

## Совмещение изображений с российских спутников «Ресурс-П»

А. И. Алексанин<sup>1</sup>, С. М. Краснопеев<sup>2</sup>, М. А. Морозов<sup>1</sup>, Е. В. Фомин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru*

<sup>2</sup> *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН  
Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: sergeikr@tig.dvo.ru*

Рассматривается задача совмещения изображений высокого пространственного разрешения (0,7 м) с пиксельной точностью. Для совмещения изображений используется алгоритм SURF, предназначенный для поиска идентичных объектов на последовательности изображений по автоматически выделяемым реперным точкам. Реперная точка характеризуется положением, которое оценивается детектором углов Харриса и дескриптором, рассчитываемым в окрестности заданного размера. Совмещение осуществляется в результате построения аффинного преобразования первого изображения во второе. Апробация проводилась на тестовых изображениях, используемых обычно для верификации методов совмещения изображений, и на спутниковых изображениях природных объектов (лес, поле), меняющихся со временем. Оценено влияние на точность совмещения изображений изменчивости дескрипторов реперных точек со временем, обусловленной сменой сезонов года. Показана неоднозначность построения такого отображения. Продемонстрированы зависимости числа строящихся пар реперных точек от заданной точности построения аффинного преобразования. Оценены размеры фрагментов совмещаемых изображений, при которых аффинное преобразование ещё можно применять для совмещения с пиксельной точностью. Предложен алгоритм совмещения полных изображений с пиксельной точностью. Рассмотрены вопросы стыковки фрагментов изображений. Показана возможность выявления областей, для которых применяемый при совмещении рельеф местности некорректен.

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

Одобрена к печати: 21.12.2017  
DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28

### Введение

Изображения высокого пространственного разрешения находят широкое применение при решении различных задач наблюдения за объектами и явлениями на поверхности Земли. Первоочередной задачей, требующей решения при практическом использовании изображений, является обеспечение точной географической привязки и метрической корректности. Проблеме географической привязки изображений высокого пространственного разрешения посвящено множество работ, подробный обзор которых можно найти в статье (Tountin, 2004). Существуют различные подходы к расчёту и уточнению географической привязки изображений, зависящие от особенностей летательных аппаратов, ведущих детальную съёмку, и решаемых задач. В частности, одной из востребованных задач является совмещение спутниковых изображений — точного сопоставления 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. В то же время, если имеется ортокорректированное, т.е. метрически корректное изображение (назовём его «эталонным»), процесс совмещения изображений позволит решить не только задачу точной географической привязки, но и задачу метрической коррекции. Такой подход к уточнению географической привязки и метрической

коррекции широко распространён и требует создания высокоточной процедуры совмещения изображений.

Для решения задачи совмещения лучше всего использовать «сырые» изображения, т. е. такие, которые не были подвержены геометрической коррекции, а прошли только предварительную привязку на основе моделей движения спутника и платформы с прибором. Такая привязка осуществляется по орбитальным данным. Совмещение сырых однотипных (полученных одним и тем же прибором) изображений является более простой задачей, чем абсолютная привязка каждого изображения. В обоих случаях уточнение привязки проводится с использованием реперных точек. При совмещении не требуется знать абсолютные географические координаты каждой точки, поэтому таких точек на паре изображений можно найти существенно больше.

Для высокоточной и обычно нелинейной коррекции географической привязки требуется большое количество пар реперных точек, что предполагает создание соответствующей автоматической процедуры их построения и идентификации на изображениях. Этой проблеме уделяется большое внимание (Шовенгердт, 2013), и основными трудностями являются точность расчёта положения реперной точки и корректность идентификации пары. Чем выше точность построения пары реперных точек, тем меньше таких пар находится. Для решения задачи иногда применяют процедуру построения взаимно однозначного отображения одного изображения в другое. Построение такого преобразования позволяет отфильтровать некорректно идентифицируемые пары, которые обычно составляют меньшинство из найденных пар. В практике обработки изображений к наиболее известным подходам к построению взаимно однозначного отображения относятся алгоритмы SIFT и SURF (Bay et al., 2008; Lowe, 2004), основанные на построении аффинного преобразования. Последний из них показывает более надёжные результаты, и делаются попытки применить его для совмещения спутниковых изображений высокого пространственного разрешения (Кузнецов и др., 2015; Морозов, Фомин, 2015; Chen et al., 2014; Kim et al., 2014; Schwind et al., 2010). Алгоритм хорошо работает на изображениях поселений и сельскохозяйственных угодий, где наблюдается значительное количество контрастов в форме углов. Однако на определённых изображениях, например леса, количество идентифицируемых пар реперных точек резко падает. Совмещаемые изображения часто имеют значительное временное рассогласование. Для того же леса могут меняться крона деревьев и контрасты. Это приводит к трансформации маркеров, что ухудшает точность их совмещения. Количество пар также существенно зависит от допустимой точности аффинного преобразования и зоны поиска репера-аналога. Понижение точности отображения ведёт к ухудшению точности совмещения изображений. Всё это требует детальных исследований для решения задачи с необходимой точностью.

