Технология CUDA для высокопроизводительных вычислений на кластерах с графическими процессорами

Колганов Александр
alexander.k.s@mail.ru

часть 4

– библиотека параллельных алгоритмов для C++

Thrust – это:

- STL-подобная библиотека обработки данных на GPU
- Реализация как для GPU, так и для CPU
- Открытый проект, поддерживаемый NVIDIA
  Разработчики: Nathan Bell и др.

Основные возможности

- Унифицированный интерфейс для выполнения типичных задач обработки данных
- Уделяется внимание производительности
- По сравнению с CUDA C, возможности тонкого контроля (напр., разделяемая память) не так богаты
- Дизайн, схожий с STL: контейнеры, итераторы, алгоритмы

Компоненты

- Контейнеры
  - Управление памятью на host и device
  - Упрощённый обмен данными
- Итераторы
  - Подобны указателям
  - «Следят» за областью памяти (host или device)
- Алгоритмы
  - Применяются к контейнерам и итераторам

Распространение

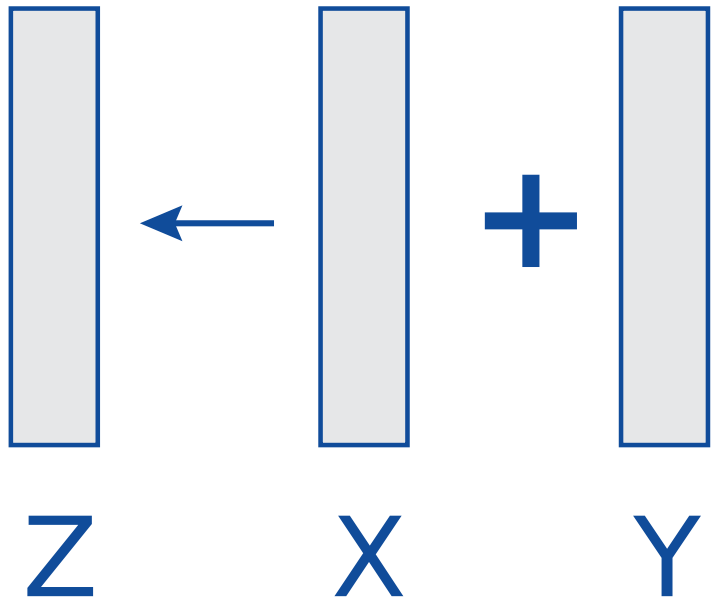
- Входит в состав CUDA 4+
- Хостинг кода: GitHub

  git clone https://github.com/thrust/thrust.git

Пример №1: сложение векторов

Простое сложение векторов в Thrust:

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
  Z[i] = X[i] + Y[i];
```



Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

   X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
    Y.begin(),
    Z.begin(),
     thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

   X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
    Y.begin(),
    Z.begin(),
     thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

Заголовочные файлы Thrust

Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

    X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
    Y.begin(),
    Z.begin(),
     thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

3 вектора
в памяти GPU

Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
    Y.begin(),
    Z.begin(),
     thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

Поэлементные присваивания неэффективны, т.к. каждая операция влечёт копирование

Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

   X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
   Y.begin(),
   Z.begin(),
    thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

Операция **transform**: начальная позиция и размер данных задаются итераторами.
Используется стандартная операция **«plus»**

Пример №1: сложение векторов

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
 #include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

   thrust::device_vector<float> X(3);
  thrust::device_vector<float> Y(3);
  thrust::device_vector<float> Z(3);

   X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
    Y.begin(),
    Z.begin(),
     thrust::plus<float>());

   for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";
}

return 0;
```

