

Гибридная CPU/GPU реализация сквозной информационной технологии построения цифровых моделей местности по космическим снимкам*

А.П. Котов, Е.В. Гошин, В.А. Фурсов

Самарский национальный исследовательский университет
имени академика С.П. Королева

В работе исследуется технология построения цифровой модели местности (ЦММ) по последовательности космических снимков. Технология строится на базе разработанных авторами ранее быстродействующих алгоритмов сопоставления изображений и построения карт диспаратности, реализованных на графических процессорах. В настоящей работе сформирована сквозная технология построения ЦММ по последовательности разноракурсных космических изображений. Экспериментальные исследования технологии показали, что ее применение позволяет существенно сократить время обработки аэрокосмических данных по сравнению с программным пакетом ENVI, который в настоящее время большинством исследователей признается одним из лучших.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, разноракурсные изображения, реконструкция 3D-сцен, сопоставление изображений, CUDA-технология, ENVI.

1. Введение

Задача построения цифровой модели местности (ЦММ) по космическим снимкам является одной из важных в системах обработки и анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Поэтому программные компоненты для построения ЦММ присутствуют в большинстве коммерческих программных комплексов обработки данных ДЗЗ. Наиболее популярные среди них – ENVI, PHOTOMOD, Geomatica [1–3]. Тем не менее, существует проблема оперативности построения моделей местности. Космические изображения, как правило, имеют большие размеры, при обработке которых возникают проблемы, связанные как с ограничением объема памяти, так и вычислительной мощности. Поэтому пользователи вынуждены «вырезать» из исходных изображений фрагменты сравнительно небольших размеров и строить локальные модели местности.

Вместе с тем, часто предъявляется требование решать данную задачу в реальном времени, например, с целью мониторинга чрезвычайных ситуаций, для анализа фоно-целевой обстановки, прокладки маршрутов и др. Поэтому, для повышения оперативности построения ЦММ, актуально использование высокопроизводительных технологий, таких как MPI, OpenMP, в том числе и на графических процессорах с применением технологии CUDA [4].

В настоящей статье мы приводим описание, в значительной степени, традиционной технологии построения ЦММ по данным ДЗЗ [5], а также детальное описание основных ее этапов. При этом основное внимание будет уделено описанию отличительных особенностей реализации этих этапов, по сравнению с известными, а также анализу степени внутреннего параллелизма. С учетом этого анализа предлагается гибридная реализация сквозной технологии построения ЦММ по космическим изображениям. Технология в целом реализуется на гибридных вычислительных системах, включающих как графические, так и центральные процессоры. Наша цель состоит в том, чтобы показать, что при реализации сквозной технологии на гибридной CPU/GPU системе может быть достигнута существенно более высокая производительность обработки данных космического зондирования Земли по

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №16-07-00729а, № 16-37-60106 мол_а_дк и 16-37-00362 мол_а).

сравнению с программным пакетом ENVI, который в настоящее время большинством исследователей признается одним из лучших.

2. Основные этапы технологии

Общая схема основных этапов рассматриваемой технологии реконструкции трёхмерной ЦММ по стереопарам космических изображений приведена на рисунке 1. Основные этапы технологии: ректификация изображений, сопоставление (определение соответствующих точек) изображений и определение трехмерных координат ЦММ.

Исходными данными для рассматриваемой технологии являются: изображения сцены (поверхности земли), полученные с различных ракурсов, а также метаинформация в виде набора RPC (Rational polynomial coefficient) [6] коэффициентов $\begin{matrix} a, & b, & c, & d \\ (20 \times 1) & (20 \times 1) & (20 \times 1) & (20 \times 1) \end{matrix}$, которые представляют собой модель формирования изображения камерой спутника.

$$Y = \frac{a^T u}{b^T u}, X = \frac{c^T u}{d^T u}, \quad (1)$$

где

$$u = [1 \ V \ U \ W \ VU \ VW \ UW \ V^2 \ U^2 \ W^2 \ UVW \ V^3 \ VU^2 \ VW^2 \ V^2U \ U^3 \ UW^2 \ V^2W \ U^2W \ W^3]^T,$$

X, Y – нормализованные координаты изображений,

U, V, W – нормализованные координаты трёхмерной точки.

Ректификация разноракурсных изображений представляет собой преобразование, в результате которого соответствующие точки на изображениях располагаются в одних и тех же строках. Целью этапа ректификации является упрощение обработки стереоснимков, в частности, поиска соответствующих точек, а также удобство построения карты диспарантности (горизонтальных параллаксов), поскольку в этом случае диспарантность возникает только по одной координате.

Центральной проблемой в технологии построения ЦММ является этап сопоставления изображений: нахождение соответствующих точек на разных видах (нахождение горизонтальных параллаксов). Для создания условий для применения методов сопоставления обычно преодолевают путем ректификации изображений (приведение строк изображений к одинаковой ориентации).

При построении ЦМР по стереопарам космической съемки используются хорошо известные как в фотограмметрии, так и в компьютерном стереозрении три класса методов сопоставления изображений: локальный, глобальный и полу-глобальный [7]. Сопоставление изображений заключается в поиске для каждой точки (s, l) на первом изображении соответствующей точки $(s + \Delta s, l + \Delta l)$ на втором изображении. В случае ректифицированных изображений, вместо двумерного может быть использован одномерный поиск. При этом случае задача сводится к нахождению горизонтальных параллаксов (относительных сдвигов) точек между изображениями.

