МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Институт №8 «Компьютерные науки и прикладная математика»
Кафедра 806 «Вычислительная математика и программирование»

Лабораторная работа №1
по курсу «Параллельная обработка данных»

Сортировка чисел на GPU. Свертка, сканирование, гистограмма.

Выполнил: О.А. Мезенин
Группа: 8О-406Б
Преподаватель: А.Ю. Морозов

Москва, 2024

Условие

Цель работы: Ознакомление с фундаментальными алгоритмами GPU: свертка (reduce), сканирование (blelloch scan) и гистограмма (histogram). Реализация одной из сортировок на CUDA. Использование разделяемой и других видов памяти. Исследование производительности программы с помощью утилиты ncu.

Вариант 4. Сортировка чет-нечет.

Все входные-выходные данные являются бинарными и считываются из stdin и выводятся в stdout.

Входные данные. В первых четырех байтах записывается целое число n -- длина массива чисел, далее следуют n чисел типа заданного вариантом.

Выходные данные. В бинарном виде записывают n отсортированных по возрастанию чисел.

Требуется реализовать блочную сортировку чет-нечет для чисел типа int. Должны быть реализованы:

● Алгоритм чет-нечет сортировки для предварительной сортировки блоков.

● Алгоритм битонического слияния, с использованием разделяемой памяти.

Ограничения: $n \leq 16 * 10^6$

Программное и аппаратное обеспечение

Характеристики графического процессора:

- Compute capability: 8.9
- Name: NVIDIA GeForce RTX 4070 SUPER
- Total Global Memory: 12584550400
- Shared memory per block: 49152
- Registers per block: 65536
- Warp size: 32
- Max threads per block: (1024, 1024, 64)
- Max block: (2147483647, 65535, 65535)
- Total constant memory: 65536
- Multiprocessors count: 56

Характеристики центрального процессора:

- Version: AMD Ryzen 7 7700
- Max Speed: 5389 MHz
- Core Count: 8
- Thread Count: 16

Характеристики оперативной памяти:

- Size: 2x16 GB
- Type: DDR5
- Speed: 4800 MT/s

Характеристики жесткого диска:

- Device Model: ADATA SU635
- User Capacity: 480 103 981 056 bytes [480 GB]
- Sector Size: 512 bytes logical/physical

- SATA Version is: SATA 3.2, 6.0 Gb/s (current: 6.0 Gb/s)

Программное обеспечение:

- OS: Linux
- Kernel: 6.10.13-3-MANJARO
- Текстовый редактор: Kate
- Компилятор: nvcc V12.4.131

Метод решения

Для начала считываем данные. Размер массива, с которым будем работать, округляем до ближайшего большего числа, кратного BLOCK_SIZE — размер блока (настраиваемый параметр). По необходимости заполняем массив фиктивными элементами.

Запускаем предварительную сортировку с конфигурацией <<<data_dev_size / BLOCK_SIZE, BLOCK_SIZE>>>, где data_dev_size — размер массива, с которым ведется работа. Если data_dev_size == BLOCK_SIZE, значит, предварительная сортировка отсортировала все данные. Иначе запускаем цикл чет-нечет сортировки, который запускает ядра с четными и нечетными блоками, применяя алгоритм битонического слияния.

Описание программы

Вся программа описана в одном файле main.cu. Есть следующие функции:

- int main() — входная точка программы, которая считывает данные, инициализирует рабочий массив, после чего запускает предварительную сортировку и основную сортировку с битоническим слиянием;
- void readData(int& n, int** data) — считывает данные из stdin в data и их размер в n.
- void writeData(int n, int* data) — выводит data размера n в stdout;
- __device__ void swap(int* data, int first_index, int second_index) — переставляет данные в массиве data.
- __global__ void fillFictitious(int fictive_n, int* fictive_data) — заполняет данные фиктивными — INT_MAX.
- __global__ void preSort(int* data) — предварительная сортировка чет-нечет.
- __global__ void bitonicMerge(int* data) — битоническое слияние.

Результаты

Будет 3 теста со следующими n: 100, 10000, 1000000. Все элементы матрицы являются числами типа int. Будет изменяться параметр BLOCK_SIZE.

Далее приведены замеры времени работы ядер с четырьмя конфигурациями, а также замеры работы без использования технологий CUDA (на CPU):

1. Конфигурация BLOCK_SIZE=32

n	Время (в мс)
100	0.192512
10000	8.42134

1000000	16677.4

2. Конфигурация BLOCK_SIZE=64

n	Время (в мс)
100	0.22016
10000	4.92749
1000000	5012.71

3. Конфигурация BLOCK_SIZE=256

n	Время (в мс)
100	0.491296
10000	2.07053
1000000	971.804

4. Конфигурация BLOCK_SIZE=1024

n	Время (в мс)
100	1.89232
10000	3.07405
1000000	379.405

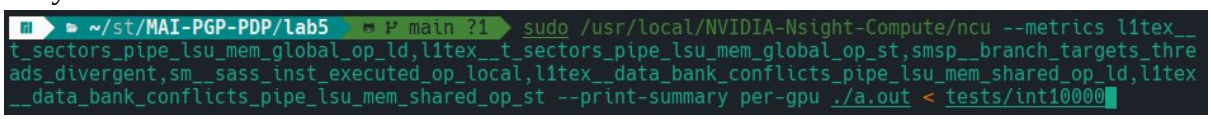
5. CPU

n	Время (в мс)
100	0.038
10000	332.96
1000000	Не дождался

Исследование производительности

Исследование производительности производилось с помощью утилиты ncu.

