

Алгоритм построения цифровой модели поверхности по данным космической стереосъемки

В.Б. Костоусов¹, Д.С. Первалов¹, Ф.А. Корнилов¹, А.А. Попель¹

¹Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, С.Ковалевской 16, Екатеринбург, Россия, 620990

Аннотация. В работе описывается метод автоматического построения высокдетальной цифровой модели поверхности, представляющей собой матрицу высот рельефа и объектов местности. Входными данными является стереопара цифровых космических снимков высокого разрешения. В основе метода лежит двухэтапный алгоритм стереосопоставления. Первый этап заключается в построении приближенной матрицы высот с помощью вычисления разреза графа специального вида. Второй этап основан на методе *sgm* и предназначен для построения микрорельефа поверхности. Для улучшения качества построенной модели используется анизотропная фильтрация исходных снимков. Эксперименты на реальных данных показали высокое качество построенной модели.

1. Введение

Одной из важнейших задач обработки изображения является дешифрирование цифровых космических снимков земной поверхности. Как правило, в данной задаче требуется выделение различных объектов – строений и сооружений, дорог, а также определение типов площадных объектов – лесов, водоемов и т.д. Данная задача решается с помощью различных методов классификации, текстурного анализа и других на основе спектральной информации снимка. Существенно повысить качество распознавания возможно посредством привлечения дополнительных данных, среди которых наиболее полезной является карта высот.

Информацию о высотах объектов и рельефа местности можно получить путем съемки сцены с разных ракурсов. Два таких снимка образуют стереопару, подающуюся на вход алгоритму стереосопоставления. Данный алгоритм вычисляет карту параллаксов, т.е. сдвигов пикселей между кадрами, принадлежащих одному и тому же объекту. Далее на основе параллаксов и данных о параметрах съемки восстанавливаются высоты объектов, тем самым строится цифровая модель поверхности.

В настоящее время задача автоматического построения высокдетальной цифровой модели местности успешно решается по данным аэросъемки методом *SGM* [1]. В то же время, этот метод не работает при его прямом использовании в случае обработки данных космической съемки. Это связано в первую очередь с тем, что значимые объекты земной поверхности (здания и сооружения) на таких изображениях имеют малый размер, сопоставимый с размером геометрических искажений, связанных со съемкой с разных углов зрения. В данной работе предлагается метод построения цифровой модели местности с помощью использования двухшагового алгоритма стереосопоставления и априорной картографической информации.

Входными данными для метода являются:

- Космический стереоснимок, состоящий из пары панхроматических изображений высокого разрешения и соответствующей им пары мультиспектральных изображений (как правило, меньшего разрешения).
- Электронная топографическая карта.
- Цифровая матрица высот рельефа разрешения порядка 150 метров на пиксель.

Результатом работы метода является цифровая модель местности в составе:

- Матрица высот строений и рельефа высокого разрешения.
- Матрица типов объектов подстилающей поверхности.
- Цифровой ортотрансформированный снимок.

Эти три раstra геометрически синхронизированы и имеют шаг на местности порядка 1 м на 1 пиксель.

Предварительные результаты изложены в [2]. Данная работа организована следующим образом. Во втором разделе описана подготовка данных для вычислений, включающая в себя растеризацию входных данных, их приведение в единое внутреннее представление, и предварительное определение типов подстилающей поверхности. В третьем разделе дается описание предварительной обработки входных стереоснимков: алгоритм вычисления соответственных точек, эпиполярная трансформация и фильтрация с целью удаления объектов, имеющих геометрические размеры меньше заданного порога. Четвертый раздел посвящен основному результату работы – новому двухэтапному алгоритму стереосопоставления, суть которого заключается в построении грубой матрицы высот с помощью модифицированного алгоритма, основанного на понятии разрезов на графах [3]. Затем матрица высот уточняется с помощью модифицированного алгоритма *SGM*. Пятый раздел содержит описание методов постобработки полученных данных. Наконец, шестой раздел посвящен деталям практической реализации предложенного метода.

2. Подготовка данных для вычислений

Этап подготовки данных начинается со сбора доступной информации и конвертации её во внутренний бинарный формат данных, не зависящий от внешних библиотек:

- Входные снимки, как правило, заданные одним или несколькими изображениями формата TIF, сшиваются и записываются как растры. Также производится их конвертация из 16 bit в 8 bit.
- Из электронной топографической карты извлекаются наборы контуров интересующих объектов (слои гидрографии и растительности).
- Цифровая матрица рельефа, заданная в формате *MTW*, записывается как растр.

