МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

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

Лабораторная работа №4
по курсу «Параллельная обработка данных»

Сортировка чисел на GPU. Свертка, сканирование, гистограмма.

Выполнил: А. Е. Максимов
Группа: М8О-407Б-19
Преподаватель: А. Ю. Морозов

Москва, 2023

1 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 `nvprof`.

Вариант на "два". Сортировка подсчетом.Диапазон от 0 до 2^{24-1}

Требуется реализовать карманную сортировку для чисел типа int. Должны быть реализованы и использованы:

- Алгоритм гистограммы, с использованием атомарных операций;
- Алгоритм сканирования из библиотеки Thrust

Ограничения: $n \leq 135 * 10^6$

2 Программное и аппаратное обеспечение

Характеристики графического процессора:

- Compute capability: 7.5
- Наименование: NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti
- Графическая память: 6143mb
- Константная память: 64kb
- Разделяемая память: 48kb
- Количество регистров на блок: 65536
- Максимальное количество потоков на блок: 1024
- Максимальное количество блоков: (2147483647, 65535, 65535)
- Константная память: 65536
- Количество мультипроцессоров: 6

Характеристики системы:

- Процессор: «Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz»
- Память: 16,0 ГБ встроенной памяти ноутбука
- SSD: «Hynix BC511 NVMe SK hynix 512GB »

Программное обеспечение:

- ОС: «Windows 10 Домашняя x64»
- Текстовый редактор: «Notepad++»
- Компилятор: «nvcc: Cuda compilation tools, release 12.0, V12.0.76»

3 Метод решения

Алгоритм сортировки подсчётом:

1. Создать массив `Hist` размера M, где M - максимальный элемент исходного массива. В этот массив записать количества элементов так, чтобы на i-ой позиции было количество элементов, равных i.

2. Вычислить префикс-суммы для массива `Hist` с помощью параллельного алгоритма `scan`.

3. Для каждого элемента изначального массива найти новую позицию на основе данных, хранящихся в `Hist` и записать результат в массив ответов.

Для упрощения было использовано максимальное возможное значение входных данных в качестве числа M. Это даёт незначительный проигрыш по используемой памяти, но выигрыш по скорости.

Для параллельного построения гистограммы требуется выполнять атомарное сложение, чтобы избежать гонки потоков - `atomicAdd`. Построение гистограммы проводится в ядре `Hist_Kernel`.

Префиксные суммы вычисляютя параллельно с помощью алгоритма `blelloch scan`. Он реализован в библиотеке `Thrust`, где он выполнен максимально оптимально и корректно для графических процессоров.

Для получения отсортированного массива используется ядро `Sort_Kernel`, которое получает в качестве аргументов исходный массив и `Hist`, после чего размещает элементы в массиве ответов, проводя необходимые операции над массивом гистограммы с помощью функции - `atomicAdd`, что позволяет опять избежать гонки потоков.

4 Результаты

Замеры времени работы CPU и ядер с различными конфигурациями.

Конфигурация	$n = 10$, мс	$n = 100$, мс	$n = 1000$, мс	$n = 10^4$, мс	$n = 10^5$, мс	$n = 10^6$, мс	$n = 10^7$, мс	$n = 10^8$, мс
CPU	38.925	43.883	45.874	47.889	55.851	145.644	1175.670	13165.214
(1, 32)	0.5817	0.5773	0.6132	0.9167	3.9184	34.0722	537.85	2873.13
(32, 32)	0.6040	0.5856	0.5940	0.6449	1.0076	4.9360	190.469	411.732
(1024, 32)	0.5878	0.5807	0.6050	0.6410	0.9741	4.5963	207.906	400.873
(1, 256)	0.5897	0.5980	0.5954	0.6574	1.3618	8.6960	166.658	719.274
(64, 256)	0.6511	0.6036	0.6987	0.6205	1.0420	4.6021	238.298	398.331
(256, 256)	0.5775	0.6288	0.5901	0.6127	0.9157	4.6906	296.945	398.254
(1, 1024)	0.5829	0.5960	0.5888	0.6386	1.0824	5.6370	273.198	451.494
(16, 1024)	0.5772	0.5765	0.5888	0.6470	0.9757	4.6264	245.632	397.336
(64, 1024)	0.5775	0.5999	0.5814	0.6021	0.9316	4.5522	155.939	398.264

5 Профилировка Nsight Compute

Конфигурация ядра (64, 256), размер выходных данных $n = 10^6$.

