Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью

А. И. Алексанин, М. А. Морозов, Е. В. Фомин

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

Работа посвящена развитию нового метода автоматического совмещения произвольных изображений высокого пространственного разрешения. Совмещение основано на построении плотной сетки реперных точек на двух изображениях. Используется алгоритм SURF для отбора корректных пар реперных точек с расчётом векторов смещений. Смещение каждого пикселя корректируемого изображения рассчитывается посредством осреднения прошедших фильтрацию векторов в заданной окрестности с оценкой точности проведённых расчётов. Работа метода разбирается на двух примерах совмещения изображений прибора Геотон спутника «Ресурс-П» № 1. В первом примере показывается возможность совмещения с пиксельной точностью снимка лесного полого холмистой местности (перепад высот более 200 м), не прошедшего процедуру ортотрансформирования и снятого под углом около 30°. Во втором примере рассмотрено совмещение изображений мультиспектральных и панхроматического каналов прибора Геотон, полученных за один сеанс съёмки. Продемонстрированы пространственные рассогласования изображений. Рассматриваются искажения, возникающие при склейке микрокадров и несовпадении осей приборов, формирующих мультиспектральные изображения. Показано хорошее геометрическое соответствие снимков, если корректно проведён учёт рассогласований углов съёмки.

Ключевые слова: «Ресурс-П», Геотон-Л1, SURF, реперные точки, совмещение изображений

Одобрена к печати: 21.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16

Введение

Одной из задач, часто возникающих при обработке изображений высокого пространственного разрешения, является совмещение снимков, получаемых с различных летательных аппаратов, т. е. точное сопоставление пикселей двух изображений, соответствующих одним и тем же точкам земной поверхности. Часто необходимо только минимизировать пространственные рассогласования двух изображений, а не гарантировать высокую точность географической привязки каждого из них. Одним из подходов к решению задачи является построение пар реперных точек, соответствующих идентичным особенностям на двух изображениях, и формирование на их основе взаимно-однозначного отображения. В практике обработки изображений к распространённым методам построения отображения относится использование алгоритма SURF (Bay et al., 2008), строящего соответствующие аффинные преобразования. Совмещение изображений таким преобразованием может давать значительные расхождения из-за неточностей рельефа, особенностей работы аппаратуры съёмки, ошибок геометрической коррекции и географической привязки изображений. В работе (Алексанин и др., 2018) детально рассмотрены существующие подходы к решению проблемы и предложен новый алгоритм, позволяющий учесть особенности совмещаемых изображений. Алгоритм имеет ряд настраиваемых параметров, которые подбираются индивидуально к конкретной паре снимков.

Обычной практикой оценки качества совмещённых изображений является визуальный анализ. Он субъективен и плохо подходит при проведении массовой обработки снимков. Сложности вызывает и совмещение изображений с разным пространственным разрешением и в разных спектральных диапазонах. Например, при совмещении изображений мультиспектральных и панхроматического каналов прибора Геотон спутников «Ресурс-П». В данном случае пространственное разрешение снимков отличается в три раза, а для ряда задач

требуется взаимно-однозначное соответствие пикселей разных спектральных каналов с максимально возможной точностью — с точностью пространственного разрешения панхроматического канала (0,7 м в надири). Предполагается, что хорошо откалиброванные приборы должны обладать такими свойствами (Строилов и др., 2017), т. е. на этапе формирования изображений должно быть взаимно однозначное соответствие пикселей, соответствующих одному и тому же участку местности и относящихся к разным спектральным каналам. Однако уже построение изображения из набора микрокадров является сложной процедурой, требующей использования высокоточных технологий (Кузнецов и др., 2015). Поэтому на этапе обработки уровня 1 необходимо жёстко контролировать пространственное соответствие изображений. Приборы, формирующие изображения, часто не соосны, что делает задачу совмещения их изображений актуальной.

В данной работе рассматривается модификация упомянутого метода, которая позволяет организовать оптимальную автоматическую настройку алгоритма на особенности изображений и давать оценки точности совмещения в каждой точке изображения. На примере панхроматических снимков прибора Геотон рассматриваются вопросы совмещения изображений холмистой местности без проведения ортотрансформирования. Анализируются возможности использования алгоритма для совмещения и оценки качества геометрической коррекции изображений разных спектральных каналов, полученных за один сеанс съёмки.

Используемые данные и алгоритмы их обработки

В качестве исходных данных были взяты панхроматические и мультиспектральные снимки прибора Геотон-Л1 уровня обработки 1А. Изображение, использованное как эталон, прошло обработку до уровня 2В: ортотрансформирование в картографическую проекцию по реперным точкам с подключением цифрового рельефа местности. Была применена общедоступная цифровая модель рельефа SRTM v.4, имеющая пространственное разрешение около 30 м. Набор данных SRTM v.4 предоставляется Международным центром по вопросам сельского хозяйства в тропических зонах (<http://srtm.csi.cgiar.org>).