По результатам сопоставления изображений может быть сформирована карта диспарантности, представляющая собой яркостную визуализацию найденных сдвигов: яркость каждого пиксела карты диспарантности тем больше, чем больше сдвиг соответствующей точки исходного изображения.

Для работы с ректифицированными изображениями мы ввели в технологию пересчет коэффициентов RPC. Поскольку RPC заданы для исходных изображений, в соответствии с применяемыми к обоим изображениям проективными преобразованиями необходимо вычислить новые коэффициенты для ректифицированных изображений.

Вычисление трёхмерных точек в глобальной системе координат по найденным соответствующим точкам производится с использованием RPC для ректифицированных изображений. Для решения этой задачи (inverse mapping) чаще всего используют нелинейный метод наименьших квадратов [8].

Далее мы приведем более детальное, но достаточно краткое описание математических моделей и алгоритмов, реализуемых на указанных этапах технологии, при этом этап сопоставления изображений сопровождается описанием параллельной реализации

предлагаемого алгоритма. В заключительном разделе приводятся примеры реализации технологии и достигнутые характеристики быстродействия.

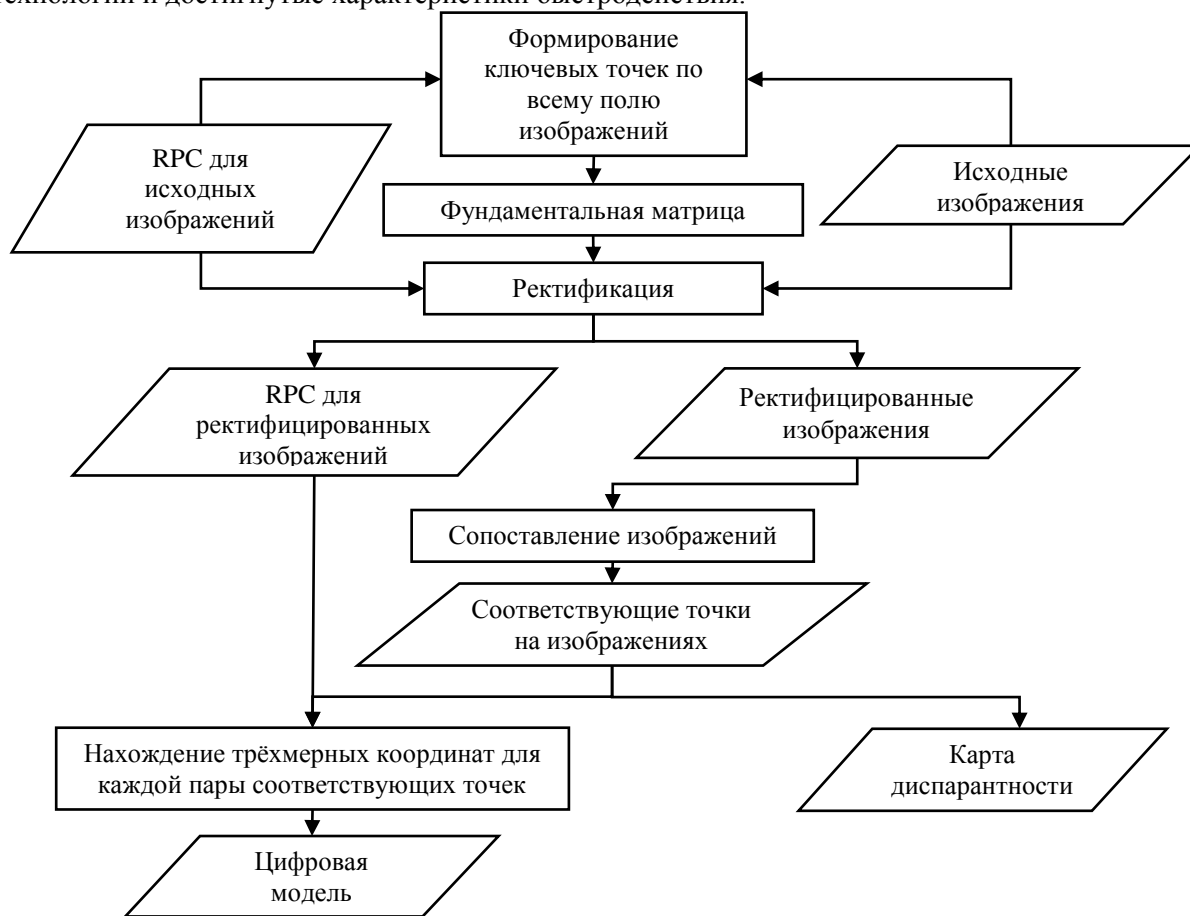


Рис. 1. Схема основных этапов информационной технологии

3. Ректификация и пересчет RPC-коэффициентов

Исходными данными для этого этапа являются пара космических изображений, зарегистрированных при разных ракурсах, на которых имеется общая область.