Ещё одним параметром, влияющим на точность совмещения изображений с помощью алгоритма SURF, является их размер. С его увеличением, как правило, падает количество строящихся пар реперных точек при заданной точности отображения. Связано это с тем, что геометрические искажения совмещаемых изображений не укладываются в модель одного аффинного преобразования. Метод можно применять лишь на фрагменте изображения, размер которого зависит от специфики спутниковой съёмки и технологии обработки. Поэтому применение данного подхода возможно только при строгом учёте типов геометрических искажений, возникающих при построении географической привязки. В работе (Dave et al., 2015) подробно описаны возможные причины, вызывающие рассогласования в географических координатах, и подходы к коррекции таких рассогласований для «сырых» спутниковых данных. Ошибки привязки делятся на две категории. К первой относятся ошибки, связанные с устройством наблюдения и обусловленные поведением спутниковой платформы и особенностями прибора, осуществляющего съёмку. Ко второй — связанные с атмосферными условиями, моделью привязки по спутниковой телеметрии и неточностями используемой топографии местности. Кроме того, ошибки делятся на систематические и случайные, а также их можно разделить по степени пространственной изменчивости. Ожидается, что систематические ошибки с высокой пространственной изменчивостью будут наиболее критичны при построении аффинного преобразования для совмещения двух «сырых» изображений.

К такому виду можно отнести только ошибки используемого рельефа местности. Решение задачи совмещения изображений требует нивелировать влияние ошибок — найти характерный размер участков, когда ещё можно использовать аффинное преобразование, и построить процедуру совмещения полных изображений на основе аффинных преобразований локальных участков.

Целью данной работы является разработка метода для решения задачи совмещения изображений спутников «Ресурс-П» для прибора Геотон-Л1. Пространственное разрешение прибора составляет около 0,7 м с шириной захвата 32 км. Решались следующие задачи: настройка алгоритма SURF для проведения совмещения изображений различных типов местности с максимальной точностью; оценка пространственных размеров участков, при которых аффинное преобразование ещё работоспособно; оценка неоднозначности построения аффинного отображения с пиксельной точностью; выявление особенностей совмещения изображений, снятых под разными углами и в разные сезоны.

### Используемые данные и алгоритмы их обработки

В качестве исходных данных были взяты панхроматические снимки с прибора Геотон-Л1 уровня обработки 1А. Изображения проходили обработку до уровня 2В — ортотрансформирование в картографическую проекцию по реперным точкам с подключением цифрового рельефа местности. Использовалась общедоступная цифровая модель рельефа SRTM v.4, имеющая пространственное разрешение около 30 м. Набор данных SRTM v.4 любезно предоставлен Международным центром по вопросам сельского хозяйства в тропических зонах (CIAT) (получить доступ к ним можно по ссылке <http://srtm.csi.cgiar.org>). Для тестирования корректности работы используемых алгоритмов применялись две пары изображений с известными функциями трансформации (взяты с сайта <http://www.robots.ox.ac.uk/~vgg/research/affine/>). Это были изображения плоских стен зданий, снятых с разных углов и разных расстояний.

Для совмещения изображений уровня 2В использовался следующий алгоритм обработки.

1. Автоматическое определение положения реперных точек при помощи детектора углов Харриса (Harris, Stephens, 1988).
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 реперных точек по их дескрипторам. Дескрипторы сопоставляются путём вычисления евклидова расстояния между ними. Сопоставление считается удачным, если для дескриптора с номером  $i$  в заданной окрестности на втором изображении находится его образ с номером  $j$ , обеспечивающий минимальное расстояние  $d_{ij}$ , удовлетворяющее заданному порогу  $d_{ij} \leq d_{threshold}$ .
4. Разбиение изображений на фрагменты заданного размера. Построение двумерного аффинного преобразования для каждого фрагмента с заданной точностью для выявления наиболее точно рассчитанных векторов. Векторы, которые не вошли в набор, удовлетворяющий точности аффинного преобразования, выбрасываются. Дополнительная фильтрация сопоставленных реперов в каждом фрагменте: по плотности отобранных реперов на единицу площади и по однородности величин и направлений векторов в заданной окрестности.
5. Построение средних смещений идентичных фрагментов двух изображений. Построение отображения одного изображения в другое методами объективного анализа. Коррекция одного изображения относительно другого.

Программная реализация алгоритма осуществлялась авторами по схемам, близким к тем, которые описаны в упомянутых выше статьях (Bay et al., 2008; Harris, Stephens, 1988). Алгоритм имеет значительное количество настраиваемых параметров, определяющих точность и эффективность его работы. К ним в первую очередь можно отнести: порог  $d_{threshold}$ ;

размерность вектора-дескриптора; задаваемую точность аффинного отображения; размер зоны поиска образа реперной точки на втором изображении; размер обрабатываемых фрагментов; допустимую плотность векторов; весовые коэффициенты в расчёте смещений пикселей изображения. Несмотря на получение высокоточного аффинного преобразования второго изображения в первое, было принято решение не использовать его для совмещения. Смещение каждого пикселя при трансформации рассчитывается на основе объективного анализа посредством расчёта для него средневзвешенного смещения реперных точек в заданной окрестности. Веса для расчёта средневзвешенного смещения берутся обратно пропорциональными расстоянию до конкретной реперной точки. Довольно часто аффинные преобразования двух соседних фрагментов столь близки, что при расчёте смещения пикселя достаточно использовать средние смещения ближайших к пикселю фрагментов. Используемые настройки алгоритма подбирались с учётом следующих требований:

