

АЛГОРИТМЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ТЕХНОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

А.П. Котов^{1,2}, А.И. Немчинова², Е.В. Гошин^{1,2}

¹ Институт систем обработки изображений РАН, Самара, Россия,

² Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) (СГАУ), Самара, Россия

В настоящей работе исследуется сквозная технология построения цифровой модели местности по разноразмерным космическим снимкам высокого пространственного разрешения. Приведены результаты работы технологии для различных алгоритмов сопоставления изображений.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, построение ЦММ, полуглобальный метод, сопоставление изображений, CUDA-технология.

Введение

В настоящее время, задача построения цифровой модели местности (ЦММ) по космическим снимкам является крайне востребованной. Вычисление ЦММ обязательно присутствует в программных комплексах обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), таких как ENVI, PHOTOMOD, Geomatica [1–3]. При этом, часто предъявляется требование выполнять данную задачу в реальном времени, например, с целью мониторинга чрезвычайных ситуаций, для анализа фоно-целевой обстановки и др. Поэтому, для повышения быстродействия, актуально использование высокопроизводительных технологий, таких как MPI, OpenMP, в том числе и на графических процессорах с применением технологии CUDA [4].

При построении ЦММ по стереопарам космической съемки используются хорошо известные как в фотограмметрии, так и в компьютерном стереозрении три класса методов: локальный, глобальный и полуглобальный [5]. Наиболее популярным методом является локальный метод. Суть метода сводится в нахождении горизонтальных параллаксов в результате сопоставления яркостей левого и правого стереоизображения. 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. Модификация локального метода для работы с эпиполярными ограничениями, реализована в работе [6]. Полуглобальный метод (SGM) впервые был предложен Н. Hirschmuller в работе 2005 года [7]. В работе использовалась программная реализация метода Semi-global Block Matching (SGBM) доступная в библиотеке OpenCV [8]. Целью настоящей работы является исследование алгоритмов сопоставления. В результате сопоставления изображений с использованием различных алгоритмов будут сформированы карты диспаратности. На основе полученных карт диспаратности для наглядности формируется цифровая трёхмерная визуализация полученной модели.

Описание основных этапов технологии

Общая схема основных этапов рассматриваемой технологии реконструкции трёхмерной ЦММ по стереопарам космических изображений приведена на рисунке 1.

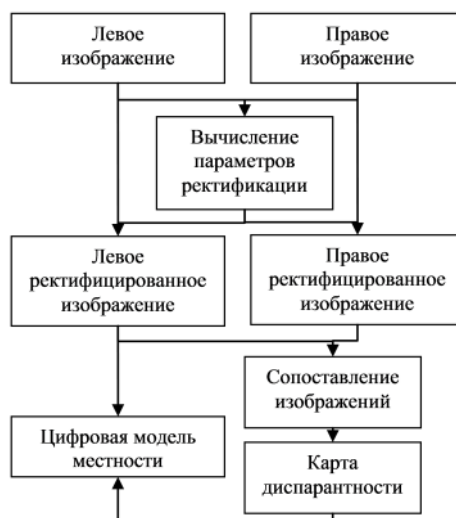


Рис 1. Схема этапов технологии

Рассмотрим основные этапы технологии.

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.

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).

Вычисление ЦММ по сформированной карте диспарантности производится либо в глобальной системе координат с использованием известных параметров (RPC, проективная, полиномиальная модель), либо в системе координат, связанной с камерой (точная модель), посредством расчёта расстояния обратно пропорционально значениям пикселей карты диспарантности.

Центральной проблемой в технологии построения ЦММ является этап сопоставления изображений: нахождение соответствующих точек на разных видах (нахождение горизонтальных параллаксов).

Алгоритмы сопоставления изображений

В работе было проведено исследование трёх алгоритмов сопоставления изображений: проприетарного алгоритма, по умолчанию используемого в программном комплексе ENVI; модификации локального метода с эпиполяльными ограничениями [6] и алгоритма SGBM (программная реализация OpenCV) [8].

Приведём подробное описание локального метода с эпполярными ограничениями и SGBM.

Обозначим координаты точек на первом изображении (u, v) , а координаты соответствующих им точек на втором – $(u + \Delta u, v + \Delta v)$, где $\Delta u, \Delta v$ – относительные сдвиги координат (параллакс) u, v соответственно. Пусть $I_L(u, v)$ и $I_R(u + \Delta u, v + \Delta v)$ – функции распределения яркости отсчётов на этих изображениях.