Существует несколько подходов к ректификации: по известным параметрам съёмки (точная модель), по известной дробно-рациональной функции изображения (RFM, rational functional model), задающей соответствие между координатами снимка и трёхмерной точки в пространстве [9], а также по известным или найденным соответствующим точкам между изображениями (проективная, полиномиальная модель).

Ключевые точки формируются по коэффициентам рациональной функции (RPC), входящим в состав метаинформации. После формирования набора ключевых точек производится вычисление фундаментальной матрицы.

Соответствующие точки на двух проекциях связаны фундаментальной 3×3 -матрицей F [10], в частности, для точек, координаты которых заданы 3×1 -векторами $m_1, m_2 : m_1 = [s_1, l_1, 1]^T$, $m_2 = [s_2, l_2, 1]^T$ выполняется условие:

$$m_1^T F m_2 = 0, \quad (2)$$

$$\text{где } F = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} \\ F_{31} & F_{32} & F_{33} \end{bmatrix}.$$

Соотношение (2) задает эпиполярные ограничения на допустимые координаты соответствующих точек на стереоизображениях. Нетрудно заметить, что для учёта этих ограничений необходимо точное знание фундаментальной матрицы.

Для нахождения параметров фундаментальной матрицы решается СЛУ методом наименьших квадратов с числом заданных соответствующих точек не меньше восьми. Для того, чтобы на двух изображениях соответствующие точки располагались в одних и тех же строках, необходимо, чтобы фундаментальная матрица имела вид:

$$F' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Для этого к обоим изображениям применяется специальное проективное преобразование [11]. Для первого и второго изображений матрицы данного преобразования обозначаются как H_1 и H_2 соответственно, и удовлетворяют следующему равенству:

$$(m_1 H_1)^T F' H_2 m_2 = 0.$$

В результате ректификации соответствующие точки на изображениях должны быть расположены в одних и тех же строках.

Как было упомянуто выше, исходные RPC неприменимы к получившимся ректифицированным изображениям, поэтому необходимо вычислить дополнительные коэффициенты $A_0, A_1, A_2, B_0, B_1, B_2, C_0, C_1, C_2$ на основе матрицы проективного преобразования H . С использованием этих коэффициентов соотношение (1) приобретает вид:

$$l + \frac{A_0 + A_1 l + A_2 s}{C_0 + C_1 l + C_2 s} = \frac{a^T u}{b^T u} L_s + L_0$$

$$s + \frac{B_0 + B_1 s + B_2 l}{C_0 + C_1 l + C_2 s} = \frac{c^T u}{d^T u} S_s + S_0,$$

где l, s – значения координат на изображении, а значения L_0, L_s, S_0, S_s берутся из метафайла RPC.

4. Сопоставление изображений

Сопоставление изображений локальным методом сводится к нахождению горизонтальных параллаксов в результате сопоставления функций распределения яркостей на фрагментах левого и правого стереоизображений. Для каждого пикселя левого изображения стереопары выполняется поиск соответствующего пикселя на правом изображении в пределах локального окна.

В программном комплексе ENVI используется локальный метод, в котором в качестве критерия сходства пикселей используется нормализованная кросс-корреляция значений яркости пикселей левого и правого изображений. Так как данный пакет является закрытым ПО, невозможно точно сказать, как именно реализован локальный метод.

Модификация локального метода для работы с эпиполярными ограничениями, посредством штрафных коэффициентов, реализована в работе [12]. В данной работе мы не использовали штрафные коэффициенты, т.к. локальный метод применялся для ректифицированных изображений. Поэтому область поиска была сосредоточена на эпиполярных линиях, с небольшим шагом по вертикали.

Приведём подробное описание локального метода, который использовался. Обозначим координаты точек на первом изображении (s, l) , а координаты соответствующих им точек на втором – $(s + \Delta s, l + \Delta l)$, где $\Delta s, \Delta l$ – относительные сдвиги координат (параллакс) s, l соответственно. Пусть $I_L(l, s)$ и $I_R(s + \Delta s, l + \Delta l)$ – функции распределения яркости отсчётов на этих изображениях. Алгоритм сопоставления представляет собой решение задачи поиска для каждой точки (s, l) на первом изображении соответствующей точки $(s + \Delta s, l + \Delta l)$ на втором изображении посредством минимизации критерия сходства:

$$E(s_0, l_0, \Delta s, \Delta l) = \sum_{(s, l) \in D(s_0, l_0)} w \|I_L(s, l) - I_R(s + \Delta s, l + \Delta l)\|$$

где $D(s_0, l_0)$ – заданная область вокруг точки (s_0, l_0) ,

w – коэффициент задающий вес пикселей в зависимости удалённости от центрального (s_0, l_0) .

4.1 Параллельный алгоритм сопоставления изображений

Параллельная реализация описанного выше алгоритма построения карты диспарантности по парам ректифицированных изображений с использованием CPU и GPU иллюстрируется на рисунке 2. Взаимодействие CPU и GPU представлено в виде взаимодействия трёх блоков. Первый и третий блоки включают процедуры, которые выполняются только на CPU. Результаты выполнения процедур в первом и третьем блоке используются во втором блоке для запуска CUDA ядра на GPU.