- реперные точки должны характеризоваться не столько наличием углов, сколько произвольными уникальными дескрипторами;
- алгоритм должен генерировать значительное количество пар реперных точек (сотни и более) для обрабатываемого фрагмента изображения даже в случае значительной изменчивости изображения (например, леса в разные сезоны года) и при максимальной точности аффинного преобразования (1 пиксель);
- генерация алгоритмом пар реперных точек должна резко падать при совмещении непохожих изображений (например, покрытых облачностью).

Верификация точности совмещения изображений оценивалась по рассогласованиям автоматически рассчитанных смещений с эталонными. Последние получались на основе рассчитанных смещений по известной функции трансформации изображений, либо посредством сравнения с реперными точками, не участвовавшими в построении ортофотоплана, либо при проведении совмещения оператором-экспертом.

### Верификация алгоритма на тестовых данных

Для тестирования корректности алгоритма совмещения были выбраны две пары изображений, используемых в мировой практике для построения подобных оценок. Данные изображения и результаты построения векторов смещений для найденных реперных точек приведены на *рис. 1*.

Проводились два типа экспериментов. В первом эксперименте анализировалась точность восстановления трансформации при двумерном аффинном преобразовании. Для этого первое изображение трансформировалось посредством поворота на  $30^\circ$  и растяжения на 10%. Трансформация описывается линейным уравнением:

$$Y = AX + B, \quad (1)$$

где  $X$  — координаты вектора положения реперной точки первого изображения;  $A$  — матрица трансформации;  $B$  — вектор смещения изображений;  $Y$  — вектор координат реперной точки на втором изображении. Совмещение изображений осуществлялось с допустимой точностью аффинного преобразования в 10 пикселей. То есть вектор включался в список, по которому строится преобразование, если его смещение и смещение, рассчитываемое по аффинному преобразованию, отличаются не более чем на 10 пикселей. Всего было построено 1804 вектора, из которых только один отфильтровался заданным преобразованием. Стандартное рассогласование найденных векторов с векторами, которые рассчитывались по функции трансформации (1), составило 0,65 пикселя, что говорит о высокой точности расчёта положения реперных точек. Во втором эксперименте использовалась оригинальная пара сопоставляемых изображений (*рис. 1*, см. с. 22). Они снимались под разными углами и с разных расстояний, т.е. в трёхмерном пространстве, поэтому трансформация изображений также описывалась преобразованием (1), но уже трёхмерным.





Рис. 1. Две последовательно сделанные фотографии с разными ракурсами. Жёлтым цветом обозначены векторы смещений реперных точек при построении двумерного аффинного отображения с точностью в 10 пикселей; красным — смещения для аффинного отображения с точностью в 1 пиксель

Двумерным аффинным преобразованием совместить изображения с пиксельной точностью невозможно. Полные изображения можно совместить с помощью аффинного преобразования только при понижении точности. Проводилось совмещение с точностью двумерного аффинного преобразования до 10 пикселей, при этом было построено 1405 векторов. Дальнейшее ухудшение точности отображения не приводило к росту числа векторов. Для оценки истинного перемещения реперной точки использовалось трёхмерное аффинное преобразование, параметры которого брались с упомянутого ранее сайта. Считали рассогласования истинного смещения и рассчитанного алгоритмом. Стандартное отклонение составило 1,5 пикселя, что многократно лучше точности аффинного преобразования. Гистограмма распределения модуля отклонений отдельных векторов от их истинных значений демонстрирует почти линейное убывание с ростом ошибки расчёта положения в диапазоне от 0 до 4,5 пикселей. Подавляющее большинство пар (более тысячи) имели рассогласования в пределах 1 пикселя. Систематические отклонения всех векторов по каждой координате были существенно меньше пикселя. Это подтверждает высокую точность и надёжность расчёта и идентификации реперных точек.

Поскольку существуют пары реперных точек с рассогласованием более пикселя, то для гарантии точности совмещения в 1 пиксель нужно использовать аффинное преобразование с этой же точностью. Но тогда останется только часть векторов, расположенная компактно в пространстве (см. рис. 1). Для построения всех векторов приведённым алгоритмом при такой точности необходимо разбивать изображение на небольшие фрагменты, в пределах которых выдерживается заданная точность сопоставления. Векторов-выбросов оказалось ничтожно мало. На первой паре изображений был всего один, на второй — несколько. Они отфильтровывались автоматически при разбиении изображения на фрагменты требуемого размера, что позволило отказаться от слабо формализуемого фильтра по однородности величин и направлений векторов.

