

## Установление соответствия между векторными эталонами и полутонными изображениями

В.А. Гришин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru*

В задачах, связанных с обработкой материалов дистанционного зондирования Земли, оптическими измерениями, в частности, в области корреляционно-экстремальной навигации, возникает необходимость установления соответствия между эталонными и реально наблюдаемыми изображениями. В настоящее время наиболее хорошо изучены вопросы установления соответствия между изображениями в растровой форме. Однако векторные эталонные изображения имеют ряд преимуществ перед растровыми. В частности, это малый объем, возможность линейных и нелинейных преобразований, а также возможность компенсации искажений съёмочной камеры путем трансформации эталона с малыми вычислительными затратами. В статье рассмотрены два алгоритма установления соответствия между векторными эталонами и растровыми изображениями, предназначенных для решения навигационных задач. Первый алгоритм обеспечивает установление соответствия между картой береговых линий и растровым изображением без нахождения в явном виде границ «океан/материк» на растровом изображении. Алгоритм не предъявляет высоких требований к качеству растрового изображения, но поиск экстремума целевой функции соответствия между эталоном и растровым изображением требует значительных вычислительных затрат. Второй алгоритм предполагает нахождение границ «океан/материк» в явном виде и требует для своей реализации существенно меньших вычислительных ресурсов. Однако он предъявляет высокие требования к алгоритмам селекции облаков на изображении.

**Ключевые слова:** корреляционно-экстремальная навигация, векторные эталоны, карта береговых линий

*Одобрена к печати: 13.01.2017  
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-40-49*

### Введение

Задача установления соответствия между различными изображениями является одной из классических задач обработки изображений. Такие задачи возникают, например, при трехмерной реконструкции поверхности, сфотографированной с нескольких точек (фотограмметрия), при регистрации изображений (Катаманов, 2007, 2012, 2013), (Егошкин и др., 2009), обнаружении заданных объектов на снимках, распознавании лиц, навигации и наведении по оптическим изображениям и т. д.

В данном случае задача установления соответствия рассматривается применительно к решению задачи оптической навигации. Дело в том, что широко распространенные в настоящее время спутниковые навигационные системы (более точно – приемники этих систем) могут быть крайне легко заблокированы с помощью средств радиоэлектронного подавления. Поэтому в настоящее время идет активное развитие иных средств навигации, обеспечивающих большую устойчивость к помехам. Одним из таких методов является оптическая навигация по изображению поверхности Земли.

В настоящее время наиболее хорошо изучены вопросы установления соответствия между изображениями в растровой форме. Однако в некоторых случаях эталонные изображения могут быть заданы в векторной форме (векторные эталоны). Вообще говоря, понятие векторного эталона является достаточно общим. В данном случае под векторным эталоном понимается совокупность линий, являющихся геометрическим местом точек, удовлетворяющих условию локального максимума нормы градиента яркости изображе-

ния. Эти линии приближаются ломаными линиями, состоящими из прямолинейных отрезков.

Такая форма представления имеет ряд преимуществ, в частности, возможность трансформирования эталона с малыми вычислительными затратами, а также малый расход памяти для хранения векторных эталонов. Возможность трансформации векторного эталона с малыми вычислительными затратами очень важна в случае, когда для получения заданной точности измерений необходимо корректировать геометрические искажения камеры, используемой для съемки. Корректировать векторный эталон на несколько порядков проще, чем растровое изображение, формируемое камерой. Вообще говоря, всегда имеется возможность преобразования векторного эталона в растровую форму и использования имеющихся методов работы с растровыми эталонами, однако этот путь (Катаманов, 2007; Егошкин и др., 2009) представляется неоптимальным.

Векторный подход используется, например, при регистрации результатов аэрофото съемки и спутниковых изображений. В работе (Fujii, Arakawa, 2004) на растровых изображениях выделяются особенности, а затем их ищут на картах. В работе (Wang et al., 2008) на изображении выделяются линейные особенности, затем устанавливается соответствие между этими особенностями и картой. В работе (Li, Briggs, 2006) устанавливается соответствие между изображением и векторной картой дорог. В работе (Habbecke, Kobbelt, 2012) устанавливается соответствие между результатами съемки и кадастровыми картами. Во всех указанных случаях соответствие устанавливается с не очень высокой точностью – в пределах 1–8 пикселей. При этом решается задача трансформации одного изображения с тем, чтобы установить соответствие с другим изображением. Параметры положения камеры не определяются.