Поэлементный вывод результата

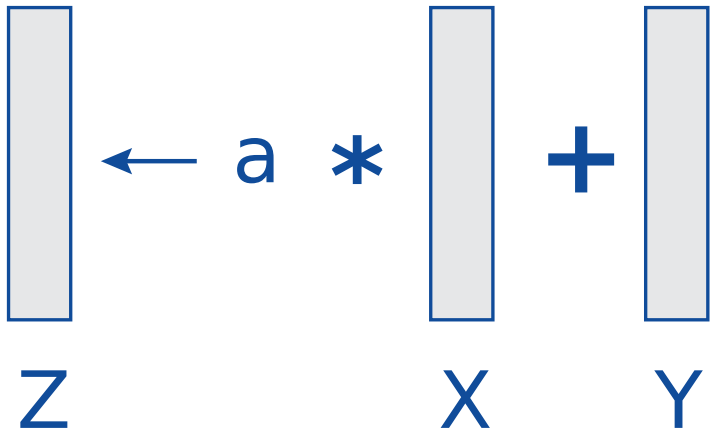
Пример №1: сложение векторов

```
[dmikushin@tesla-cmc vector_addition]$ nvcc --version
nvcc: NVIDIA (R) Cuda compiler driver
Copyright (c) 2005-2011 NVIDIA Corporation
Built on Thu_Nov_17_17:38:12_PST_2011
Cuda compilation tools, release 4.1, V0.2.1221
[dmikushin@tesla-cmc vector_addition]$ make
nvcc vector_addition.cu -o vector_addition
[dmikushin@tesla-cmc vector_addition]$ ./vector_addition
Z[0] = 25
Z[1] = 55
Z[2] = 40
```

Пример №2: SAXPY

SAXPY: $z \leftarrow a * x + y$

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
  Z[i] = a * X[i] + Y[i];
```



Пример №2: SAXPY – класс-функтор

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

struct saxpy {

  float a;

  saxpy(float a) : a(a) {}

  __host__ __device__ float operator()(float x, float y) {
    return a * x + y;
   }

};
```

Пример №2: SAXPY – класс-функтор

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

struct saxpy {

  float a;

  saxpy(float a) : a(a) {}

  __host__ __device__ float operator()(float x, float y) {
    return a * x + y;
  }

};
```

Стандартной операции **«saxpy»** в Thrust нет, поэтому мы реализуем её в виде класса-**функтора** (функционального объекта)

Пример №2: SAXPY – main

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  float a = 2.0f;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
          Y.begin(),
          Z.begin(),
           saxpy(a));

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";

  return 0;

}
```

Пример №2: SAXPY – main

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  float a = 2.0f;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
          Y.begin(),
          Z.begin(),
           saxpy(a));

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";

  return 0;

}
```

Thrust-трансформация с функтором saxpy, определённым пользователем

Пример №3: SAXPY, λ-выражения (Thrust 1.5+)

```
using namespace thrust::placeholders;

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  float a = 2.0f;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
          Y.begin(),
          Z.begin(),
           a * _1 + _2);

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";

}
```

Пример №3: SAXPY, λ-выражения (Thrust 1.5+)

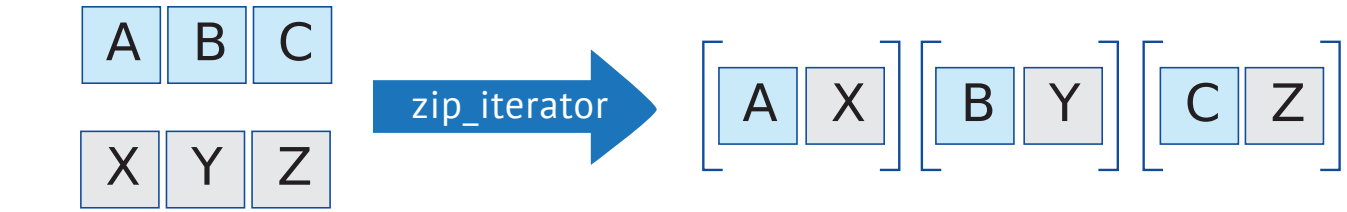
```
using namespace thrust::placeholders;

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;

  float a = 2.0f;

  thrust::transform(X.begin(), X.end(),
         Y.begin(),
         Z.begin(),
          a * _1 + _2);

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "Z[" << i << "] = " << Z[i] << "\n";

