

АВТОМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРИВЯЗКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ГЕОСТАЦИОНАРНЫХ МЕТЕОСПУТНИКОВ СЕРИИ FENGYUN-2 С ПИКсельНОЙ ТОЧНОСТЬЮ

© 2011 г. С. Н. Катаманов

Учреждение Российской академии наук Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

Поступила в редакцию 10.02.2010 г.

В этой работе представлен автоматический метод коррекции географической привязки “полных” (сформированных в течение всего сеанса приема) изображений, получаемых с геостационарного спутника FengYun-2C в режиме S-VISSR2.0, с пиксельной точностью. Метод коррекции привязки разделен на два этапа: первичная и вторичная процедуры. Процедура первичной коррекции устраняет “основную” ошибку привязки с помощью определения истинного положения диска Земли на изображении. Процедура вторичной коррекции устраняет остаточные ошибки привязки по всему изображению посредством автоматического расчета невязок в реперных точках. В качестве параметров коррекции привязки используются углы стабилизации спутниковой платформы с радиометром (крен, тангаж, рысканье). 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 четырехмесячной серии (за 2008 г.) в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН.

Ключевые слова: спутниковые FengYun-2C изображения, автоматический метод коррекции привязки, реперные точки, пиксельная точность, углы ориентации платформы спутника (крен, тангаж, рысканье), прогнозирование параметров привязки

ВВЕДЕНИЕ

В январе 2005 г. Китайским метеорологическим агентством (China Meteorological Administration – CMA) был введен в эксплуатацию новый геостационарный метеорологический спутник FengYun-2C (FY-2C) взамен вышедшего из строя FengYun-2B. Высота орбиты спутника составляет 35800 км, 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 (0.55–0.90 мкм), ближний ИК-канал (3.5–4.0 мкм), канал водяного пара (6.5–7.0 мкм), первый ИК (10.3–11.3 мкм) и второй ИК (11.5–12.5 мкм) каналы. Данные со спутника FY-2C передаются в двух режимах – LRIT и S-VISSR2.0 (CMA, 2004). Для режима S-VISSR2.0 пространственное разрешение ИК-каналов равно 5 км, для видимого канала – 1.25 км в надире. Высокие характеристики изображений радиометра FY-2C/S-VISSR, получаемых в режиме S-VISSR2.0 (число градаций на пиксел изображения для ИК-каналов составляет 1024, а для видимого – 64), и частый прием изображений (48 сеансов за сутки) позволяют использовать его данные для различного рода задач мониторинга

окружающей среды. При решении многих задач спутникового мониторинга (таких, как оценка временной изменчивости температуры поверхности океана (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 Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВО РАН) был использован алгоритм привязки, разработанный в Японском метеорологическом агентстве для данных, принятых в форматах S-VISSR и HiRID, с геостационарных спутников серии GMS и MTSAT-1R (Kigawa, 1991). Этот алгоритм включает в себя орбитальную модель движения спутника и геометрическую модель сканирования радиометром поверхности Земли. В качестве входных параметров для этой модели привязки используются данные Дос-сектора (Documentation sector), который включается при трансляции сигнала со спутника в каждый кадр потока данных (CMA, 2004). При применении этого алгоритма ошибка географической привязки изображений FY-2C/S-VISSR может достигать колоссальных размеров (300–

800 км), что недопустимо для многих задач спутникового мониторинга.

Стабилизация всех спутников серии FengYun-2, как и у первых спутников серии GOES, осуществляется вращением вокруг своей оси симметрии (dual-spin). При стабилизации типа “dual-spin” спутник имеет форму цилиндра, который вращается вокруг его продольной оси. Этот тип спутника состоит из двух частей – вращающейся, на которой установлены панели солнечных батарей, и стабилизированной (которая также является платформой для радиометра) – с установленными коммуникационными антеннами. Вращающаяся часть обеспечивает основную стабилизацию и может вращаться со скоростью до 100 об/мин. Стабилизированная часть вращается тоже, хотя намного медленнее – один оборот на виток (в сутки) – поддерживая антенны постоянно повернутыми к Земле и предотвращая вход спутника в плоское вращение (которое является естественной тенденцией). Положение спутниковой платформы с радиометром 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 вдоль столбца и строки изображения (для углов *roll* и *pitch* соответственно) и поворота относительно надира (подспутниковой точки) изображения (для угла *yaw*) эталонного берегового контура относительно контура, видимого на изображении (Катаманов, 2009). Также источником ошибок географической привязки изображений может служить неточность определения некоторых параметров положения спутника на орбите, в результате чего визуальный эффект ошибок привязки будет выражаться в виде смещения истинного надира на изображении.

Результаты работ китайских ученых (Xu et al., 2002; Zhang, Xu, 2005; Lu et al., 2008) подтверждают, что источником ошибки привязки изображений FY-2C/S-VISSR может служить неточность определения некоторых параметров положения спутника на орбите и ориентации в пространстве спутниковой платформы с радиометром. В работах (Xu et al., 2002; Lu et al., 2008) представлен сам метод автоматической привязки FY-2C/S-VISSR изображений, в котором коррекция ошибки привязки выполняется только по контуру диска Земли на изображении, т.е. вычисляется только смещение истинного надира изображения, в связи с чем остаточные ошибки привязки по всему изображению, вызванные углами положения спутниковой платформы с радиометром в пространстве, могут достигать несколько пикселей, что недопустимо для многих задач спутникового мониторинга (Катаманов, 2009; Катаманов, Десяткова, 2009). Также в работе (Lu et al., 2008) представлены результаты применения метода на небольшой

по объему серии изображений (за один месяц) и не приведены оценки остаточных ошибок привязки после проведения ее коррекции, что в итоге не позволяет оценить эффективность использования метода в условиях оперативной обработки спутниковых данных.

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 (Катаманов, Десяткова, 2009). Метод коррекции привязки состоит из двух этапов: первичная и вторичная процедуры коррекции. Процедура первичной коррекции устраняет “основную” ошибку привязки, связанную со смещением истинного надира изображения, с помощью минимизации рассогласований между видимым и истинным расположением диска Земли на изображении. Процедура вторичной коррекции устраняет остаточные ошибки привязки по всему изображению посредством автоматического расчета невязок в реперных точках. Сама коррекция привязки осуществляется с помощью вычисления оптимальных значений углов стабилизации спутниковой платформы (*roll*, *pitch*, *yaw*) на основе параметров, полученных при проведении обеих процедур коррекции. Такой подход позволяет значительно уменьшить объем вычислений при автоматическом расчете реперных точек и достигать пиксельной точности привязки для каждого изображения при условии получения достаточной конфигурации реперных точек. В свою очередь, достижение пиксельной точности привязки изображений, для которых невозможно получение достаточной конфигурации реперных точек, выполняется проведением коррекции географической привязки на основании результатов работы с изображениями, сформированных ранее, т.е. используются соответствующие схемы прогнозирования параметров коррекции географической привязки.

В этой работе представлены автоматический метод коррекции географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений и результаты его апробации на четырехмесячной серии (за 2008 г.). Рассматривается проблема рассогласования оптических осей датчиков видимого и ИК-каналов радиометра и предлагается ее решение. Представлены схемы прогноза параметров первичной и вторичной процедур коррекции привязки и обсуждаются результаты эффективности их применения.

ПРОЦЕДУРА ПЕРВИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИВЯЗКИ FY-2C/S-VISSR ИЗОБРАЖЕНИЙ

Данная процедура вычисляет параметры смещения истинного надира на основе морфологического анализа границ диска Земли на изобрае-

жении. Для идентификации границ диска Земли используется изображение ИК-канала (первого или второго), а условием использования изображения является наличие полного диска Земли и отсутствие сбойных строк в кадре при приеме. Используя свойство бимодальности гистограммы значений данных ИК-канала (диск Земли и космос), выбирается значения порога для построения бинарной маски диска Земли на изображении. В качестве величины порога (*threshold*) задается значение ИК-данных, которое находится между двумя модами на гистограмме и которому соответствует наименьшее количество пикселей с таким значением на изображении. Далее выполняется построение бинарной маски диска Земли на изображении с помощью порогового критерия

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

$$S(I', J') = \max_{I', J' \in [-MNE_1, +MNE_1]} \left\{ \left(\sum_{I, J}^{N_r, N_c} [IED(I, J) \cdot NED(I - I', J - J')] \right) / \sum_{I, J}^{N_r, N_c} IED(I, J) \right\}, \quad (1)$$

где N_r, N_c – количество строк и столбцов в масках; (I', J') – параметры смещения истинного надира изображения; MNE_1 – максимальная ошибка географической привязки для процедуры первичной коррекции (вдоль столбца и строки равна 200 и 20 пикселям соответственно).

