

Результаты географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 2

С. Н. Катаманов¹, В. А. Качур^{1,2}

¹ *Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru*

² *Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, 690950, Россия*

Представлены результаты исследований, проведённых при разработке автоматического метода географической привязки изображений, полученных радиометром МСУ-МР с российского спутника «Метеор-М» № 2 в течение полного сеанса приёма. Метод основан на орбитальной модели движения SGP4 (с прогнозными телеграммами NORAD TLE) в сочетании с математической моделью формирования изображения, которая достаточно точно учитывает все аспекты работы сканера. Пиксельная точность привязки каждого изображения достигается вычислением оптимальных значений углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье) по автоматически рассчитанным реперным точкам или прогнозированием. Вычислены и приведены оценки углов пространственного рассогласования между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра МСУ-МР относительно базовых каналов. При прогнозировании привязки выполняется перенос значений одного или нескольких углов ориентации спутниковой платформы, вычисленных по реперным точкам на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты с одинаковым направлением. Приведены и обсуждаются результаты апробации разработанного метода привязки на длительной серии данных МСУ-МР, полученных с 2014 по 2017 г. в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН. По веб-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно непосредственно оценить результаты автоматической привязки данных МСУ-МР.

Ключевые слова: «Метеор-М», МСУ-МР, спутниковые изображения, географическая и межканальная привязка, реперные точки, углы ориентации спутниковой платформы, прогноз привязки, близлежащие витки орбиты

Одобрена к печати: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-9-18

Введение

Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), установленное на российском спутнике «Метеор-М» № 2, предназначено для широкозахватной (не менее 2950 км) трассовой съёмки с получением изображений облачности и земной поверхности в видимом и инфракрасном (ИК) участках спектра с пространственным разрешением не хуже 1 км в надире (Акимов и др., 2015). Данные измерений МСУ-МР можно использовать для получения следующей информационной продукции (как регионального, так и глобального покрытия): карты температуры подстилающей поверхности; оценки параметров облачности и осадков; данные мониторинга атмосферных явлений и пожаров; карты и параметры растительного, снежного и ледового покровов. Открытый доступ к данным МСУ-МР и бесперебойная работа спутника «Метеор-М» № 2 (который был запущен 8 июля 2014 г.) в режиме штатной эксплуатации на протяжении более трёх лет не привели к широкому использованию этих данных в практике дистанционного зондирования. Это было связано в первую очередь с трудностью организации первичной обработки данных, а именно с отсутствием корректных процедур калибровки (пересчёт отсчётов радиометра к геофизическим величинам) (Алексанин, Дьяков, 2015; Филей и др., 2016) и невозможностью получения точной

географической привязки изображений стандартными методами. Последнее ограничение, в свою очередь, затрудняло применение регрессионных методик на основе *in situ* и/или спутниковых измерений для создания соответствующих технологий получения информационных продуктов по данным МСУ-МР.

Данная работа посвящена разработке и апробации автоматического метода точной географической привязки изображений МСУ-МР, получаемых со спутника «Метеор-М» № 2 (далее МСУ-МР № 2). В рамках исследования рассмотрены следующие проблемы, связанные с обработкой данных МСУ-МР № 2. Первая проблема заключается в том, что номинальная величина угла поля зрения (Field Of View, FOV) для радиометра МСУ-МР, установленного на ИСЗ «Метеор-М» № 2, не соответствует заявленной в документации. В результате использование заявленной величины FOV для радиометра МСУ-МР № 2 приводит к тому, что ошибка привязки увеличивается от надира к краям изображения и достигает около 2 пикселей. Другая проблема состоит в рассогласовании оптических осей датчиков отдельных каналов, вследствие чего суммарные изображения одного сеанса выглядят по-разному для различных каналов (т. е. они не могут быть совмещены простым наложением изображений одного канала на изображения других каналов). Для некоторых пар каналов рассогласования достигают 2–6 пикселей. Это, в свою очередь, приводит к тому, что при коррекции привязки изображений по реперным точкам (Ground Control Points, GCPs) необходимо для каждого канала рассчитывать свой набор реперных точек. В работе (Еремеев и др., 2014) вышеозначенные проблемы для радиометра МСУ-МР, установленного на ИСЗ «Метеор-М» № 2, были также указаны, но каких-либо оценок не приводилось. Также одной из основных проблем получения точной привязки данных МСУ-МР № 2 являются изображения с неудачной конфигурацией реперных точек или полным их отсутствием (сплошная облачность, открытые морские акватории и т. д.). Привязку данных такого рода с необходимой точностью можно выполнить только прогнозированием параметров коррекции привязки, т. е. используя результаты успешной привязки изображений (сформированных ранее) по реперным точкам.

