

Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения

А.И. Алексанин, С.Н. Катаманов

Институт Автоматики и процессов управления ДВО РАН

690041, Владивосток, Радио 5

E-mails: aleks@iacp.vl.ru , sergey@satellite.dvo.ru

Привязка «полных» (полученных в течение сеанса приёма) спутниковых изображений базируется на процедуре автоматического расчёта реперных точек (GCPs) и коррекции орбитальных параметров и/или углов ориентации платформы с радиометром. Известные в мировой практике реализации таких методов демонстрируют низкую эффективность процедур расчёта GCPs для изображений, полученных в сложных условиях наблюдения. Разработанная автоматическая процедура расчета реперных точек основана на критерии проверки гипотезы статистической разделимости участков суша/вода на изображении, что позволило значительно повысить количество привязанных изображений при сложных условиях наблюдения. Предложенная процедура контроля качества привязки всего изображения обеспечивает 95% вероятность привязки изображения с пиксельной точностью по конфигурации реперных точек. Алгоритм прошел апробацию на более чем годичной серии изображений (около 3000) спутников NOAA-12, 15 и 17 при его эксплуатации в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Работа поддержана грантами РФФИ № 04-07-90350; 05-01-01110 и грантами ДВО РАН

Введение

Задача точной географической привязки «полных» изображений AVHRR/NOAA, полученных за один сеанс, содержит две базовых подзадачи: построение геометрической модели формирования изображения, на основе которой осуществляются прямое и обратное преобразования между координатами точек изображения и земной поверхностью, и построение автоматического метода расчета реперных точек (Ground Control Points, GCPs) по изображению. При таком подходе для достижения подпиксельной точности привязки изображений достаточно получения трёх углов ориентации платформы с радиометром (roll, pitch, yaw) [1, 2, 3] (http://www.eumetsat.int/en/area2/proceedings/eump39/docs/3_20_crawford.pdf).

Основным недостатком предшествующих работ является следующий. При сложных условиях наблюдения имеется большой процент изображений, где предложенными методами невозможно рассчитать реперные точки. При этом отсутствуют надежные схемы прогноза корректируемых параметров привязки для таких изображений. Кроме того, используемые критерии качества привязки изображения рассчитываются на основе среднестатистических показателей по длительному ряду наблюдений, что не гарантирует точной привязки конкретного изображения. Вероятность неправильной привязки при этом не подсчитывается. Целью данной работы являлась разработка автоматического метода привязки изображений AVHRR/NOAA полного сеанса, который будет эффективным в сложных условиях наблюдения и позволит достигать заданной точности.

Используемый нами метод географической привязки основан на популярной модели орбитального движения SGP4 и прогнозных телеграмм TLE [4] (www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/610.pdf). Улучшение этого подхода возможно за счет следующих процедур:

- повышение точности и надежности процедуры расчета реперных точек при сложных условиях наблюдения;
- разработка схем прогноза значений корректируемых параметров модели движения и углов платформы;
- улучшение критериев оценки качества привязки.

Автоматический расчет реперных точек

В последние годы сложились два основных подхода в решении задачи автоматического определения реперных точек на изображениях AVHRR NOAA: контурный [5, 6] и шаблонный [7, 8, 9, 10, 11, 12 (http://www.eumetsat.int/en/area2/proceedings/eump36/Session_1/1_29_Scheidgen.pdf)]. В первом подходе выполняется совмещение эталонного контура с выделенным, а во втором подходе минимизируется рассогласование между исходным участком изображения и шаблоном, построенного по эталонной маске суша/море. На практике, как правило, широко используется второй подход, позволяющий привязывать изображений с пиксельной точностью посредством коррекции трех углов ориентации платформы с радиометром [7]. Основным недостатком методов является практическая непригодность для применения на изображениях, сформированных в сложных климатических условиях, в первую очередь в зимний период для регионов с высокими широтами (лёд, низкий температурный контраст между сушей и морем, снежный покров и т.п.). Не удастся рассчитать приемлемую конфигурацию реперных точек. Так в работе [13] заявлено о полной невозможности его использования в высоких широтах, а в работе [2] продемонстрирована плохая работоспособность метода автоматического определения GCPs [7], где в зимние месяцы наблюдается до 75% не привязанных изображений. Основная причина неудачи используемых методик может заключаться в следующем. Помимо оценки оптимальной величины критерия расчёта реперной точки необходимо оценивать статистическую значимость результата и связать статистическую значимость с точностью положения реперной точки.