Проведенный анализ результатов вычисления параметров совмещения (1) показал, что максимум корреляционной функции $S(I', J')$ всегда является выраженным в форме пика. На рис. 1 приведен график максимальных значений корреляционной функции в процентах относительно количества пикселей “актуальной” маски диска

Земли $\left(\sum_{I, J}^{N_r, N_c} IED(I, J) \right)$ согласно формуле (1).

На графике видно, что все максимумы корреляционной функции (1) больше 96%. При этом значения максимумов корреляционной функции относительно количества пикселей эталонной мас-

ки диска Земли $\left(\sum_{I, J}^{N_r, N_c} NED(I, J) \right)$ для всех случаев

больше 99.95%. Также визуальный анализ серии результатов (более 1000 шт.) совмещения бинарных масок диска Земли показал, что актуальная маска практически идентична эталонной маске. При этом ошибка совмещения масок лежит в пределах 1–2 пикселей ИК-изображения как по строке, так и по столбцу.

Далее выполняется первичная коррекция географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений (каждого канала) на основе вычисления

где $\text{pixel}(I, J)$ – значение пикселя с координатами $((I, J)$ – строка и столбец) в ИК-изображении; $IED(I, J)$ – “актуальная” маска диска Земли, где значение пикселя равно единице, если он принадлежит диску Земли, и значение пикселя равно нулю в противном случае.

После этого выполняется построение бинарной маски диска Земли по модели географической привязки ($NED(I, J)$), в результате чего мы имеем две бинарные маски для диска Земли, одна из которых была построена с помощью морфологического анализа границ изображения (“актуальная”), а вторая – по модели географической привязки (эталонная). Далее выполняется совмещение актуальной и эталонной масок диска Земли, для чего используется процедура поиска максимума корреляции бинарных сцен

углов положения спутниковой платформы с использованием рассчитанных по формуле (1) параметров положения истинного надира

$$\begin{cases} \text{roll}_0 = -(Ry_{\text{nadir}} \cdot I') / D_{\text{nadir}}, \\ \text{pitch}_0 = (Rx_{\text{nadir}} \cdot J') / D_{\text{nadir}}, \end{cases} \quad (2)$$

где roll_0 и pitch_0 – углы крена и тангажа соответственно; Ry_{nadir} и Rx_{nadir} – размер пикселя ИК-канала в надире по строке и столбцу соответственно (равен 5 км в обоих случаях); D_{nadir} – дистанция от спутника до подспутниковой точки Земли (в километрах), вычисляется по орбитальной модели движения спутника. Соотношения формулы (2) получены на основании следующих положений (математические выкладки в полном объеме приведен в работе (Lu et al., 2006)): $\cos \alpha \cong 1$ и $\sin \alpha \cong \alpha$ (ввиду малости значений углов стабилизации спутниковой платформы); в надире угол рысканья на привязку не влияет ($yaw = 0$); тригонометрические соотношения для синуса и косинуса углов в прямоугольном треугольнике. Геометрический аспект и математические соотношения для поворота системы координат, которая связана с центром масс геостационарного спутника (FY-2C), относительно углов положения спутниковой платформы с радиометром (S-VISSR) подробно рассмотрен в работах (Lu et al., 2006; Lu et al., 2008).

Проведенный визуальный анализ совмещения видимого и эталонного береговых контуров на выборочной серии изображений (около 500 шт.) после проведения процедуры первичной коррекции показал, что остаточная ошибка привязки не превышает несколько пикселей по всему изобра-

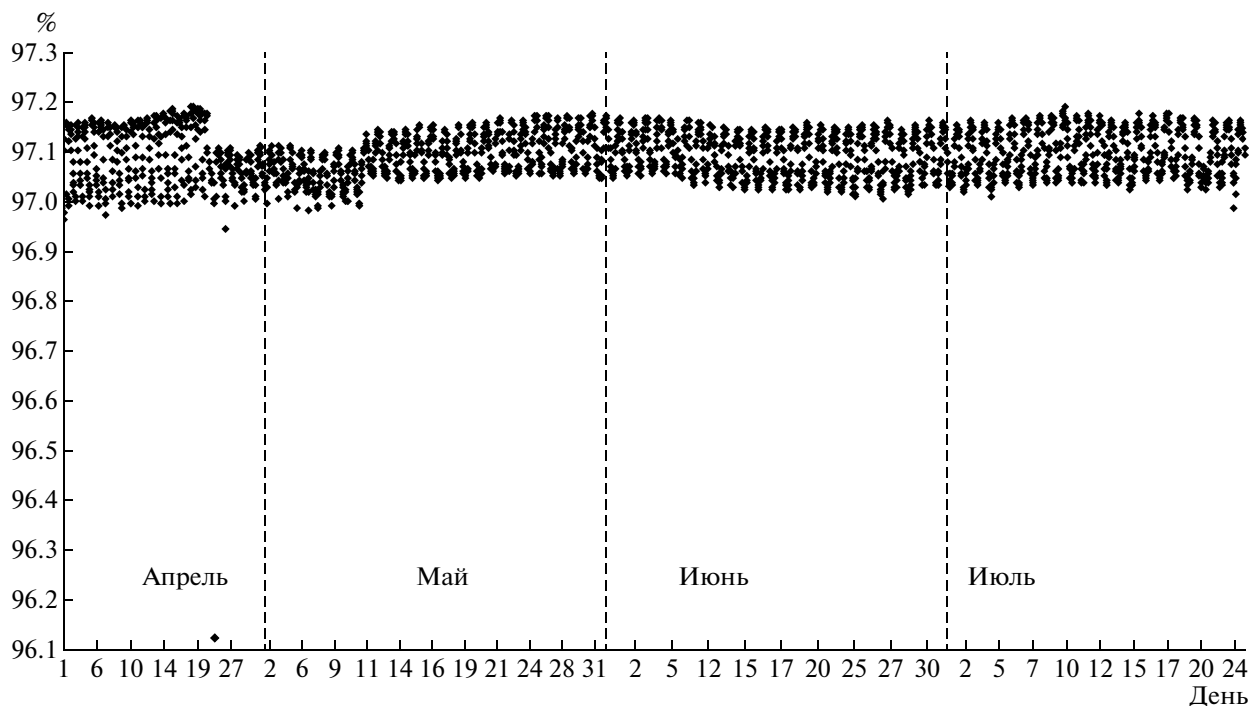


Рис. 1. Максимальные значения корреляционной функции (в процентах относительно количества пикселей “актуальной” маски диска Земли), при которых были рассчитаны параметры истинного положения надира изображений (с апреля по июль 2008 г.) процедурой первичной коррекции.

жению (для ИК-каналов). В табл. 1 приведены значения статистических параметров, которые были вычислены по невязкам в реперных точках после исполнения процедуры первичной коррекции привязки (этапы *A* и *C*) для одного изображения (видимого и ИК-каналов). Используемый в табл. 1 термин RMS (Root Mean Square) – среднеквадратическая величина модулей невязок в реперных точках – является показателем ошибки привязки.

ПРОЦЕДУРА ВТОРИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ ПРИВЯЗКИ FY-2C/S-VISSR ИЗОБРАЖЕНИЙ

Процедура вторичной коррекции устраняет остаточные ошибки привязки по всему изображе-

нию после проведения процедуры первичной коррекции и тем самым позволяет достигать пиксельной точности привязки по всему изображению, сформированному в течение всего сеанса приема. Это выполняется уточнением углов положения платформы спутника с радиометром (*roll, pitch u yaw*), поправки, к которым вычисляются на основе минимизации рассогласования между видимыми и истинными (рассчитываются автоматически) положениями реперных точек на изображении (Ground Control Points – GCPs).

Для расчета истинных координат реперных точек используется база участков эталонной маски суша/вода (лэндмаркеры) с характерными особенностями – наличием резких изменений в на-

Таблица 1. Значения параметров невязок в реперных точках, которые были автоматически рассчитаны по FY-2C/S-VISSR изображениям ИК- и видимого диапазона (4:01 UTC 5.05.2008 г.)

Этапы расчета	Количество GCPs	RMS невязки, Δx	Максимум модуля невязки, Δx	RMS невязки, Δy	Максимум модуля невязки, Δy	RMS модуля невязок	Максимум модуля невязок, Δr
<i>A</i>	24	3.27	5.25	0.83	1.5	3.37	5.46
<i>B</i>	24	0.33	0.58	0.54	0.75	0.58	0.82
<i>C</i>	108	11.5	21.75	1.64	3.25	11.61	21.97
<i>D</i>	108	0.42	0.75	0.52	0.96	0.67	1.22

Примечание. Для ИК-канала: *A* – после выполнения процедуры первичной коррекции и *B* – после исполнения процедуры вторичной коррекции привязки. Для видимого канала: *C* – после выполнения процедуры первичной коррекции и *D* – после исполнения процедуры вторичной коррекции привязки.

