

Автоматическая привязка изображений геостационарного спутника MTSAT-1R

С.Н. Катаманов

*Институт Автоматики и Процессов Управления ДВО РАН
690041, Владивосток, Радио, 5
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

В июле 2005 года Японским Метеорологическим Агентством (JMA) введен в эксплуатацию новый геостационарный спутник MTSAT-1R (Multi-functional Transport SATellite). Высокие характеристики радиометра VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer), установленного на этом спутнике, и частый приём изображений позволяют использовать его данные для различного рода задач мониторинга окружающей среды. При решении многих задач спутникового мониторинга (таких как, оценка временной изменчивости ТПО, определение скорости передвижения облачных масс и т.д.) требуется пиксельная точность географической привязки. При привязке изображений MTSAT-1R/VISSR с помощью алгоритма, разработанного в JMA для данных геостационарных спутников (серий GMS и MTSAT) ошибка может достигать до 20 км, что недопустимо для такого рода задач. В данной статье представлен метод географической привязки «полных» (полученных в течение сеанса приёма) изображений, получаемых с геостационарного спутника MTSAT-1R, с пиксельной точностью. Этот метод основан на процедуре коррекции углов ориентации платформы с радиометром. Для вычисления этих параметров коррекции используется процедура автоматического расчета реперных точек (GCPs). Обсуждаются результаты его апробации в Региональном Спутниковом Центре Мониторинга Окружающей Среды ДВО РАН.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-01-96915; 05-01-01110 и грантами ДВО РАН.

Введение

В июле 2005 года Японским Метеорологическим Агентством (JMA) был введен в эксплуатацию новый геостационарный спутник MTSAT-1R (Multi-functional Transport SATellite) взамен вышедшего из строя GMS-5 (Geostationary Meteorological Satellite). Он оборудован радиометром VISSR (Visible and Infrared Spin Scan Radiometer), содержащим видимый (0.55-0.80 мкм), ближний инфракрасный (3,5-4,0 мкм), канал водяного пара (6,5-7,0 мкм), первый инфракрасный (10,3-11,3 мкм), второй инфракрасный (11,5-12,5 мкм). Пространственное разрешение инфракрасных каналов равно 5км, видимого – 1,25 км в надире. Высокие характеристики изображений радиометра MTSAT-1R/VISSR (режим HiRID, High Resolution Imager Data) и частый приём изображений (раз в 15 минут) позволяют использовать его данные для различного рода задач мониторинга окружающей среды. При решении многих задач спутникового мониторинга (таких как, оценка временной изменчивости ТПО, определение скорости передвижения облачных масс и т.д.) требуется пиксельная точность географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений.

При географической привязке данных MTSAT-1R/VISSR с помощью алгоритма, разработанного в JMA (Japan Meteorological Agency) для данных геостационарных спутников (серий GMS и MTSAT), ошибка может достигать до 20 км, что недопустимо для такого рода задач. В связи с этим, для достижения пиксельной точности в Региональном Спутниковом Центре Мониторинга Окружающей Среды ДВО РАН был разработан метод коррекции географической привязки «полного» изображения (полученного в течение всего сеанса приёма), который основан на вычислении корректирующих параметров для модели привязки по реперным точкам (GCPs, Ground Control Points). Данный метод коррекции привязки основан на следующих концепциях.

Задание и отбор лэндмаркеров на изображении

Для автоматического задания реперных точек используются база участков эталонной маски суша/вода (лэндмаркеры), с характерными особенностями - наличие резких изменений в направлении береговой линии (озера, острова, мысы и т.п.). Данная база лэндмаркеров была задана для региона попадающего в обзор сенсора с использованием маски суша/море, созданной на основе географической контурной базы GSHHS (Global Self-consistent Hierarchical High-Resolution Shoreline Database) [1]. Отбор реперных участков (чипов) исходного изображения, пригодных для задания опорных точек выполняется после проведения процедуры фильтрации облачности [2]. Чипы, у которых процентное количество отфильтрованных пикселей превышает допустимое значение (65%, в нашем случае), отбраковываются.

Автоматическая процедура расчёта реперных точек (GCPs)

Для расчёта параметров оптимального положения реперной точки был взят за основу алгоритм, ранее нами разработанный и апробированный при автоматической привязке изображений NOAA/AVHRR [3, 4]. Этот алгоритм выполняет совмещение пиксельного шаблона лэндмаркера маски суша/вода с реперным участком изображения. После этого проверяется гипотеза о разделённости суши и моря для вычисленных параметров оптимального положения реперного фрагмента изображения. Схема реализации данного алгоритма требует выполнение следующих двух шагов:

Поиск оптимального положения реперного участка изображения

Расчёт оптимального положения реперной точки (p', q') выполняется через поиск максимума меры рассогласования между средними значениями яркостей для суши и воды реперного участка изображения:

$$D(p', q') = \max_{p, q} |VISSR_{land}(p, q) - VISSR_{water}(p, q)| \quad (1)$$

где p и $q \in [-MNE; +MNE]$, MNE – максимальная ошибка географической привязки по модельным данным (параметры коррекции равны нулю), в нашем случае равна 10 пикселям - $MNE = 10$.