Используемые методы и данные

При разработке метода географической привязки данных МСУ-МР № 2 использован подход, который был ранее применён для изображений других полярно-орбитальных ИСЗ (Катаманов, 2014, 2015, 2016). Суть подхода состоит в моделировании всех основных аспектов формирования изображения радиометром на орбите. Для предсказания положения ИСЗ «Метеор-М» № 2 на орбите используется широко известная модель орбитального движения SGP4 (Vallado et al., 2006) в сочетании с прогнозными телеграммами NORAD TLE. Сканирующая система радиометра МСУ-МР № 2 (Акимов и др., 2015) относится к типу *cross-track* и практически полностью по всем основным параметрам соответствует радиометру AVHRR. Частота сканирования МСУ-МР № 2 составляет 6,5 строк в секунду. Полная длина строки изображений МСУ-МР № 2 составляет 1572 пиксела. Заявленный в документации полный угол раствора сканера МСУ-МР, установленного на ИСЗ «Метеор-М» № 2, является некорректным. Уточнение номинальной величины угла FOV для радиометра МСУ-МР № 2 было выполнено с помощью метода реперных точек — таким же образом, как для спутников серии MetOp (Катаманов, 2015). В итоге уточнённая величина угла поля зрения радиометра МСУ-МР № 2 составила $110,3^\circ$ (угловой размер пиксела равен $1,2$ мрад).

Для достижения пиксельной точности привязки данных МСУ-МР № 2 в разработанном методе используется процедура коррекции, которая вычисляет оптимальные значения углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве по реперным точкам. Для расчёта истинных положений реперных точек используется метод, который был ранее разработан и апробирован для изображений других полярно-орбитальных ИСЗ (Катаманов, 2014, 2015, 2016). Полное описание используемого метода автоматической привязки приведено в работе (Катаманов, 2016).

Пространственное рассогласование каналов

Проблема пространственного рассогласования изображений отдельных каналов радиометра МСУ-МР № 2 была решена таким же образом, как для спутника «Метеор-М» № 1 (Катаманов, 2014). Были выбраны базовые каналы для ИК (5) и видимого (2) спектральных диапазонов, относительно которых для остальных каналов вычислялись три угла поворота: крен, тангаж и рысканье. Для оценки величин углов использовался метод реперных точек. Для этого были рассчитаны реперные точки по изображениям каждого канала относительно эталонной цифровой карты (Wessel, Smith, 1996). Далее невязки в наборах реперных точек для каждого изображения были пересчитаны относительно базовых каналов, т. е. вычитались соответствующие невязки по строке и столбцу изображения (Катаманов, 2014). После чего с помощью метода наименьших квадратов по относительным невязкам в реперных точках были вычислены оценки трёх углов поворота для каждого изображения. Для этого использовался подход, предложенный в работе (Rosborough et al., 1994), с помощью которого решение последней задачи сводится к системе линейных уравнений. Для расчётов была использована длительная серия данных МСУ-МР № 2, сформированных с октября 2014 г. по май 2017 г. (всего 4070 сеансов). Вычисленные наборы углов были отобраны согласно условиям, которым удовлетворяла искомая конфигурация реперных точек на каждом изображении: количество точек не меньше 50 шт., величина «база по строке» не меньше 0,8 и значения RMS (Root Mean Square) и максимума модуля остаточных невязок в реперных точках не более 1,0 и 1,5 пиксела соответственно. Параметр «база по строке» («база по столбцу») — это отношение максимальной разницы координат реперных точек вдоль строки (столбца) на изображении к количеству пикселей в строке (столбце), т. е. он определяет пространственные характеристики конфигурации точек на изображении.