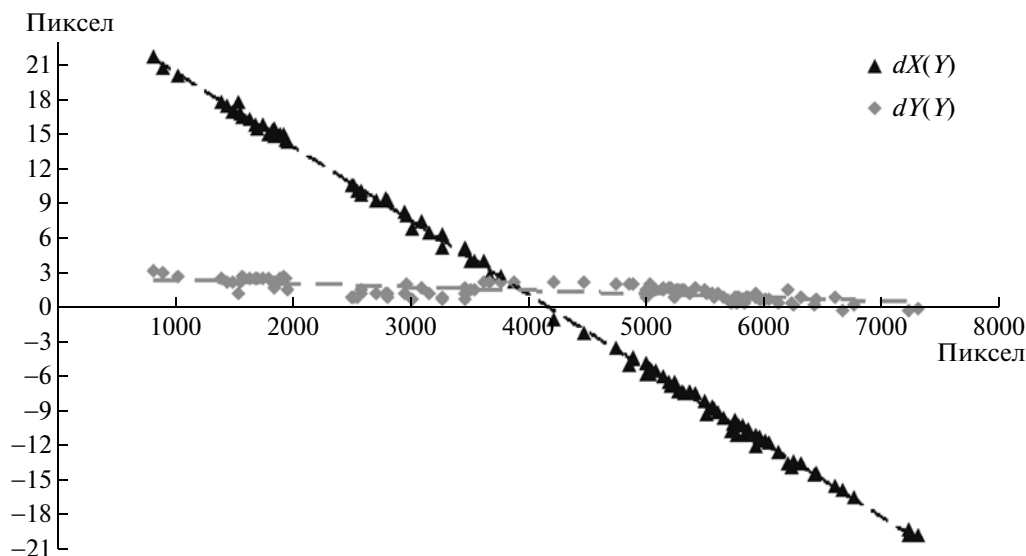


Рис. 2. График зависимости значений невязок в реперных точках (вдоль строки — $dX(Y)$ и вдоль столбца — $dY(Y)$) от номера скана изображения, автоматически рассчитанных для видимого канала FY-2C/S-VISSR изображения (4:01 UTC 5.05.2008 г.).

правлении береговой линии (острова, полуострова, заливы, мысы, озера, извилистые русла крупных рек и т.п.). Данная база лэндмаркеров была задана для всего географического региона, который попадает в обзор сенсора спутника (FY-2C/S-VISSR), с использованием маски суша/вода, созданной на основе цифровой географической контурной базы GSHHS (Wessel, Smith, 1996). Для изображений видимого и ИК-диапазонов используются отдельные базы — в связи с различным пространственным разрешением этих каналов. Отбор реперных участков исходного изображения, пригодных для расчета GCPs, выполняется после проведения процедуры грубой фильтрации облачности (Катаманов, 2009).

Процедура расчета параметров оптимального положения реперной точки основывается на алгоритме, который ранее был разработан и апробирован для автоматической привязки изображений AVHRR (ИСЗ серии POES NOAA) и VISSR (ИСЗ MTSAT-1R) (Алексанин, Катаманов, 2006; Катаманов, 2009). 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. Алгоритм выполняет поиск оптимального совмещения пиксельного шаблона лэндмаркера маски суша/вода с реперным участком изображения на основе максимального рассогласования средних значений для суши и воды. После этого оценивается статистическая значимость результата для вычисленных параметров оптимального

положения реперного фрагмента изображения относительно маски суша/вода (в качестве основы данного критерия выступает проверка гипотезы о разделимости участков суши и воды). Далее по заданному пороговому значению для критерия статистической значимости выполняется отбор “хороших” реперных точек. Остаточная отбраковка “плохих” реперных точек производится при вычислении параметров коррекции привязки с помощью критерия 2σ (Алексанин, Катаманов, 2006; Катаманов, 2009).

На рис. 2 представлен график зависимости невязок в реперных точках (вдоль строки и столбца) от номера скана изображения (что эквивалентно времени сканирования кадра изображения). Анализ данного графика показывает, что поведение углов платформы спутника FY-2C аналогично, как и у японского геостационарного спутника MTSAT-1R (Катаманов, 2009), т.е. значения углов (*roll*, *pitch*) меняются с линейной скоростью в течение полного сеанса формирования изображения радиометром; вклад угла рысканья в неточность привязки незначителен ($yaw = 0$). Таким образом, значения параметров коррекции привязки могут быть вычислены с помощью линейных регрессий — зависимостей углов от времени сканирования кадра изображения (Катаманов, 2009; Катаманов, Десяткова, 2009), с учетом рассчитанных значений углов процедурой первичной коррекции

$$\begin{cases} roll = \alpha_1(t - t_n) + \alpha_0 + roll_0, \\ pitch = \beta_1(t - t_n) + \beta_0 + pitch_0, \end{cases} \quad (3)$$

где t — время сканирования кадра изображения; t_n — время сканирования кадра изображения, ко-

торый находится в надире; α_i и β_i ($i = \overline{0, 1}$) – оценки значений коэффициентов (нулевого и первого порядков) линейных регрессий; $roll_0$ и $pitch_0$ – значения углов крена и тангажа, которые были рассчитаны процедурой первичной коррекции привязки согласно формуле (2).

$$\begin{cases} \alpha_1 = \left\{ \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} (Ry_i \cdot dY_i) / D_i \right) - N_{GCP} \cdot \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (t_i \cdot Ry_i \cdot dY_i) / D_i \right\} / \left\{ N_{GCP} \cdot \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \right\}, \\ \alpha_0 = -\frac{1}{N_{GCP}} \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} (Ry_i \cdot dY_i) / D_i + \alpha_1 \cdot \sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right), \\ \beta_1 = \left\{ N_{GCP} \cdot \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (t_i \cdot Rx_i \cdot dX_i) / D_i - \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} (Ry_i \cdot dX_i) / D_i \right) \right\} / \left\{ N_{GCP} \cdot \sum_{i=1}^{N_{GCP}} (t_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right) \right\}, \\ \beta_0 = \frac{1}{N_{GCP}} \left(\sum_{i=1}^{N_{GCP}} (Rx_i \cdot dX_i) / D_i - \beta_1 \sum_{i=1}^{N_{GCP}} t_i \right), \end{cases}$$

где t_i – время сканирования кадра изображения для i -GCP (относительно надира); (dX_i, dY_i) – значения невязок по столбцу и строке соответственно в i -GCP (в пикселях); Rx_i и Ry_i – размер пикселя по столбцу и строке соответственно (в километрах), который зависит от пространственного размещения i -GCP; D_i – дистанция от спутника до i -GCP (в километрах); N_{GCP} – число реперных точек, которые участвуют в вычислении параметров коррекции привязки.

Был проведен визуальный анализ выборочной серии (более 500 шт.) FY-2C/S-VISSR изображений видимого и ИК-каналов после исполнения процедуры вторичной коррекции географической привязки. Результаты анализа показали что, ошибка смещения видимого берегового контура на изображении относительно эталонного в пределах одного пикселя (см. рис. 3). Это также подтверждается значениями статистических параметров, вычисленных по остаточным невязкам в реперных точках (см. табл. 1, этапы *B* и *D* для изображений ИК- и видимого каналов соответственно).

Результаты визуального и статистического анализа остаточных ошибок привязки изображений после исполнения процедур первичной и вторичной коррекции привязки подтверждают, что данный метод позволяет достигать пиксельной точности привязки “полных” FY-2C/S-VISSR изображений.