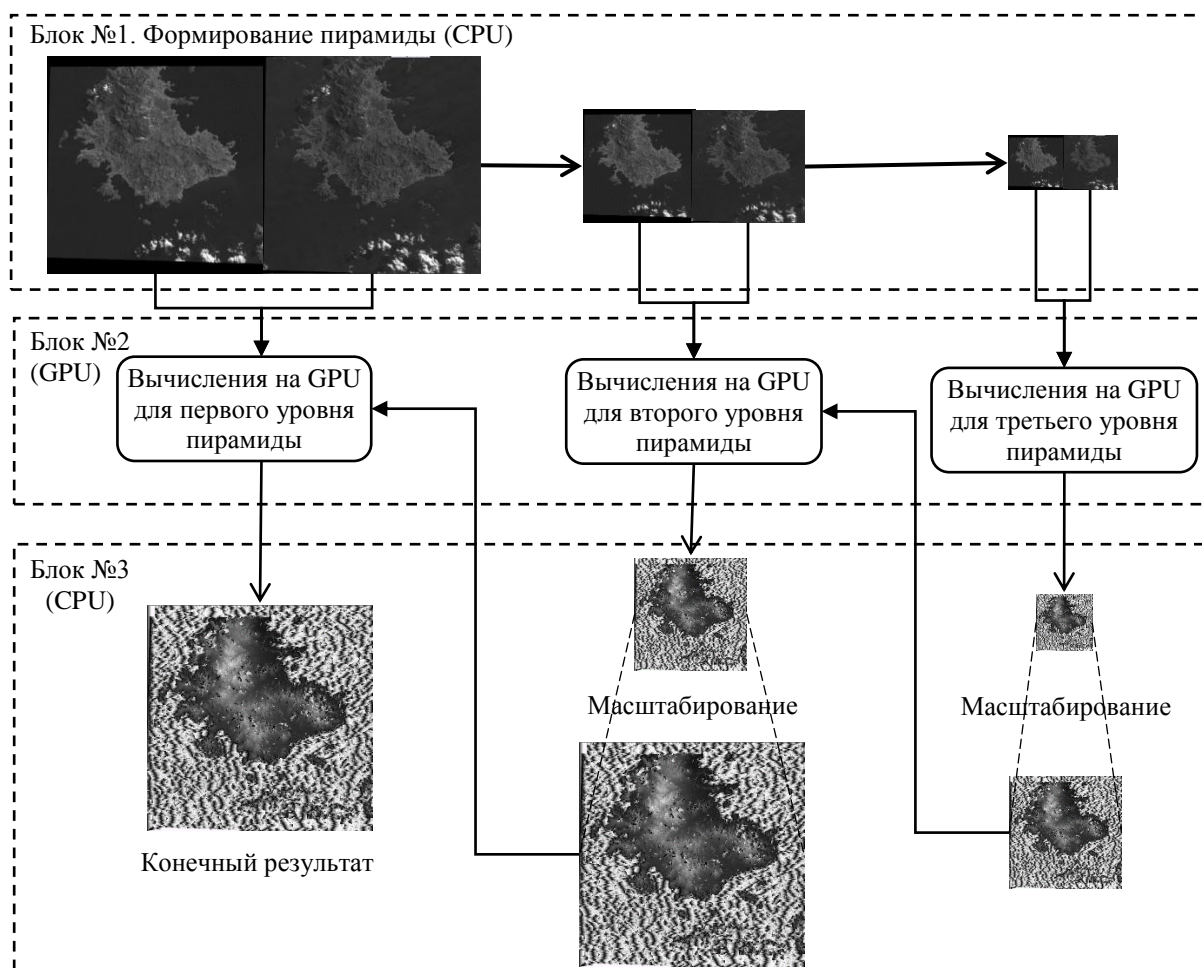


Рис. 2. Схема взаимодействия CPU/GPU на примере трёх уровней пирамиды

В первом блоке осуществляется формирование пирамиды изображений для последующего сопоставления изображений. Для наглядности на рисунке 2 показана трёхуровневая пирамида изображений (Блок №1) для пары ректифицированных изображений. Пирамида изображений формируется в виде набора изображений, получаемых уменьшением разрешения в два раза по обеим координатам. Таким образом, на N -м уровне пирамиды формируется изображение, разрешение которого в 2^N раз меньше исходного разрешения.

После формирования пары изображений для третьего уровня пирамиды выполняются процедуры во втором блоке. Данные процедуры обрабатывают изображение третьего уровня

пирамиды с начальным сдвигом равным нулю. После завершения работы CUDA ядра формируются относительные сдвиги для левого изображения в виде массива. После копирования массива относительных сдвигов из памяти GPU в оперативную память они сохраняются в виде изображения – карты диспарантности, масштабирование которых для всех уровней пирамиды осуществляется в третьем блоке (см. рисунок 2).

В следующем запуске CUDA ядра используются ректифицированные изображения из второго уровня пирамиды и начальные сдвиги, найденные на предшествующем запуске. Предварительно значения координат начальных сдвигов удваиваются (Блок 3). В зависимости от числа уровней пирамиды зависит число вызовов ядра CUDA.