Недостатками векторных эталонов являются некоторые проблемы со сходимостью процесса установления соответствия при очень больших начальных ошибках, а также меньший накопленный объем опыта по работе с такими эталонами. Первый недостаток можно устранить путем проведения предварительного грубого поиска, при котором остаточная ошибка определения координат гарантированно попадает в область сходимости алгоритма, осуществляющего точный поиск с использованием векторного эталона. Под областью сходимости понимается такая окрестность искомого решения, из которой итерационный процесс поиска решения сходится к искомому решению по некоторой норме.

### **Алгоритм установления соответствия без нахождения границ в явном виде**

Первоначально задача установления соответствия между векторными эталонами и полутоновыми изображениями решалась применительно к задаче корреляционно-экстремальной навигации по форме видимой линии горизонта при полете летательных аппаратов над поверхностью материков и задаче оценивания местной вертикали по изображению линии горизонта при полете над океаном (Маслов, Гришин, 2015).

В дальнейшем аналогичная задача установления соответствия между векторным эталоном и растровым изображением решалась применительно к задаче навигации космических аппаратов по изображению Земли. Для отработки алгоритмов были использованы изображения Земли, полученные со спутника Электро-Л (Гришин, 2014) за 2013 г. В качестве векторного эталона использовались карты береговой линии – (Global..., 2015; Wessel, Smith, 1996). Поскольку наибольший контраст береговых линий (водоемов, морей и океанов) наблюдается в красном и ближнем ИК диапазоне, то здесь и далее используются изображения в этом диапазоне. Процедура поиска была реализована в два этапа.

На первом этапе производился грубый поиск соответствия, в результате которого ошибка совмещения растрового и векторного эталонов уменьшалась до 3–5 пикселей. Грубый поиск осуществляется с помощью специально синтезированного сетчатого эталона с шагом сетки  $0,05^\circ$  по долготе и широте. Этот эталон синтезируется для полосы  $\pm 45$  км от границы береговой линии. При этом, если точка сетчатого эталона принадлежит материке, ей присваивается значение «1», если океану – «0». Для грубого поиска использован один из вариантов корреляционного алгоритма.

Затем осуществлялся точный поиск (совмещение векторного и растрового изображений). Проводились эксперименты как с изображениями пониженного разрешения, охватывающими весь земной шар, так и изображениями полного разрешения форматом  $1000 \times 1000$  пикселей (рис. 1).