}
```

Реализация **saxpy** с использованием **маркеров подстановки**: _1 и _2

Типы трансформаций

- **Унарная:** $X[i] = f(A[i])$
- **Бинарная:** $X[i] = f(A[i], B[i])$
- **Тернарная:** $X[i] = f(A[i], B[i], C[i])$
- **Обобщённая:** $X[i] = f(A[i], B[i], C[i], \ldots)$

zip-итераторы



Несколько последовательностей

Последовательность кортежей

Пример №4: тернарная трансформация

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

struct linear_combo {

   __host__ __device__ float operator()(thrust::tuple<float,float,float> t) {

    float x, y, z;

     thrust::tie(x,y,z) = t;

     return 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;

  }

};
```

Пример №4: тернарная трансформация

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

struct linear_combo {

   __host__ __device__ float operator()(thrust::tuple<float,float,float> t) {

     float x, y, z;

      thrust::tie(x,y,z) = t;

      return 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;

   }

};
```

Функтор, оперирующий кортежами

Пример №4: тернарная трансформация

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

struct linear_combo {

   __host__ __device__ float operator()(thrust::tuple<float,float,float> t) {

    float x, y, z;

    thrust::tie(x,y,z) = t;

     return 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;

  }

};
```

Разбиение кортежа на компоненты

Пример №4: тернарная трансформация

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

struct linear_combo {

   __host__ __device__ float operator()(thrust::tuple<float,float,float> t) {

    float x, y, z;

     thrust::tie(x,y,z) = t;

     return 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;

  }

};
```

Вычисление результата

Пример №4: тернарная трансформация

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);
  thrust::device_vector<float> U(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;
  Z[0] = 20; Z[1] = 30; Z[2] = 25;

  thrust::transform(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin(), Z.begin())),
     thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(),
    Y.end(),
    Z.end())),
    U.begin(),
    linear_combo());

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
  std::cout << "U[" << i << "] = " << U[i] << "\n";

  return 0;

}
```

Пример №4: тернарная трансформация

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);
  thrust::device_vector<float> U(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;
  Z[0] = 20; Z[1] = 30; Z[2] = 25;

  thrust::transform(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin(), Z.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(),
    Y.end(),
    Z.end())),
    U.begin(),
    linear_combo());

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
  std::cout << "U[" << i << "] = " << U[i] << "\n";

  return 0;

}
```

Входные данные задаются zip_iterator'ами

Пример №5: сумма

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

   float result = thrust::reduce(X.begin(), X.end());

  std::cout << "sum is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

Пример №5: сумма

```cpp
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  float result = thrust::reduce(X.begin(), X.end());

  std::cout << "sum is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

Сумма – оператор по умолчанию для редукции

Пример №6: поиск максимума

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  float init = 0.0f;

  float result = thrust::reduce(X.begin(), X.end(),
                 init,
                thrust::maximum<float>());

  std::cout << "maximum is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

Пример №6: поиск максимума

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  float init = 0.0f;

  float result = thrust::reduce(X.begin(), X.end(),
                 init,
                 thrust::maximum<float>());

  std::cout << "maximum is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

Редукция с оператором maximum и начальным значением 0.0 (только для неотрицательных чисел)

Пример №7: индекс максимума

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

typedef thrust::tuple<int,int> Tuple;

struct max_index {

  __host__ __device__ Tuple operator()(Tuple a, Tuple b) {

    if (thrust::get<0>(a) > thrust::get<0>(b))
      return a;
    else
      return b;
   }

};
```

Пример №7: индекс максимума

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

typedef thrust::tuple<int,int> Tuple;

struct max_index {

  __host__ __device__ Tuple operator()(Tuple a, Tuple b) {

   if (thrust::get<0>(a) > thrust::get<0>(b))
     return a;
   else
     return b;
  }

};
```

Функтор над кортежами (ключ, значение): сравнить ключи и вернуть кортеж

Пример №7: индекс максимума

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<int> X(3), Y(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20; // values
   Y[0] = 0; Y[1] = 1; Y[2] = 2;    // indices

   Tuple init(X[0],Y[0]);