## Верификация на спутниковых изображениях

Совмещение спутниковых изображений является более сложной задачей, так как обычно между ними наблюдается значительное временное рассогласование, в течение которого происходит изменение яркостных и спектральных характеристик снимаемой поверхности. В результате ухудшается идентификация пар реперных точек и растут ошибки в определении их положений. Для обеспечения достаточного количества векторов требуется ослабление критериев похожести, что приводит к росту числа векторов-выбросов. Появляются дополнительные



виды ошибок расчёта векторов смещения, связанные с неточностью модели формирования изображений, рельефа местности, изменчивостью освещённости, помехами природного характера.

В первую очередь требуется выяснить влияние ошибок определения положений реперов из-за изменчивости их пространственных характеристик во времени. Для этого были взяты изображения фрагмента (6000×4000 пикселей) практически плоской местности (Чулымская долина в Сибири), снятые спутником «Ресурс-П» № 1 с близких спутниковых трасс с небольшим рассогласованием угла съёмки (15°). Вся изменчивость рельефа местности укладывалась в 60 м. При таких условиях можно ожидать, что ошибки при совмещении изображений, связанные с учётом рельефа и неточностями модели формирования изображений, будут минимальными. На это указывают и результаты привязки: относительная привязка изображений по реперным точкам, выделенным экспертом, показывает высокое качество (в пределах 1 пикселя).

Временные рассогласования между съёмками значительны: первое изображение относится к весне, когда на деревьях ещё нет листвы, а второе — к лету. В таких условиях координаты и дескрипторы одной и той же реперной точки на двух изображениях могут существенно различаться. Всего автоматически найдено 2323 пары реперных точек, и фактически все они строятся при точности аффинного преобразования около 3 пикселей. Их количество резко падает при попытке построить аффинное преобразование с точностью 1 пиксель (рис. 2). Наблюдается иная картина, если провести сравнение с результатами, приведёнными на рис. 1. Построенные пары реперных точек распределены по всему изображению, а не сосредоточены в одном районе. Количество векторов, построенных с пиксельной точностью, составляет менее половины.

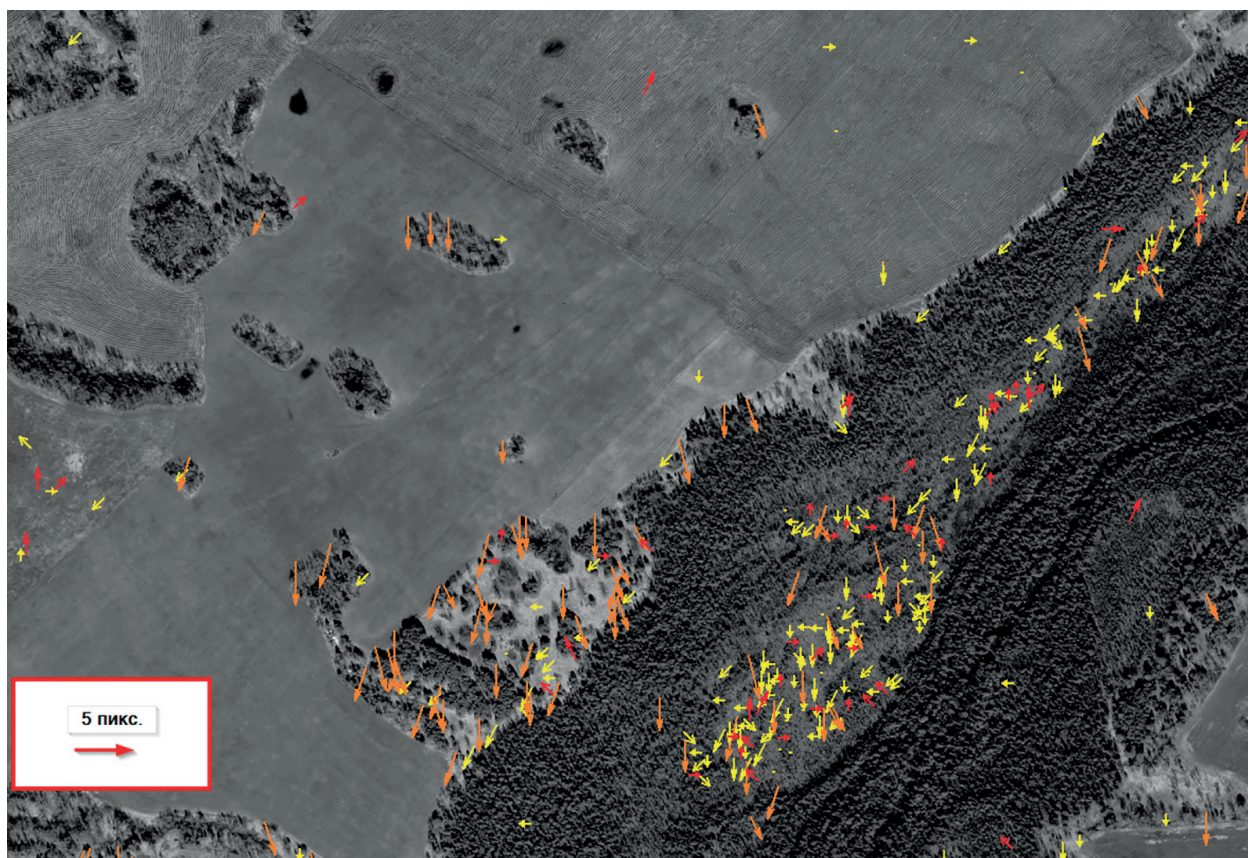


Рис. 2. Фрагмент изображения, сформированного прибором Геотон спутника «Ресурс-П» № 1 за 02.05.2014. Векторы, найденные на трёх итерациях: жёлтые (1-я), оранжевые (2-я) и красные (3-я)