Проведённый анализ временных рядов, состоящих из рассчитанных величин углов для каждого сеанса, показал, что для всех каналов каких-либо существенных тенденций к изменению в течение выбранного периода времени не наблюдалось. Только для величин угла крена между каналами 5-го и 6-го (ИК) спектральных диапазонов наблюдалось чёткое разделение на две группы, у которых разница между средними значениями составила около 0,35 мрад. На *рис. 1* (см. с. 12) приведены графики вычисленных значений (в мрад) угла крена пространственного рассогласования между оптическими осями 5-го и 6-го (ИК) каналов в зависимости от времени (месяц и год) формирования изображений. На рисунке видно, что большей части значений каждой из групп соответствуют разные типы витков орбиты. Зависимость от типа витка, возможно, связана с тем, что съёмка на нисходящих витках происходит при солнечном освещении, а на восходящих витках — без него. Одной из причин такого разделения может являться наличие «размытости» пиксела на изображениях 6-го ИК-канала радиометра МСУ-МР № 2. В *табл. 1* приведены вычисленные оценки средних значений (в миллирадианах) углов для отдельных каналов радиометра МСУ-МР № 2 относительно базовых каналов.

Таблица 1. Углы пространственного рассогласования между каналами радиометра МСУ-МР спутника «Метеор-М» № 2

№ канала (спектральный диапазон, мкм)	Углы относительно 2-го канала			Углы относительно 5-го канала		
	Крен, мрад	Тангаж, мрад	Рысканье, мрад	Крен, мрад	Тангаж, мрад	Рысканье, мрад
1 (0,5–0,7)	–0,002968	–1,486596	0,045527	3,65393	–5,79217	0,49398
2 (0,7–1,1)	—	—	—	3,669598	–4,424163	0,228589
3 (1,6–1,8)	–0,4005	0,535455	–0,039142	3,234001	–3,884207	0,162617
4 (3,5–4,1)	–0,011789	3,737444	–0,48814	3,794892	–0,312878	0,013464
5 (10,5–11,5)	–3,663983	4,458691	–0,11974	—	—	—
6 (11,5–12,5)	–0,169798	6,1855	–0,352546	3,473053	1,892143	–0,087252

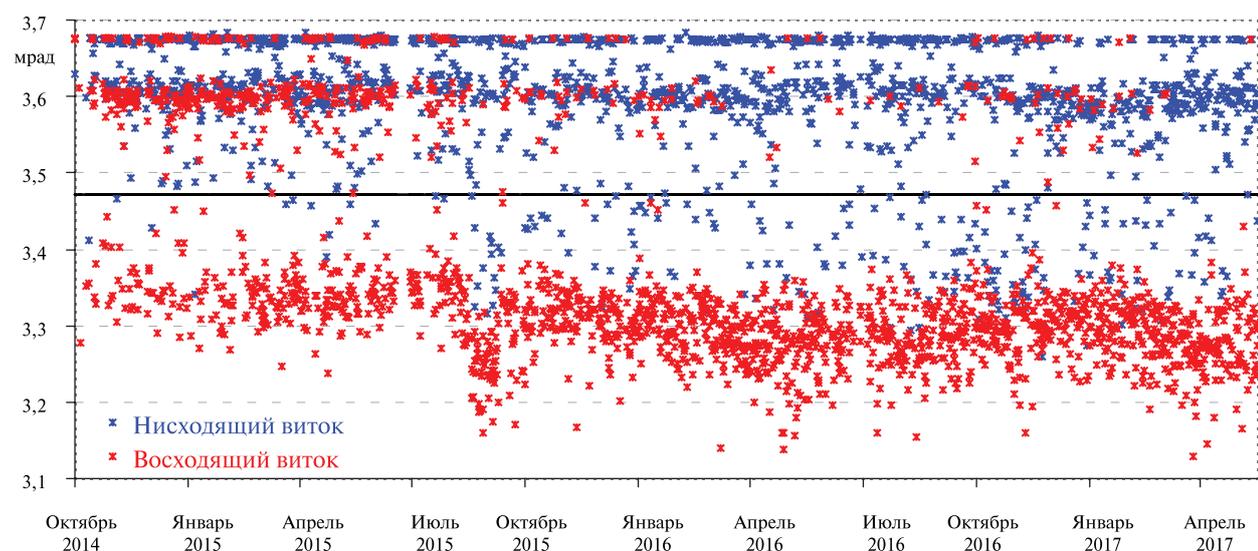


Рис. 1. Значения угла крена пространственного рассогласования между оптическими осями 5-го и 6-го каналов