Средние значения яркостей суши и воды ($VISSR_{land}$ и $VISSR_{water}$) оцениваются (для каждого смещения (p, q)) по эталонной маске суша/вода лэндмаркера для реперного участка изображения:

$$VISSR_{land}(p, q) = \frac{\sum_{i,j} \{VISSR_{ch}(i, j)LSM(i, j)CM(i, j)\}}{\sum_{i,j} \{LSM(i, j)CM(i, j)\}} \quad (2)$$

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

где $LSM(i, j)$ – эталонная маска суша/вода лэндмаркера (1 - если пиксел относится к суше и 0 – в другом случае), $CM(i, j)$ – маска облачности для реперного участка изображения (0 - если пиксел облачный и 1 – в другом случае), $VISSR_{ch}$ - калиброванные значения яркостей пикселей

изображения, ch – номер канала изображения (для дневных изображений – 1 канал VISSR (VIS), для ночных изображений - 4 канал VISSR (IR)).

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 (1) не может гарантировать правильность расчета реперной точки [5]. Проверка гипотезы выполняется на основе t-критерия [6] через расчёт статистической значимости, основанный на вычислении статистического критерия:

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

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 значение критерия Ψ_{crit} прямо пропорционально зависит от количества пикселей реперного участка изображения, по которым проводится вычисление данной оценки: n_{land} и n_{water} для каждого реперного фрагмента изображения имеют разные значения, это связано с размерами лэндмаркера и отбраковкой пикселей фильтрацией облачности; то критерий Ψ_{crit} нормируется на число этих пикселей ($n_{land} + n_{water}$).

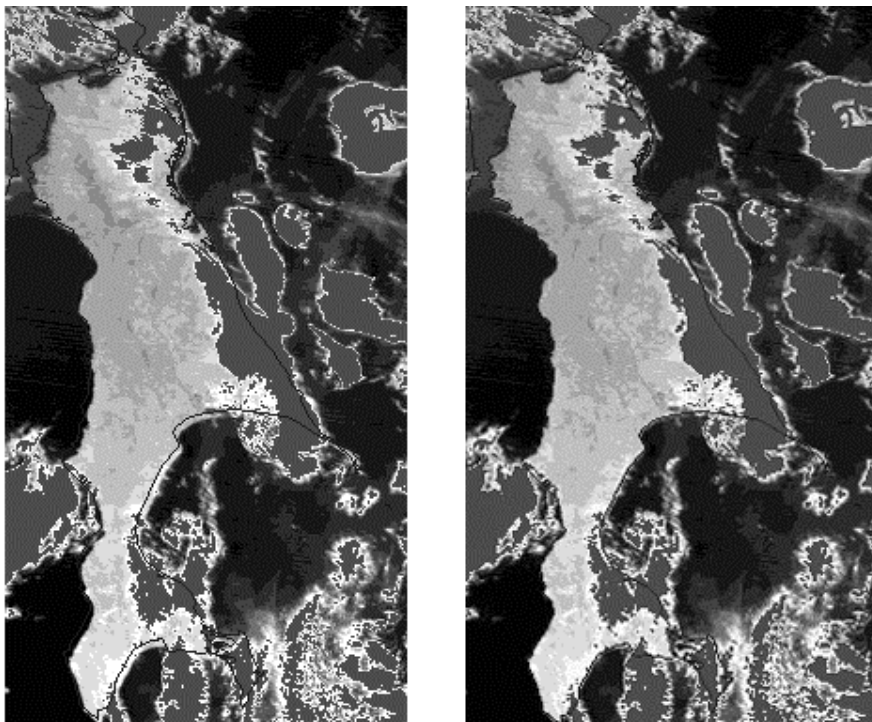


Рис. 1. Визуальное представление процедуры вычисления параметров реперной точки по изображению видимого канала (VIS) MTSAT-1R/VISSR (27.09.2006г.). Слева фрагмент изображения с наложенным эталонным береговым контуром до вычисления смещений реперной точки. Справа тот же фрагмент изображения после вычисления смещений реперной точки ($p' = 2.25$, $q' = 2.75$, $\Psi_{crit} = 0.74$, cloudy=19.9%). Серым цветом замаскированы пиксели изображения, которые были отбракованы процедурой грубой фильтрации облачности

После расчета статистической значимости выполняется отбор реперных точек, которые будут использоваться для вычисления параметров коррекции привязки, на основании выполнения следующего соотношения [4]:

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

Для отбраковки «остаточных выбросов» среди реперных точек применяется критерий отбраковки по величине 2σ , где σ - среднеквадратичное отклонение остаточных невязок в реперных точках после проведения коррекции географической привязки изображения. После отбраковки параметры коррекции привязки вновь пересчитываются. На рис. 1 представлен пример расчета реперной точки по изображению видимого канала (VIS) MTSAT-1R/VISSR.