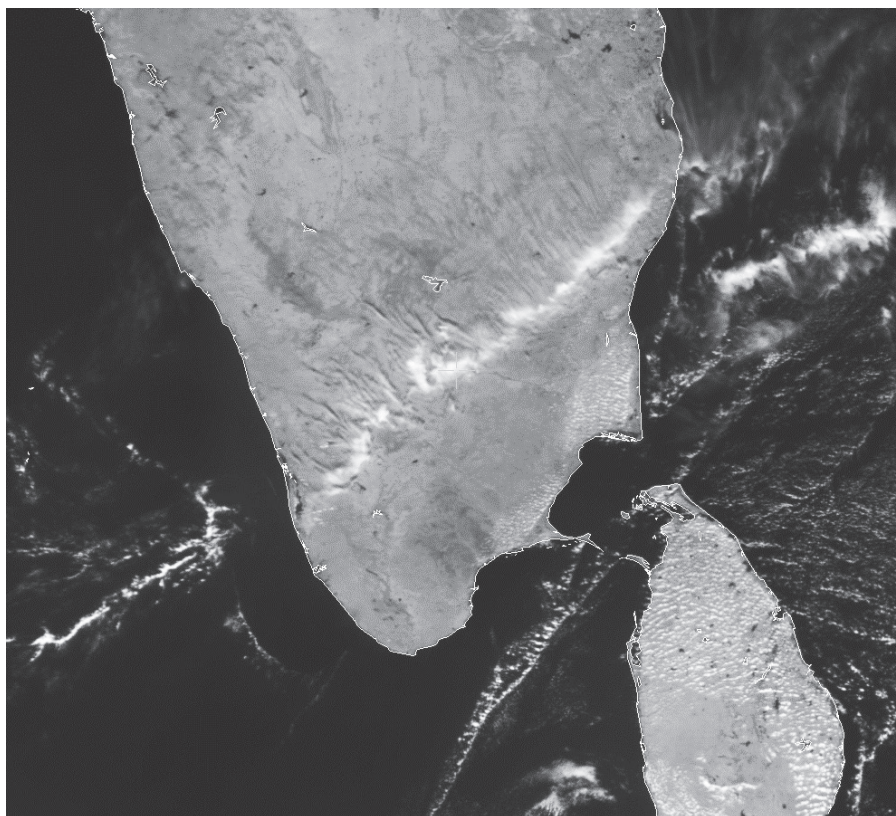


Рис. 1. Южная оконечность полуострова Индостан и остров Шри-Ланка с наложенным на них эталонным изображением (серый контур) после оптимизации критериальной функции

Рассмотрим, как рассчитывалась целевая (критериальная) функция соответствия векторного эталона растровому изображению (рис. 2).

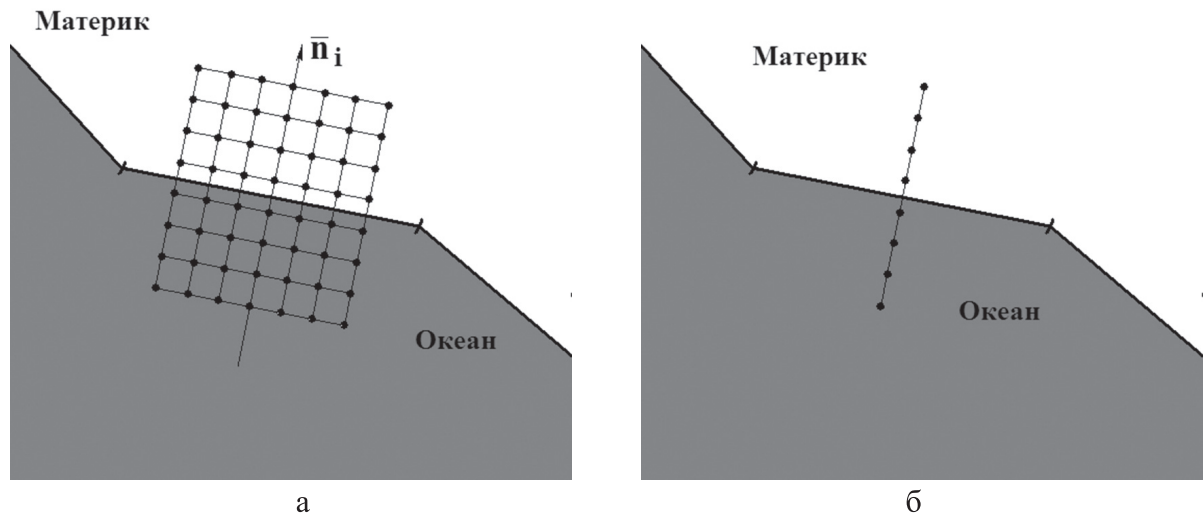


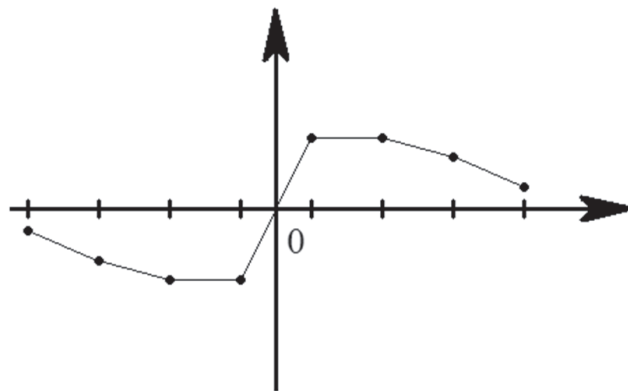
Рис. 2. Получение вектора отсчетов яркости, ассоциированного с каждым отрезком векторного эталона: а) локальная система координат, связанная с отрезком границы; б) вектор отсчетов яркости для отрезка границы