В предлагаемом нами методе, основанном на втором подходе, для автоматического задания реперных точек используются база участков (лэндмаркеры) эталонной маски суша/вода с характерными особенностями - наличием резких изменений в направлении береговой линии (острова, мысы, заливы, озёра и т.п.). Специальная автоматическая процедура используется для выбора пригодные участки и оценки точности имеющейся береговой линии. Отбор реперных участков исходного изображения выполняется обычно после проведения процедуры фильтрации облачности [14]. Схема расчета реперных точек требует выполнение следующих двух шагов.

Поиск оптимального положения реперного участка изображения

По заданной эталонной маске оцениваются средние значения яркостей для суши и воды ($AVHRR_{land}$ и $AVHRR_{water}$) реперного участка изображения:

$$AVHRR_{land} = \frac{\sum_{i,j} \{AVHRR_{ch}(i,j)LSM(i,j)CM(i,j)\}}{\sum_{i,j} \{LSM(i,j)CM(i,j)\}} \quad (1),$$

$$AVHRR_{water} = \frac{\sum_{i,j} \{AVHRR_{ch}(i,j)[1-LSM(i,j)]CM(i,j)\}}{\sum_{i,j} \{[1-LSM(i,j)]CM(i,j)\}}$$

где $LSM(i, j)$ – эталонная маска суша/вода (1 - если пиксел относится к суше и 0 – в другом случае), $CM(i, j)$ – маска облачности для реперного участка изображения (0 - если пиксель облачный и 1 – в другом случае), $AVHRR_{ch}$ - калиброванные значения яркостей пикселей изображения, ch – номер канала изображения (для дневных изображений – 2 канал AVHRR (VIS) и 4 канал AVHRR (NIR), для ночных изображений - только 4 канал.

Для расчёта оптимального положения реперной точки используется функция, которая представляет меру рассогласования между средними значениями яркостей для суши и воды реперного участка изображения:

$$D(p, q) = |AVHRR_{land}(p, q) - AVHRR_{water}(p, q)| \quad (2),$$

где p и $q \in [-MNE; +MNE]$, MNE – максимальная ошибка привязки по орбитальным данным, (в нашем случае равна 15 пикселям - $MNE=15$).

Проверка гипотезы о статистической разделимости участков суши и воды

Отличительной особенностью нашего алгоритма является проверка гипотезы разделимости суши и воды на выбранном реперном участке. Яркостные характеристики изображения имеют широкий диапазон изменчивости, поэтому величина критерия оптимальной совместимости (2) не может гарантировать правильность расчета реперной точки.

Проверка гипотезы выполняется через расчёт статистической значимости, основанный на вычислении статистического критерия [15]:

$$\Psi_{crit}(p', q') = \frac{|s_{land} - s_{water}|}{\sqrt{(n_{land} - 1)\sigma_{land}^2 + (n_{water} - 1)\sigma_{water}^2}} \sqrt{\frac{n_{land}n_{water}(n_{land} + n_{water} - 2)}{n_{land} + n_{water}}} \quad (3),$$

где s_{land} и s_{water} – оценки значений средних для суши и воды соответственно; σ_{land} и σ_{water} – оценки значений стандартных отклонений от средних для суши и воды; n_{land} и n_{water} – количество пикселей суши и воды, по которым проводилось вычисление данных оценок.

Так как статистическая значимость пропорциональна Ψ_{crit} , то его и использовали для оценки точности привязки участка изображения. Оценка точности автоматически вычисленных координат основывалась на сравнении с координатами, определёнными ручным способом. На рисунке 1 представлен пример графиков зависимости значений критерия статистической значимости (Ψ_{crit}) от точности привязки Δr (евклидова норма вектора рассогласования в пикселях). Следует заметить, что точность автоматического расчёта параметров практически для всех реперных точек, у которых значения критерия Ψ_{crit} выше величины, отмеченной линией (threshold), лучше 1 пикселя. По видимым каналам точность расчета реперных точек выше, чем по ИК-каналам, но не существенно. Как показали эксперименты, точность расчета GCP фактически не зависит от размера площадки, поэтому в дальнейшем использовался критерий, нормализованный на число пикселей площадки.