РАССОГЛАСОВАНИЕ ОСЕЙ ДАТЧИКОВ РАДИОМЕТРА FENGYUN-2C/S-VISSR

После проведенного анализа результатов коррекции привязки изображений, которая проводилась отдельно по видимому и ИК-каналам, вы-

числение оценок коэффициентов α_i и β_i ($i = \overline{0, 1}$) выполняется согласно полученным значениям невязок в реперных точках (рассогласование между видимыми и истинными координатами на изображении) с помощью метода наименьших квадратов

яснилось, что радиометр FY-2C/S-VISSR имеет технический дефект – рассогласование оптических осей датчиков этих каналов (что также отмечено в работе (Zhang, Xu, 2005)). Эффект этого рассогласования выражается в том, что вычис-

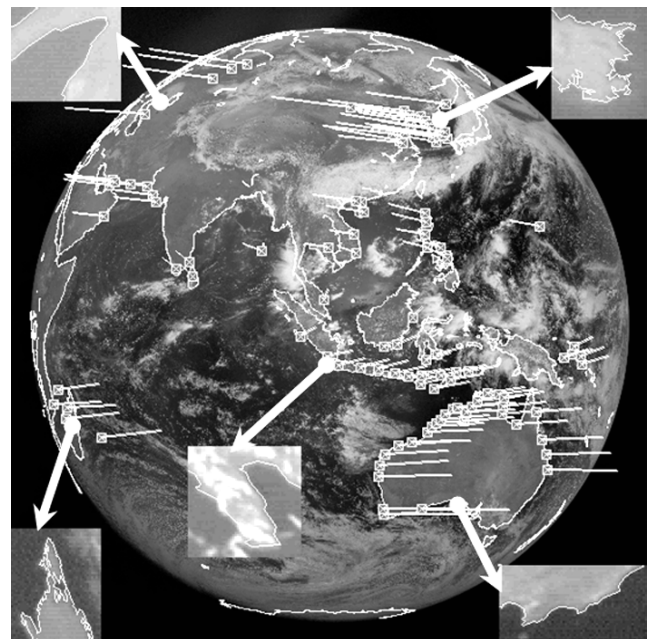


Рис. 3. FY-2C/S-VISSR изображение видимого канала (4:01 UTC 5.05.2008 г.) с наложенным эталонным береговым контуром (помечен белым тоном) после проведения процедуры вторичной коррекции привязки. Показаны рассчитанные реперные точки с векторами смещений (помечены серым и белым тоном). Вынесены пять фрагментов изображения в увеличенном масштабе (2 : 1), где эталонный береговой контур помечен белым тоном.

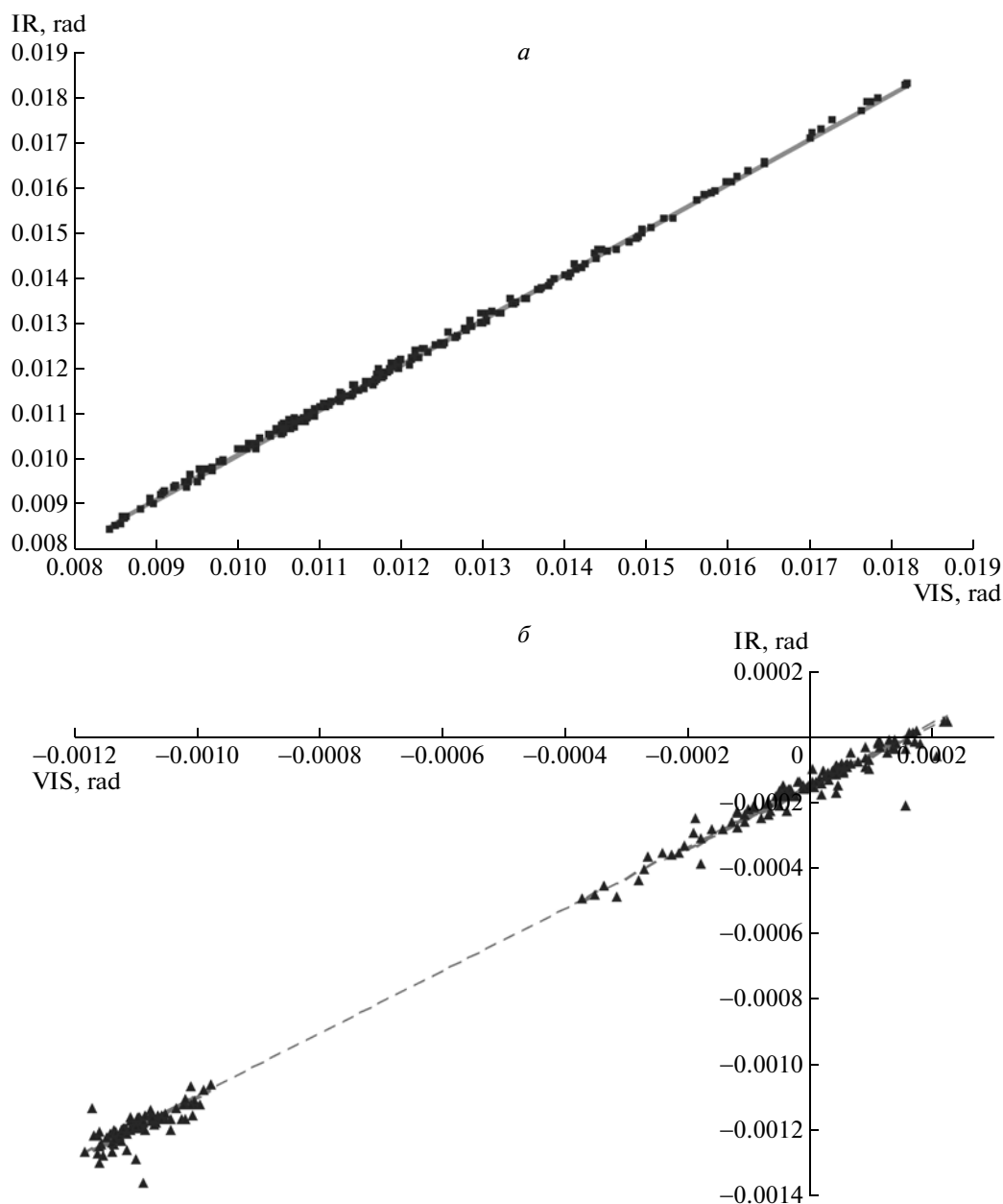


Рис. 4. Зависимость значений (в радианах) углов *roll* (а) и *pitch* (б), вычисленных для ИК-каналов, от значений углов *roll* (а) и *pitch* (б), рассчитанных для видимого канала.

ленный набор параметров коррекции по изображению видимого канала нельзя использовать без преобразования для коррекции привязки изображений ИК-каналов, и наоборот. Поэтому для совместного использования наборов параметров коррекции разных каналов (видимого и ИК) необходима процедура пересчета одного набора в другой в соответствии с геометрическими характеристиками рассогласования оптических осей датчиков радиометра.

На рис. 4а и б представлены графики зависимостей между значениями углов крена и тангажа, вычисленных по видимому и ИК каналам. Анализ графиков, представленных на рис. 4а и б, показывает, что при пересчете значений углов крена и тангажа (от набора видимого канала к набору ИК-каналов, и наоборот) достаточно использовать линейные регрессии, т.е. решение данной проблемы можно выполнить аналогичным образом, как это было проделано для японского гео-

Таблица 2. Значения коэффициентов линейных регрессий для пересчетов углов *roll* и *pitch*, вычисленных для видимого канала в углы для ИК-каналов (и наоборот). Значения стандартных ошибок расчета для каждого коэффициента

Угол положения спутниковой платформы с радиометром, <i>angle</i>	Коэффициент линейной регрессии нулевого порядка, λ_0	Коэффициент линейной регрессии первого порядка, λ_1	Стандартная ошибка для коэффициента линейной регрессии, λ_0	Стандартная ошибка для коэффициента линейной регрессии, λ_1
Для вычисления набора параметров коррекции ИК-канала по набору видимого канала				
<i>roll</i> _{IR}	0.0001097	0.9986379	0.0000276	0.0022259
<i>pitch</i> _{IR}	-0.0001452	0.9528906	0.0000031	0.0043102
Для вычисления набора параметров коррекции видимого канала по набору ИК-канала				
<i>roll</i> _{VIS}	-0.0000977	1.0003749	0.0000278	0.0022298
<i>pitch</i> _{VIS}	0.0001498	1.0451829	0.0000037	0.0047276

стационарного спутника MTSAT-1R (Катаманов, 2009).

Таким образом, пересчет значений параметров коррекции для ИК каналов в зависимости от параметров для видимого канала (и наоборот) можно выполнять следующим образом:

$$\begin{cases} angle_{IR} = angle_{VIS} \lambda_1^{IR} + \lambda_0^{IR}, \\ angle_{VIS} = angle_{IR} \lambda_1^{VIS} + \lambda_0^{VIS}, \end{cases} \quad (4)$$

где *angle*_{IR} и *angle*_{VIS} – углы положения платформы спутника с радиометром (в нашем случае, *roll* и *pitch*) для ИК- и видимого датчиков; величины λ_j^{IR} и λ_j^{VIS} ($j = 0, 1$) – коэффициенты линейных регрессий для пересчета набора параметров коррекции привязки из набора для ИК-каналов (IR) в углы коррекции привязки видимого канала (VIS) и наоборот.