  Tuple result = thrust::reduce(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y.end())),
     init,
    max_index());

  int value, index;

  thrust::tie(value,index) = result;

  std::cout << "maximum value is " << value << " at index " << index << "\n";

  return 0;

}
```

Пример №7: индекс максимума

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<int> X(3), Y(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20; // values
  Y[0] = 0; Y[1] = 1; Y[2] = 2;    // indices

   Tuple init(X[0],Y[0]);

  Tuple result = thrust::reduce(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y.end())),
     init,
    max_index());

  int value, index;

  thrust::tie(value,index) = result;

  std::cout << "maximum value is " << value << " at index " << index << "\n";

  return 0;

}
```

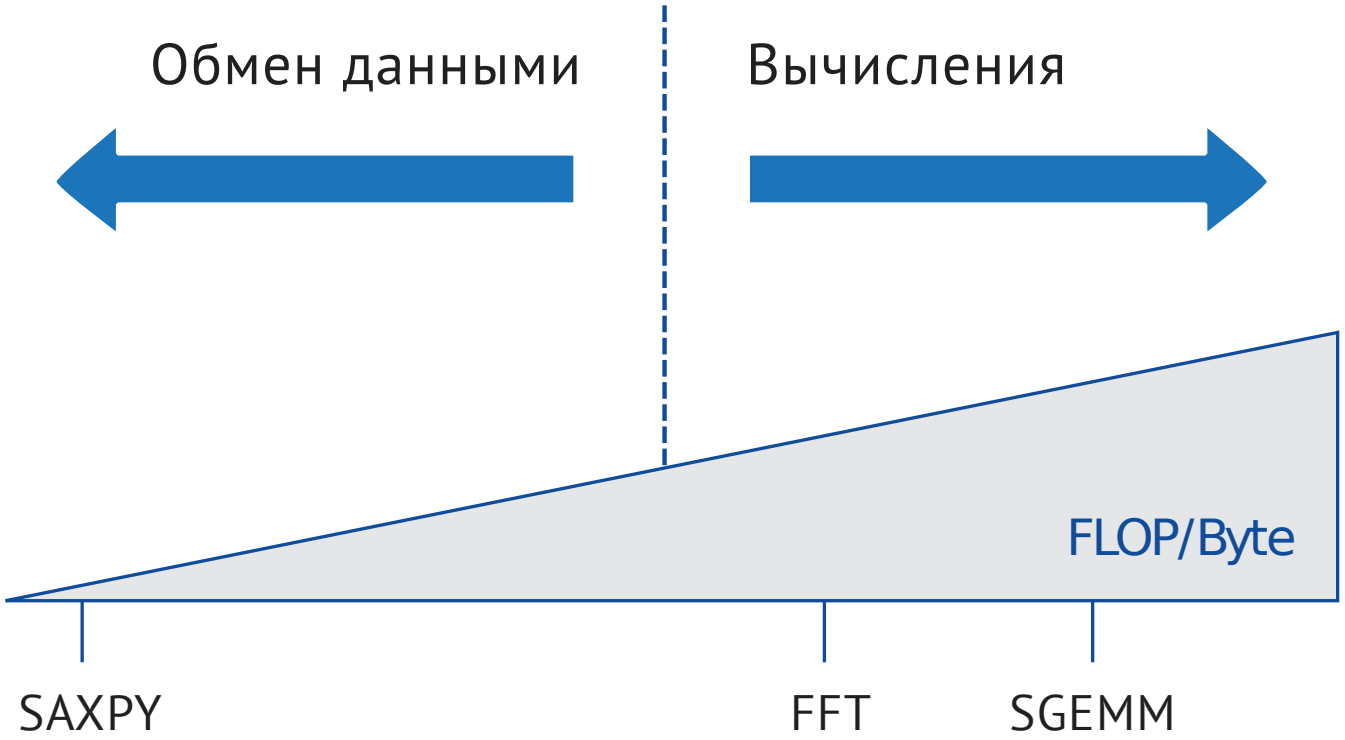
Дополнительный массив индексов

Пример №7: индекс максимума

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<int> X(3), Y(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20; // values
   Y[0] = 0; Y[1] = 1; Y[2] = 2;    // indices