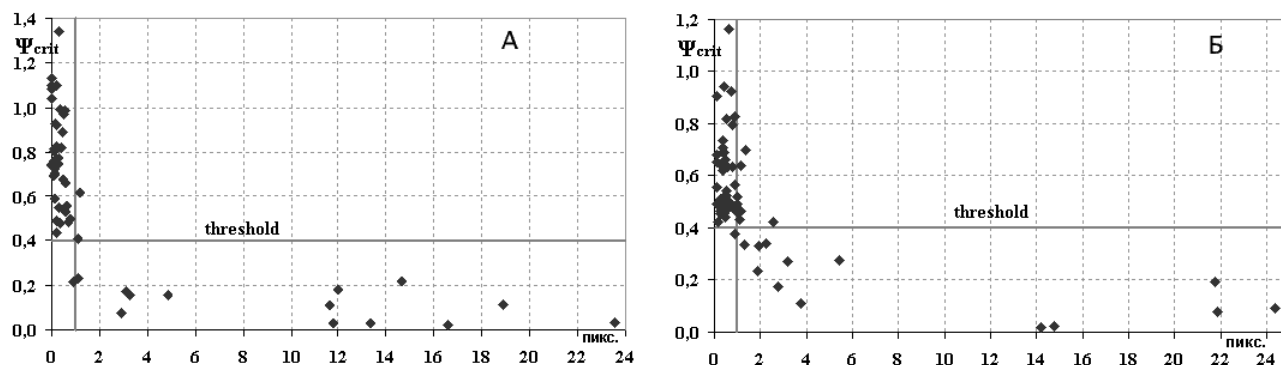


Рис. 1. Зависимость значений критерия статистической значимости (Ψ_{crit}) от рассогласования (Δr) между положениями реперных точек изображения, определённых автоматическим и ручным способами: а) для 2 канала AVHRR NOAA (видимый); б) для 4 канала AVHRR NOAA (инфракрасный)
Расчет реперных точек в зимний период

Для оценки работоспособности метода при сложных условиях наблюдения была взята серия изображений за февраль-март 2005 года. На изображениях, полученных в условиях полярной ночи (видимые каналы фактически отсутствовали), северные моря были покрыты льдом, искажавшим береговую линию, и характеризовались значительной облачностью. Применение стандартной процедуры фильтрации облачности и льда приводило к маскированию подавляющей части изображения и невозможности расчёта реперных точек. В то же время ручная привязка изображений была возможна. Было принято решение отказаться от фильтрации вообще, а «зашумленные» льдом и облачностью реперные участки изображения отбраковать после расчёта параметров положения реперных точек по критерию статистической значимости (Ψ_{crit}). На рисунке 2 представлен пример графика зависимости значений критерия статистической значимости (Ψ_{crit}) от точности привязки Δr . Можно отметить, что значение порога (threshold) осталось таким же, но точность несколько ухудшилась, и увеличилось число «выбросов» - точек с неверными результатами. Отбор реперных точек выполнялся также на основании соотношения:

$$\Psi_{crit}(p', q') \geq 0.4 \quad (4).$$

Для отбраковки «выбросов» среди реперных точек был использован критерий отбраковки по величине 2σ , где σ - среднеквадратичное отклонение остаточных невязок в реперных точках после проведения коррекции привязки изображения. После отбраковки изображение перепривязывалось.