Вычисление значений коэффициентов λ_j^k формулы (4) проводилось по апробированной методике, которая была использована при решении задачи согласования для осей датчиков радиометра MVISR (Алексанин и др., 2006), установленного на китайском полярно-орбитальном спутнике FengYun-1D, и для радиометра VISSR (Катаманов, 2009), установленного на японском геостационарном спутнике MTSAT-1R. В качестве набора входных данных было отобрано 150 изображений, сформированных в дневное время суток, для которых коррекция привязки была выполнена с пиксельной точностью (RMS остаточных невязок в реперных точках не более одного пиксела). Вычисление оценок значений коэффициентов λ_j^k выполнялась по методу наименьших квадратов, также была проведена проверка на неадекватность линейной модели (по критерию Фишера при уровне значимости 99%) и значимость коэффициентов линейной регрессии (при уровне значимости 99%). В табл. 2 представлены значения для коэффициентов λ_j^k , с помощью которых выполняется пересчет углов крена и тангажа согласно формуле (4).

Для некоторых задач спутникового мониторинга (расчет ветра, определение характеристик облачности, определение льда и т.п.) представляют интерес изображения видимого канала, полученные в утренние и вечерние часы. Для данного времени характерна небольшая высота солнца над горизонтом, в связи с чем большая часть диска Земли будет находиться в тени. В результате этого количество и пространственное расположение реперных точек на изображении видимого канала будет явно недостаточным для вычисления параметров коррекции привязки. Поэтому необходимо использовать параметры коррекции, вычисленные для ИК-каналов.

Для оценки точности результатов исполнения такой процедуры были проведены эксперименты для около 300 хорошо привязанных изображений (RMS модуля остаточных невязок в реперных точках не более 1.0 пиксела для ИК-каналов и 1.5 пиксела для видимого канала). Оценивались остаточные невязки в реперных точках изображений видимого канала после коррекции привязки с использованием набора параметров коррекции, вычисленных для изображений ИК-каналов, в результате чего до 50% изображений видимого канала привязывается с точностью до 2.0 пикселов и до 90% – с точностью до 3.0 пикселов. Таким образом, учитывая тот факт, что пространственное разрешение изображений ИК-каналов в 4 раза хуже, чем у изображений видимого канала, использование параметров привязки ИК-каналов решает указанную выше проблему.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ МЕТОДА КОРРЕКЦИИ ПРИВЯЗКИ

Представленный метод автоматической коррекции привязки FY-2C/S-VISSR изображений прошел апробацию на серии изображений (около 4000 шт.) за 4 мес. 2008 г. (апрель–июль). На рис. 5а представлен график зависимости значений смещений вдоль столбца (вычисленных процедурой первичной коррекции, в пикселах ИК-изображе-

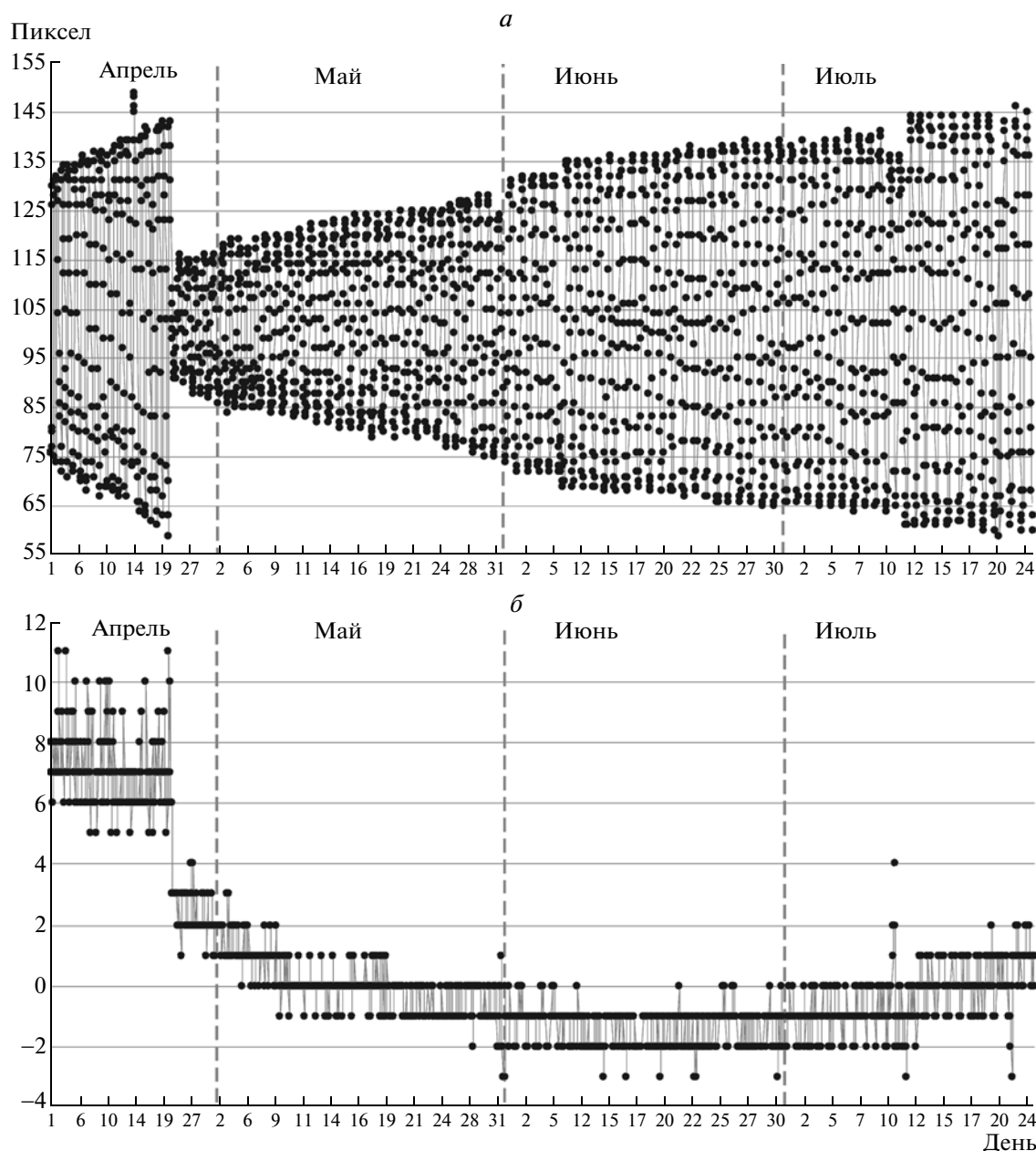


Рис. 5. Зависимость значений смещений вдоль столбца (а) и строки (б) от времени формирования изображения (день, месяц), вычисленных процедурой первичной коррекции привязки.

ний) от даты формирования изображения. Анализ представленного графика показывает, что ошибка привязки (смещение вдоль столбца изображения) подчиняется периодическому закону (интервал периода равен 24 ч). При этом наблюдается нарастание амплитуды смещений вдоль столбца. Аналогичные результаты были получены и в работах (Zhang, Xu, 2005; Lu et al., 2008). На рис. 5б представлен график зависимости значений смещений вдоль строки (вычисленных процедурой первичной коррекции, в пикселах ИК-изображений) от даты формирования изображения. На этом рисунке видно, что значения

ошибки вдоль строки постепенно, со временем, уходят в ноль и значительно не варьируются.

Анализ представленных графиков (на рис. 5а и б) показывает, что поведение ошибок привязки (вдоль столбца и строки) резко изменилось. Данное событие произошло между 21 и 25 апреля 2008 г. (с 22 по 24 апреля прием изображений со спутника FY-2С в центре не выполнялся по техническим причинам). Анализ значений орбитальных параметров положения спутника FY-2С на орбите (широта и долгота надир, высота спутника и т.п.) также свидетельствует о резком изменении пове-

дений величин этих орбитальных параметров в это же время. В результате единственным объяснением этого факта является то, что, по-видимому, в это время из центра управления полетов выполнялась коррекция положения спутника FY-2C на орбите или коррекция значений орбитальных параметров к номинальным величинам (т.е. минимизация накопившихся ошибок при расчете орбитальных параметров).

На рис. 6 приведена гистограмма количества (в процентах от общего числа) привязанных FY-2C/S-VISSR изображений ИК-каналов за каждый месяц после исполнения процедуры вторичной коррекции. Решение о правильности привязки “полного” изображения принималось по следующим критериям: количество реперных точек не менее 10, величина RMS модуля остаточных невязок в реперных точках не более 1.0 пиксела, “база по столбцу” не менее 0.1 и “база по строке” не менее 0.4. Параметры база по столбцу (база по строке) – это отношение максимальной разницы координат по столбцу (строке) GCPs на изображении к количеству пикселей в столбце (строке), т.е. они определяют пространственные характеристики размещения конфигурации GCPs на изображении. “База по столбцу” фактически не влияет на точность привязки изображения, так как точность расчета углов положения платформы (*roll*, *pitch*) по формулам (2, 3) фактически не зависит от величины этого параметра.