Детально используемый алгоритм приведён в работе (Алексанин и др., 2018). Основные его процедуры с учётом модификации описываются следующей схемой:

1. Автоматическое определение положения реперных точек при помощи детектора углов Харриса (Harris, Stephens, 1998).
2. Построение дескрипторов реперных точек методом SURF (Bay et al., 2008). В основном использовались нормализованные на единицу векторы-дескрипторы размерностью 64, иногда — размерностью 128.
3. Сопоставление реперов по их дескрипторам. Дескрипторы сопоставляются путём вычисления евклидова расстояния между ними. Сопоставление считается удачным, если для дескриптора с номером i в заданной окрестности находится на втором изображении его образ с номером j , обеспечивающий минимальное расстояние d_{ij} , удовлетворяющее заданному порогу $d_{ij} \leq d_{threshold}$.
4. Автоматическое нахождение образа первого изображения на втором. Проведение совмещения изображений с помощью аффинного преобразования (грубое совмещение).
5. Разбиение изображений на фрагменты минимально допустимого размера (но не менее 200 векторов на фрагмент). Построение двумерного аффинного преобразования для каждого фрагмента с наилучшей точностью. Фильтрация сопоставленных пар реперов в каждом фрагменте: при помощи аффинного преобразования, по плотности отобранных реперов на единицу площади и по однородности величин и направлений векторов.
6. Построение смещения каждого пикселя корректируемого изображения посредством усреднения векторов в окрестности пикселя. Коррекция одного изображения относительно другого.
7. Построение карты точности совмещения каждого пикселя: $\varepsilon = \sigma/\sqrt{N}$, где σ — стандартное отклонение векторов окрестности смещаемого пикселя относительно среднего вектора, N — число векторов окрестности, в которой считается смещение.

Тестирование алгоритма показало, что процедура фильтрации эффективно удаляет векторы некорректных смещений, возникших в результате случайной близости дескрипторов, относящихся к разным точкам земной поверхности (Алексанин и др., 2018). Ошибки расчёта смещений носят случайный характер, не превышают 4 пикселей и хорошо подавляются простым осреднением. Оценка точности ε относится к совмещению некоторой окрестности пикселя, а не к самому пикселю. В случае изображений, снятых под существенно отличающимися углами и ghb значительной изменчивости рельефа, на масштабах менее размера окна расчёта дескриптора (20 пикселей) отдельные пиксели могут совмещаться с существенно большей ошибкой, чем получаемые оценки. Рассмотрим эти проблемы на примере.

Совмещение без ортотрансформирования

Целью эксперимента была проверка работоспособности алгоритма в наиболее сложных случаях. Для этого использовались два панхроматических изображения гористой местности в Приморском крае, почти сплошь покрытой лесом (*рис. 1*). В качестве эталона взято прошедшее ортотрансформирование изображение, снятое почти в надир 14.09.2015 прибором Геотон спутника «Ресурс-П» № 1. Вторым было летнее изображение, снятое тем же спутником 10.08.2015 и не прошедшее географическую привязку с ортотрансформированием, но скорректированное алгоритмом. Изображение снято под углом более 30° от надира, оно светлее и на нём меньше теней. Рельеф характеризовался перепадом высот свыше 200 м.

Рис. 1. Фрагменты двух изображений, состыкованных по произвольной линии разреза: *слева* — эталонного изображения; *справа* — прошедшего обработку алгоритмом

Рис. 2. Векторы смещений: *a* — после фильтрации на карте точности расчёта векторов смещений (пиксели); *б* — на карте рельефа местности (м)

На рис. 2 представлены результаты расчётов, проведённых алгоритмом. Векторы смещений показывают значительную нелинейность трансформации изображения и достигают величин в 150 пикселей. Векторы автоматически отфильтровываются не только на облачности, но и на дороге, что имеет естественное объяснение. Совмещение осуществляется по пологому лесу, который почти сплошной на данном фрагменте. Дорога лежит ниже полого на среднюю высоту деревьев, поэтому совмещение дороги с пиксельной точностью при имеющихся углах наблюдения невозможно (векторы смещений для дороги были отфильтрованы, так как относились к другому уровню поверхности и их недостаточно для организации детального совмещения изображений). Расчёты показывают (см. рис. 2а), что почти везде точность не превышает одного пикселя. Максимальные ошибки (чуть больше пикселя) наблюдаются в районе с сильной изменчивостью рельефа. В этой области векторы смещений сильно меняются на коротких расстояниях, что не позволяет подавить ошибку посредством простого осреднения (процедура 6 в описании алгоритма). Визуальный анализ показал, что вершины деревьев, которые значительно превышают уровень полого, также и по той же причине не совмещаются с пиксельной точностью. Следует заметить, что при строгой географической привязке наших изображений точного совмещения пологих не было бы вообще. Из-за съёмки под большим углом и географической привязки по реперным точкам на поверхности земли рассогласования могут достигать 10 пикселей при средней высоте деревьев около 20 м. Для задачи автоматического определения вырубок одиночных деревьев, например, такая точность была бы неприемлема.