После этого осуществляется искусственное повышение разрешения мультиспектральных снимков методом слияния (англ. "panchromaticsharpening" или "pansharpening") с панхроматическим изображением, имеющим более высокое разрешение. Для решения данной задачи разработано множество различных методов [4]. В данной работе был применен один из наиболее простых и эффективных методов, основанный на использовании цветового пространства HSV. Преимущество использования пространства HSV заключается в том, что оно позволяет эффективно отделить пространственную составляющую (V), определяющую «резкость границ», от спектральной (H и S), отвечающей за цвет изображения. Выделив таким образом пространственную составляющую мультиспектральных изображений, можно заменить ее на более четкое панхроматическое изображение, тем самым повысив резкость границ.

Полученные мультиспектральные снимки, вместе с контурами, полученными из электронной топографической карты, используются для построения матрицы типов объектов подстилающей поверхности, среди которых выделяются облака и водная поверхность (выделяются методами текстурного анализа с привлечением дополнительной информации о местности), растительность (определяется путем применения индекса NDVI [5]) и прочие типы поверхности, включающие в себя строения и сооружения, дороги, мосты и т.д. При этом области, скрытые облаками, требуется исключить из дальнейшей работы, водная поверхность

при стереосопоставлении учитывается только по границе, а для ее внутренней, слабоконтрастной части, высота определяется с помощью интерполяции. В то же время, области растительности и антропогенных объектов полностью передаются на вход алгоритму стереосопоставления.

Последним этапом предварительной обработки идёт разбиение области, для которой следует осуществить построение цифровой модели местности, на вычислительные фрагменты. Данная процедура позволяет осуществить вычисление стереосопоставления параллельно и независимо, что ускоряет расчеты пропорционально количеству имеющихся вычислительных ядер. Описанные в разделах три и четыре алгоритмы стереосопоставления работают именно на этих вычислительных фрагментах.

3. Предварительная обработка

Цель этапа предварительной обработки заключается в построении эпитрансформированных растров, пригодных для использования их в качестве входных данных в алгоритмах стереосопоставления.

Предполагается, что входные снимки содержат информацию о геометрии съемки в виде *RPC*-коэффициентов (англ. *Rational Polynomial Coefficients*, рациональные полиномиальные коэффициенты) [6]. Эти коэффициенты позволяют трансформировать координаты точки на снимке в координаты точки на земной поверхности и обратно по известному значению высоты точки на земной поверхности. Как правило, *RPC*-коэффициенты, поставляемые вместе с космоснимками, обладают небольшой погрешностью, поэтому, перед их использованием, требуется осуществить взаимную привязку двух снимков, указав на них одну или несколько соответственных точек. В данной работе используется одна соответственная точка, которая находится в автоматизированном режиме с помощью следующего алгоритма.

Желательно, чтобы соответственные точки находились на уровне земной поверхности и располагались в высокоинформативной области: края дорожного полотна, угла перекрестка и т.д. Поэтому, для их обнаружения удобно использовать уже посчитанные для снимков матрицы типов объектов подстилающей поверхности, позволяющих исключить из рассмотрения малоконтрастные области облаков, растительности и водных поверхностей. Оставшиеся пиксели прореживаются с некоторым (значительным) шагом, и для полученных точек вычисляется дисперсия: точки, в которых она мала, также исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Далее необходимо сопоставить полученные пары пикселей. Для этого используются исходные *RPC*-коэффициенты, позволяющие найти соответствие точек на паре снимков. К сожалению, такое соответствие является неточным – с погрешностью до нескольких метров на местности, поэтому для уточнения результата используется коэффициент корреляции между фрагментами исходных снимков. При этом сопоставленная пара точек, для которых корреляция меньше некоторого выбранного порога, также отбрасывается.

В результате для пары изображений размером примерно 15000×15000 пикселей остается около 300 пар точек. При этом данные точки могут попадать на крыши высотных домов, опоры мостов и т.д. Исключить их можно вычислив относительное направление и величину «сдвига» точек: для пикселей на ровных участках поверхности земли они будут примерно одинаковы, а для строений и сооружений из-за различия их высот будут отличаться. Теперь следует выбрать точки с наиболее часто встречающимся «сдвигом», и среди них выбрать ту пару, что более близка к центрам снимков. Эта пара точек используется в качестве искомой пары соответственных точек.

Следующим этапом предварительной обработки идёт разбиение области, для которой следует осуществить построение цифровой модели местности, на фрагменты, называемые вычислительными фрагментами. Данная процедура позволяет осуществить вычисление параллельно и независимо, что позволяет ускорить процесс вычисления пропорционально количеству имеющихся вычислительных ядер.