Векторная карта береговых линий представлена в виде последовательности отрезков. Вдоль каждого отрезка произвольной ориентации строится локальная система координат; в этой системе координат строится сетка с шагом 1 пиксел или менее (рис. 2а). Размер этой сетки в направлении, ортогональном отрезку, выбирается таким, чтобы при любых начальных ошибках совмещения векторного эталона и растрового изображения береговая линия растрового изображения никогда не выходила за пределы сетки. Размер сетки вдоль отрезка меньше длины самого отрезка. Это обусловлено тем же самым требованием, чтобы при любых начальных ошибках совмещения сетка всегда покрывала соответствующий участок береговой линии растрового изображения. В узлах сетки рассчитываются отсчеты яркости растрового изображения. Т.е. для каждого узла сетки, положение которой задается в системе координат, связанной с растровым изображением, определяется яркость путем интерполяции между отсчетами яркости соседних пикселей, находящихся в некоторой окрестности от каждого узла сетки.

Далее, все полученные путем интерполяции отсчеты яркости суммируются в направлении, параллельном отрезку границы. Полученный в результате суммирования одномерный вектор привязывается к координате, соответствующей центру отрезка (рис. 2б). Суммирование используется с целью уменьшения влияния различных шумов (квантовых шумов, шумов считывания, структурного шума, обусловленного неравномерностью чувствительности пикселей и разбросом их темновых токов при условии малого радиуса их корреляции, структурного шума, обусловленного многоканальным считыванием, шумов квантования и др.), а также локальных вариаций яркости океана и материка.

Для упрощения рисунка одномерный вектор имеет размерность 8. Реально использовались векторы большей размерности (18). При формировании вектора путем суммиро-

вания отсчетов яркости в направлениях, параллельных границе, не происходит заметной потери информации, поскольку сам эталон представлен в виде последовательности отрезков, а суммирование производится в направлениях, параллельных этим отрезкам границы. Далее, полученный вектор умножался на весовую функцию, аппроксимирующую операцию дифференцирования. На *рис. 3* приведено условное изображение весовой функции с размерностью, равной 8.



*Рис. 3. Весовая функция, аппроксимирующая операцию дифференцирования*

Вообще говоря, весовая функция (как длина вектора, так и сами коэффициенты) может быть оптимизирована по критерию минимума случайной и/или систематической ошибки. Однако для этого необходимо располагать статистическими моделями сигнала (перепада яркости на границе «океан/материк») и шума. Проблема в том, что эти модели очень изменчивы даже в пределах одного кадра, не говоря уже о последовательности кадров. Кроме величины остаточных ошибок параметры весовой функции (в первую очередь – длина вектора) определяют также и область сходимости алгоритма.

Затем производится суммирование полученных результатов по всему контуру. В результате чего получается значение целевой (критериальной) функции соответствия векторного эталона растровому изображению при тех значениях параметров (координат и ориентации), для которых была построена проекция векторного эталона в поле зрения камеры. Искомые координаты определяются из условия максимального значения целевой функции соответствия линии границ наблюдаемому растровому изображению. Автором были реализованы различные модификации градиентных методов оптимизации. Алгоритмы допускают ряд модификаций, направленных на получение субпиксельной точности.

Определенной проблемой является наличие облаков. Если использовать снимки с достаточно большим количеством спектральных каналов, то вероятность правильного распознавания облаков (иными словами – фильтрации облачности) может достигать 98–99% (Мальцев и др., 2012). Однако для изображений в одном спектральном диапазоне эта вероятность гораздо ниже. Вместе с тем для указанного алгоритма облака представляют опасность только в том случае, если граница облачности точно накладывается на границу материка (граница облачности параллельна границе материка со сдвигом не более 2–5 пикселей). В противном случае наличие облаков ухудшает отношение «сигнал/помеха» для

целевой функции и будет существенным, если в кадре свободна от облаков только весьма малая часть береговой линии.

Указанный алгоритм показал вполне удовлетворительные результаты в широком диапазоне контрастов между различными областями на изображении. При малых контрастах оказалось весьма проблематично получить субпиксельное разрешение, поскольку в таких условиях сильно возрастает влияние различных шумов и помех, которые имеют не только аддитивный, но и мультипликативный характер (в частности – структурный шум), заметный радиус корреляции, не стационарные не только по времени, но и по площади кадра, а законы распределения имеют тяжелые «хвосты».

