

Автоматическая привязка изображений геостационарного спутника FengYun-2C

С.Н. Катаманов, О.Я. Десяткова

*Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, Радио 5
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

При географической привязке изображений китайского геостационарного спутника FengYun-2C с помощью алгоритма, разработанного в Японском метеорологическом агентстве для данных радиометра S-VISSR, ошибка может достигать колоссальных размеров (300-800 км), что недопустимо для многих задач спутникового мониторинга. В этой работе представлен автоматический метод коррекции географической привязки “полных” (принятых в течение всего сеанса приема) изображений, получаемых с геостационарного спутника FengYun-2C в режиме S-VISSR2.0, с пиксельной точностью. Метод коррекции привязки изображений основан на вычислении истинного положения надира изображения и определения параметров стабилизации платформы спутника с радиометром в пространстве (углы крена, тангажа и рысканья). Для вычисления оптимальных значений углов положения платформы используется процедура автоматического расчета реперных точек на изображении. Исследована возможность прогнозирования параметров коррекции привязки FengYun-2C/S-VISSR изображений с ранее привязанных изображений и обсуждаются результаты эффективности его применения. Представлены результаты апробации автоматического метода коррекции географической привязки на 2-х месячной серии (за 2008 год) в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН. Работа поддержана грантами РФФИ №08-07-00227, №09-01-98519 и грантами ДВО РАН.

Ключевые слова: автоматическая привязка изображений, реперные точки, стабилизация платформы спутника, прогноз параметров привязки.

Введение

В январе 2005 года Китайским метеорологическим агентством был введен в эксплуатацию новый геостационарный метеорологический спутник FengYun-2C (FY-2C), его местоположение на орбите – 105° в.д. Он оборудован радиометром S-VISSR (Stretched-Visible and Infrared Spin Scan Radiometer), который сканирует в пяти спектральных диапазонах: видимый канал и четыре инфракрасных (ИК) канала. Пространственное разрешение данных в режиме S-VISSR2.0 [1] составляет: ИК-каналов равно 5 км и для видимого канала – 1.25 км в надире. Высокие характеристики изображений радиометра FY-2C/S-VISSR и частый прием изображений позволяют использовать его данные для различного рода задач мониторинга окружающей среды. При решении многих задач спутникового мониторинга (таких как, оценка временной изменчивости ТПО, построение карт морских течений, определение скорости передвижения облачных масс, локализация пожаров и т.д.) требуется пиксельная точность географической привязки спутниковых изображений.

Для географической привязки изображений FY-2C/S-VISSR в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН был использован алгоритм привязки, разработанный в Японском метеорологическом агентстве для данных, полученных с геостационарных спутников серии GMS и MTSAT-1R [2]. При применении этого алгоритма ошибка географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений может достигать колоссальных размеров (300-800 км), что недопустимо для многих задач спутникового мониторинга. Где основным источником ошибок привязки является неправильное определение углов стабилизации платформы спутника FY-2C с радиометром и неточность определения прогнозных параметров положения спутника на орбите [3, 4].

Положение платформы спутника в пространстве определяется тремя углами: крен (roll), тангаж (pitch) и рысканье (yaw). Истинные значения величин этих углов неизвестны и в идеале должны быть нулевыми. Визуальный эффект ошибки привязки выражается в виде смещений (для углов roll и pitch) и

поворота (для угла yaw) эталонного берегового контура относительно контура, видимого на изображении [5]. Другим источником ошибок географической привязки изображений может служить неточность определения некоторых параметров положения спутника на орбите, где визуальный эффект ошибок привязки выражается в виде смещения истинного надира на изображении.

В работе [3] представлен метод автоматической привязки FY-2C/S-VISSR изображений, в котором выполняется только грубая коррекция привязки, устраняющая эффект смещения истинного надира изображения. В связи с чем, остаточные ошибки привязки по всему изображению, вызванные углами положения платформы спутника, могут достигать несколько десятков километров. Таким образом, без вычисления оптимальных значений углов невозможно достичь пиксельной точности привязки [5, 6].