Алгоритм сопоставления, предложенный в работе [6] представляет собой решение задачи поиска для каждой точки (u, v) на первом изображении соответствующей точки $(u + \Delta u, v + \Delta v)$ на втором изображении посредством минимизации критерия сходства:

$$\begin{aligned} E(u_0, v_0, \Delta u, \Delta v) &= \\ &= \sum_{(u, v) \in D(u_0, v_0)} a(u, v) \|I_L(u, v) - I_R(u + \Delta u, v + \Delta v)\|, \end{aligned} \quad (1)$$

где $D(u_0, v_0)$ – заданная область вокруг точки (u_0, v_0) , а $a(u, v)$ – весовая функция, задаваемая в указанной области в виде произведения двух коэффициентов:

$$a(u, v) = w_d \cdot w_f,$$

где w_d – коэффициент задающий вес пикселей в зависимости удалённости от центрального (u_0, v_0) . Коэффициент w_f задаёт функцию штрафа при удалении точки (u', v') от эпполярной линии $au' + bv' + c$, определяемой по координатам точки (u_0, v_0) с использованием фундаментальной матрицы.

Метод полуглобального стереосопоставления [8] основан на идее попиксельного сопоставления и последующем применении глобальных двумерных ограничений. Задача вычисления параллакса в SGBM формулируется как задача минимизации критерия сходства:

$$S(p, d) = \sum_r L_r(p, d),$$

где p – пиксель первого изображения, d – горизонтальный параллакс этого пикселя, а L – некоторая величина, характеризующая «путь, который пройден в направлении \mathbf{r} ». Карта диспаратности для базового изображения вычисляется, как и в обычных методах локального сопоставления, путем выбора для каждого пикселя p такого смещения d , которому соответствует наименьший критерий сходства, т.е. $\min_d S(p, d)$.

При программной реализации рассматриваемой информационной технологии использовалась открытая библиотека компьютерного зрения OpenCV.

Результаты экспериментов

В качестве исходных данных были выбраны стереопары, полученные с КА IRS-P5 с пространственным разрешением в надире 2.5 метра [10]. Стереопара IRS-P5 (Cartosat-1) была получена 30 января 2008 года [11]. Исходный левый снимок приведён на рисунке 1. Ректификация стереопары IRS-P5 (Cartosat-1) выполнялась в программном комплексе ENVI-5.2 по коэффициентам рациональной функции (RPC), входящим в состав данных ДЗЗ.

Было проведено сопоставление результатов обработки приведёнными выше алгоритмами.

Результаты обработки локальным методом были получены в программном продукте ENVI-5.2.

Поскольку на изображениях проведена «горизонтальная» ректификация, располагающая соответствующие точки в одних и тех же строках обоих изображений, фундаментальная матрица в случае обработки изображений локальным методом [6], учитывающем эпполярные ограничения, имеет вид:

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

Обработка стереопар полуглобальным методом (SGBM) проводилась с использованием библиотеки OpenCV версия 2.4.11 [8].

Ниже приведены карты диспаратности, полученные в результате обработки локальным методом, учитывающем эпполярные ограничения (рисунок 3), SGBM (рисунок 4) и локальным методом ENVI (рисунок 4).