  Tuple init(X[0],Y[0]);

  Tuple result = thrust::reduce(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y.end())),
    init,
    max_index());

  int value, index;

  thrust::tie(value,index) = result;

  std::cout << "maximum value is " << value << " at index " << index << "\n";

  return 0;

}
```

Редукция с первым элементом в качестве начального значения и функтором max_index

Вопросы производительности



Вычислительная интенсивность

- В вышеприведённых примерах (FLOPS : byte)

vector addition	1 : 12
SAXPY	2 : 12
ternary transform	5 : 20
sum	1 : 4
index of maximum	1 : 12

- Оптимальная интенсивность для GPU (FLOPS : byte)

GeForce GTX 280	7.0 : 1
GeForce GTX 480	7.6 : 1
Tesla C870	6.7 : 1
Tesla C1060	9.1 : 1
Tesla C2050	7.1 : 1

Вычислительная интенсивность

- В вышеприведённых примерах (FLOPS : byte)
  - vector addition 1 : 12
  - SAXPY 2 : 12
  - ternary transform 5 : 20
  - sum 1 : 4
  - index of maximum 1 : 12
- Оптимальная интенсивность для GPU (FLOPS : byte)
  - GeForce GTX 280 7.0 : 1
  - GeForce GTX 480 7.6 : 1
  - Tesla C870 6.7 : 1
  - Tesla C1060 9.1 : 1
  - Tesla C2050 7.1 : 1

Реальная и оптимальная интенсивность противоположны!

Пример №8: индекс максимума (оптимизация)

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<int>     X(3);
   thrust::counting_iterator<int> Y(0);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  Tuple init(X[0],Y[0]);

  Tuple result = thrust::reduce(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y)),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y + X.size())),
    init,
    max_index());

  int value, index;

  thrust::tie(value,index) = result;

  std::cout << "maximum value is " << value << " at index " << index << "\n";

  return 0;

}
```

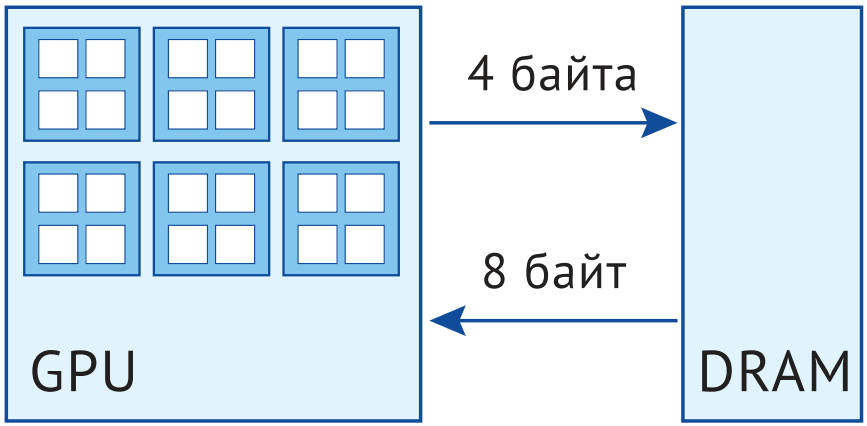
Пример №8: индекс максимума (оптимизация)

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<int>     X(3);
  thrust::counting_iterator<int> Y(0);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  Tuple init(X[0],Y[0]);

  Tuple result = thrust::reduce(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y)),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y + X.size())),
    init,
    max_index());

  int value, index;

  thrust::tie(value,index) = result;

  std::cout << "maximum value is " << value << " at index " << index << "\n";

  return 0;