В связи с этим в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН был разработан автоматический метод коррекции географической привязки “полных” FY-2C/S-VISSR изображений (полученных в течение всего сеанса приема) с пиксельной точностью. Метод коррекции привязки состоит из двух этапов: первичная и вторичная процедуры коррекции. Процедура первичной коррекции устраняет ошибку, связанную с неточностью определения положения спутника на орбите, тем самым определяет истинный наadir изображения. Процедура вторичной коррекции устраняет остаточные ошибки привязки по всему изображению, обусловленные неточным определением параметров стабилизации платформы спутника в пространстве. Такой подход позволяет отдельно анализировать вклад (и поведение) в ошибку географической привязки изображений как неточности определения орбитальных параметров положения спутника, так и недостаточности информации об углах (roll, pitch, yaw).

В этой работе представлен автоматический метод коррекции географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений и результаты апробации метода на 2-х месячной серии (за 2008 год). Исследована возможность прогнозирования параметров первичной коррекции привязки и обсуждаются результаты эффективности его применения.

Процедура первичной коррекции

Данная процедура вычисляет параметры истинного надира на основе морфологического анализа границ диска Земли на изображении. Для идентификации границ диска Земли используется изображение первого ИК-канала (IR1), а условием использования изображения является: наличие полного диска Земли и отсутствие сбойных строк в кадре при приеме. На основании заданного значения порога (threshold), которое имеет наименьшее количество пикселей на изображении и находится между двумя модами на гистограмме данных IR1, выполняется построение бинарной маски диска Земли (“актуальной”) на изображении с помощью порогового критерия:

$$\begin{cases} \text{if } (pixel(I, J) < \text{threshold}) \text{ then } IED(I, J) = 1 \\ \text{else } IED(I, J) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где $pixel(I, J)$ - значение пиксела IR1-изображения с координатами (I, J) . $IED(I, J)$ - “актуальная” маска диска Земли, где значение пиксела равно единице, если он принадлежит диску Земли, и значение пиксела равно нулю в противном случае.

Далее строим бинарную маску диска Земли ($NED(I, J)$) по модели географической привязки (эталонную). Потом выполняем совмещение “актуальной” и эталонной масок, для чего используется процедура поиска максимума корреляции бинарных сцен:

$$S(I', J') = \max_{I', J' \in [-MNE1, +MNE1]} \left\{ 1 - \left(\sum_{i, j}^{N_l, N_c} [IED(i, j) - NED(i + I', j + J')] / N_l \cdot N_c \right) \right\} \quad (2)$$

где N_l, N_c - количество строк и столбцов в масках; (I', J') - параметры смещения истинного надира изображения; $MNE1$ - максимальная ошибка географической привязки (вдоль столбца равна 150 пикселям, вдоль строки равна 20 пикселям).

Результаты экспериментов показали, что все максимумы корреляционной функции (2) лежат выше отметки в 95% (а максимумы корреляционной функции относительно количества пикселей эталонной маски диска Земли практически всегда равны 100%). При этом ошибка совмещения масок составляет не больше 2-х пикселей, как по строке, так и по столбцу. По результатам формулы (2) выполняется

первичная коррекция географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений (каждого канала), следующим образом:

$$\begin{cases} I_C = I_C + I' \\ J_C = J_C + J' \end{cases} \quad (3)$$

где I_C и J_C - координаты в изображении надира (строка и столбец). Для видимого канала (VIS) необходимо параметры смещения (I', J') увеличить в четыре раза (т.к. пространственное разрешение инфракрасных каналов в четыре раза ниже).