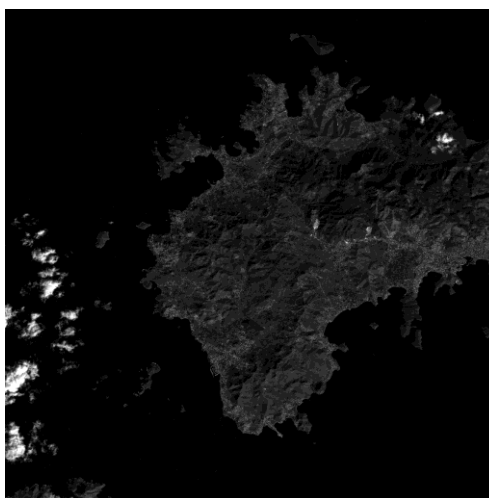


Рис. 2. Исходный левый снимок

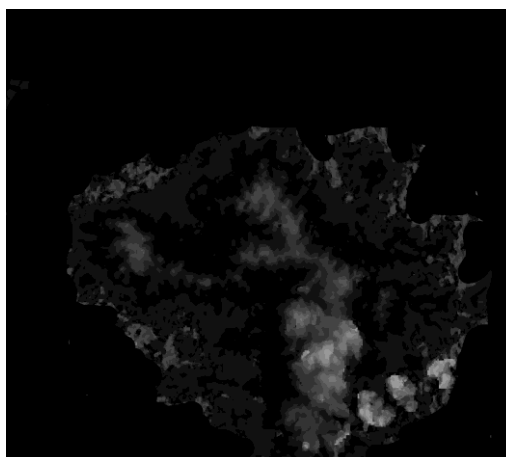


Рис. 3. Локальный метод с учётом с эпполярных ограничений

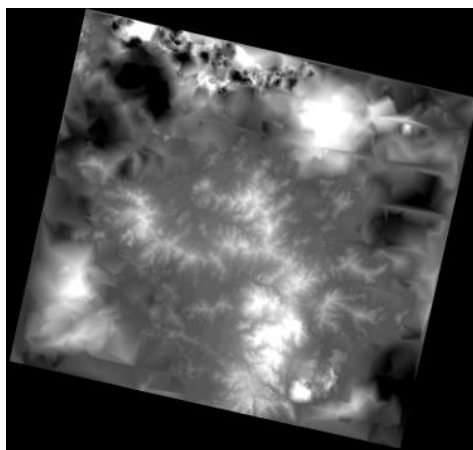


Рис. 4. SGBM

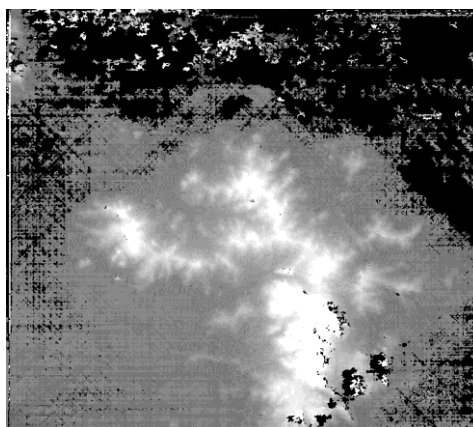


Рис. 5. Локальный метод ENVI

На рисунке 5 приведена трёхмерная модель местности, восстановленная по карте диспаратности, полученной с использованием предложенной модификации локального метода с учётом эпполярных ограничений.

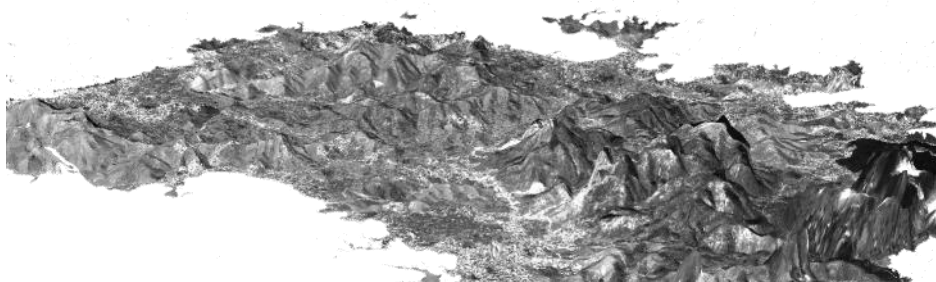


Рис. 6. 3D-визуализация

Предложенный алгоритм реализован с использованием массивно-многопоточной технологии. На графических процессорах было достигнуто увеличение быстродействия программной реализации данного алгоритма в 15 раз.

Заключение

Реализована сквозная технология построения ЦММ по разноракурсным космическим снимкам высокого пространственного разрешения. В рамках реализованной технологии проведено исследование трёх алгоритмов сопоставления: локального корреляционный

метода (ENVI-5.2); полуглобального метода SGBM (OpenCV 2.4.11) и локального метода с эпиполярными ограничениями.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-07-00729а.

Авторы выражают благодарность научному руководителю д.т.н., профессору Фурсову В.А. за помощь при подготовке настоящей работы, постановке задачи и ряд важных замечаний.

Литература

1. Руководство пользователя к пакету ENVI [Электронный ресурс]. – URL: https://www.exelisvis.com/portals/0/pdfs/envi/DEM_Extraction_Module.pdf (дата обращения 01.04.2016).
2. Руководство пользователя к пакету PHOTOMOD [Электронный ресурс]. – URL: <http://www2.racurs.ru/download/docs/rus/DEM.pdf> (дата обращения 01.04.2016).
3. Руководство пользователя к пакету Geomatica [Электронный ресурс]. – URL: http://www.pcigeomatics.com/pdf/geomatica/tutorials/Live_DEM_Editing.pdf (дата обращения 01.04.2016).
4. Котов, А.П. Технология оперативной реконструкции трёхмерных сцен по разноразмерным изображениям / А.П. Котов, В.А. Фурсов, Е.В. Гошин // Компьютерная оптика. – 2015. – № 39. – С. 600-605. – ISSN 0134-2452.
5. Солюшкін 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.
6. Фурсов В.А. Информационная технология реконструкции цифровой модели местности по стереоизображениям / В.А. Фурсов, Е.В. Гошин // Компьютерная оптика. – 2014. – № 38. – С. 335-342. – ISSN 0134-2452.
7. Hirschmüller H. Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information // Computer Vision and Pattern Recognition. – 2005. – Vol. 2. – P. 807-814.
8. Программная реализация алгоритма SGBM в библиотеке OpenCV [Электронный ресурс]. – URL: http://docs.opencv.org/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html#stereosgbm-stereosgbm (дата обращения 01.04.2016).
9. Описание Rational Functional Model [Электронный ресурс]. – URL: http://geotiff.maptools.org/STDI-0002_v2.1.pdf (дата обращения 01.04.2016).
10. Параметры спутника IRS-P5 Cartosat-1 [Электронный ресурс]. – URL: https://www.euromap.de/docs/doc_004 (дата обращения 01.04.2016).
11. Данные ДЗЗ спутника IRS-P5 Cartosat-1 [Электронный ресурс]. – URL: http://www.euromap.de/products/prod_041 (дата обращения 01.04.2016).