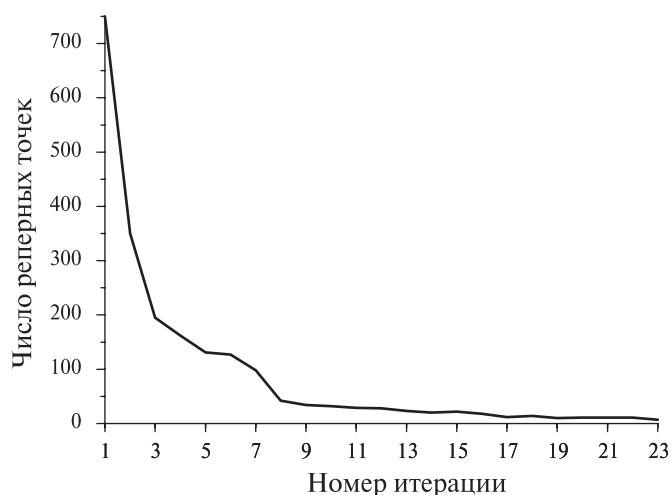


Рис. 3. Число пар реперных точек, строящихся при аффинном преобразовании с пиксельной точностью для участка Чулымской долины (см. рис. 2), в зависимости от номера итерации

Если исключить из рассмотрения построенные пары, то по оставшимся реперным парам тоже можно построить аффинное преобразование с пиксельной точностью. Пар будет наблюдаться существенно меньше, но всё ещё достаточно, при этом изменится среднее смещение. При продолжении этой процедуры можно построить график падения числа пар в зависимости от увеличения номера итерации (рис. 3). Векторы, относящиеся к первым трём итерациям, приведены на рис. 2. Векторы каждой итерации распределены по всему изображению. Среднее смещение, полученное на первой итерации, — менее 1 пикселя, что говорит о корректности оценки смещения. Но уже результат второй итерации достигает 3 пикселей, что неверно. Можно сделать вывод, что при значительной изменчивости изображений возможны ситуации, когда для совмещения изображений с пиксельной точностью необходимо будет проводить детальный анализ всех строящихся пар реперных точек.

Проверка работоспособности метода проходила на изображениях г. Владивостока и его окрестностей — местность холмистая с перепадом высот вплоть до 470 м. В последние годы на данной территории идёт интенсивное строительство, что сопровождается изменением рельефа. Работоспособность метода разберём на паре изображений за февраль 2016 г. — одной из наиболее сложных для автоматического совмещения. Первое изображение безоблачное и снято спутником «Ресурс-П» № 2 под углом 26°. Второе изображение снято другим спутником («Ресурс-П» № 1) почти в надир под углом в 3° (рис. 4, см. с. 25) при наличии как сплошной, так и полупрозрачной облачности. Изображения прошли обработку уровня 2В. Ортотрансформирование осуществлялось по трём общим опорным точкам (см. рис. 4), а остальные точки (порядка 60) использовались для контроля точности. Для первого изображения контроль точности показал стандартное отклонение  $\sigma = 0,55$  пикселя, для второго — 1 пиксель. Изображения были разбиты на области с размерами 1000×1000 пикселей, и для каждого были рассчитаны аффинное преобразование и среднее смещение. Смещения были посчитаны фактически везде, где позволяла облачность. Области со сплошной облачностью и морские регионы автоматически отфильтровались. Алгоритм совмещения изображений показал наличие районов, где смещения значительны и достигают порой 8 пикселей. К ним можно отнести центральный и северо-восточный районы, для которых реперных точек, используемых в процедуре ортотрансформирования, не оказалось по крайней мере для одного изображения. Наиболее вероятной причиной таких крупномасштабных нелинейных расхождений двух изображений может являться некорректность расчёта RPC-коэффициентов, применяемых при геометрической коррекции изображений. Интерактивный расчёт смещений в этих районах, выполненный экспертом, подтвердил правильность расчётов автоматического метода. Корректные смещения получались даже для областей, частично заперенных облачностью.