Результаты, приведенные на рис. 6, показывают, что наименьшее количество привязанных изображений ИК-каналов приходится на летние месяцы (аналогичный результат был получен и при привязке MTSAT-1R/VISSR изображений (Катаманов, 2009)). Это объясняется тем, что для данного времени года характерно более высокое содержание влажности в атмосфере (тайфуны, туманы и т.п.), в результате чего на изображениях меньше участков суша/вода открытых от облачности и значительно хуже контраст на границе суша/вода.

Результаты привязки FY-2C/S-VISSR изображений несколько хуже, чем аналогичные полученные результаты для MTSAT-1R/VISSR изображений (Катаманов, 2009). Данный факт вызван следующими факторами. В результате отсутствия данных ближнего ИК-канала (прием со спутника FY-2C в центре выполнялся на станцию, которая обеспечивала прием только в формате S-VISSR (CMA 2004)) число “правильных” реперных точек для ИК-изображений практически вдвое меньше, чем могло бы быть. Из-за невозможности исполнять фильтрацию облачности на изображениях перед расчетом GCPs (значения коэффициентов калибровочных таблиц для FY-2C/S-VISSR данных являются некорректными (Zhang, Xu, 2005)) количество “правильных” реперных точек также

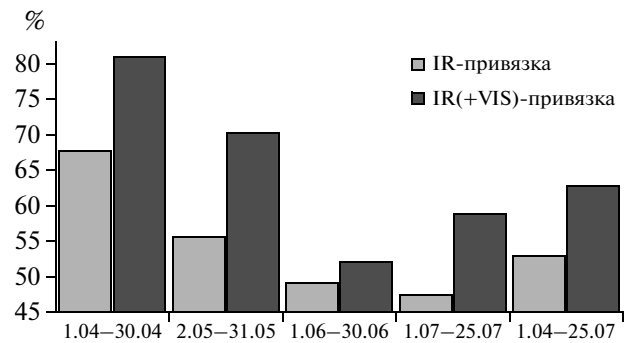


Рис. 6. Количество привязанных ИК-изображений (в процентах от общего числа) с апреля по июль 2008 г. Гистограмма “IR-привязка” – это количество привязанных ИК-изображений только с помощью реперных точек (рассчитанных по ИК-изображениям). Гистограмма “IR(+VIS)-привязка” – это количество привязанных ИК-изображений с помощью реперных точек (рассчитанных по ИК-изображениям) и с помощью набора параметров коррекции, вычисленного для изображений видимого канала.

значительно уменьшилось как для ИК-каналов, так и для видимого канала. В свою очередь, данный факт является подтверждением исполнения с высокими показателями процедуры автоматического расчета реперных точек на изображениях даже при таких условиях.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕДУРЫ ПЕРВИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ

В тех случаях, когда выполнение метода коррекции не обеспечивает пиксельную точность привязки изображения, необходимо выполнять прогнозирование параметров коррекции привязки. Для спутника FY-2C было проведено исследование возможности прогнозирования параметров как первичной, так и вторичной процедур коррекции привязки. Прогноз для первичной коррекции является актуальным в тех случаях, когда изображение не содержит полный диск Земли или имеет пропущенные кадры (строки). Ниже представлены разработанные схемы прогнозирования для параметров первичной процедуры коррекции привязки и обсуждаются результаты апробации на четырехмесячной серии изображений.

Анализ представленного графика на рис. 5а показывает, что ошибка привязки (смещение вдоль столбца изображения) подчиняется периодическому закону (интервал периода равен 1 сут). При этом наблюдается постепенное нарастание амплитуды значений смещения вдоль столбца. Используя первый факт (т.е. без учета нарастания амплитуды колебания), можно использовать сле-

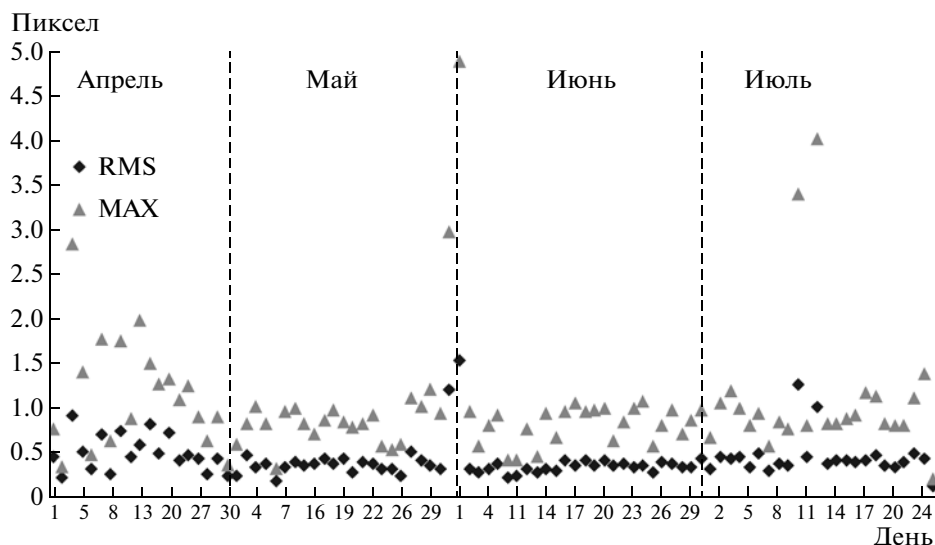


Рис. 7. Значения RMS и максимумов (MAX) остаточных ошибок при вычислении параметров ($K_i, i = \overline{0, 2}$) формулы (5) с помощью метода минимизации для каждого дня (с 1 апреля по 25 июля 2008 г.).

дующую модель для расчета данной ошибки в течение суток:

$$dY_{24} = K_0 + K_1 \cdot \sin \frac{2\pi \cdot (h + K_2)}{24}, \quad (5)$$

где dY_{24} — функция тренда (прогнозируемый параметр смещения вдоль столбца); h — время формирования изображения (в часах); K_0 — смещение синусоиды относительно нуля; K_1 — постоянная составляющая амплитуды синусоиды; K_2 — начальная фаза колебания. Индекс 24 указывает на выбранный нами период изменения функции тренда (24 ч).

По всей выборке FY-2C/S-VISSR изображений (с 1 апреля по 25 июня 2008 г.) для каждого дня были рассчитаны параметры ($K_i, i = \overline{0, 2}$) формулы (5) с помощью метода минимизации (использовался “метод Nelder-Mead”). На рис. 7 представлены графики значений RMS и максимумов остаточных ошибок результатов вычисления данных параметров для каждого дня. Анализ графиков на рис. 7 показывает, что значения остаточных ошибок за сутки практически во всех случаях составляет для RMS не больше 1.0 пикселя, для максимума — не больше 1.5 пикселя. Таким образом, ошибка расчета смещения вдоль столбца по формуле (5) в течение суток является вполне удовлетворительной и лежит в пределах погрешности расчета для процедуры первичной коррекции привязки.

На рис. 8а, б и в представлены графики реальных значений (отмечены символом “треугольник”) параметров ($K_i, i = \overline{0, 2}$) формулы (5), которые были рассчитаны для каждого дня (с 1 апреля

по 25 июня 2008 г.). Анализ данных графиков показывает, что зависимость значений параметров ($K_i, i = \overline{0, 2}$) от дня формирования изображения вполне хорошо описывается линейной моделью

$$K_i = \gamma_i^0 + d \cdot \gamma_i^1, \quad (6)$$

где $K_i, i = \overline{0, 2}$ — параметры из формулы (5); d — день формирования изображения; γ_i^j ($i = \overline{0, 2}; j = \overline{0, 1}$) — коэффициенты линейных регрессий.