Визуальный анализ совмещения видимого и эталонного береговых контуров на выборочной серии изображений (100 шт.) после проведения процедуры первичной коррекции показал, что остаточная ошибка привязки не превышает 15 пикселей по всему изображению. В табл. 1 приведены значения статистических параметров, которые были вычислены по невязкам в реперных точках для одного изображения.

Таблица 1. Значения параметров невязок в реперных точках, которые были автоматически рассчитаны по ИК (A,B) и видимому (C,D) каналам изображения FY-2C/S-VISSR (6.04.2008г., 5:30 UTC). Этапы: A и C – после выполнения процедуры первичной коррекции. Этапы: B и D – после исполнения процедуры вторичной коррекции привязки. RMS (Root Mean Square) – среднеквадратическая величина модулей невязок в реперных точках, является показателем ошибки привязки.

Этапы расчета параметров	Кол-во GCPs	RMS невязки, Δx	Максимум модуля невязки, Δx	RMS невязки, Δy	Максимум модуля невязки, Δy	RMS модуля невязок, $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$	Максимум модуля невязок, Δr
A	15	1.553	3.25	1.157	1.75	1.936	3.335
B	15	0.268	0.43	0.349	0.73	0.44	0.79
C	140	4.824	10.5	8.299	9.5	9.57	13.5
D	140	0.51	0.91	0.756	1.253	0.911	1.321

Процедура вторичной коррекции

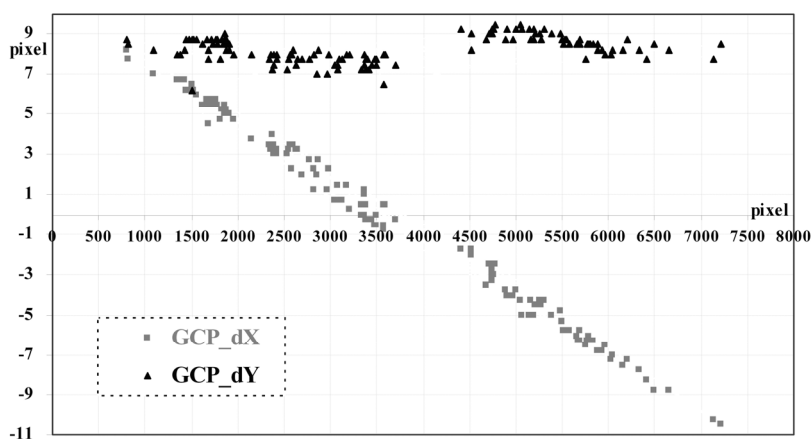


Рис. 1. График зависимости значений невязок (вдоль строки - GCP_dX и столбца - GCP_dY) от номера скана изображения в реперных точках, автоматически рассчитанных по изображению FY-2C/S-VISSR (6.04.2008г., 5:30 UTC) видимого канала

выполнялось аналогичным образом, как и для данных спутника MTSAT-1R [5]. Отбор реперных участков исходного изображения, пригодных для расчета опорных точек, выполняется после проведения процедуры грубой фильтрации облачности [5].

Процедура вторичной коррекции вычисляет углы положения платформы спутника с радиометром (roll, pitch и yaw) на основе автоматического расчета реперных точек (Ground Control Points - GCPs). Таким образом, устраняет остаточную ошибку привязки по всему изображению после проведения процедуры первичной коррекции, и тем самым, позволяет достигать пиксельной точности привязки по всему изображению. Для автоматического задания реперных точек используются база участков эталонной маски суша/вода (лэндмаркеры). Создание базы лэндмаркеров