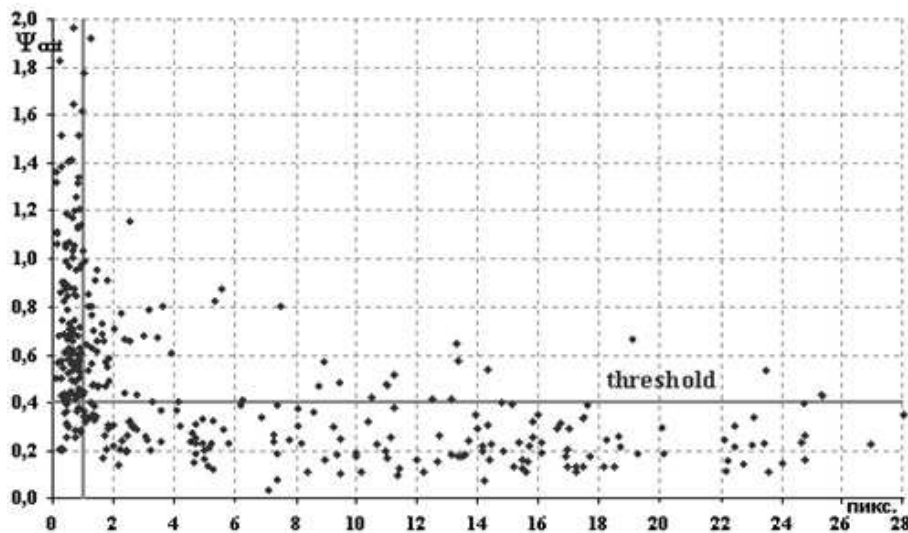


Рис. 2. Зависимость значений критерия статистической значимости (Ψ_{crit}) от точности привязки (Δr).
4 канал AVHRR (NIR) без фильтрации облачности и льда

Сравнение результатов привязки изображений по трём углам при ручном и автоматическом задании реперных точек

Восстановление трех углов ориентации платформы (roll – угол крена, pitch – тангажа и yaw – рысканья) обеспечивает точную привязку изображения. Погрешность восстановления угла до 1 микро радиана дает в надире примерно пиксельную точность вдоль строки (roll), вдоль траектории полета (pitch) и разворот изображения со смещением на краях в один пиксель (yaw) [2].

На рисунке 3 приведены средние модули ошибок (avg_mod) при ручном и автоматическом задании реперных точек после проведения коррекции географической привязки по трём углам (roll, pitch, yaw) для серии изображений AVHRR NOAA-12,-15,-17 (15-30 ноябрь 2004 года). На графике видно, что средний модуль ошибки (avg_mod), вычисленный по реперным точкам, определённым автоматическим методом, около 1 пикселя и менее, за исключением одного случая. Его анализ показал, что во время сеанса приема

данных происходила коррекция ориентации платформы радиометра на борту спутника – точную привязку можно было сделать либо на юге, либо на севере.

Однако, сравнение углов ориентации платформ, вычисленных ручным и автоматическим способами, показывало значительные расхождения. Основная причина – интервал распределения точек вдоль строки мал по сравнению со всей строкой изображения, что можно характеризовать величиной отношения максимальной разницы X-координат (вдоль строки) реперных точек к длине строки - «база по столбцу» [4]. В результате согласованные изменения углов ρ_{ch} и u_{aw} могут быть значительными (в несколько мрад) при удовлетворительной точности расчета реперных точек. В таких случаях изображение нельзя считать привязанным с пиксельной точностью. В эксперименте более 10% изображений точно привязать было нельзя.

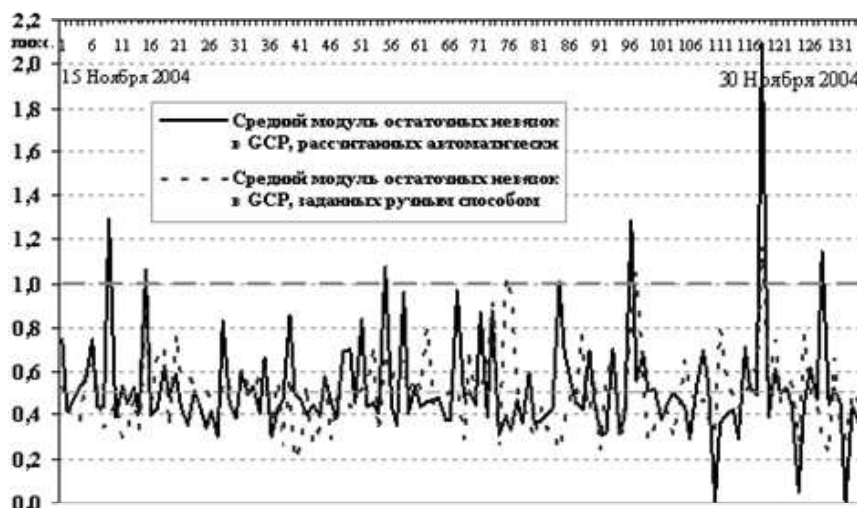


Рис. 3. Средний модуль ошибки (avg_mod) привязки, вычисленный при ручном и автоматическом задании GCP