}
```

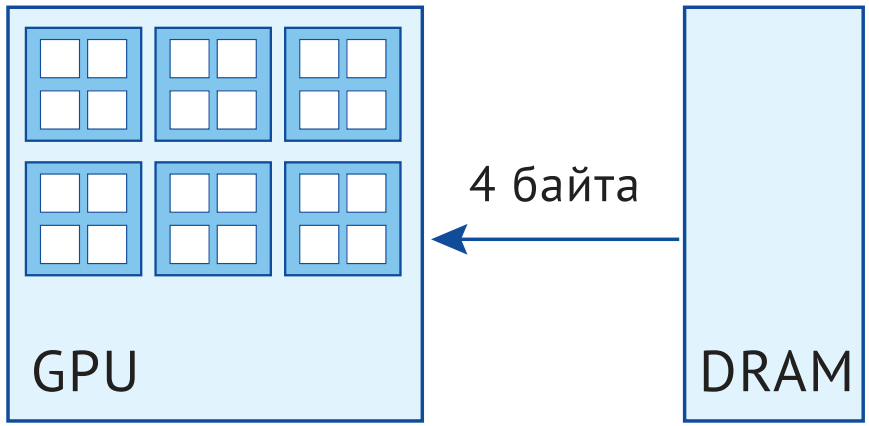
В целях оптимизации используется специальный **counting_iterator** вместо массива индексов

Пример №8: индекс максимума (оптимизация)

Исходная реализация



Оптимизированный вариант



Слияние (fusion) циклов

Два исходных цикла:

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
  U[i] = F(X[i],Y[i],Z[i]);
for (int i = 0; i < N; ++i)
  V[i] = G(X[i],Y[i],Z[i]);
```

Два цикла, объединённые в один:

```
for (int i = 0; i < N; ++i) {
  U[i] = F(X[i],Y[i],Z[i]);
  V[i] = G(X[i],Y[i],Z[i]);
}
```

Пример №9: слияние трансформаций

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

typedef thrust::tuple<float,float>       Tuple2;
typedef thrust::tuple<float,float,float> Tuple3;

struct linear_combo {

  __host__ __device__ Tuple2 operator()(Tuple3 t) {

    float x, y, z; thrust::tie(x,y,z) = t;

    float u = 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;
    float v = 1.0f * x + 2.0f * y + 3.0f * z;

     return Tuple2(u,v);

  };

}
```

Пример №9: слияние трансформаций

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <thrust/iterator/zip_iterator.h>
#include <iostream>

typedef thrust::tuple<float,float>       Tuple2;
typedef thrust::tuple<float,float,float> Tuple3;

struct linear_combo {

  __host__ __device__ Tuple2 operator()(Tuple3 t) {

    float x, y, z; thrust::tie(x,y,z) = t;

    float u = 2.0f * x + 3.0f * y + 4.0f * z;
    float v = 1.0f * x + 2.0f * y + 3.0f * z;

    return Tuple2(u,v);

  };

}
```

Входные и выходные данные объединяются в кортежи

Пример №9: слияние трансформаций

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);
   thrust::device_vector<float> U(3), V(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;
  Z[0] = 20; Z[1] = 30; Z[2] = 25;

  thrust::transform(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin(), Z.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y.end(), Z.end())),
     thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(U.begin(), V.begin())),
    linear_combo());

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "U[" << i << "] = " << U[i] << " V[" << i << "] = " << V[i] << "\n";

  return 0;

}
```

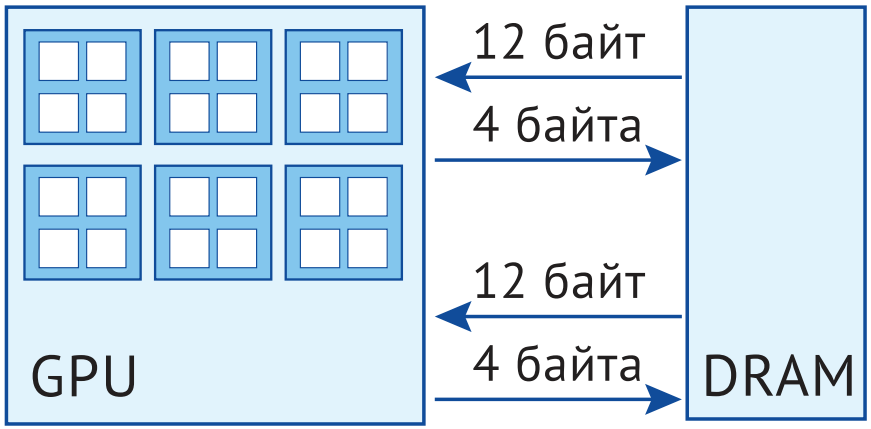
Пример №9: слияние трансформаций

```
int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3), Y(3), Z(3);
  thrust::device_vector<float> U(3), V(3);