Наиболее близким к рассматриваемой критериальной функции является интегро-дифференциальный оператор Даугмана (Daugman, 2004), робастность которого по отношению к различным помехам на изображении отмечается многими исследователями.

### **Алгоритм установления соответствия с определением положения границы береговой линии в явном виде**

Если первоначальный алгоритм имел не слишком высокую чувствительность к наличию облаков, то для второго алгоритма заметно ужесточаются требования по надежности их селекции. Кроме того, второй алгоритм может быть использован при достаточно больших контрастах «океан/материк». Вместе с тем второй алгоритм позволяет существенно уменьшить вычислительные затраты, необходимые для определения координат. Рассмотрим второй алгоритм более подробно. Так же как и для первого алгоритма, сначала производится грубый поиск соответствия. Затем для каждого отрезка границы определяется величина сдвига  $\bar{\delta}_i$  реальной береговой линии относительно отрезка границы по направлению нормали к границе  $\bar{n}_i$  (рис. 4). Для уменьшения различий между положением отрезков границы береговой линии на карте и в растровом изображении используются три оператора – сдвиг, масштабирование и поворот. Необходимо отметить, что здесь преобразование происходит не в координатах «долгота», «широта», «высота» и «курс», а в системе координат, связанной с растровым изображением.

Записывается целевая функция в следующем виде:

$$J = \sum_{i=1}^L \|e_i\| (\delta_i - \delta_{i0} - \delta_{is} - \delta_{ir})^2 \rightarrow \min .$$

Здесь:

$L$  – общее число отрезков границы в поле зрения;

$\|e_i\|$  – норма отрезка границы, которая определяется по размеру сетки (в узлах которой рассчитывается яркость изображения) в направлении, параллельном отрезку границы;

$\delta_i$  – расстояние от отрезка границы до реальной границы на растровом изображении;

$\delta_{i0}$ ,  $\delta_{is}$  и  $\delta_{ir}$  – проекции координатного сдвига  $i$ -отрезка на нормаль к отрезку при сдвиге всей карты на вектор  $\bar{r}_0$  при масштабировании всей карты и при повороте всей карты соответственно.

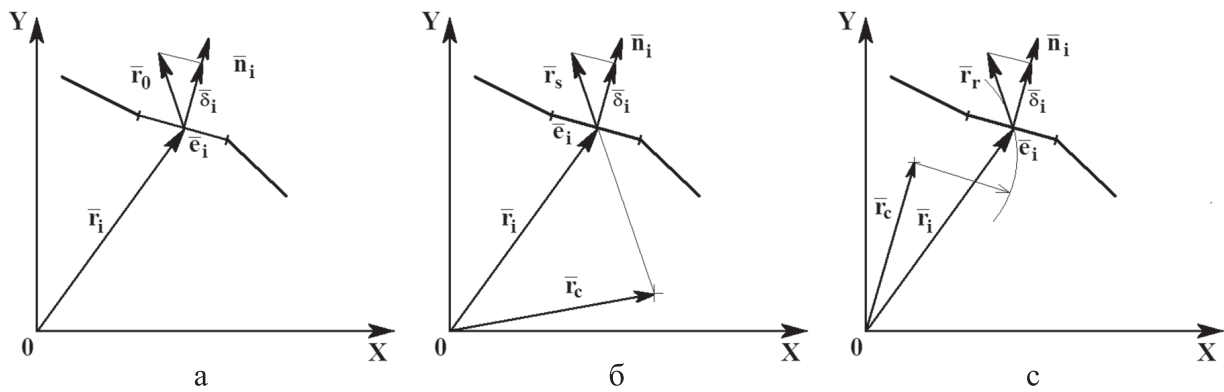


Рис. 4. Проекции векторов перемещения границы на нормаль  $\bar{n}_i$  к границе  $\bar{e}_i$ , возникающие при сдвиге, масштабировании и повороте: а) сдвиг на вектор  $\bar{r}_0$ ; б) масштабирование относительно центра  $\bar{r}_c$ ; в) поворот относительно центра  $\bar{r}_c$