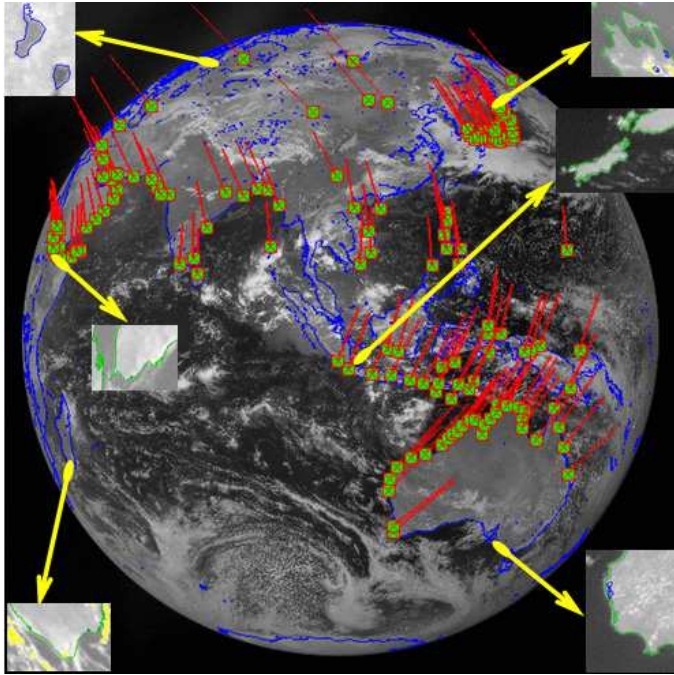


Рис. 2. Изображение FY-2C/S-VISSR (6.04.2008г., 5:30 UTC) видимого канала с наложенным эталонным береговым контуром (помечен синим тоном) после проведения процедуры вторичной коррекции географической привязки. Показаны рассчитанные реперные точки с векторами смещений (помечены красным тоном). Вынесены шесть фрагментов изображения в увеличенном масштабе, где эталонный береговой контур помечен зеленым и синим тоном

японского геостационарного спутника MTSAT-1R [5]. Т.е. значения углов (*Roll*, *Pitch*) меняются с линейной скоростью за время сеанса формирования изображения радиометром; вклад угла рысканья в неточность привязки незначителен ($Yaw=0$). Следовательно, значения параметров коррекции привязки могут быть вычислены с помощью линейных регрессий - зависимостей углов от времени сканирования [5]:

$$\begin{cases} Roll = \alpha_1 \cdot (t - t_n) + \alpha_0 \\ Pitch = \beta_1 \cdot (t - t_n) + \beta_0 \end{cases} \quad (4)$$

где t - время сканирования скана изображения и t_n - время сканирования скана изображения в надире; α_i и β_i ($i = \overline{0,1}$) - оценки значений коэффициентов линейных регрессий для углов ориентации платформы спутника с радиометром.

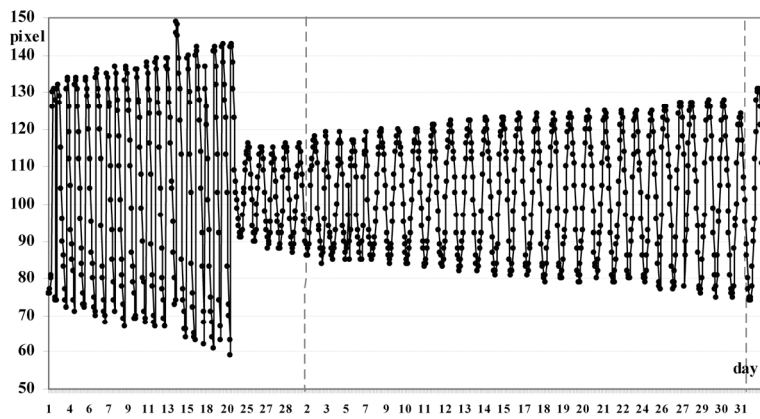
Результаты визуального анализа выборочной серии (более 100 шт.) FY-2C/S-VISSR изображений видимого и ИК каналов после исполнения процедуры вторичной коррекции географической привязки показали что, ошибка смещения видимого берегового контура на изображении относительно эталонного не больше одного пиксела (смотрите рис. 2). Это также подтверждается значениями статистических параметров, вычисленных по остаточным невязкам в реперных точках (смотрите табл. 1).