Прогнозирование параметров коррекции привязки

При выборе подхода для прогноза параметров коррекции привязки было проанализировано поведение вычисленных углов положения платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 в зависимости от времени формирования изображений, направления и расположения трасс витков орбиты на поверхности Земли. Были вычислены углы по реперным точкам для той же серии изображений МСУ-МР № 2 (см. выше). Анализировались только наборы значений углов, которые были отобраны согласно условиям, приведённым в предыдущем разделе. Проведённый анализ позволил выявить следующие особенности поведения и зависимости вычисленных углов. Во-первых, для всех углов наблюдалось разделение вычисленных значений на две группы по типу витков орбиты (восходящие и нисходящие), на которых были сформированы изображения. Во-вторых, для всех углов была выявлена зависимость от долготы ближайших узлов витков орбиты, что эквивалентно расположению трасс витков орбиты на поверхности Земли. Аналогичный результат был ранее получен и для ИСЗ серии NOAA и MetOp (Катаманов, 2015, 2016).

На рис. 2 (см. с. 13) приведены графики вычисленных значений углов крена и тангажа ориентации платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 в зависимости от долготы ближайших узлов витков орбиты. На рис. 3 (см. с. 13) приведены графики вычисленных значений угла рысканья ориентации платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 в зависимости от времени формирования изображения. На рис. 2 и 3 хорошо видно, что характер поведения значений углов тангажа и рысканья резко изменился после 07.08.2015. При этом поведение значений угла рысканья стало более стабильным, за исключением нескольких непродолжительных периодов времени, в течение которых наблюдались существенные выбросы значений (см. рис. 3). В данные периоды времени также наблюдались выбросы значений (только меньшие по амплитуде) углов крена и тангажа (см. рис. 2). Возможно, в такие периоды выполнялась коррекция орбиты спутника и/или менялись режимы стабилизации ориентации платформы ИСЗ.

Таким образом, исходя из полученных результатов, было предложено при прогнозировании параметров коррекции привязки выполнять перенос вычисленных значений одного или нескольких углов по реперным точкам изображений, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением). В качестве меры, определяющей пространственное рассогласование трасс витков орбиты на поверхности Земли, использовалась величина абсолютной разницы долгот ближайших узлов орбиты. При поиске максимальный порог для разницы по времени между изображениями был установлен в 45 сут.