Затем, в каждом фрагменте, осуществляется построение эпиполярных пар изображений. Это изображения, получаемые из исходных изображений путем геометрической трансформации,

которая приводит к тому, что каждая соответствующая пара пикселей лежит на одной строке изображения [7]. Эпиполярная трансформация сводит задачу нахождения соответственных пар пикселей при стереосопоставлении к нахождению одномерных горизонтальных сдвигов пикселей, а потому, практически все известные алгоритмы стереосопоставления предполагают, что входные изображения эпитрансформированы.

Обозначим через $P_1(\lambda, \phi, h)$ и $P_2(\lambda, \phi, h)$ координаты пикселей на первом и втором изображениях соответственно, получаемые применением *RPC*-коэффициентов для долготы λ , широты ϕ и высоты h . Зададим прямоугольник с координатами (x, y) в плоской системе координат (СК42), и положим h равным минимуму высоты на этом фрагменте, и определим правила нахождения λ и ϕ по (x, y) . Обозначим через I_1, I_2 входные изображения.

Тогда, если (x, y) пробегает дискретную матрицу значений, то изображения

$$e_1(x, y) = I_1(P_1(\lambda(x, y), \phi(x, y), h))$$

$$e_2(x, y) = I_2(P_2(\lambda(x, y), \phi(x, y), h))$$

являются эпитрансформированными после поворота на некоторый угол. А именно, этот угол находится как угол поворота вектора $P_2(\lambda(x_0, y_0), \phi(x_0, y_0), h) - P_1(\lambda(x_0, y_0), \phi(x_0, y_0), h)$ для некоторой пары точек (x_0, y_0) .

С помощью описанного метода строятся эпиполярные пары панхроматических изображений и матриц типов подстилающей поверхности. Затем, осуществляется построение сегментированных изображений, путём фильтрации панхроматических изображений с помощью алгоритма анизотропной медианной фильтрации. Пусть I – входное изображение. Для каждого пикселя (x, y) перебирается $N=32$ отрезка. Отрезок i выходит из (x, y) , имеет длину $L=7$ пикселей и повернут на угол $i \cdot 360/32$ градуса. Для пикселей отрезка вычисляется медиана m_i яркостей I , и вычисляется сумма квадратов S_i отклонений яркостей I от m_i . Значение m_i отрезка, на котором достигается минимум S_i , полагается результатом фильтрации для (x, y) .

По построению, работа алгоритма заключается в устранении однородных областей на изображении, размер которых менее $L/2$ пикселей, и при этом сохраняет геометрию края больших областей. В итоге, для каждого фрагмента получается набор из трёх пар эпитрансформированных изображений одинакового размера: панхроматическое изображение и его сегментированный вариант, а также матрица типов подстилающей поверхности. Эти пары изображений используются в этапе стереосопоставления.

4. Стереосопоставление

Этап стереосопоставления является основным для построения цифровой модели местности. Его целью является построение матриц сдвигов, описывающих сдвиг пикселей между парами панхроматических изображений.

Матрица сдвигов для пары эпитрансформированных изображений (I_1, I_2) – это такая матрица M , что для всех пикселей (x, y) выполняется

$$I_1(x+M(x, y), y) \sim I_2(x, y).$$

То есть, матрица сдвигов определяет, как следует сдвинуть пиксели изображения I_1 для того, чтобы получить изображение, как можно более близкое к I_2 . Близость здесь понимается в качественном смысле близости яркостей пикселей и их окрестностей; точная формулировка зависит от используемых алгоритмов стереосопоставления.

В предлагаемом методе построение матриц ведётся в два шага. На первом шаге строятся грубые матрицы сдвигов пикселей первого изображения во второе и второго изображения в первое. Для измерения близости пикселей при вычислении соответствия используется метод *DAISY* [8], который основан на сравнении свойств нескольких фрагментов в окрестности рассматриваемой точки, и устойчив к изменениям яркости и небольшим геометрическим искажениям объектов. Помимо *DAISY*, функционал близости окрестностей двух пикселей зависит от близости типов подстилающей поверхности и близости яркостей сегментированных изображений в этих пикселях.

Для вычисления стереосопоставления применяется алгоритм, основанный на разрезах на графах [3]. Параметры алгоритма подобраны таким образом, чтобы он вычислял матрицы сдвигов, на которых представлены лишь сдвиги для сравнительно больших объектов (таких,

как дом или группа деревьев), при этом сдвиги являются преимущественно плоскими. Мы называем такие матрицы сдвигов *грубыми*. Подобный подход позволяет устойчиво найти все существенные сдвиги на снимках.