Критерии расчета точности автоматической привязки

В работах [1-3] представлены результаты анализа работы алгоритмов автоматической привязки, существующих в действующих спутниковых центрах и апробированных на длительных сериях наблюдений (около года). Для принятия решения о приемлемости привязки изображения используются два одновременно выполняющихся критерия – не превышение заданных пороговых значений величинами стандартного отклонения реперных точек и базы по столбцу. Однако выбор порогов базировался на средней по выборке величине точности привязки изображений без анализа вероятности правильной привязки для заданной конфигурации реперных точек конкретного изображения. Это приводило к отбраковке части хорошо привязанных изображений и пропуску плохо привязанных. Проведенные нами исследования позволили выяснить влияние на вероятность правильной привязки вышеупомянутых критериев и количества рассчитанных реперных точек. Были введены более жесткие критерии точности – не превышение точности расчета по углам величин 1 мрад для g_{oll} и ρ_{ch} и 1.5 мрад для u_{aw} с вероятностью не менее 95% и 100% для двойной величины ошибки. Введение нового критерия существенно повысило качество привязки при незначительном уменьшении числа привязанных изображений. Это позволило гарантировать точную привязку каждого изображения, а не в среднем за год.

Апробация метода автоматической привязки спутниковых изображений NOAA (сравнение с методом, представленным французским центром CMS)

Представленный метод автоматической привязки прошёл апробацию на более чем годичной серии изображений (более 3000) спутников NOAA-12, 15, 17 и показал следующие результаты. Было проведено сравнение результатов, полученных нашим методом, с результатами метода представленного в работе [2], так как он подробно описан. В первую очередь, основное внимание уделялось работоспособности процедуры автоматического расчёта реперных точек при сложных условиях наблюдения. В Таблице 1 приведено сравнение результатов автоматической привязки, полученных нашим методом и методом, представленным французским центром CMS (Centre de Meteorologie Spatiale, Lannion). Сравнение проведено на февральских изображениях, где расчёт реперных точек является наиболее затруднительным: лёд, полярная ночь в регионах с высокими широтами, низкий температурный контраст между сушей и морем, снежный покров и т.п. Решение о привязки «полного» изображения по трём углам принималось для каждого метода по своим критериям (использование критерия работы [2] в наше методе улучшало его показатели, что говорит о большей жесткости отбора).

Таблица 1. Сравнение результатов автоматической привязки изображений, полученных с помощью нашего метода (А) (февраль 2005 г., NOAA-12, 15, 17) и метода [2] (Б) (февраль 1997 г., NOAA-12, 14)

Метод привязки	Процент изображений без реперных точек	Процент привязанных изображений по трём углам	Процент изображений с коррекцией ориентации платформы (не привязываемые)
А	0	80	3
Б	20	25	---

Сравнение на годичной выборке по критерию [2] давало при использовании нашего метода 90% (вместо 40%) привязанных изображений (82% по нашему критерию). На рисунке 4 приведены помесячные графики процента привязанных изображений нашим методом. В отличие от работ [2] и [3] не наблюдается падения процента в зимние месяцы. Колебания можно объяснить нерегулярностью распределения облачности и туманов, а не сезоном.

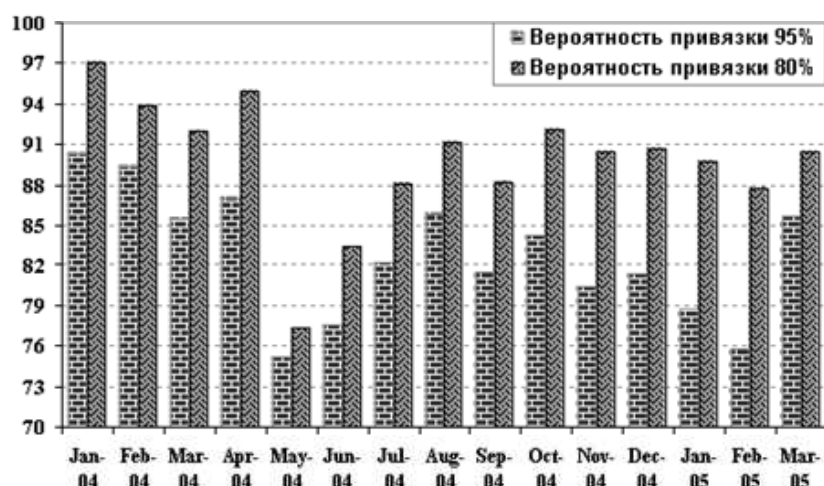


Рис. 4. Количество привязанных изображений (в процентах) по месяцам с различной вероятностью пиксельной точности привязки