Глобальная память на GPU для всех операций выделяется однократно. Общий размер выделяемой памяти равен количеству пикселей левого изображения для N уровня пирамиды $\times (2 \times 16 \text{ bit} + 64 \text{ bit})$. Это объясняется тем, что глубина пикселя исходных изображений – 16 bit, а матрица в которой хранятся относительные сдвиги по горизонтали и вертикали содержит два значения float в каждом элементе матрицы. Освобождение памяти на GPU выполняется после завершения всех вычислений. В качестве параметров для запуска CUDA ядра на N уровне пирамиды используются: размер сетки, размер блока, число нитей, размер изображения, размер области поиска и размер окна обработки.

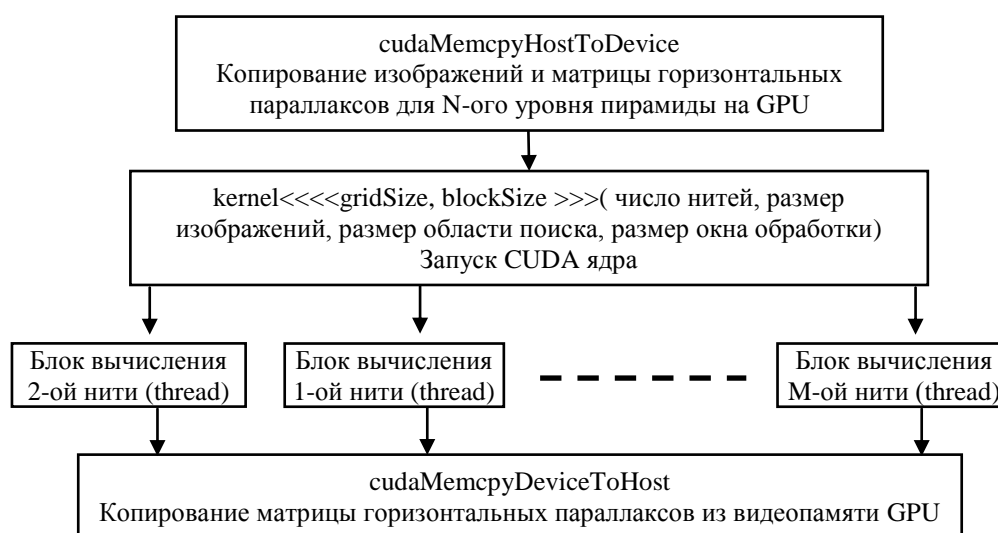


Рис. 3. Блок вычислений на GPU

Перед запуском CUDA-ядра копируются необходимые данные из оперативной памяти в память (global memory) графической видеокарты. Для результатов также выделяется память на видеокарте. Каждая нить рассчитывает евклидову норму для двух выбранных дескрипторов. Под дескриптором данной точки понимается вектор признаков фрагмента изображения с центром в искомой соответствующей точке. Для нахождения соответствующей точки, необходимо рассчитать евклидовы нормы для всех дескрипторов точек, выбранных в области поиска в качестве возможных соответствующих. При этом число создаваемых нитей равно размеру изображения (в пикселях).

На рисунке 4 приведена укрупненная схема вычисления, выполняемых одной нитью. Данный блок вычислений на рисунке 3 обозначен как «Блок вычислений нити». Каждая нить выполняет вычисления независимо от остальных нитей. В этом варианте удастся избежать формирования массива избыточных данных на GPU. Также отсутствует последовательный этап сравнений евклидовых норм на CPU.

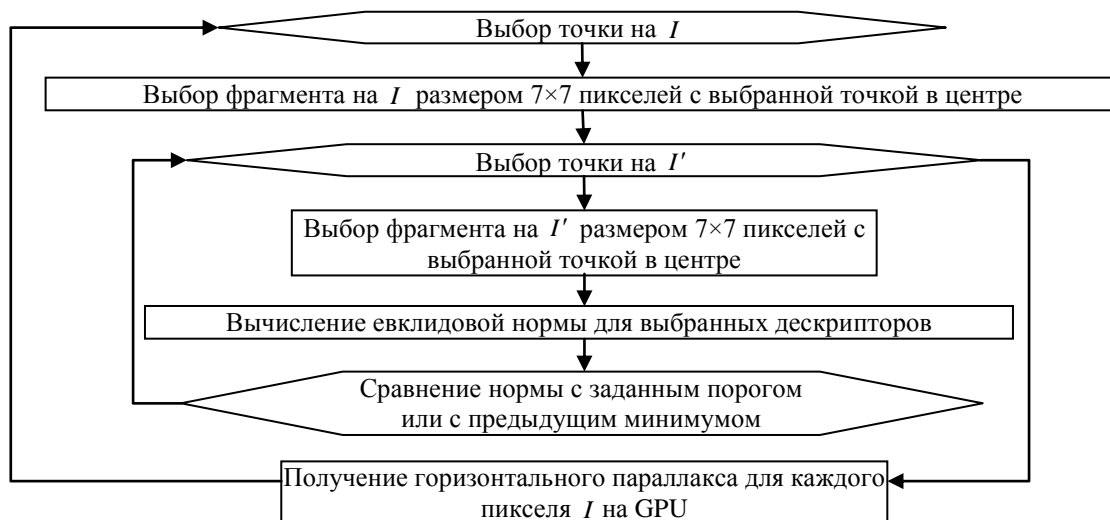


Рис. 4. Схема вычислений, выполняемых одной нитью при запуске CUDA ядра

После определения минимальной нормы на CPU определяется относительный сдвиг.