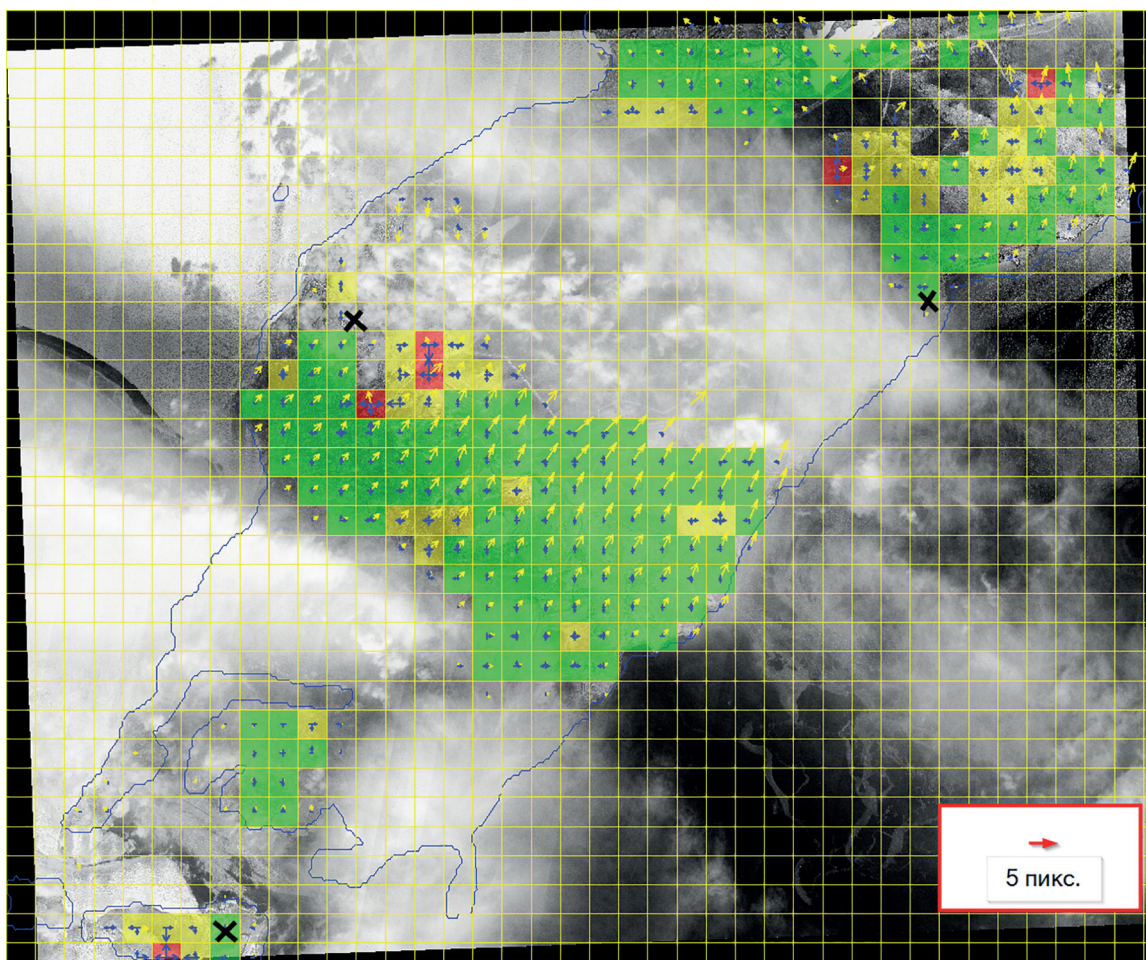


Рис. 4. Полутоновое изображение г. Владивостока со спутника «Ресурс-П» № 1 за 20.02.2016 и средние векторы смещений (жёлтый цвет) для областей размером  $1000 \times 1000$  пикселей. Чёрные кресты — положение реперных точек, применявшихся при ортотрансформировании; синие векторы — величины отклонений среднего смещения от соседних; зелёные области — невязки не превышают стандартного отклонения; жёлтые — невязки больше величины стандартного отклонения, но меньше двойного отклонения; красные — отклонения больше двух стандартных величин

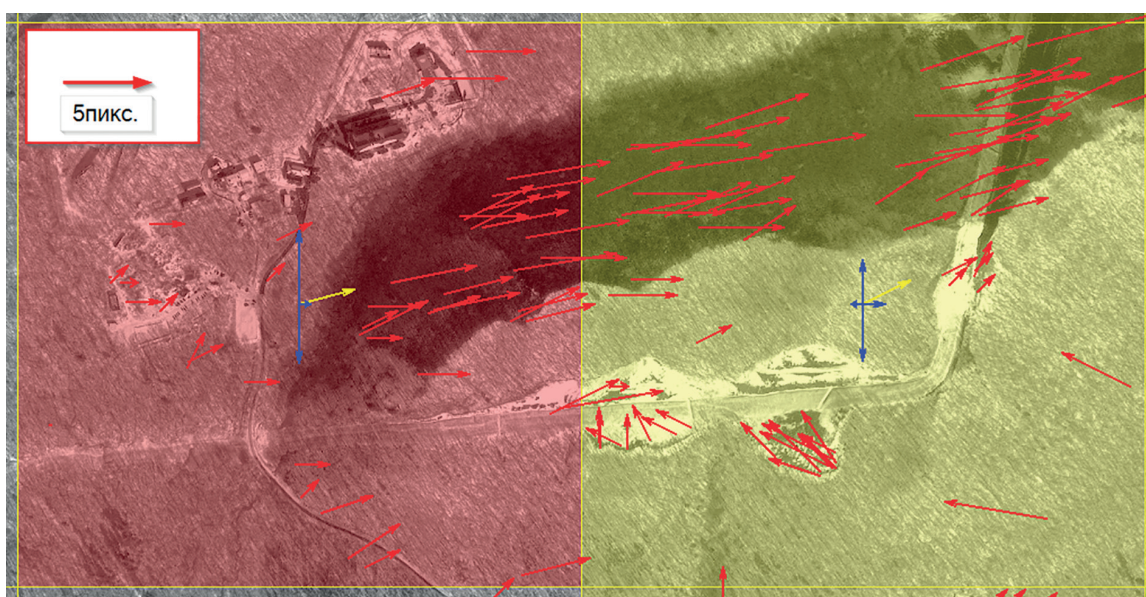


Рис. 5. Фрагмент местности изображения, представленного на рис. 4, в исходном разрешении. Обозначения те же. Красные векторы — смещения реперных точек