Конфликты банков памяти

```
C:\Users\cerma\Desktop\MAI\4c\ППП\lab5>ncu --metrics
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum,
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum,
smsp__sass_average_branch_targets_threads_uniform.pct,
dram__sectors_read.sum,dram__sectors_write.sum,
l1tex__t_requests_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum
a.exe <tests\test1000000.txt
==PROF== Connected to process 440 (C:\Users\cerma\Desktop\MAI\4c\ППП\lab5\a.exe)
==PROF== Profiling "Hist_Kernel(int *,int *,int)" -0: 0%....50%....100% -4
passes
==PROF== Profiling "DeviceScanInitKernel" -1: 0%....50%....100% -4 passes
==PROF== Profiling "DeviceScanKernel" -2: 0%....50%....100% -4 passes
==PROF== Profiling "Sort_Kernel" -3: 0%....50%....100% -4 passes
332.831 ms
==PROF== Disconnected from process 440
[440] a.exe@127.0.0.1
Hist_Kernel(int *,int *,int) (64,1,1)x(256,1,1),Context 1,Stream 7,Device 0,CC
7.5
Section: Command line profiler metrics
-------------------------------------------------------------------------------
Metric Name                                                 Metric Unit Metric
Value
-------------------------------------------------------------------------------
dram__sectors_read.sum                                            sector    2a103a551
dram__sectors_write.sum                                           sector    1a012a184
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                             0
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                             0
l1tex__t_requests_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                  request             0
smsp__sass_average_branch_targets_threads_uniform.pct                  %           100
-------------------------------------------------------------------------------

void cub::DeviceScanInitKernel<cub::ScanTileState<int,(bool)1>>(T1,int) (86,1,1)x(128
1,Stream 7,Device 0,CC 7.5
Section: Command line profiler metrics
-------------------------------------------------------------------------------
Metric Name                                                 Metric Unit Metric
```

```
Value
----------------------------------------------------------------------------
dram__sectors_read.sum                                          sector          77
dram__sectors_write.sum                                         sector         723
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                          0
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                          0
l1tex__t_requests_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                 request         343
smsp__sass_average_branch_targets_threads_uniform.pct                 %           0
----------------------------------------------------------------------------

void cub::DeviceScanKernel<cub::DeviceScanPolicy<int>::Policy600,thrust::device_ptr<in
*>,int,int>(T2,T3,T4,int,T5,T6,T7) (10923,1,1)x(128,1,1),Context 1,Stream 7,Device
0,CC 7.5
Section: Command line profiler metrics
----------------------------------------------------------------------------
Metric Name                                                 Metric Unit Metric
Value
----------------------------------------------------------------------------
dram__sectors_read.sum                                          sector    2a100a918
dram__sectors_write.sum                                         sector    2a096a252
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                     53a624
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                     28a477
l1tex__t_requests_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                 request      546a133
smsp__sass_average_branch_targets_threads_uniform.pct                 %          100
----------------------------------------------------------------------------

Sort_Kernel(int *,int *,int *,int) (64,1,1)x(256,1,1),Context 1,Stream 7,Device
0,CC 7.5
Section: Command line profiler metrics
----------------------------------------------------------------------------
Metric Name                                                 Metric Unit Metric
Value
----------------------------------------------------------------------------
dram__sectors_read.sum                                          sector    2a109a573
dram__sectors_write.sum                                         sector    1a987a548
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_ld.sum                          0
l1tex__data_bank_conflicts_pipe_lsu_mem_shared_op_st.sum                          0
l1tex__t_requests_pipe_lsu_mem_global_op_st.sum                 request       31a250
smsp__sass_average_branch_targets_threads_uniform.pct                 %          100
----------------------------------------------------------------------------
```