Ставится задача свести целевую функцию к минимуму путем использования трех операторов (сдвиг, поворот и масштабирование). Для этого решается система уравнений:

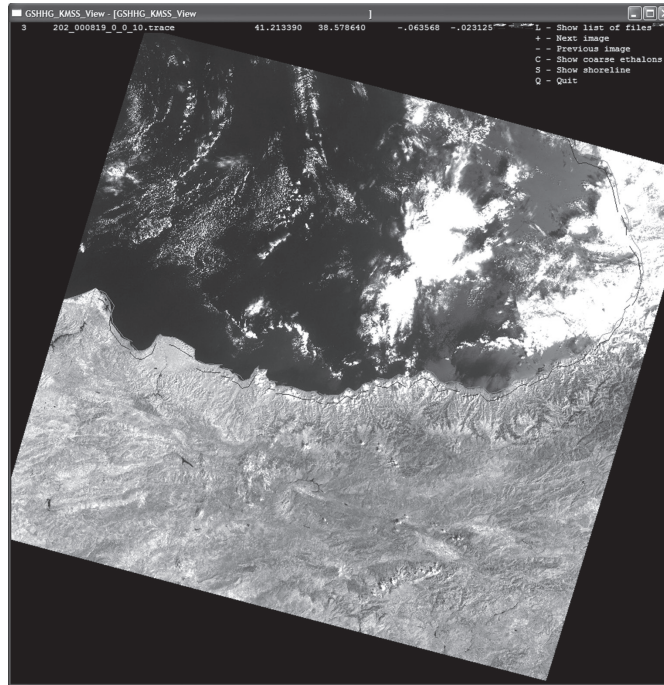
$$\begin{cases} \dot{J}_x = 0 \\ \dot{J}_y = 0 \\ \dot{J}_s = 0 \\ \dot{J}_\varphi = 0 \end{cases} \cdot \text{Она приводится к системе линейных уравнений:} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ s \\ \varphi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{pmatrix}.$$

Здесь  $x$  и  $y$  – компоненты сдвига,  $s$  – параметр масштабирования границы,  $\varphi$  – угол поворота границы. После решения данной системы уравнений полученные компоненты сдвига пересчитываются в сдвиг по координатам «долгота» и «широта», а также поправки по высоте и углу курса (приближенно). После учета поправок вновь пересчитывается положение отрезков карты. Процесс сходится за 2–4 итерации. Такой метод расчета позволил существенно сократить вычислительные затраты, поскольку сократилось как число итераций, по сравнению с градиентным методом оптимизации, так и вычислительная сложность каждой итерации при определении четырех параметров положения (широта, долгота, высота и угол курса). Для градиентного метода установления соответствия при использовании первого алгоритма с оценкой матрицы вторых производных требуется порядка  $3 \times 3 \times 3 \times 3 = 81$  расчетов положения отрезков карты на одну итерацию. Здесь же требуется всего один расчет положения отрезков на итерацию.

Описанный алгоритм имеет два источника ошибок. Во-первых, решение системы линейных уравнений дает искомые параметры только для бесконечно малых масштабирований и угловых разворотов. То есть нелинейная по своей сути задача заменяется её линейным приближением, которое тем лучше, чем меньше перемещение и ближе коэффициент масштабирования изображения к единице.

Во-вторых, пересчет смещений по изображению в смещения по координатам, а также изменения масштаба в изменение высоты и разворота изображения в поправку по курсу происходят с некоторыми ошибками. Однако эти ошибки все-таки не настолько велики, чтобы серьезно ухудшать сходимость. Пример работы алгоритма представлен на рис. 5.

Исходное положение береговой линии отображается темно-серым цветом. Положение после оптимизации – светло-серым цветом. В настоящее время определение положения границы береговой линии осуществляется методом максимального правдоподобия.