На втором шаге, осуществляется уточнение полученных грубых матриц сдвигов. Для этого применяется изменённая версия алгоритма *SGM*. В отличие от исходного алгоритма [1], цель которого заключается в построении матрицы сдвигов, значения которой в каждом пикселе лежат в заданном диапазоне относительно значений соответствующей грубой матрицы сдвигов. В качестве меры близостей также используется метод *DAISY*, как на первом шаге, но с другими настроечными параметрами, позволяющими осуществлять более точную локализацию объектов. В результате работы алгоритма получается матрица сдвигов, на которой отражены малые сдвиги, и которая более точно описывает соответствие между изображениями.

Описанный двухшаговый подход позволил преодолеть указанную во введении проблему неустойчивой работы алгоритма *SGM* при обработке космических снимков. В результате работы этапа стереосопоставления получается две грубые и две уточнённые матрицы сдвигов первого изображения на второе и второго на первое.

5. Постобработка

На этапе постобработки к обеим уточнённым матрицам сдвигов применяется процедура ортотрансформации с помощью *RPC*-коэффициентов, используя в качестве оценки высот грубые матрицы сдвигов. После этого осуществляется преобразование значений пиксельных сдвигов в метры. В результате, получается две матрицы высот рельефа высокого разрешения. Затем, эти матрицы сливаются в одну итоговую матрицу высот рельефа путём усреднения. Аналогичным образом, строятся матрицы типов подстилающей поверхности и цифровой ортотрансформированный снимок.

В итоге, мы получаем три слоя данных: матрицу высот рельефа, матрицу типов подстилающей поверхности и цифровой ортотрансформированный снимок для каждого фрагмента вычислений.

После того, когда все фрагменты обработаны, фрагменты этих трёх слоев сшиваются в итоговые слои цифровой модели поверхности. После этого, осуществляется медианная фильтрация матрицы высот рельефа, и фильтрация выбросов матрицы подстилающей поверхности.

6. Практическая реализация метода

Стереосопоставление относится к классу ресурсоемких задач, требующих значительного объема памяти и времени работы. При этом используемые для решения алгоритмы трудно поддаются распараллеливанию, особенно – без потери качества. Использование схемы с вычислительными фрагментами позволяет провести искусственную декомпозицию решения на ряд относительно простых подзадач, но время обработки всей сцены будет по-прежнему линейно зависеть от количества используемых процессоров.

Для обработки одного фрагмента, соответствующего области 400×400 метров, требуется примерно 5 минут. Тогда при размере сцены порядка 145 км^2 общее время работы в однопоточном режиме составит около 55 часов. При использовании стационарного компьютера с 4-х ядерным процессором время вычислений уменьшится до 13 часов. Но даже в таком случае для обработки сцены, соизмеримой с площадью Москвы, понадобится 10 дней, и 6 месяцев – для Московской области. Уменьшить требуемой для обработки время можно за счет использования многопроцессорных вычислителей кластерного типа (суперкомпьютеров). Проведенные эксперименты показали, что для кластера, содержащего 2024 вычислительных ядра, тестовая сцена (145 км^2 , 986 фрагментов) была посчитана за 5 мин, поскольку не смогла полностью загрузить все доступные ядра, а для приведенного выше примера с Москвой и Московской областью оценка времени работы составила 30 минут и 9 часов соответственно.

Для проверки работоспособности был проведён вычислительный эксперимент по построению цифровой модели местности по данным космической съемки, полученной во всех

четырёх сезонах. Результаты эксперимента показывают, что алгоритмы работают достаточно надёжно. На рисунке 1 показаны фрагменты матрицы высот рельефа, вычисленных предложенным методом, и соответствующие им результаты лидарной съёмки. Визуальное сравнение показывает, что вычисленные матрицы высот рельефа качественно близки к результатам лидарной съёмки.