Для анализа ошибок работы автоматического метода были проделаны следующие вычисления. Для каждой области считались модули рассогласования средних смещений с четырьмя соседними. Подбиралось такое разбиение изображения на фрагменты, когда при правильном расчёте среднего смещения модуль рассогласования векторов соседних средних смещений составлял менее 1 пикселя. Если полагать, что ошибка расчёта смещения распределена по нормальному закону со стандартным отклонением в 1 пиксель, то можно оценить вероятности получения рассогласований соседних смещений хуже чем в 1 и 2 пикселя. Такие рассогласования соседних смещений будут иметь отклонения от соседних на величину, превышающую  $\sqrt{2}$  и  $2\sqrt{2}$  пикселей соответственно (согласно оценке стандартного отклонения для разности двух случайных величин). Смещение будет считаться некорректно посчитанным, если наблюдалось не менее двух таких отклонений от соседних. Всего областей с тремя и более соседями было 208, из которых 52 области (25 %) имели отклонения больше  $\sqrt{2}$  и 6 (2,9 %) — больше  $2\sqrt{2}$ . Процентный состав некорректно рассчитанных векторов соответствует гипотезе о случайной ошибке со стандартным отклонением чуть меньше 1 пикселя. Однако визуальный анализ смещений в областях с величинами отклонений средних смещений более  $2\sqrt{2}$  пикселей показал, что средние смещения рассчитаны верно и причины отклонений другие. Из всех типов ошибок, влияющих на точность географической привязки изображений и упомянутых во введении, наиболее вероятной причиной таких локальных отклонений являются неточности используемого рельефа местности. Разберём это на конкретном примере (рис. 5, см. с. 25). На рисунке заметны отсутствие коллинеарности построенных векторов найденных пар реперов и значительный разброс их длины. Для приведённого фрагмента выделяется группа векторов, расположенная в ложбине между хребтами и находящаяся в тени. Они существенно отличаются от остальных как по величине, так и по направлению. Также не соответствуют общей тенденции векторы, расположенные около дороги в областях со следами проводившихся земляных работ. На это же указывают и параметры аффинного преобразования. Аффинное преобразование можно представить как смещение, поворот и масштабирование. При правильном рельефе и хорошо привязанных изображениях аффинное преобразование фрагментов не должно иметь поворота и масштабирования. А в данном случае эти коэффициенты значительные и во много раз превышают величины, которые могли бы быть объяснены наличием случайной ошибки в расчёте смещений пар реперных точек. Представленный алгоритм может помечать такие области для последующего анализа.

## Заключение

Применение метода, созданного на основе алгоритма SURF, для решения задачи автоматического совмещения изображений с пиксельной точностью показывает перспективность такого подхода. Совмещение изображений при помощи аффинного преобразования возможно даже при значительной сезонной изменчивости местности на таких сложных объектах, как лес и поле. Поскольку метод автоматически находит значительное количество пар реперных точек фактически для произвольной местности, то возможно разбиение изображений на участки, которые совмещаются посредством аффинного преобразования с пиксельной точностью. Аффинное преобразование является избыточным по количеству определяемых параметров. Эту избыточность можно использовать для контроля и улучшения точности получаемого отображения. Корректные аффинные преобразования должны генерировать смещения, одинаковые на границах разных участков. Возможно введение ограничений на допустимые величины сжатия/растяжения по каждой оси координат и поворота. Стоит ожидать, что это повысит точность совмещения изображений и улучшит отбраковку некорректных пар реперных точек. Выход параметров аффинного преобразования за допустимые ограничения может использоваться для поиска участков, для которых применяемый рельеф местности некорректен. Необходимо также отметить, что предлагаемый алгоритм совмещения изображений не использует специфику спутников «Ресурс-П». Его можно применять как для других спутниковых изображений, так и для обработки снимков с беспилотных летательных аппаратов.

Работа поддержана РФФИ (проект № 17-05-41152) и программой Президиума РАН № 27 «Фундаментальные проблемы решения сложных практических задач с помощью суперкомпьютеров». Использовались информационные ресурсы Центра коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН и Центра «Вычислительный ресурс».