На рис. 8а, б и в представлены также графики модельных значений (отмечены символом “точка”) параметров ($K_i, i = \overline{0, 2}$), которые были рассчитаны для каждого дня (с 1 апреля по 25 июня 2008 г.) согласно формуле (6). В табл. 3 приведены значения коэффициентов линейных регрессий формулы (6) для каждого параметра ($K_i, i = \overline{0, 2}$) формулы (5), которые были вычислены по реальным данным с 26 апреля по 25 июня 2008 г. с помощью метода наименьших квадратов. Также в табл. 3 приведены значения стандартных ошибок (RMS) и значения коэффициента детерминации (R^2) для каждого коэффициента линейной регрессии. Результат сравнения фактических величин каждого коэффициента детерминации ($R^2 > 0.95$) указывает на то, что выбранная нами модель (см. (6)) очень хорошо описывает зависимость значений параметров формулы (5) от дня формирования изображения. Также была проведена проверка на адекватность линейной модели для каждого параметра ($K_i, i = \overline{1, 2}$) и на значимость коэффициентов первого порядка для ли-

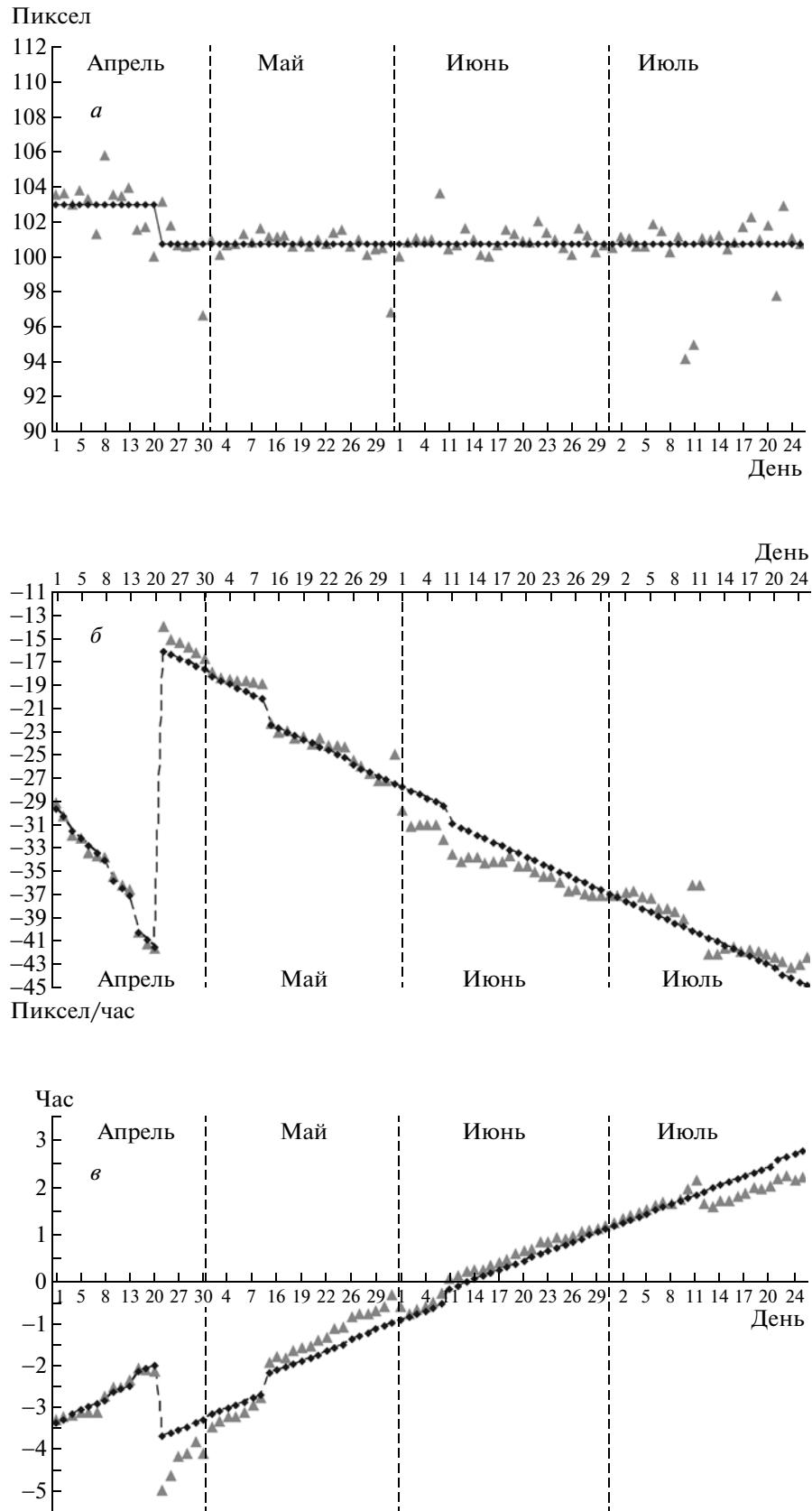


Рис. 8. Зависимость реальных и прогнозных значений коэффициентов K_0 (а), K_1 (б) и K_2 (в) от даты формирования изображения, которые были вычислены по всем данным с 1 апреля по 25 июля 2008 г.

Таблица 3. Значения коэффициентов линейных регрессий (см. формулу (6)) для каждого параметра ($K_i, i = \overline{0,2}$) формулы (5), которые были вычислены по реальным данным (с 26 апреля по 25 июня 2008 г.). Значения стандартных ошибок для каждого коэффициента и фактические величины коэффициента детерминации

Параметр	Коэффициент линейной регрессии нулевого порядка, γ_i^0	Коэффициент линейной регрессии первого порядка, γ_i^1	Стандартная ошибка (RMS) для коэффициента $-\gamma_i^0$	Стандартная ошибка (RMS) для коэффициента $-\gamma_i^1$	Коэффициент детерминации, R^2
Смещение синусоиды, K_0	101.915825	0.0	0.515044	—	—
Постоянная составляющая амплитуды, K_1	-14.098653	-0.333281	0.362276	0.006507	0.971489
Начальная фаза колебания, K_2	-3.740406	0.075245	0.091357	0.001641	0.964679

нейных регрессий с вероятностью, равной 99% для обеих проверок.

Таким образом, на основании приведенных выше результатов прогнозирование значений угла *roll*, вычисляемого процедурой первичной коррекции, можно выполнять с помощью расчета параметров формул (5), (6).

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕДУРЫ ВТОРИЧНОЙ КОРРЕКЦИИ

Прогнозирование для вторичной коррекции актуально в случае невозможности рассчитать достаточную конфигурацию реперных точек на изображении (недостаточное количество GCPs или пространственное размещение GCPs не позволяет восстановить полный набор параметров коррекции). Проведенный анализ зависимости значений коэффициентов линейных регрессий (3) от времени, показал, что поведение уточняющих значений углов положения спутниковой платформы с радиометром (крена и тангажа) значи-

тельно не меняется. Поэтому для спутника FY-2C при прогнозировании параметров процедуры вторичной коррекции привязки был выбран простой перенос значений коэффициентов линейных регрессий ($\alpha_i, \beta_i, i = \overline{0,1}$) формулы (3) с ближайшего по времени “правильно” привязанного изображения (с пиксельной точностью), т.е. аналогичным образом, как это было сделано для японского геостационарного спутника MTSAT-1R (Катаманов, 2009).

Эффективность такого прогноза для ИК-изображений проверялась указанным ниже способом. Были отобраны изображения со следующими критериями по конфигурации реперных точек: количество реперных точек не менее 10, величина RMS и максимума остаточных невязок в реперных точках не более 1.0 пиксела, база по столбцу не менее 0.3 и база по строке не менее 0.5 — и анализировались RMS остаточных невязок в реперных точках на изображении после проведения коррекции привязки с использованием прогнозного набора параметров коррекции. Результаты экспериментов показали (см. рис. 9), что до 68% изображений ИК-каналов можно привязывать с точностью 1.0 пиксел и до 95% с точностью 2.0 пиксела. При этом точность привязки изображения с использованием прогнозного набора параметров коррекции (вычисленного для другого изображения) тем лучше, чем меньше разница по времени между формированием этих изображений.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов по исследованию эффективности применения разработанных схем для прогнозирования коррекции привязки (первичной и вторичной процедур) показали, что поведение углов платформы спутника FY-2C с радиометром S-VISSR во времени выглядит следующим образом: значения угла *roll* изменяются по синусоиде с нарастающей амплитудой (с периодом равным 1 сут), а значения угла *pitch* в течение трех суток (до 70 ч) значительно не варьируются.

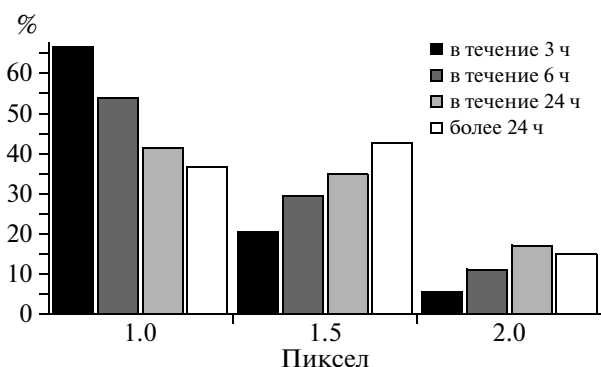


Рис. 9. Гистограмма (в процентах) распределения величин RMS остаточных невязок в реперных точках после привязки изображений ИК-каналов с помощью прогнозных наборов параметров коррекции, вычисленных для изображений с соседних сеансов приема (полученных раньше от 0.5 до 70 ч).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке автоматического метода коррекции географической привязки FY-2C/S-VISSR изображений был использован алгоритм привязки, разработанный в Японском метеорологическом агентстве для данных геостационарных спутников серии GMS и MTSAT-1R, получаемых в режимах S-VISSR и HiRID (Kigawa, 1991). Результаты привязки изображений этим алгоритмом показали, что ошибка географической привязки может достигать колоссальных размеров (300–800 км). Основными источниками ошибок привязки является неточность определения некоторых параметров положения спутника на орбите и ориентации платформы с радиометром в пространстве. Поэтому для достижения пиксельной точности географической привязки изображений геостационарного спутника FY-2C необходимо использовать автоматический метод коррекции привязки, который разделен на два этапа: первичная и вторичная процедуры коррекции.