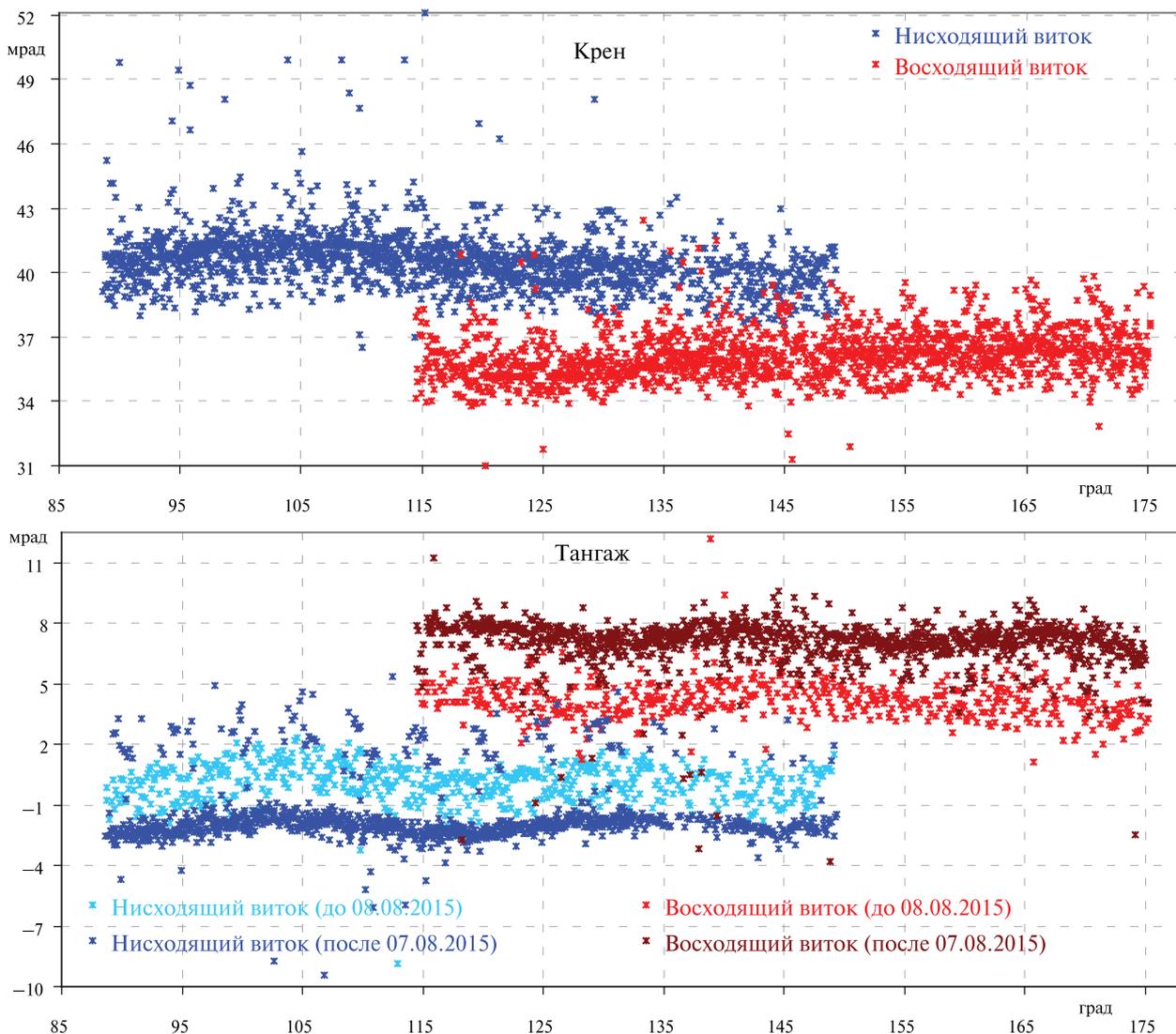


Рис. 2. Значения углов крена и тангажа положения платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 в зависимости от долготы ближайших узлов витков орбиты

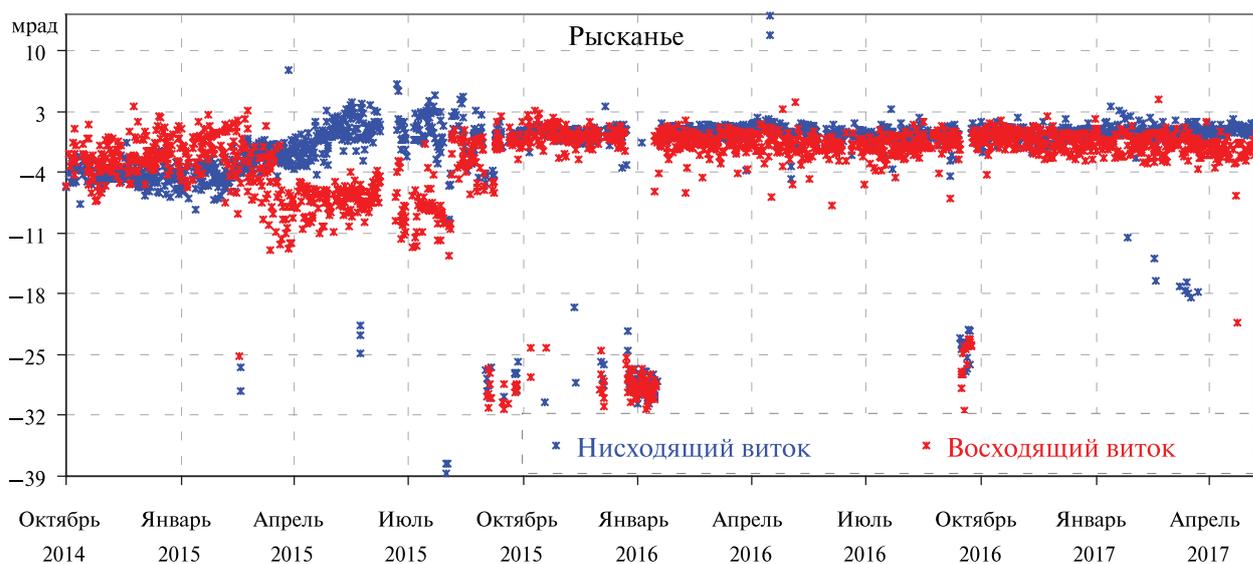


Рис. 3. Значения угла рысканья положения платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 в зависимости от времени формирования изображения