*Рис. 5. Пример работы алгоритма установления соответствия. Исходное положение береговой линии отображается темно-серым цветом. Положение после оптимизации – светло-серым цветом*

Статистический анализ результатов применения второго алгоритма производился на модельных изображениях, поскольку точность имеющихся карт и точность привязки снимков недостаточна. В частности, было построено модельное изображение – небольшой треугольник. Высота съемки задавалась равной 830 км. Размер проекции пиксела на поверхность Земли – около 600 м. При положении треугольника приблизительно в центре кадра средние квадратические ошибки определения координат по долготе – 100 м, по широте – 10 м, по высоте – 65 м. При смещении к периферии кадра ошибки по координатам заметно возрастали. При увеличении размеров треугольника ошибки уменьшались.

Вопросам определения положения границы «океан/материк» с субпиксельной точностью, подготовке эталонов, селекции облаков и анализу ошибок определения координат (ковариационная матрица ошибок) предполагается посвятить отдельные публикации, поскольку это вопросы достаточно объемные.

## **Заключение**

В статье рассмотрены два алгоритма установления соответствия между векторным эталоном и растровым изображением. Указанные алгоритмы являются представителями



двух больших классов алгоритмов, а именно алгоритмов установления соответствия без нахождения границ в явном виде (Shape Matching Without Extracting Edges) и алгоритмов установления соответствия с определением положения границы береговой линии в явном виде (Shape Matching With Edges Extraction). Первый алгоритм работоспособен в широком диапазоне контрастов изображений и не очень чувствителен к наличию облачного слоя. Однако вычислительная сложность данного алгоритма достаточно велика и еще более возрастает при увеличении размерности вектора измеряемых параметров. Второй алгоритм существенно экономичнее в плане вычислительных затрат, что существенно для бортовых применений. В то же время второй алгоритм предъявляет заметно более высокие требования к контрасту исходного растрового изображения и к эффективности работы алгоритмов селекции облаков, границы которых находятся в непосредственной близости к береговым линиям.

### Литература

1. Гришин В.А. Повышение точности навигации космических аппаратов при использовании глобальной карты береговых линий // Техническое зрение. 2014. № 1. С. 44–52.
2. Егюшкин Н.А., Еремеев В.В., Козлов Е.П., Москатиньев И.В., Москвитин А.Э. Геодезическая привязка изображений от геостационарных спутников по контуру диска Земли и электронным картам // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 1. № 6. С. 132–138.
3. Катаманов С.Н. Автоматическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 1. № 4. С. 63–68.
4. Катаманов С.Н. Точная географическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R в формате HRIT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 97–105.
5. Катаманов С.Н. Разработка автоматического метода географической привязки изображений MVISR полярно-орбитального спутника FengYun-1D // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 85–93.
6. Мальцев Е.А., Сиротин Э.Е., Перфильев Д.А., Цибульский Г.М. Измерение облачности на снимках, полученных со спутника SPOT-4 // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 2. С. 229–242.
7. Маслов И.А., Гришин В.А. Некоторые результаты мониторинга морского горизонта в красной и ближней инфракрасной областях спектра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 171–180.
8. Daugman J. How Iris Recognition Works // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. 2004. Vol. 14. No. 1. P. 21–30.
9. Fujii K., Arakawa K. Automatic Registration of Satellite Image to Map in Urban Area // Theory and Applications of GIS. 2004. Vol. 12. No. 1. P. 15–22.
10. Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHG). 2015. URL: <http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>.
11. Habbecke M., Kobbelt L. Automatic Registration of Oblique Aerial Images with Cadastral Maps // Trends and Topics in Computer Vision. Volume 6554 of the series Lecture Notes in Computer Science. Kiriakos N. Kutulakos (ed.). 2012. P. 253–266.
12. Li Y., Briggs R. Automated Georeferencing Based on Topological Point Pattern Matching // Proceedings of The International Symposium on Automated Cartography (AutoCarto'06). Vancouver. 2006.
13. Wang C., Stefanidis A., Croitoru A., Agouris P. Map Registration of Image Sequences Using Linear Features // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2008. Vol. 74. No. 1. P. 25–38.
14. Wessel P., Smith W.H.F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // Journal of Geophysical Research. 1996. Vol. 101. No. B4. P. 8741–8743.