Совмещение разномасштабных мультиспектральных изображений

В данном эксперименте анализировались возможности алгоритма для контроля качества изображений. Использовались съёмки местности п-ова Муравьева-Амурского, характеризующегося перепадом высот в пределах полукилометра. Проводился анализ геометрического соот-

ветствия изображений, снятых в различных спектральных каналах в течение одного сеанса съёмки на примере изображений прибора Геотон спутника «Ресурс-П» № 1. Рассматривались проблемы совмещения изображений четырёх каналов мультиспектральной съёмки с длинами волн 0,48–0,53; 0,54–0,59; 0,62–0,68; 0,72–0,80 мкм (синий, зелёный, красный, ближний инфракрасный) и панхроматического изображения. При идеальной конструкции аппаратуры, осуществляющей съёмку при одинаковых углах ориентации датчиков, «сшитые» из микрокадров изображения (уровень обработки 1А) должны быть совмещены или совмещаться посредством поворота и сдвижки.

Рис. 3. Фрагмент панхроматического изображения Владивостока за 17.03.2018. Жёлтым и красным цветами показаны: а — векторы смещения синего канала относительно красного; б — векторы трансформации (сдвиг, поворот и масштабирование) изображения красного канала к панхроматическому; в — векторы остаточных смещений красного и панхроматического каналов, прошедших трансформацию; г — векторы смещений на льду Амурского залива

Для проверки качества соответствия друг другу мультиспектральные изображения были отмасштабированы и обработаны алгоритмом. Обработка осуществлялась в два этапа: на первом с помощью аффинного преобразования изображения совмещались в целом; на втором осуществлялось детальное совмещение изображений нашим алгоритмом. На каждом этапе оценивалась точность совмещения, на втором этапе она была везде менее одного пикселя.

Вначале совмещались мультиспектральные снимки (рис. 3а, см. с. 13). Изображения разных каналов хорошо соответствовали друг другу с точностью до пикселя, за исключением синего, где наблюдались существенные локальные рассогласования с остальными тремя каналами. На выбранном фрагменте, характеризующемся значительной изменчивостью рельефа, векторы смещений образуют пространственные структуры (см. рис. 3а) и достигают величин в 6 пикселей (12 м). Максимальные рассогласования расстояний между двумя точками на разных спектральных изображениях одного и того же участка местности могут достигать двойной ошибки (24 м). В то же время на изображении льда (плоский рельеф) после преобразования первого этапа изображение синего канала совмещалось с другими с подпиксельной точностью. Это говорит о том, что сшивка микрокадров делается однотипно с подпиксельной точностью, а несоответствия вызваны отличием ориентации датчиков синего канала от других. Пространственные рассогласования каналов объясняются только рельефом. Аккуратное ортотрансформирование изображений с учётом поправки на ориентацию датчиков синего канала должно решать проблему совмещения с пиксельной точностью, во всяком случае для фрагментов 2000×2000 пикселей, с которыми мы работали. Географическая привязка также будет точна, если склейка микрокадров сделана аккуратно, а рельеф точен.

Совмещение мультиспектральных каналов с панхроматическим требует трансформации изображений на основе аффинного преобразования (первый этап обработки). Происходит сдвигка, поворот и масштабирование по двум осям одного изображения относительно другого. Здесь преобразовывалось изображение красного канала относительно панхроматического. Характерные векторы трансформации первого этапа приведены на рис. 3б. Векторы смещений, полученные в результате использования нашего алгоритма на втором этапе, показаны на рис. 3в. Они образуют пространственные структуры и достигают величин в 7 пикселей панхроматического изображения (около 5 м в надире). Для уточнения причин смещений был проведён аналогичный эксперимент на фрагменте с ледовым покровом моря. Получившиеся векторы смещений образуют квазипериодические структуры с максимальным относительным смещением, достигающим 1,5 пикселя (см. рис. 3г). Максимальное рассогласование расстояний между двумя точками на панхроматическом и мультиспектральном изображениях может достигать 3 пикселя (чуть более 2 м, что соответствует размеру пикселя мультиспектрального канала). Поскольку рельеф плоский, эти рассогласования обусловлены либо особенностями алгоритма сшивки микрокадров, либо аберрацией оптической системы. Корректный учёт углов съёмки разными датчиками и рельефа местности должен давать высокую точность соответствия изображений после проведения индивидуальных ортотрансформирований мультиспектральных и панхроматического каналов.