Коррекция географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений

Процедура вычисления параметров коррекции (поправки к модели географической привязки данных геостационарных спутников серий GMS и MTSAT) выполняется на основе минимизации рассогласования между модельными и расчётными координатами реперных точек. В качестве параметров коррекции привязки используются углы положения платформы спутника с радиометром. Расчет параметров коррекции показал, что результаты аналогичны полученным для коррекции географической привязки изображений геостационарных спутников серии GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) [7, 8].

Положение платформы спутника MTSAT-1R с радиометром во время сеанса приёма меняется по всем трем углам – крену, тангажу и рысканью (roll, pitch и yaw) с линейной скоростью. Основной вклад в ошибку привязки изображения вносят углы roll и pitch, эффект которых выражается в смещении по строке и столбцу соответственно эталонного берегового контура относительно видимого на изображении. В отличие от спутников серии GOES, эффект угла yaw незначителен (поэтому этим можно пренебречь), который проявляется в виде поворота вдоль столбца относительно надира и усиливается на краях изображения. Таким образом, углы положения платформы спутника с радиометром вычисляются с помощью линейных регрессий (в нашем случае $Yaw = 0$):

$$\begin{cases} Roll = \alpha_1 \cdot Time + \alpha_0 \\ Pitch = \beta_1 \cdot Time + \beta_0 \end{cases} \quad (5)$$

где $Time$ - время сканирования скана изображения; α_i и β_i ($i = \overline{0,1}$) – оценки значений коэффициентов линейных регрессий для углов ориентации платформы спутника с радиометром (крена и тангажа соответственно), расчет которых выполняется по невязкам в реперных точках с помощью метода МНК.

На рисунке 2 представлен пример вычисления линейных регрессий для углов крена и тангажа (в нашем случае $Yaw = 0$) в зависимости от времени сканирования строки изображения. А в таблице 1 приведен пример вычисления значений статистических параметров для невязок в реперных точках до выполнения коррекции географической привязки и после по углам положения платформы (крену и тангажу), расчёт значений которых по этим невязкам GCPs представлен на рис. 2.

Визуальный анализ, проведенный после коррекции географической привязки, по всему изображению для смещения видимого берегового контура относительно наложенного эталонного контура показывает, что ошибка несовпадения контуров меньше пиксела. Это также подтверждается значениями статистических параметров, вычисленных по остаточным невязкам в реперных точках (смотрите таблица 1, этап **B**). Это, в свою очередь, говорит о привязке «полных» изображений (принятых в течение сеанса приёма) с пиксельной точностью.

Таблица 1. Значения статистических параметров невязок в реперных точках, которые были автоматически рассчитаны по видимому каналу (VIS) изображения MTSAT-1R/VISSR (27.09.2006г.);
A – до вычисления параметров коррекции географической привязки,
B – после выполнения коррекции привязки

этапы вычисления статистики	кол-во GCPs	rms невязки Δx	max модуля невязки Δx	rms невязки Δy	max модуля невязки Δy	rms модуля невязок $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$	max модуля невязок Δr
A	30	1.179	3.0	4.782	6.0	4.925	6.708
B	30	0.431	0.437	0.427	1.23	0.606	1.374

Коррекция географической привязки для геостационарных спутников серии GOES также выполняется с использованием положения звёзд на изображении (в совокупности с лэндмаркерами) [7, 8]. В нашем случае при коррекции привязки изображений спутника MTSAT-1R это невозможно, так как приём данных VISSR в Региональном Спутниковом Центре Мониторинга Окружающей Среды ДВО РАН ведётся после ретрансляции сигнала (в результате чего объекты на изображении, которые лежат за пределами диска Земли, вырезаются).