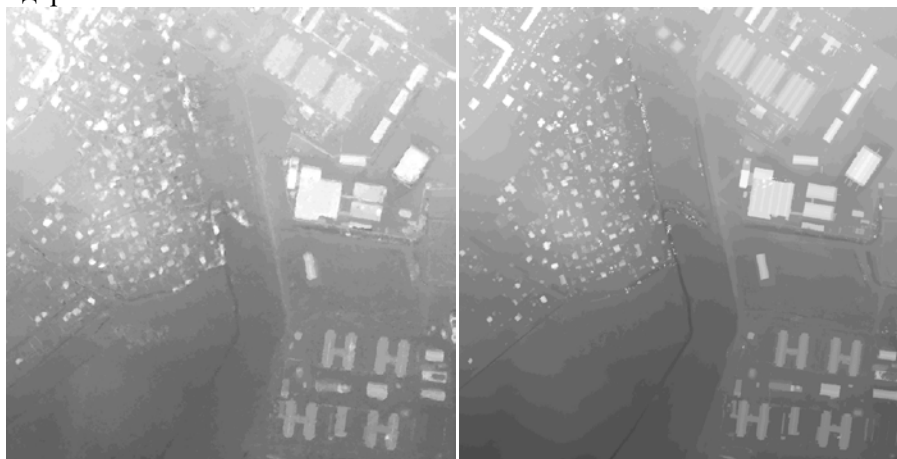


Рисунок 1. Фрагмент вычисленной матрицы высот рельефа (слева) и соответствующая ей матрица, полученная с помощью лидарной съёмки (справа).

7. Заключение

Описанный в работе метод был реализован в виде программного комплекса. Помимо вычислений цифровой модели поверхности, комплекс включает модуль визуализации больших растров [9]. При этом, для визуализации растров применяется технология представления исходного изображения в пирамидальном виде, что позволяет оперировать с ограниченным объемом входных данных в выбранном масштабе.

Разработанный программный комплекс был апробирован на вычислении модели местности для площади порядка 1500 кв. км. Результаты сравнения с лидарной съёмкой показали, что качество модели достаточно для её применения на практике, в частности, для задач навигации и дешифрирования данных дистанционного зондирования земли.

8. Литература

- [1] Gehrke, S. Semi-global matching: an alternative to LiDAR for DSM generation? / S. Gehrke, K. Morin, M. Downey, N. Boehrer, T. Fuchs // ISPRS Archives.–2010. – Vol. XXXVII(1). – P. 6.
- [2] Перевалов, Д.С. Метод построения цифровой модели местности по данным космической стереосъёмки / А.В. Дунаева, К.В. Дунаевская, Ф.А. Корнилов, Д.С. Перевалов // Люльевские чтения: Материалы X межрегион. отраслевой науч.-техн. конф., АО «ОКБ «Новатор». Челябинск: Издат. Центр ЮУрГУ, 2016. – С. 90.
- [3] Kolmogorov, V. Kolmogorov and Zabih's Graph Cuts Stereo Matching Algorithm / V. Kolmogorov, P. Monasse, P. Tan // Image Processing On Line. – 2014. – Vol. 4.– P. 220-251.
- [4] Jawak, S.D. A Comprehensive Evaluation of PAN-Sharpener Algorithms Coupled with Resampling Methods for Image Synthesis of Very High Resolution Remotely Sensed Satellite Data / S.D. Jawak, A.J. Luis // Advances in Remote Sensing. – 2013. – Vol. 2. – P. 332-344.
- [5] Козодеров, В.В. Методы оценки состояния почвенно-растительного покрова по данным оптических систем дистанционного аэрокосмического зондирования / В.В. Козодеров, Т.В. Кондранин. – Москва, МФТИ, 2008. – 222 с.
- [6] RPCs in GeoTIFF [Electronic resource]. – Access mode: http://geotiff.maptools.org/rpc_prop.html (23.10.2017).
- [7] Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бинум, 2006. – 752 с.

- [8] Tola, E.A DAISY: An Efficient Dense Descriptor Applied to Wide-Baseline Stereo / E. Tola, V. Lepetit, P. Fua // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 32(5). – P. 815-830.
- [9] Перевалов, Д.С. Обработка и визуализация больших данных при построении цифровой модели местности / П.А. Васев, А.В. Дунаева, К.В. Дунаевская, С.В. Киселева, Д.С. Перевалов // Люльевские чтения: Материалы X межрегион. отраслевой науч.-техн. конф., АО «ОКБ «Новатор». Челябинск: Издат. Центр ЮУрГУ, 2016. – С. 91.

Digital surface model generation from satellite stereo imagery

V.B.Kostousov¹, D.S.Perevalov¹, F.A.Kornilov¹, A.A.Popel¹

¹N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, S. Kovalevskaya street 16, Yekaterinburg, Russia, 620990

Abstract. The paper describes a method for automatically constructing a highly detailed digital surface model, which is a matrix of relief heights and terrain objects. The input data is a stereo pair of high-resolution digital satellite imagery. The method is based on a two-stage stereo matching algorithm. The first stage consists in constructing an approximate matrix of heights by calculating the cut of a graph of a special kind. The second stage is based on the SGM method and is intended for constructing the so-called surface microrelief. To improve the quality of the model built, anisotropic filtering of the original images is used. Experiments on real data showed the high quality of a surface model built.

Keywords: Image processing, digital surface model, stereo matching, satellite imagery.