# Establishing the correspondence between vector reference patterns and halftone images

V.A. Grishin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: vgrishin@iki.rssi.ru

In tasks associated with remote sensing of the Earth, optical measurements, in particular, correlation-extreme navigation, it is necessary to establish the correspondence between a reference pattern and an actually observed image. Currently, best of all the correspondence between raster forms is investigated. However, vector reference patterns have some advantages compared to raster ones. In particular, small volume, the possibility of linear and non-linear transformations as well as the possibility of correcting shooting camera distortions at small computational costs are the main advantages of vector reference patterns. Two different algorithms to establish the correspondence between vector reference patterns and raster images are considered in this article. Both are designed for navigation tasks. The first algorithm establishes the correspondence between a shoreline map and a raster image without explicitly extracting the borders between the ocean and continent in the raster image. This algorithm does not require high quality of cloud recognition in raster images. But the search for extremum of the similarity function between a shoreline map pattern and raster image requires significant computational expenses. The second algorithm includes the search for borders between the ocean and continent in raster images explicitly and requires substantially lower computational expenses. However, it requires high quality of cloud detection algorithms in raster images.

**Keywords:** correlation-extreme navigation, vector reference pattern, shoreline map

Accepted: 13.01.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-1-40-49

## References

1. Grishin V.A., Povyshenie tochnosti navigatsii kosmicheskikh apparatov pri ispol'zovanii global'noi karty beregovykh linii (Increasing of spacecraft navigation precision by using of the global shoreline database), *Tekhnicheskoe zrenie*, 2014, No. 1, pp. 44–52.
2. Egoshkin N., Ereemeev V., Kozlov E., Moskatin'ev I., Moskvitin A., Geodezicheskaya privyazka izobrazhenii ot geostatsionarnykh sputnikov po konturu diska Zemli i elektronnykh kartam (Geodetic binding of images from the geostationary satellite on a contour of a disk of the Earth and electronic maps), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 1, No. 6, pp. 132–138.
3. Katamanov S., Avtomaticheskaya privyazka izobrazhenii geostatsionarnogo sputnika MTSAT-1R (Automatic registration of images from geostationary satellite MTSAT-1R), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 1, No. 4, pp. 63–68.
4. Katamanov S., Tochnaya geograficheskaya privyazka izobrazhenii geostatsionarnogo sputnika MTSAT-1R v формате HRIT (Accurate HRIT Image Navigation for Geostationary Satellite MTSAT-1R), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 97–105.
5. Katamanov S., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MVISR polyarno-orbital'nogo sputnika FengYun-1D (Development of automatic method navigation for MVISR imagery of polar-orbital satellite FengYun-1D), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 85–93.
6. Mal'tsev E.A., Sirotnin E.E., Perfil'ev D.A., Tsubul'skii G.M., Izmerenie oblachnosti na snimkakh, poluchennykh so sputnika SPOT-4 (The Cloud Cover Measurement of the Spot-4 Satellite Images), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta, Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2012, Vol. 5, No. 2, pp. 229–242.
7. Maslov I.A., Grishin V.A., Nekotorye rezul'taty monitoringa morskogo gorizonta v krasnoi i blizhnei infrakrasnoi oblastiakh spectra (Some results of monitoring marine horizon in the red and near infrared spectral ranges), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 171–180.
8. Daugman J., How Iris Recognition Works, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2004, Vol. 14, No. 1, pp. 21–30.
9. Fujii K., Arakawa K., Automatic Registration of Satellite Image to Map in Urban Area, *Theory and Applications of GIS*, 2004, Vol. 12, No. 1, pp. 15–22.
10. Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database (GSHHG), 2015, <http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/gshhg/>.
11. Habbecke M., Kobbelt L., Automatic Registration of Oblique Aerial Images with Cadastral Maps, *Trends and Topics in Computer Vision*, Vol. 6554 of the series Lecture Notes in Computer Science, Kiriakos N. Kutulakos (ed.), 2012, pp. 253–266.
12. Li Y., Briggs R., Automated Georeferencing Based on Topological Point Pattern Matching, *Proceedings of The International Symposium on Automated Cartography (AutoCarto'06)*, Vancouver, 2006.
13. Wang C., Stefanidis A., Croitoru A., Agouris P., Map Registration of Image Sequences Using Linear Features, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2008, Vol. 74, No. 1, pp. 25–38.
14. Wessel R., Smith W., A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database, *Journal of Geophysical Research*, 1996, Vol. 101, No. B4, pp. 8741–8743.