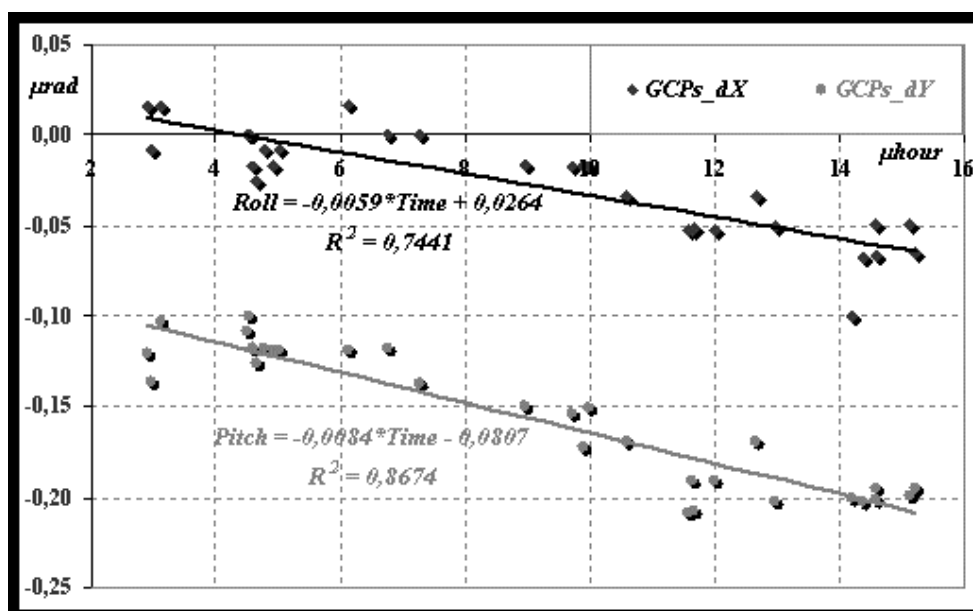


Рис. 2. Линейные регрессии для углов положения платформы спутника с радиометром (крен и тангаж) в зависимости от времени сканирования скана изображения. Коэффициенты этих регрессий были рассчитаны с использованием невязок в реперных точках, автоматически заданных по изображению видимого канала (VIS) VISSR/MTSAT-1R (27.09.2006г.)

Заключение

Представленный метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/VISSR «полных» изображений (полученных в течение всего сеанса приёма) достигает пиксельной точности привязки полностью в автоматическом режиме, что так необходимо для решения многих задач спутникового мониторинга (таких как, оценка временной изменчивости ТПО, определение скорости передвижения облачных масс и т.д.). Предложенный метод может быть также применён для обработки данных других геостационарных спутников, формирующих изображения в видимом и инфракрасном диапазонах, в частности, китайского спутника FY-2C [9].

Литература

1. *P.Wessel and W.H.F.Smith*. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // *Journal of Geophysical Research*, Vol. 101, N. B4, pp. 8741-8743, 10 April 1996 // http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/papers/1996/JGR_96/jgr_96.html
2. *L.Jun and X.Jianmin*. An automated, dynamic threshold cloud detection algorithm for FY-2C images. // *Proc. of 8th International Winds Workshop, Beijing, China, 24 - 28 April 2006, P.47* // http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p47_s4_02_jian_v.pdf
3. *A.I.Alexanin, S.N.Katamanov and Yu.S.Epstein*. Problems of accurate automatic navigation of NOAA/AVHRR and FY-1D satellite images // *Proc. of 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, S-Petersburg, Russia, 20-24 June 2005* // <http://www.isprs.org/publications/related/ISRSE/html/papers/610.pdf>
4. *Александрин А.И. и Катаманов С.Н.* Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // *Сборник трудов Третьей всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)» Москва, ИКИ РАН, февраль 2006, сс. 41-48* // <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-041-048.pdf>
5. *J.L.Carr, H.Madani and C.Shoeser*. Image registration using autolandmark // *Proc. Of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Vol. 6, USA, September 20-24, 2004, pp. 3778-3781* // http://www.carrastro.com/pubs/New_articles_2004/PID38720.pdf
6. *Я. А. Фурман и др.* Введение в контурный анализ / "Инвариантные к характеристикам сцены обнаружители границ изображений", С. 273-282. // , М.: Физматлит, 2002, 590с.
7. *J.L.Carr, J.Harris and D.Chu*. A long-term characterization of GOES I-M attitude errors // *Flight Mechanics Symposium, NASA/GSFC, June 2001* // <http://www.carrastro.com/papersandpublications.html>
8. *L.Feng, W.P.Menzel, C.S.Velden, X.Jianmin, S.Wanzong and L.Jun*. Attempts to improve GOES image navigation. // *Proc. of 8th International Winds Workshop, Beijing, China, 24 - 28 April 2006, P.47* // http://www.eumetsat.int/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p47_s4_01_feng_v.pdf
9. *X.Jianmin, L.Feng and Z.Qishong*. Automatic navigation of FY-2 geosynchronous meteorological satellite images // *Proc. of 6th International Winds Workshop, Madison, Wisconsin, USA, May 2002, pp. 291-295* // <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/351XU.pdf>