  X[0] = 10; X[1] = 20; X[2] = 30;
  Y[0] = 15; Y[1] = 35; Y[2] = 10;
  Z[0] = 20; Z[1] = 30; Z[2] = 25;

  thrust::transform(
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.begin(), Y.begin(), Z.begin())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(X.end(), Y.end(), Z.end())),
    thrust::make_zip_iterator(thrust::make_tuple(U.begin(), V.begin())),
    linear_combo());

  for (size_t i = 0; i < Z.size(); i++)
    std::cout << "U[" << i << "] = " << U[i] << " V[" << i << "] = " << V[i] << "\n";

  return 0;

}
```

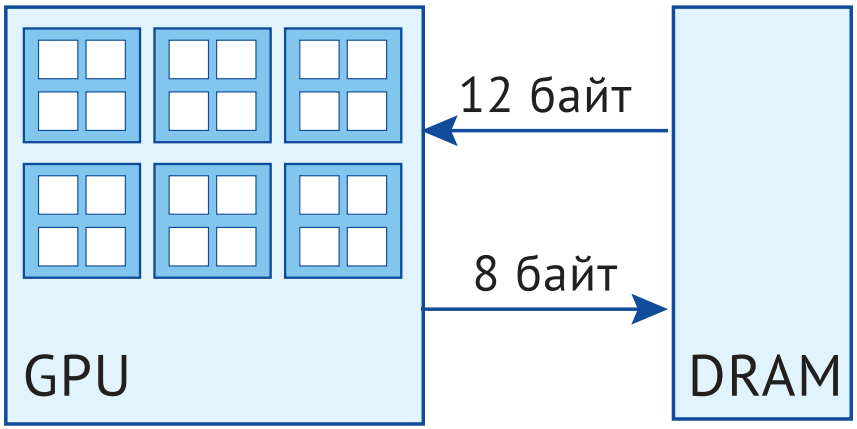
Теперь и на выходе – последовательность кортежей

Пример №9: слияние трансформаций

Исходная реализация



Оптимизированный вариант



Слияние трансформации и редукции

Два исходных цикла:

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
  Y[i] = F(X[i]);
for (int i = 0; i < N; ++i)
  sum += Y[i];
```

Два цикла, объединённые в один:

```
for (int i = 0; i < N; ++i)
  sum += F(X[i]);
```

Пример №10: трансформация + редукция

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

using namespace thrust::placeholders;

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  float result = thrust::transform_reduce(
    X.begin(), X.end(),
    _1 * _1,
    0.0f,
     thrust::plus<float>());

  std::cout << "sum of squares is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

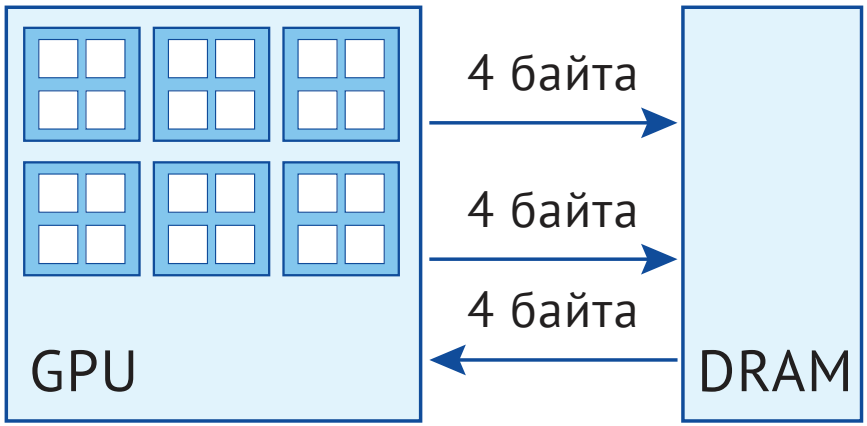
Пример №10: трансформация + редукция

```
#include <thrust/device_vector.h>
#include <thrust/transform.h>
#include <thrust/functional.h>
#include <iostream>

using namespace thrust::placeholders;

int main(void) {

  thrust::device_vector<float> X(3);

  X[0] = 10; X[1] = 30; X[2] = 20;

  float result = thrust::transform_reduce(
   X.begin(), X.end(),
   _1 * _1,
   0.0f,
    thrust::plus<float>());

  std::cout << "sum of squares is " << result << "\n";

  return 0;

}
```