Результаты апробации метода коррекции привязки FY-2C/S-VISSR изображений

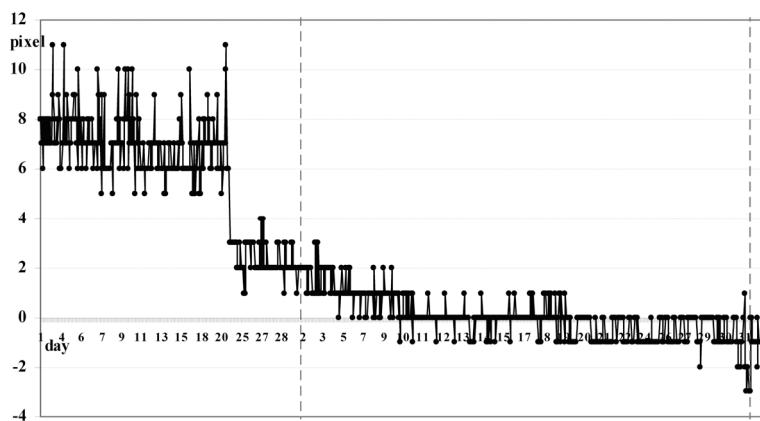
Представленный метод автоматической коррекции привязки прошел апробацию на серии изображений (около 2000 шт.) за два месяца 2008 года (апрель-май). На рис. За представлен график зависимости значений смещений вдоль столбца (вычисленных процедурой первичной коррекции) от

Процедура расчета параметров оптимального положения реперной точки основывается на алгоритме, который ранее был разработан и апробирован для автоматической привязки изображений AVHRR (ИСЗ NOAA) и VISSR (ИСЗ MTSAT-1R) [5,6]. Одним из главных достоинств этого алгоритма является то, что его можно применять без какой-либо предварительной настройки для различного рода изображений (различные спектральные диапазоны, время суток, климатические условия и т.п.), и он показывает хорошие результаты применения даже при отказе от проведения процедуры фильтрации облачности. Далее рассчитываются параметры коррекции (углы положения платформы спутника с радиометром) на основе минимизации рассогласования между модельными и рассчитанными координатами реперных точек [5, 6].

Визуальный анализ графика зависимости невязок (вдоль строки и столбца) в реперных точках от номера скана изображения (что эквивалентно времени сканирования кадра изображения) показал (смотрите рис. 1), что поведение углов платформы спутника FY-2C аналогично, как и у



а)



б)

Рис. 3. Зависимость значений смещений вдоль столбца (а) и смещений вдоль строки (б) от времени формирования изображения, вычисленных процедурой первичной коррекции

времени формирования ИК-изображения. Анализ представленного графика показывает, что ошибка привязки (смещение вдоль столбца изображения) подчиняется периодическому закону (интервал периода равен 24 часам). При этом наблюдается нарастание амплитуды смещений вдоль столбца. Аналогичные результаты были получены и в работе китайских ученых [4]. На рис. 3б представлен график зависимости значений смещений вдоль строки (вычисленных процедурой первичной коррекции) от времени формирования ИК-изображения. На этом рисунке видно, что значения ошибки вдоль строки постепенно со временем уходит в ноль и значительно не варьируются.

Анализ представленных графиков на рис. 3а и 3б показывает, что поведение ошибок привязки (вдоль столбца и строки) резко изменилось. Данное событие произошло между 21 и 25 апреля 2008 года (с 22 по 24 апреля прием изображений со спутника FY-2С не выполнялся в центре по техническим причинам). Единственным

объяснением такого поведения является то, что, по-видимому, в это время выполнялась коррекция положения спутника на орбите (или корректировка значений прогнозных орбитальных параметров).