5. Формирование трехмерной модели

После сопоставления для каждой пары соответствующих точек может быть вычислена точка в трёхмерном пространстве. Для этого можно воспользоваться методом, описанным в статье [8]. Для вычисления искомых трёхмерных координат помимо координат соответствующих точек используется метаинформация о коэффициентах рациональной функции (RPC). На основе этих данных составляются система нелинейных уравнений для левого и правого изображения.

$$\begin{cases} Y_L = \frac{a_L^T u}{b_L^T u} \\ X_L = \frac{c_L^T u}{d_L^T u} \\ Y_R = \frac{a_R^T u}{b_R^T u} \\ X_R = \frac{c_R^T u}{d_R^T u} \end{cases}$$

где L, R – левое и правое изображения.

В результате решения полученной нелинейной системы уравнений будут найдены U, V, W трёхмерные координаты точки в глобальной системе координат.

6. Результаты экспериментов

В качестве исходных данных были выбраны стереопары, полученные с КА IRS-P5 с пространственным разрешением в надире 2.5 метра [13]. Стереопара IRS-P5 (Cartosat-1) была получена 30 января 2008 года [14]. Исходный левый снимок приведён на рисунке 1.

Исходные изображения представлены на рисунке 5.

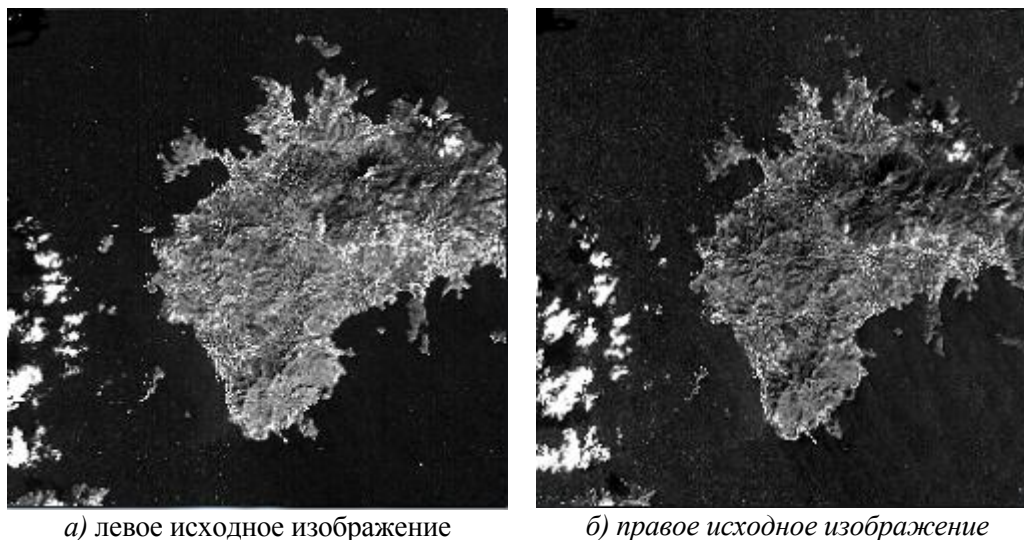


Рис. 5. Исходные изображения

На основе алгоритма сопоставления ENVI была построена трёхмерная модель. На полученной модели (рис. 6, а)) отчётливо видны горы и рельеф местности. Очевидно, что поверхность воды восстановлена неверно. На рисунке 6 б) приведена карта диспарантности, сформированная с использованием предлагаемой гибридной CPU/GPU технологии (рис. 1). Так же, как и с использованием ENVI, удалось получить достоверный рельеф местности. Присутствующие на поверхности воды сбои можно уменьшить, используя фильтры сглаживания.