Процедура первичной коррекции привязки на основе морфологического анализа определяет границы диска Земли на изображении и выполняет его совмещение с модельным диском Земли (построенным по модели привязки) в результате чего минимизируется ошибка привязки в надире. Процедура вторичной коррекции привязки автоматически рассчитывает реперные точки по всему изображению, в результате чего устраняет остаточные ошибки привязки по всему изображению. Коррекция привязки на основе параметров, рассчитанных этими двумя процедурами, выполняется вычислением оптимальных значений для двух углов положения платформы спутника с радиометром (*roll* и *pitch*) согласно формулам (2), (3). Такой подход к коррекции географической привязки “полных” FY-2C/S-VISSR изображений (сформированных в течение всего сеанса приема) обеспечивает достижение пиксельной точности привязки.

Установленный на геостационарном спутнике FY-2C радиометр S-VISSR имеет рассогласование оптических осей датчиков видимого и ИК каналов, в результате чего при использовании вычисленного набора параметров коррекции видимого канала для коррекции привязки ИК-каналов (и наоборот) пиксельная точность привязки не обеспечивается. Для решения этой проблемы достаточно выполнять линейные преобразования углов положения платформы спутника (крена и тангажа) согласно формуле (4). При использовании набора параметров коррекции, вычисленного для ИК-каналов, для привязки изображений видимого канала до 50% изображений привязывается с точностью в 2.0 пиксела и до 90% привязывается с точностью до 3.0 пикселов.

Апробация автоматического метода коррекции географической привязки для серии FY-2C/S-VISSR изображений за четыре месяца (апрель-июль) 2008 г. в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды ДВО РАН показала, что эффективность использования метода в условиях оперативной обработки спутниковых данных является вполне высокой. В среднем за четыре месяца привязано около 63% изображений (с учетом отсутствия процедуры фильтрации облачности). В тех случаях, когда нет возможности вычислить набор параметров коррекции привязки, необходимо использовать прогнозирование параметров коррекции, используя ранее полученные привязанные изображения с пиксельной точностью.

Исследование возможности прогнозирования для параметров первичной коррекции привязки показало, что прогнозирование значений смещения вдоль столбца (что эквивалентно углу крена) можно выполнять согласно формулам (5), (6). Прогнозирование параметров вторичной коррекции привязки выполняется на основе простого переноса значений коэффициентов линейных регрессий для расчета углов платформы спутника (см. (3)) с ближайшего по времени принятого изображения, привязанного с пиксельной точностью. Такая схема прогноза коррекции привязки позволяет перепривязывать ИК-изображения в 88% случаев с точностью 1.5 пиксела и до 95% с точностью 2.0 пиксела.

Единственным объяснением резкого изменения значений ошибок географической привязки (и некоторых орбитальных параметров) во времени, которое произошло между 21 и 25 апреля 2008 г., является то, что в это время из центра управления полетов выполнялась коррекция положения спутника FY-2C на орбите или минимизация накопившихся ошибок в орбитальных параметрах движения спутника. Поведение углов положения платформы спутника FY-2C во времени выглядит следующим образом: значения угла *roll* изменяются по синусоиде с нарастающей амплитудой (с периодом, равным одним суткам), а значения угла *pitch* в течение трех суток (до 70 ч) значительно не варьируются.

Представленный метод коррекции географической привязки полных FY-2C/S-VISSR изображений достигает пиксельной точности привязки целиком в автоматическом режиме, что так необходимо при решении многих задач спутникового мониторинга. Метод может быть применен для обработки данных других геостационарных спутников, формирующих изображения в видимом и ИК-диапазонах. В частности, что касается всех китайских геостационарных спутников серии FengYun-2, то: на данный момент времени еще один спутник этой серии – FengYun-2D – нахо-

дится в оперативном режиме (85° в.д.), другой – FengYun-2E – в ближайшее время заменит FengYun-2C, и завершит серию запуск спутника FengYun-2F.

Работа поддержана грантами РФФИ: № 08-07-00227, № 09-01-98519-р_восток_а; и грантом ДВО РАН: № 09-III-B-03-078.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрин А.И., Дьяков С.Е., Катаманов С.Н., Наумкин Ю.В.* Технология обработки данных полярно-орбитальных спутников FY-1C/1D для мониторинга физических полей океана // Подводные исследования и робототехника. 2006. № 2. С. 82–91. http://www.im-tp.fébras.ru/images/stories/journal/2/82_91.pdf
- Александрин А.И., Катаманов С.Н.* Автоматическая привязка спутниковых изображений AVHRR/NOAA при сложных условиях наблюдения // Сб. статей III всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” / Под ред. Н.П. Лаверова. М.: Азбука-2000, 2006. Вып. 3. Т. 1. С. 41. <http://www.iki.rssi.ru/earth/articles06/vol1-041-048.pdf>
- Катаманов С.Н.* Автоматический метод коррекции географической привязки MTSAT-1R/VISSR изображений с пиксельной точностью // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 3. С. 55–66.
- Катаманов С.Н., Десяткова О.Я.* Автоматическая привязка изображений геостационарного спутника FengYun-2C // Сб. статей VI всероссийской открытой конференции “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” / Под ред. Н.П. Лаверова, М.: Азбука-2000, 2009. Вып. 6. Т. 1. С. 181–188. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,1/181-188.pdf
- Carr J.L., Harris J., Chu D.* A long-term characterization of GOES I-M attitude errors // Proc. 2001 Flight Mechanics Symp. NASA/GSFC. June 2001. Greenbelt, Maryland, USA.
- China Meteorological Administration. FY-2C/D/E S-VISSR Data Transmission. Beijing, China, September 2004. Vers. 2.0. <http://www.bom.gov.au/sat/MTSAT/FY2VISSR2.0.pdf>
- Kigawa S.* A Mapping Method for VISSR Data // Meteorol. Satellite Center Techn. Note. Japan, 1991. № 23. P. 15–34.
- Lu F., Menzel W.P. et al.* Attempts to improve GOES image navigation // Proc. 8-th Int. Winds Workshop. April 2006. Beijing, China. P. 47. http://www.eumetsatint/groups/cps/documents/document/pdf_conf_p47_s4_01_feng_v.pdf
- Lu F., Zhang X., Xu J.* Image Navigation for the FY2 Geosynchronous Meteorological Satellite // J. Atm. Ocean. Tech. 2008. V. 25. № 7. P. 1149–1165.
- Xu J., Lu F., Zhang Q.S.* Automatic navigation of FY-2 geosynchronous meteorological satellite images // Proc. 6th Int. Winds Workshop. May 2002. Madison, Wisconsin, USA. P. 291. <http://www.crisp.nus.edu.sg/~acrs2001/pdf/351XU.pdf>
- Wessel P., Smith W.H.F.* A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. № B4. P. 8741–8743. http://www.soest.hawaii.edu/pwessel/papers/1996/JGR_96/jgr_96.html
- Zhang P., Xu J.* FengYun 2C and It's Application // Proc. Symp. Satellite Meteorology: Past, Present and Future in Celebration of CIMSS's Silver Anniversary. July 2005. Madison, Wisconsin, USA. http://cimss.ssec.wisc.edu/cimss25th/presentations/CIMSS_Silver_pengz_2005.pdf

Automatic Correction Navigation Method of FengYun-2 Geosynchronous Meteorological Satellite Imagery with Pixel Accuracy

S. N. Katamanov

Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok

In this paper an automatic navigation method of one pixel accuracy for “full” images received during one session of S-VISSR2.0 data broadcast is presented. The navigation method is divided into two stages: primary and secondary correction procedures. Primary correction procedure is eliminated the “basic” navigation error by definition of true nadir of the Earth disk on the image. Secondary correction procedure is eliminated residual errors of under image by an automatic calculation of ground control points (GCPs). The method is based on the computation of satellite 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 4-month data set (for 2008) received in the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of FEB RAS are presented.

Keywords: FY-2 image, automatic correction navigation method, ground control points, pixel accuracy, satellite attitude angles (roll, pitch and yaw), navigation attitude forecasting