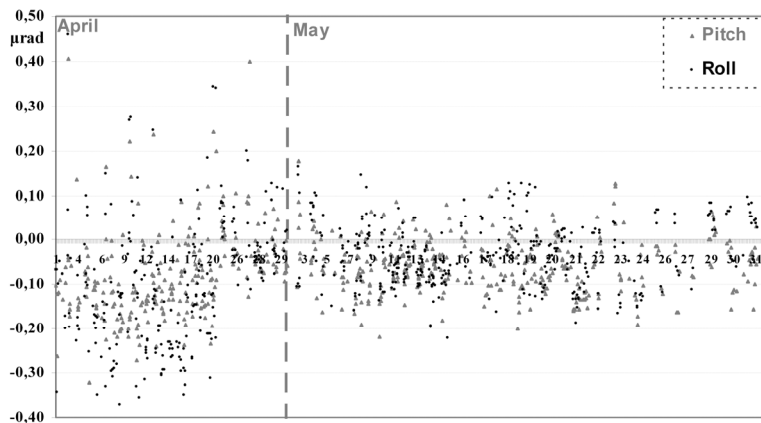
На рис. 4а и 4б представлены значения коэффициентов линейных регрессий (смотрите формулу 4), вычисленные по изображениям ИК канала, согласно которым выполняется расчет углов положения платформы спутника (roll, pitch). Анализ графиков показывает, что поведение параметров процедуры вторичной коррекции аналогично поведению параметров, вычисленных для японского геостационарного спутника MTSAT-1R [5].

Исследование возможности прогнозирования коррекции привязки

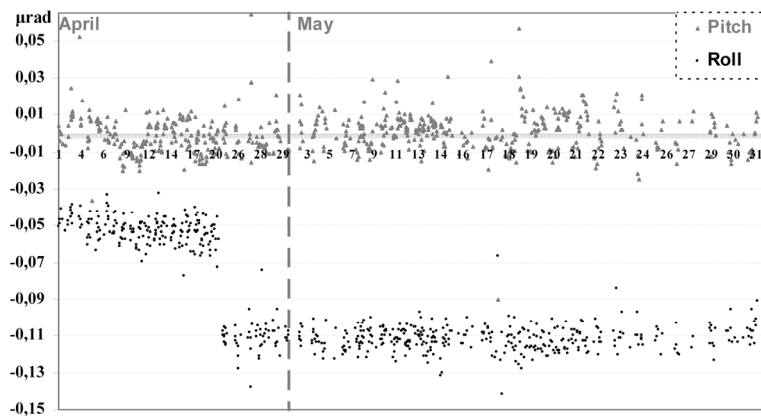
Для спутника FY-2С было проведено исследование возможности прогнозирования параметров первичной коррекции. Что является актуальным в тех случаях, когда изображение не содержит полный диск Земли или имеет пропущенные строки. Исходя из результатов анализа поведения ошибки привязки (смещение вдоль столбца изображения), описанных в предыдущем пункте, можно применить следующую модель для такого прогнозирования:

$$dY_f = A_{24} + B_{24} \cdot d \cdot \sin \frac{2\pi \cdot (h - C_{24})}{24} \quad (5)$$

где dY_f - ошибка смещения вдоль столбца, d - номер дня формирования изображения, h - время формирования изображения, A_{24} - смещение синусоиды относительно нуля, B_{24} - постоянная



а)



б)

Рис. 4. Значения коэффициентов линейных регрессий нулевого (а) и первого (б) порядков, вычисленных для FY-2C/S-VISSR ИК-изображений согласно формуле (4)