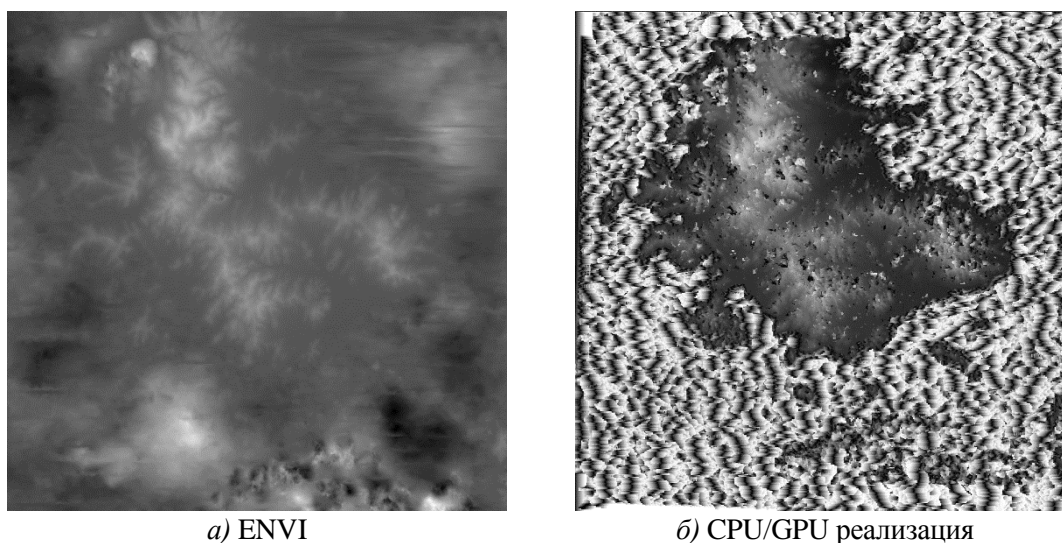


Рис. 6. ENVI и разработанный параллельный алгоритм

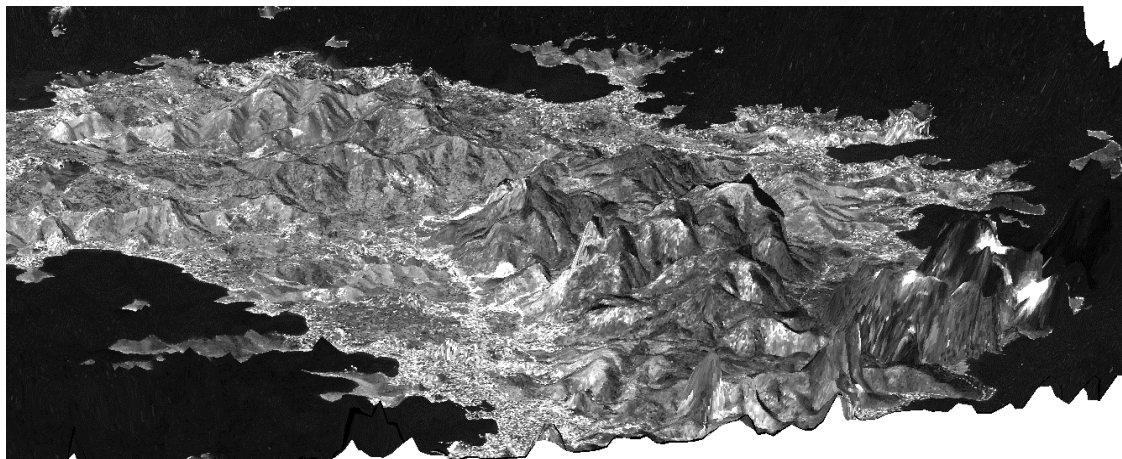


Рис. 7. 3D-визуализация

На рисунке 7 приведена трёхмерная модель рельефа местности, полученная на основе результата сопоставления изображений.

В таблице 1 приведены результаты сравнительных исследований времени реализации алгоритма сопоставления программного комплекса ENVI-5.0 и предлагаемого параллельного алгоритма на GPU при различном числе уровней пирамиды (данные получены при реализации с использованием GeForce GTX 750 Ti, и Intel Core i7-6700K, 16GB DDR4, ОС Windows 10). Для эксперимента использовались ректифицированные изображения одинакового размера 12000×12000 пикселей.

Таблица 1. Полученные результаты исследования

Уровень пирамиды (разрешение изображения в пикселях)	1	2	3	4	5	6	7
	219×219	438×438	875×875	1750×1750	3500×3500	6000×6000	12000×12000
Время выполнения ENVI (миллисекунды)	1.1*10 ³	1.87*10 ³	7.44*10 ³	28.24*10 ³	112.54*10 ³	441.27*10 ³	1806.5*10 ³
Время выполнения CPU/GPU технологии (миллисекунды)	-	6.3	20.2	70.4	252.9	925.3	3390.1

Для реализации предлагаемого алгоритма мы время выполнения для разрешения 219×219 пикселей не приводится, поскольку в предлагаемой технологии используется на один уровень пирамиды меньше. Время выполнения для CPU/GPU технологии указаны в миллисекундах. Предлагаемая технология находит соответствующие точки на несколько порядков быстрее программного комплекса ENVI-5.0. Этот эффект может объясняться несколькими причинами. Во-первых, ENVI это пакет, в котором, реализовано много модулей для решения широкого спектра задач. Наша разработка направлена на решение одной конкретной задачи из этого спектра. Во-вторых, ENVI написан на языке программирования IDL. Мы используем технологию распараллеливания CUDA, которая использует набор расширений для языков C и C++. Таким образом, наша разработка в большей степени «заточена» на конкретную задачу и использует современные технологии.

7. Заключение

Результаты экспериментов показывают, что разработанная сквозная технология обеспечивает качество трёхмерной цифровой модели местности сравнимое с качеством, которое достигается с использованием программного комплекса ENVI-5.0. Вместе с тем, время реализации технологии при обработке одной и той же пары изображений с размерами 12000×12000 меньше в 532 раза. К сожалению, в настоящее время отсутствуют представительные базы тестовых наборов трёхмерных моделей и соответствующих

разноракурсных изображений. Поэтому дальнейшие исследования будут направлены на разработку методик формирования тестовых изображений, моделей трехмерных сцен и верификации технологии с их использованием с целью получения объективных статистических оценок качества ЦММ.