## Литература

1. Кузнецов А. Е., Пошехонов В. И., Рыжиков А. С. Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА «Landsat-8» // Цифровая обработка сигналов. 2015. № 3. С. 37–42.
2. Морозов М. А., Фомин Е. В. Геометрическая коррекция изображений с российских спутников Канопус-В и Ресурс-П // 13-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. М.: ИКИ РАН, 2015. С. 49.
3. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование: Модели и методы обработки изображений. М.: Техносфера, 2013. 592 с.
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. Chen Q., Wang Sh., Wang B., Sun M. Automatic registration method for fusion of ZY-1-02C satellite images // Remote Sensing. 2014. V. 6. P. 157–179.
6. Dave C. P., Joshi R., Strivastava S. S. A survey on geometric correction of satellite imagery // Intern. J. Computer Applications. 2015. V. 116. No. 12. P. 24–27.
7. Harris C., Stephens M. A Combined corner and edge detector // Proc. 4<sup>th</sup> Alvey Vision Conf. 1988. P. 147–151.
8. Kim A.-L., Song J.-H., Kang S.-L., Lee W.-K. Matching and geometric correction of multi-resolution satellite SAR images using SURF technique // Korean J. Remote Sensing. 2014. V. 30. No. 4. P. 431–444.
9. Lowe D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints // Intern. J. Computer Vision. 2004. V. 60. No. 2. P. 91–110.
10. Schwind P., Suri S., Reinartz P., Seibert A. Applicability of the SIFT operator to geometric SAR image registration // Intern. J. Remote Sensing. 2010. V. 31. Iss. 8. P. 1959–1980.
11. Tountin T. Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. Iss. 10. P. 1893–1924.

## Superimposition of images from Russian Resource-P satellites

A. I. Alexanin<sup>1</sup>, S. M. Krasnopeev<sup>2</sup>, M. A. Morozov<sup>1</sup>, E. V. Fomin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia  
E-mail: aleks@iacp.dvo.ru

<sup>2</sup> Pacific Geographical Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia  
E-mail: sergeikr@tig.dvo.ru

The task to be considered is the superimposition of high spatial resolution images (0.7 m) with pixel-level accuracy. To superimpose images, a SURF algorithm is used to search for identical objects in a sequence of images on the basis of automatically allocated reference points. A reference point shall be characterized as a position estimated by a Harris angle detector and a descriptor calculated within the vicinity of a preset size. Superimposition shall be realized as a result of structuring an affine transformation of the first image into the second one. Approbation was performed on test images which are usually used for verification of image superimposition methods and on satellite images of natural objects (forests, fields, etc.), changing over time. The influence of the variability of season-conditioned reference point descriptors on the accuracy of superimposition of the images was estimated, and the ambiguity of structuring such imaging was shown. The relationships between the number of constructed



pairs of reference points and the preset accuracy of the affine transformation are demonstrated. The sizes of the superimposed image fragments are estimated when an affine transformation can still be applied for pixel-level accuracy superimposition. An algorithm of pixel-level accuracy superimposition of complete images is proposed. The issue of coupling of image fragments has been considered. An opportunity to detect areas, for which the terrain relief applied for superimposition is incorrect, has been shown.

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

Accepted: 21.12.2017

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-18-28

## References

1. Kuznetsov A. E., Poshekhonov V. I., Ryzhikov A. S., Tekhnologiya avtomaticheskogo kontrolya tochnosti geoprivязki sputnikovykh izobrazhenii po opornym snimkam ot KA "Landsat-8" (A technology for automatic control of accuracy of satellite image navigation with ground control points of LANDSAT-8), *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2015, No. 3, pp. 37–42.
2. Morozov M. A., Fomin E. V., Geometricheskaya korrektsiya izobrazhenii s rossiiskikh sputnikov Kanopus-V i Resurs-P (Rectification of images from Russian satellites Kanopus-V and Resurs-P), *13-ya konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (13th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow: IKI RAN, 2015, p. 49.
3. Shovengerdt R. A., *Distantsionnoe zondirovanie. Modeli i metody obrabotki izobrazhenii* (Remote sensing. Models and methods of image processing), Moscow: Tekhnosfera, 2013, 592 p.
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. Chen Q., Wang Sh., Wang B., Sun M., Automatic registration method for fusion of ZY-1-02C satellite images, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, pp. 157–179.
6. Dave C. P., Joshi R., Strivastava S. S., A survey on geometric correction of satellite imagery, *Intern. J. Computer Applications*, 2015, Vol. 116, No. 12, pp. 24–27.
7. Harris C., Stephens M., A combined corner and edge detector, *Proc. 4th Alvey Vision Conf.*, 1988, pp. 147–151.
8. Kim A.-L., Song J.-H., Kang S.-L., Lee W.-K., Matching and geometric correction of multi-resolution satellite SAR images using SURF technique, *Korean J. Remote Sens.*, 2014, Vol. 30, No. 4, pp. 431–444.
9. Lowe D. G., Distinctive image features from scale-invariant keypoints, *Intern. J. Computer Vision*, 2004, Vol. 60, No. 2, pp. 91–110.
10. Schwind P., Suri S., Reinartz P., Seibert A., Applicability of the SIFT operator to geometric SAR image registration, *Intern. J. Remote Sens.*, 2010, Vol. 31, Issue 8, pp. 1959–1980.
11. Tountin T., Review article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *Intern. J. Remote Sens.*, 2004, Vol. 25, Issue 10, pp. 1893–1924.