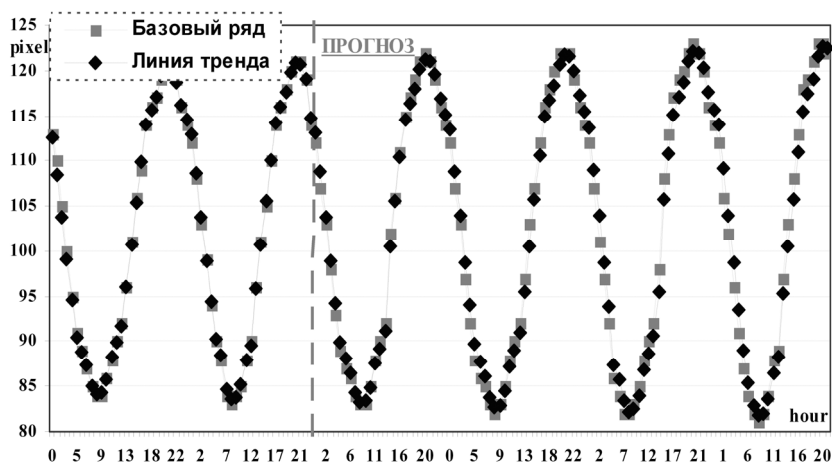
составляющая амплитуды синусоиды, C_{24} - начальная фаза колебания. Индекс 24 указывает на выбранный нами период изменения функции (сутки).

На рис. 5а представлен график искомым значений ошибки привязки (смещение вдоль столбца) и прогнозируемых значений согласно формуле (5). А на рис. 5б представлен график разности между искомыми и прогнозируемыми значениями (остатки). На графиках после вертикальной линии, обозначенной пунктиром, следуют прогнозные значения в течение четырех суток. Анализ графика на рис. 5б показывает, что ошибка прогнозирования в течение нескольких суток является вполне удовлетворительной (до 3 пикселей). В табл. 2 представлены значения коэффициентов согласно формуле (5). Также приведены значение квадрата коэффициента корреляции и его минимальное значение, результатом сравнения которых ($R^2 > R_{\min}^2$), является то, что корреляция рядов является существенно значимой с вероятностью равной 99%.

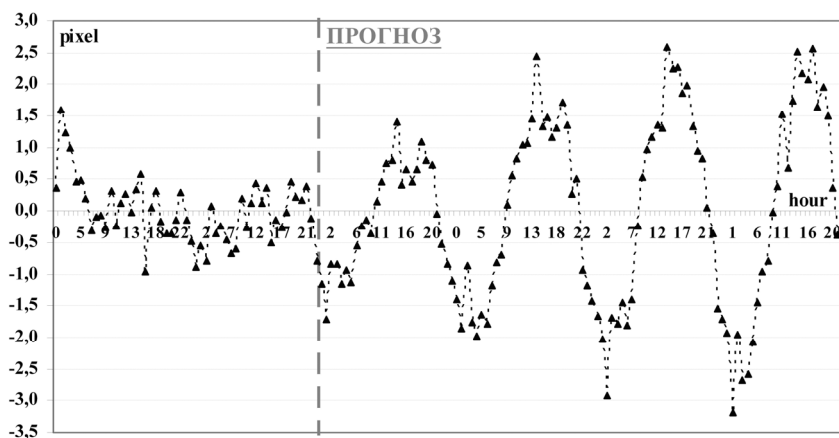
Таблица 2. Значения коэффициентов, которые были вычислены по реальным данным (с 10 по 12 мая 2008 года)

Смещение синусоиды, A_{24}	Постоянная составляющая амплитуды синусоиды, B_{24}	Начальная фаза колебания, C_{24}	Кол-во наблюдений, используемых для прогноза	Квадрат коэффициента корреляции, R^2	Минимум коэффициента корреляции при уровне значимости $0.01, R_{\min}^2$
102.21064	0.45561	-9.65915	54	0.99854	0.12071

В связи с тем, что значения ошибки вдоль строки (смотрите рис. 3б) практически не варьируются в течение значительного времени (несколько суток), то прогнозирование значений этого параметра для процедуры первичной коррекции можно выполнять простым переносом с ближайшего по времени формирования изображения. Анализ зависимости значений коэффициентов линейных регрессий от времени, представленных на рис. 4а и 4б, показывает то, что поведение углов положения платформы спутника с радиометром (крена и тангажа) значительно не меняется. Поэтому для спутника FY-2C при прогнозировании параметров процедуры вторичной коррекции привязки можно применить простой перенос значений углов с ближайшего по времени хорошо привязанного изображения, как это было сделано в работе [5] для спутника MTSAT-1R.