Поведение углов положения платформы спутника с радиометром

Для привязки изображений, где конфигурация реперных точек не позволяет рассчитать три угла с нужной точностью, обычно используется процедура расчета двух углов (roll и pitch), а в случае отсутствия реперных точек - процедура переноса углов с соседних витков [2, 3]. Эффективность такой процедуры разработчиками методов детально не исследовалась. Для оценки возможностей подхода нами были проведены следующие эксперименты. Из набора привязанных изображений были отобраны изображения со 100% вероятностью правильной привязки. Использовались только свежие телеграммы TLE для прогноза положения спутника на орбите. Поскольку коррекция времени пролета спутника эквивалентна коррекции угла pitch, то GPS-часы не использовались.

На рисунке 5 приведены графики поведения каждого угла (roll, pitch, yaw) положения платформы спутника NOAA-12 (для других спутников наблюдалась та же картина). Резкие изменения значений угла тангажа (pitch) платформы по абсолютной величине связаны с коррекцией времени бортовых часов спутника. Разделение значений угла тангажа на отрицательные и положительные наблюдается для изображений с разными типами витков спутника (восходящий и нисходящий) и, по-видимому, причина такого явления заключается в значительной неточности орбитальной модели SGP4 на протяжении суточного оборота спутника вокруг Земли. Линейный рост величины угла рысканья (yaw) платформы, который наблюдается на протяжении нескольких витков, скорее всего, вызван изменением (коррекцией) ориентации платформы спутника по этому углу. Характер графиков говорит, что упомянутые выше подходы не дадут точной привязки. Возможно подходы с прогнозом параметров привязки, изложенные в [4], позволят решить проблему привязки всех изображений.

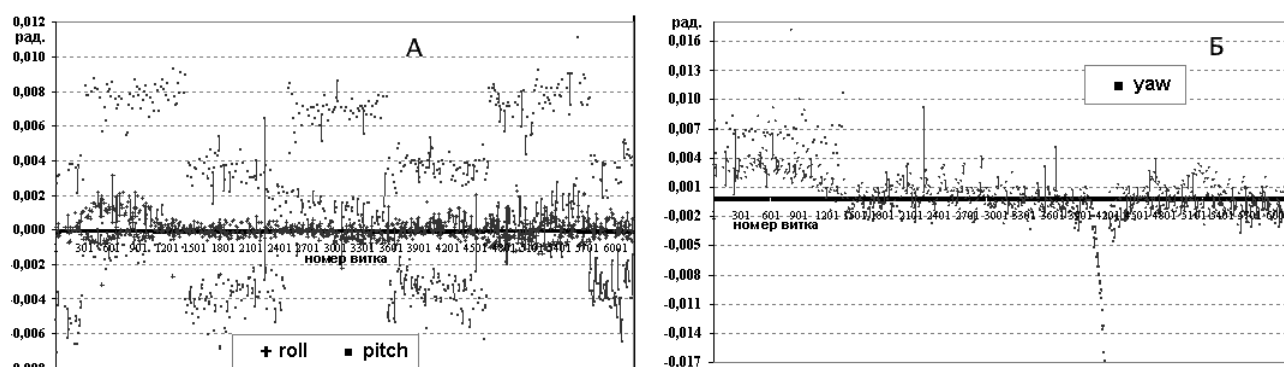


Рис. 5. Поведение углов крена, тангажа (а) и рысканья (б) ориентации платформы с радиометров AVHRR спутника NOAA-12 (январь 2004г. - март 2005г.). Вертикальные прямые соединяют углы двух соседних витков

Заключение

Предложенный метод автоматической коррекции географической привязки, в целом, успешно привязывает одиночные изображения с пиксельной точностью. Критерий отбора реперных точек, основанный на проверке гипотезы делимости суша/вода, значительно повышает количество привязанных изображений при сложных условиях наблюдения и отказе от фильтрации облачности и льда.