Литература

1. Руководство пользователя к пакету ENVI. URL: https://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/DEM_Extraction_Module.pdf (дата обращения 01.04.2016).
2. Руководство пользователя к пакету PHOTOMOD. URL: <http://www2.racurs.ru/download/docs/rus/DEM.pdf> (дата обращения 01.04.2016).
3. Руководство пользователя к пакету Geomatica. URL: http://www.pcigeomatics.com/pdf/geomatica/tutorials/Live_DEM_Editing.pdf (дата обращения 01.04.2016).
4. Котов, А.П., Фурсов В.А., Гошин Е.В. Технология оперативной реконструкции трёхмерных сцен по разноракурсным изображениям // Компьютерная оптика. 2015. № 39. С. 600–605.
5. Baltsavias E. P., Stallmann D. SPOT stereo matching for DTM generation // Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. – International Society for Optics and Photonics. 1993. P. 152–163.
6. Fraser C. S., Hanley H. B. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2005. Vol. 71. No. 8. P. 909–915.
7. Солюшкин А.В. Сравнение методов построения ЦМР по стереопарам космической съемки высокого пространственного разрешения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № 1. С. 43–52.
8. Grodecki J., Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2003. Vol. 69. No. 1. P 59–68.
9. Описание Rational Functional Model. URL: http://geotiff.maptools.org/STDI-0002_v2.1.pdf (дата обращения 01.04.2016).
10. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: ИД Вильямс. 2004. 928 с.
11. Hartley R.I. Theory and Practice of Projective Rectification. IJCV. 1999. Vol. 35. No. 2. P 115–127.
12. Фурсов В.А., Гошин Е.В. Информационная технология реконструкции цифровой модели местности по стереоизображениям // Компьютерная оптика. 2014. № 38. С. 335–342.
13. Параметры спутника IRS-P5 Cartosat-1. URL: https://www.euromap.de/docs/doc_004.html (дата обращения 01.04.2016).
14. Данные ДЗЗ спутника IRS-P5 Cartosat-1. URL: http://www.euromap.de/products/prod_041.html (дата обращения 01.04.2016).

The hybrid CPU / GPU implementation of general information technology for generation of digital terrain models from satellite images

A.P. Kotov, Ye.V. Goshin, V.A. Fursov

Samara University

This paper considers the technology of digital terrain model (DTM) generating using a sequence of satellite images. The technology is built on the basis of algorithms for image matching and disparity maps generating previously developed by the authors and implemented on GPUs. This paper presents a general technology for the DTM construction from a sequence of satellite stereo images. Experimental studies have shown that implementation of the technology can significantly reduce the time of satellite data processing compared to the ENVI software package, which is currently considered one of the best by most researchers.

Keywords: digital image processing, 3D-scene reconstruction, image matching, CUDA.

References

- 1 User guide ENVI. URL: https://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/DEM_Extraction_Module.pdf. (accessed: 01.04.2016).
- 2 User guide PHOTOMOD. URL: <http://www2.racurs.ru/download/docs/rus/DEM.pdf> . (accessed: 01.04.2016).
- 3 User guide Geomatica. URL: http://www.pcigeomatics.com/pdf/geomatica/tutorials/Live_DEM_Editing.pdf. (accessed: 01.04.2016).
- 4 Kotov, A. P., Fursov, V. A., Goshin, E. V. Technology for fast 3D-scene reconstruction from stereo images //Computer Optics. 2015. Vol. 39. P. 600-605.
- 5 Baltsavias E. P., Stallmann D. SPOT stereo matching for DTM generation // Optical Engineering and Photonics in Aerospace Sensing. – International Society for Optics and Photonics. 1993. P. 152–163.
- 6 Fraser C. S., Hanley H. B. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery //Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2005. Vol. 71. No. 8. P. 909–915.
- 7 Sonyushkin A.V. Sravnenie metodov postroeniya TsMR po stereoparam kosmicheskoy s"emki vysokogo prostranstvennogo razresheniya // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotos"emka. – 2015. – № 1. – P. 43–52.
- 8 Grodecki J., Dial G. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials //Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2003. Vol. 69. No. 1. P. 59-68.
- 9 Rational Functional Model. URL: http://geotiff.maptools.org/STDI-0002_v2.1.pdf (accessed: 01.04.2016).
- 10 Forsayt D., Pons Zh. Komp'yuternoe zrenie. Sovremennyy podkhod. 2004. 928 p.
- 11 Hartley R.I. Theory and Practice of Projective Rectification // IJCV. 1999. Vol. 35. No. 2. P. 115–127.

- 12 Fursov, V. A., Goshin, E. V. Information technology for digital terrain model reconstruction from stereo images // *Computer Optics*. 2014. Vol. 38. P. 335-342.
- 13 IRS-P5 Cartosat-1 PAN-A and PAN-F Products. URL: https://www.euromap.de/docs/doc_004.html (accessed: 01.04.2016).
- 14 Key Parameters of the IRS-P5 Sensors. URL: http://www.euromap.de/products/prod_041.html (accessed: 01.04.2016).