Время выполнения

```
C:\Users\cerma\Desktop\MAI\4c\ППП\lab5>ncu --set default a.exe <tests\test1000000.txt
==PROF== Connected to process 13152 (C:\Users\cerma\Desktop\MAI\4c\ППП\lab5\a.exe)
==PROF== Profiling "Hist_Kernel(int *,int *,int)" -0: 0%....50%....100% -8
passes
==PROF== Profiling "DeviceScanInitKernel" -1: 0%....50%....100% -8 passes
==PROF== Profiling "DeviceScanKernel" -2: 0%....50%....100% -8 passes
==PROF== Profiling "Sort_Kernel" -3: 0%....50%....100% -8 passes
498.754 ms
==PROF== Disconnected from process 13152
[13152] a.exe@127.0.0.1
Hist_Kernel(int *,int *,int) (64,1,1)x(256,1,1),Context 1,Stream 7,Device 0,CC
7.5
Section: GPU Speed Of Light Throughput
----------------------------------------------
Metric Name               Metric Unit Metric Value
----------------------------------------------
DRAM Frequency          cycle/nsecond         6,00
SM Frequency            cycle/nsecond         1,46
Elapsed Cycles                  cycle    2a307a511
Memory Throughput                   %        21,88
DRAM Throughput                     %        21,88
Duration                       msecond         1,57
L1/TEX Cache Throughput             %         3,71
L2 Cache Throughput                 %         8,00
SM Active Cycles                cycle 2a028a923,54
Compute (SM) Throughput             %         0,62
----------------------------------------------


Section: Launch Statistics
-------------------------------------------------------------
Metric Name                           Metric Unit    Metric Value
-------------------------------------------------------------
Block Size                                                   256
Function Cache Configuration                      CachePreferNone
Grid Size                                                     64
Registers Per Thread             register/thread              16
Shared Memory Configuration Size           Kbyte           32,77
```

```
Driver Shared Memory Per Block        byte/block               0
Dynamic Shared Memory Per Block       byte/block               0
Static Shared Memory Per Block        byte/block               0
Threads                                    thread          16a384
Waves Per SM                                                0,67
-----------------------------------------------------------------

Section: Occupancy
-------------------------------------------------------
Metric Name                     Metric Unit Metric Value
-------------------------------------------------------
Block Limit SM                        block           16
Block Limit Registers                 block           16
Block Limit Shared Mem                block           16
Block Limit Warps                     block            4
Theoretical Active Warps per SM        warp           32
Theoretical Occupancy                     %          100
Achieved Occupancy                        %        67,43
Achieved Active Warps Per SM           warp        21,58
-------------------------------------------------------


void cub::DeviceScanInitKernel<cub::ScanTileState<int,(bool)1>>(T1,int) (86,1,1)x(128
1,Stream 7,Device 0,CC 7.5
Section: GPU Speed Of Light Throughput
-----------------------------------------------
Metric Name               Metric Unit Metric Value
-----------------------------------------------
DRAM Frequency          cycle/nsecond         7,85
SM Frequency            cycle/nsecond         1,86
Elapsed Cycles                  cycle        3a163
Memory Throughput                   %         8,43
DRAM Throughput                     %         0,03
Duration                      usecond         1,70
L1/TEX Cache Throughput             %        15,14
L2 Cache Throughput                 %         8,43
SM Active Cycles                cycle       787,29
Compute (SM) Throughput             %         2,05
-----------------------------------------------
```

```
Section: Launch Statistics
-------------------------------------------------------------
Metric Name                           Metric Unit    Metric Value
-------------------------------------------------------------
Block Size                                                   128
Function Cache Configuration                      CachePreferNone
Grid Size                                                     86
Registers Per Thread                 register/thread          16
Shared Memory Configuration Size           Kbyte           32,77
Driver Shared Memory Per Block        byte/block               0
Dynamic Shared Memory Per Block       byte/block               0
Static Shared Memory Per Block        byte/block               0
Threads                                    thread          11a008
Waves Per SM                                                0,45
-------------------------------------------------------------

Section: Occupancy
-----------------------------------------------------
Metric Name                     Metric Unit Metric Value
-----------------------------------------------------
Block Limit SM                        block           16
Block Limit Registers                 block           32
Block Limit Shared Mem                block           16
Block Limit Warps                     block            8
Theoretical Active Warps per SM        warp           32
Theoretical Occupancy                     %          100
Achieved Occupancy                        %        41,49
Achieved Active Warps Per SM           warp        13,28
-----------------------------------------------------


void cub::DeviceScanKernel<cub::DeviceScanPolicy<int>::Policy600,thrust::device_ptr<i
*>,int,int>(T2,T3,T4,int,T5,T6,T7) (10923,1,1)x(128,1,1),Context 1,Stream 7,Device
0,CC 7.5
Section: GPU Speed Of Light Throughput
-----------------------------------------------
Metric Name               Metric Unit Metric Value