а)



б)

Рис. 5. Зависимости искомых и прогнозируемых значений первичной коррекции привязки (а) и значений разности между ними (б) от времени формирования изображения (с 10 по 16 мая 2008 года)

еще один спутник этой серии - FengYun-2D находится в оперативном режиме (85° в.д.), другой - FengYun-2E в ближайшее время заменит FengYun-2C и завершит данную серию запуск спутника FengYun-2F.

Литература

1. FY-2C/D/E S-VISSR Data Transmission // National Satellite Meteorological Center (NSMC), China Meteorological Administration (CMA), Version 2.0, September 2004 // url: <http://www.bom.gov.au/sat/MTSAT/FY2VISSR2.0.pdf>
2. Geostationary Meteorological Satellite, ANNEX IV-E: The Mapping Method of S-VISSR Data // JMA technical Report, Japan, 1999, Part IV
3. Jianmin X., Feng L., Qishong Z. Automatic navigation of FY-2 geosynchronous meteorological satellite images // Proceedings of 6th International Winds Workshop, Madison, Wisconsin, USA, May 2002 P. 291-295
url: <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/351XU.pdf>
4. Zhang P., Jianmin X. FengYun 2C and It's Application // Proceedings of the Symposium on Satellite Meteorology: Past, Present and Future in Celebration of CIMSS's Silver Anniversary // Madison, Wisconsin, USA, 11-13 July 2005
url: http://cimss.ssec.wisc.edu/cimss25th/presentations/CIMSS_Silver_pengz2005.pdf
5. Катаманов С.Н. Автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений с пиксельной точностью // Исследование Земли из космоса, 2009. №3.

Заключение

Апробация автоматического метода коррекции географической привязки для серии FY-2C/S-VISSR изображений за два месяца 2008 года в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН показала, что эффективность использования метода в условиях оперативной обработки спутниковых данных является хорошей (в среднем за два месяца привязано около 65% изображений). В тех случаях, когда нет возможности вычислить набор параметров коррекции привязки необходимо использовать прогнозирование параметров коррекции, используя ранее полученные хорошо привязанные изображения.

Метод может быть применен для обработки данных других геостационарных спутников, формирующих изображения в видимом и ИК диапазонах. В частности для всех китайских геостационарных спутников серии FengYun-2: на данный момент времени

Б.Александрин А.И., Катаманов С.Н. Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. Сб. научных статей. М.: ООО «Азбука-2000», 2006. Т. I. С. 41-48.

Automatic navigation of FengYun-2C geostationary satellite imagery

Katamanov Sergey Nikolaevitch, Desyatkov Olga Yakovlevna

Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok

The image navigation error of the algorithm developed by Japan meteorological agency for Chinese geostationary satellite FengYun-2C (radiometer S-VISSR) may be up to 800 km, that is unsatisfactory for many satellite applications. An automatic navigation method of one pixel accuracy for "full" images received during one session of S-VISSR2.0 data broadcast is presented. The method is based on the computation of true image nadir and on the estimation of satellite attitude angles (roll, pitch and yaw). An automatic calculation of ground control points (GCPs) on the image is used for the computation of the attitude angles (roll, pitch and yaw). A possibility to forecast the navigation parameters from earlier navigated images is considered and the results of the application efficiency are discussed. The approbation results of the new navigation method for a 2-month data set (for 2008 year) received in the Center for regional satellite monitoring of environment of FEB RAS are presented.

Keywords: automatic image navigation, ground control points, attitude angles, forecasting image navigation.