Заключение

Автоматическое совмещение снимков на основе векторов, отобранных аффинным преобразованием, возможно при значительной изменчивости изображений местности и её рельефа на таких сложных объектах, как лес. Совмещение с пиксельной точностью получается даже для изображений, не прошедших ортотрансформирование, и при значительно различающихся углах съёмки. С заданной точностью совмещаются не конкретные пиксели, а их окрестности, размер которых оптимально выбирается при осреднении векторов. В пределах этого размера заданная точность совмещения не гарантируется из-за возможности резких перепадов рельефа на небольших расстояниях. Поскольку метод автоматически находит значительное количество пар реперных точек фактически для произвольной местности, на практике часто возможно разбиение изображений на участки, гарантирующее совмещение с пиксельной точностью.

Созданный метод можно использовать для контроля сшивки и геометрической коррекции изображений, получаемых в различных спектральных каналах в течение сеанса съёмки. В частности, если аккуратно учесть различия в углах сканирования датчиков мультиспектральных и панхроматического каналов прибора Геотон-Л1 спутника «Ресурс-П» № 1 и провести корректное ортотрансформирование, то максимальные рассогласования расстояний между двумя произвольно выбранными точками на различных спектральных изображениях будут около двух метров. Созданный метод никак не связан со спецификой спутниковых изображений и может использоваться для совмещения снимков с беспилотных летательных аппаратов и произвольных систем видеонаблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-05-41152).

Литература

1. Алексанин А. И., Краснопеев С. М., Морозов М. А., Фомин Е. В. Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 18–28.
2. Кузнецов А. Е., Пресняков О. А., Мятлов Г. Н. Структурное восстановление изображений от многоматричных сканерных датчиков дистанционного зондирования Земли // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 29–36.
3. Стролов Н. А., Никитин А. В., Куркина А. Н., Бессонов Р. В., Белинская Е. В., Воронков С. В. Методики наземной взаимной привязки систем координат звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 52–63.
4. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L. V. SURF: Speeded Up Robust Features // Computer Vision and Image Understanding. 2008. V. 110. No. 3. P. 346–359.
5. Harris C., Stephens M. A. combined corner and edge detector // Proc. 4th Alvey Vision Conf. 1988. P. 147–151.

The problems of image superimposition with one-pixel accuracy

A. I. Alexanin, M. A. Morozov, E. V. Fomin

*Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

The work is dedicated to the development of a new method of automatic superimposition of high spatial resolution images. Superimposition is based on a tight net of reference points on two images. A SURF algorithm is used to select the correct pairs of reference points for computing the displacement vectors. Displacement of each pixel of the image under correction is calculated by finding an average of the vectors after filtration in any pixel vicinity. It includes an estimation of computational accuracy. This method of operation is considered for two examples of image superimposition of the satellite “Resource-P”, Geoton-L1 unit. The superimposition possibility with one-pixel accuracy is demonstrated in the first example of forest images in a hilly area (the height variability is more 200 m). The image was not ortho-transformed and had a shooting angle of more than 30°. Superimposition of multisensory and panchromatic Geoton images received for the same scan job is considered in the second example, which demonstrates the image discrepancies. The discrepancies appeared due to chip splicing and a lack of coincidence of the axis of the sensors forming the multisensory images. A good geometrical coincidence of images could be demonstrated if the shooting angles of the sensors had been correctly taken into account.

Keywords: Resource-P, Geoton-L1, SURF, reference points, superimposition of images

Accepted: 21.12.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-9-16

References

1. Aleksanin A. I., Krasnopeev S. M., Morozov M. A., Fomin E. V., Sovmeshchenie izobrazhenii s rossiiskikh sputnikov "Resurs-P" (Superimposition of images from Russian Resource-P satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 18–28.
2. Kuznetsov A. E., Presnyakov O. A., Myatov G. N., Strukturnoe vosstanovlenie izobrazhenii ot mnogo-matrichnykh skanernykh datchikov distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Stitching of remote sensing images from staggered TDI CCD), *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2015, No. 3, pp. 29–36.
3. Stroilov N. A., Nikitin A. V., Kurkina A. N., Bessonov R. V., Belinskaya E. V., Voronkov S. V., Metodiki nazemnoi vzaimnoi privyazki sistem koordinat zvezdnykh datchikov (Ground intercalibration methods of star sensor coordinate frames), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 52–63.
4. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Gool L. V., SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359.
5. Harris C., Stephens M., A combined corner and edge detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conf.*, 1988, pp. 147–151.