Запуск:



Вывод:

```
bitonicMerge(int *) (10, 1, 1)x(512, 1, 1), Invocations 10
  Section: Command line profiler metrics
  ------------------------------------------------------- ----------- -------- -------- --------
  Metric Name                                             Metric Unit  Minimum  Maximum  Average
  ------------------------------------------------------- ----------- -------- -------- --------
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.avg              154,86   166,96   162,04
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.max              880,00 1 086,00 1 038,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.min                0,00     0,00     0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum            8 672,00 9 350,00 9 074,20
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.avg               52,00    64,11    59,18
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.max              304,00   510,00   462,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.min                0,00     0,00     0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum            2 912,00 3 590,00 3 314,20
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.avg                 sector    22,86    22,86    22,86
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.max                 sector   128,00   128,00   128,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.min                 sector     0,00     0,00     0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.sum                 sector 1 280,00 1 280,00 1 280,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.avg                 sector    22,86    22,86    22,86
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.max                 sector   128,00   128,00   128,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.min                 sector     0,00     0,00     0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                 sector 1 280,00 1 280,00 1 280,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.avg                              inst     0,00     0,00     0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.max                              inst     0,00     0,00     0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.min                              inst     0,00     0,00     0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.sum                              inst     0,00     0,00     0,00
  smsp__branch_targets_threads_divergent                     branches     8,00   643,00   330,80
  ------------------------------------------------------- ----------- -------- -------- --------
```

```
fillFictitious(int, int *) (32, 1, 1)x(32, 1, 1), Invocations 1
  Section: Command line profiler metrics
  ------------------------------------------------------- ----------- ------- ------- -------
  Metric Name                                             Metric Unit Minimum Maximum Average
  ------------------------------------------------------- ----------- ------- ------- -------
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.avg                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.max                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.min                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.avg                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.max                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.min                0,00    0,00    0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.avg                 sector   0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.max                 sector   0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.min                 sector   0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.sum                 sector   0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.avg                 sector   0,54    0,54    0,54
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.max                 sector   4,00    4,00    4,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.min                 sector   0,00    0,00    0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                 sector  30,00   30,00   30,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.avg                              inst   0,00    0,00    0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.max                              inst   0,00    0,00    0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.min                              inst   0,00    0,00    0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.sum                              inst   0,00    0,00    0,00
  smsp__branch_targets_threads_divergent                     branches   1,00    1,00    1,00
  ------------------------------------------------------- ----------- ------- ------- -------
```

```
preSort(int *) (10, 1, 1)x(1024, 1, 1), Invocations 1
  Section: Command line profiler metrics
  ------------------------------------------------------- ----------- ------------ ------------ ------------
  Metric Name                                             Metric Unit      Minimum      Maximum      Average
  ------------------------------------------------------- ----------- ------------ ------------ ------------
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.avg                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.max                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.min                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.avg                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.max                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.min                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                      0,00         0,00         0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.avg                  sector        22,86        22,86        22,86
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.max                  sector       128,00       128,00       128,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.min                  sector         0,00         0,00         0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_ld.sum                  sector     1 280,00     1 280,00     1 280,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.avg                  sector        22,86        22,86        22,86
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.max                  sector       128,00       128,00       128,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.min                  sector         0,00         0,00         0,00
  l1tex__t_sectors_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                  sector     1 280,00     1 280,00     1 280,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.avg                               inst         0,00         0,00         0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.max                               inst         0,00         0,00         0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.min                               inst         0,00         0,00         0,00
  sm__sass_inst_executed_op_local.sum                               inst         0,00         0,00         0,00
  smsp__branch_targets_threads_divergent                      branches 1 541 167,00 1 541 167,00 1 541 167,00
  ------------------------------------------------------- ----------- ------------ ------------ ------------
```

Выводы

В ходе лабораторной работы ознакомился с фундаментальными алгоритмами GPU: свертка, сканирование и гистограмма. Узнал про четно-нечетную сортировку и битоническое слияние. Реализовал блочную четно-нечетную сортировку с использованием битонического слияния.

Четно-нечетная сортировка является модификацией пузырьковой сортировки. Хотя алгоритмическая сложность сортировки оставляет желать лучшего, зато эту сортировку можно выполнять параллельно.

Судя по профилировщику, с реализациями ядер fillFictitious и bitonicMerge всё хорошо, чего нельзя сказать о ядре preSort: очень много дивергенций. Вероятно, это из-за ветвлений: в коде каждая итерация цикла вызывает два условия для четных и нечетных потоков — это приводит к тому, что некоторые потоки выполняют одну ветку, в то время как другие останавливаются и ждут. Надо переделывать реализацию preSort.

Из результатов сравнения можно увидеть, что CPU выигрывает по времени только на первом тесте. Также стоит отметить, что, например, с первым тестом на GPU справляется лучше всех первая конфигурация, а у остальных конфигураций время выполнения уже выше. Аналогично со вторым тестом. Это наглядный пример того, что выбор конфигурации зависит от входных данных.