-----------------------------------------------
DRAM Frequency          cycle/nsecond         5,95
SM Frequency            cycle/nsecond         1,45
Elapsed Cycles                  cycle      764a268
```

```
Memory Throughput                    %        89,16
DRAM Throughput                      %        89,16
Duration                         usecond       524,48
L1/TEX Cache Throughput              %        66,91
L2 Cache Throughput                  %        51,69
SM Active Cycles                   cycle   762a405,67
Compute (SM) Throughput              %        27,76
-----------------------------------------------

Section: Launch Statistics
---------------------------------------------------------------
Metric Name                              Metric Unit    Metric Value
---------------------------------------------------------------
Block Size                                                      128
Function Cache Configuration                          CachePreferNone
Grid Size                                                  10a923
Registers Per Thread                  register/thread              35
Shared Memory Configuration Size            Kbyte           65,54
Driver Shared Memory Per Block         byte/block               0
Dynamic Shared Memory Per Block        byte/block               0
Static Shared Memory Per Block        Kbyte/block            6,16
Threads                                     thread       1a398a144
Waves Per SM                                               56,89
---------------------------------------------------------------

Section: Occupancy
-----------------------------------------------------
Metric Name                         Metric Unit Metric Value
-----------------------------------------------------
Block Limit SM                            block           16
Block Limit Registers                     block           12
Block Limit Shared Mem                    block           10
Block Limit Warps                         block            8
Theoretical Active Warps per SM            warp           32
Theoretical Occupancy                         %          100
Achieved Occupancy                            %        97,64
Achieved Active Warps Per SM               warp        31,24
-----------------------------------------------------

Sort_Kernel(int *,int *,int *,int) (64,1,1)x(256,1,1),Context 1,Stream 7,Device
```

```
0,CC 7.5
Section: GPU Speed Of Light Throughput
----------------------------------------------
Metric Name               Metric Unit Metric Value
----------------------------------------------
DRAM Frequency          cycle/nsecond         5,99
SM Frequency            cycle/nsecond         1,47
Elapsed Cycles                  cycle    3a384a605
Memory Throughput                   %        19,67
DRAM Throughput                     %        19,67
Duration                       msecond         2,30
L1/TEX Cache Throughput             %         7,44
L2 Cache Throughput                 %         8,41
SM Active Cycles                cycle 3a007a629,54
Compute (SM) Throughput             %         0,92
----------------------------------------------

Section: Launch Statistics
-------------------------------------------------------------
Metric Name                             Metric Unit    Metric Value
-------------------------------------------------------------
Block Size                                                      256
Function Cache Configuration                          CachePreferNone
Grid Size                                                        64
Registers Per Thread                 register/thread             16
Shared Memory Configuration Size               Kbyte           32,77
Driver Shared Memory Per Block        byte/block                0
Dynamic Shared Memory Per Block       byte/block                0
Static Shared Memory Per Block        byte/block                0
Threads                                     thread          16a384
Waves Per SM                                                  0,67
-------------------------------------------------------------

Section: Occupancy
-----------------------------------------------------
Metric Name                     Metric Unit Metric Value
-----------------------------------------------------
Block Limit SM                        block           16
Block Limit Registers                 block           16
Block Limit Shared Mem                block           16
Block Limit Warps                     block            4
```

```
Theoretical Active Warps per SM        warp           32
Theoretical Occupancy                    %          100
Achieved Occupancy                       %        67,85
Achieved Active Warps Per SM           warp        21,71
----------------------------------------------------------
```

Как можно увидеть в результатах профилировки - конфликты банков памяти возникают в процедуре `scan`, которая была реализована создателями CUDA. Это происходит вследствие параллельного вычисления префиксных сумм на массиве условно случайной длины.

6 Выводы

Сортировка используется во многих алгоритмах, например она необходима для применения бинарного поиска и для построения выпуклой оболочки алгоритмом Грэхема.

Средняя сложность алгоритма $O(n)$, так как сортировка подсчётом использует каждую единицу данных не больше трёх раз.

В этой лабораторной работе я гораздо лучше понял особенности оптимизации параллельных процессов и их важность для скорости работы программы, поскольку позволяет во много раз увеличить быстродействие вычислений.

Список литературы

[1] *Chapter 39. Parallel Prefix Sum (Scan) with CUDA.*
URL: `https://developer.nvidia.com/gpugems/gpugems3/part-vi-gpu-computing/chapter-39-parallel-prefix-sum-scan-cuda`
(дата обращения: 01.11.2022)