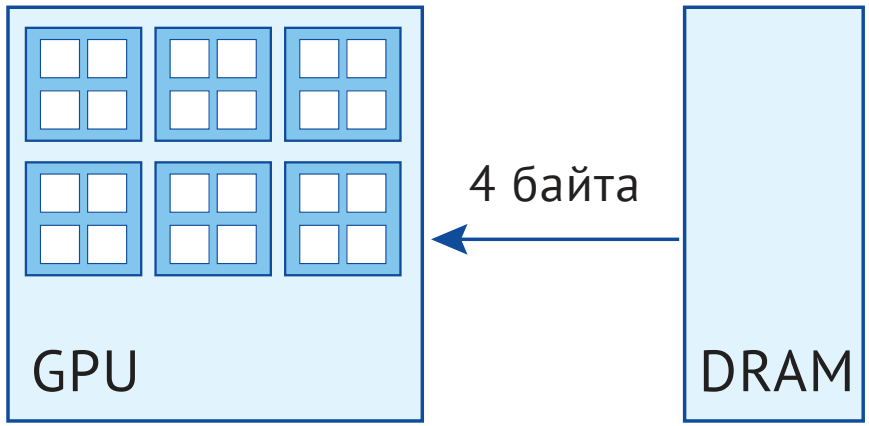
Вычисление квадратов и сложение в одной операции

Пример №10: трансформация + редукция

Исходная реализация



Оптимизированный вариант



Взаимодействие Thrust и CUDA

- Преобразовать контейнер к обычному указателю:

```
thrust::device_vector<int> d_vec(4);

int* ptr = thrust::raw_pointer_cast(&d_vec[0]);

my_kernel<<< N / 256, 256 >>>(N, ptr);

cudaMemcpyAsync(ptr, ... );
```

Взаимодействие Thrust и CUDA

- «Обернуть» обычный массив в спец. контейнер Thrust:

```
int *raw_ptr;

cudaMalloc((void**) &raw_ptr, N * sizeof(int));

thrust::device_ptr<int> dev_ptr(raw_ptr);

thrust::fill(dev_ptr, dev_ptr + N, (int) 0);

dev_ptr[0] = 1;

cudaFree(raw_ptr);
```

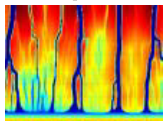
Дополнительные примеры на GitHub:

- Monte Carlo Integration
- Run-Length Encoding
- Summed Area Table
- Moving Average
- Word Count
- VoronoiDiagram
- Graphics Interop
- Stream Compaction
- Lexicographical Sort
- Summary Statistics
- Histogram
- ...

Приложения Thrust

CUSP – операции с разреженными матрицами и вычисления на графах с поддержкой CUDA

http://code.google.com/p/cusp-library/



PETSc – параллельное решение научных задач, моделируемых дифференциальными УРЧП

http://www.mcs.anl.gov/petsc/

Trilinos – объектно-ориентированная библиотека для решения сложных научных и инженерных задач

http://trilinos.sandia.gov/

Ресурсы

- Презентация Nathan Bell:
  Rapid Problem Solving Using Thrust
- Презентация Ty McKercher:
  Using Thrust to Sort CUDA FORTRAN Arrays