Предложенная процедура контроля качества привязки изображения обеспечивает высокую вероятность привязки (95%) с пиксельной точностью на основании зависимости точности привязки от стандартного отклонения невязок в реперных точках и параметра «база по столбцу». Это позволяет проводить более тщательный отбор изображений, для которых информации о рассчитанных реперных точках недостаточно для получения точной привязки.

Популярный пакет обработки данных AAPP для первичной обработки данных спутников NOAA в работе не анализировался, так как процедура расчета углов платформы в него не включена (во всяком случае, для пятой версии [16]). В нем для привязки используются средние за полугодие углы платформы, что не обеспечивает пиксельной точности привязки.

Литература

1. *Rosborough G.W., Baldwin D. and Emery W.* Precise AVHRR Image Navigation // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 32. 1994. P. 644-657.
2. *Brunel P. and Marsouin A.* Operational AVHRR navigation results // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. No. 5. P. 951-972.
3. *Scheidgen P., Harrmann O. and Crawford P.* Landmark correction for polar orbiters // The EUMETSAT Meteorological Conference Proceedings. 2003.
4. *Alexanin A.I., Katamanov S.N. and Epstein Yu.S.* Problems of accurate automatic navigation of NOAA/AVHRR and FY-1D satellite images // 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment (31st ISRSE), Global Monitoring for Sustainability and Security, Saint Petersburg, RF, June 20-24, 2005.
5. *O'Brien D.M. and Turner P.J.* Navigation of coastal AVHRR images // International Journal of Remote Sensing. 1992. Vol. 13. No. 3. P. 509-514.
6. *Eugenio F. and Marques F.* Automatic satellite image georeferencing using a contour-matching approach // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 41. No. 12. December 2003. P. 2869-2880.
7. *Bordes P., Brunel P. and Marsouin A.* Automatic adjustment of AVHRR navigation // Journal of Atmospheric and Oceanic technology. 1992. Vol. 9. P. 15-27.
8. *Parada M., Millan A., Lobato A. and Hermosilla A.* Fast coastal algorithm for automatic geometric correction of AVHRR images // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. No. 11. P. 2307-2312.
9. *Pergola N. and Tramutoli V.* SANA: sub-pixel automatic navigation of AVHRR imagery // International Journal of Remote Sensing. 2000. Vol. 21. No. 12. P. 2519-2524.
10. *Purevdorj T. and Yokoyama R.* An approach to automatic detection of GCP for AVHRR imagery // Journal of the Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing. 2002. Vol. 41. No.1. P. 56-65.
11. *Haibo LIU and Jim McGregor.* Automatic NOAA AVHRR image registration in mountains area // International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (IAPRS). Vol. XXXIV. PART2. COMMISSION II. Xi'an. Aug. 20-23, 2002. P. 291-295.
12. *Scheidgen P., Harrmann O. and Crawford P.* Improvement of image navigation by means of Doppler correction and landmark correction for polar orbiters // The EUMETSAT Meteorological Conference Proceedings, 2002. EUM P 36. P. 168 - 173.
13. *Dybbroe A., Brunel P., Marsouin A. and Thoss A.* Accurate Real-time Navigation of AVHRR data at high latitudes // International TOVS Study Conference (ITSC). Vol. XII. Victoria, Australia. Feb. 28 2002.
14. *Derrien M., Farki B., Harang L., Legleau H., Noyalet A., Pochic D. and Sairouni A.* Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery. // Remote Sensing of Environment. 1993. Vol. 46. P. 246-267.
15. *Фурман Я.А. и др.* Введение в контурный анализ // Инвариантные к характеристикам сцены обнаружители границ изображений. М.: Физматлит, 2002. С. 273-282.
16. *Marsouin A., Brunel P.* AAPP DOCUMENTATION. ANNEX OF SCIENTIFIC DESCRIPTION AAPP-5 NAVIGATION// NWP SAF. Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction. Document NWPSAF-MF-UD-005, Version 1.1, 07 April 2005, 27 p.