sorting successful!
)   = 20
munmap(0x7fb5228dd000, 135168)          = 0
munmap(0x7fb5228fe000, 135168)          = 0
exit_group(0)                           = ?
+++ exited with 0 +++
```