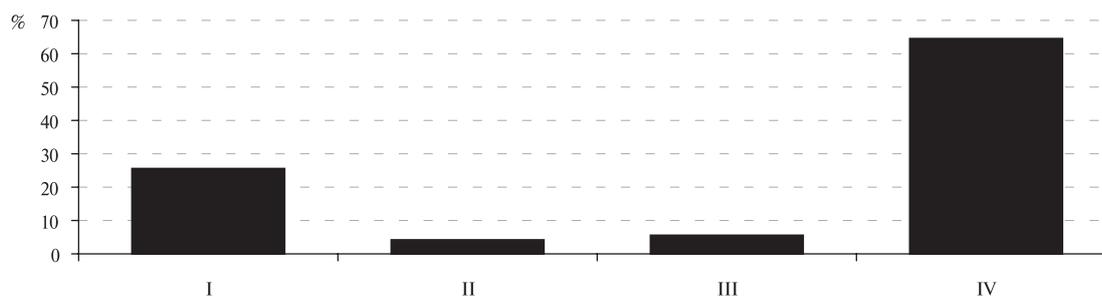


Рис. 4. Распределение количества привязанных изображений МСУ-МР № 2 в зависимости от способа прогнозирования

Значения углов, для которых перенос не выполнялся, вычислялись по реперным точкам с помощью подхода, описанного в работе (Rosborough et al., 1994). При этом сначала параметры реперных точек пересчитывались с учётом значений перенесённых углов. Далее для вышеуказанной серии данных была выполнена апробация предложенного подхода прогноза. То есть для непривязанных изображений, согласно критерию оценки точности привязки по реперным точкам (Катаманов, 2016), выполнялась прогнозная привязка по вышеописанной схеме.

При апробации были использованы следующие способы прогнозирования углов: 1) перенос угла рысканья; 2) перенос угла тангажа; 3) перенос углов крена и тангажа; 4) перенос всех углов. При прогнозной привязке использовался тот способ прогноза, который имел самые высокие показатели согласно критерию оценки точности привязки по реперным точкам (Катаманов, 2016). Выбор такого подхода был вызван следующими основными факторами. Во-первых, тем, что поведение значений угла рысканья до 08.08.2015 было крайне нестабильным (как во времени, так и в зависимости от расположения трасс витков орбиты). Во-вторых, тем, что присутствовали периоды времени, когда наблюдались выбросы значений углов (существенно превосходящие по амплитуде основной тренд). На рис. 4 приведена гистограмма распределения количества изображений МСУ-МР № 2 с прогнозной привязкой в зависимости от выбранного способа прогнозирования. Из анализа данной гистограммы следует, что в случае ИСЗ «Метеор-М» № 2 высокую эффективность имели только два способа прогнозирования: перенос угла рысканья и перенос всех углов.

Результаты географической привязки изображений

По результатам автоматической привязки длительной серии данных МСУ-МР № 2, полученных с 2014 по 2017 г., были построены гистограммы распределений количества изображений в зависимости от параметров, характеризующих качество привязки. На рис. 5 (см. с. 15) приведён график распределения (помесячно) количества изображений (в процентах от общего числа), у которых коррекция привязки была выполнена только по реперным точкам. Для остальных изображений привязка выполнялась прогнозированием (см. выше). Из анализа графиков на рис. 5 следует, что эффективность привязки по реперным точкам остаётся практически неизменной на протяжении всего времени года. Среднее количество привязанных изображений по реперным точкам за весь выбранный период составило 94,5%. При этом максимальный разброс за весь период не превысил 15% (рис. 5).

Далее были построены гистограммы распределений количества изображений (в процентах от общего числа) в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных на них реперных точек. В данном случае учитывались также изображения с прогнозной привязки. На рис. 6 (см. с. 15) вверху приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от числа рассчитанных для них точек. В данном случае реперные точки, имеющие одинаковое местоположение и рассчитанные на различных спектральных каналах, интерпретировались как одна точка.



Рис. 5. Распределение количества привязанных (по реперным точкам) изображений МСУ-МР № 2

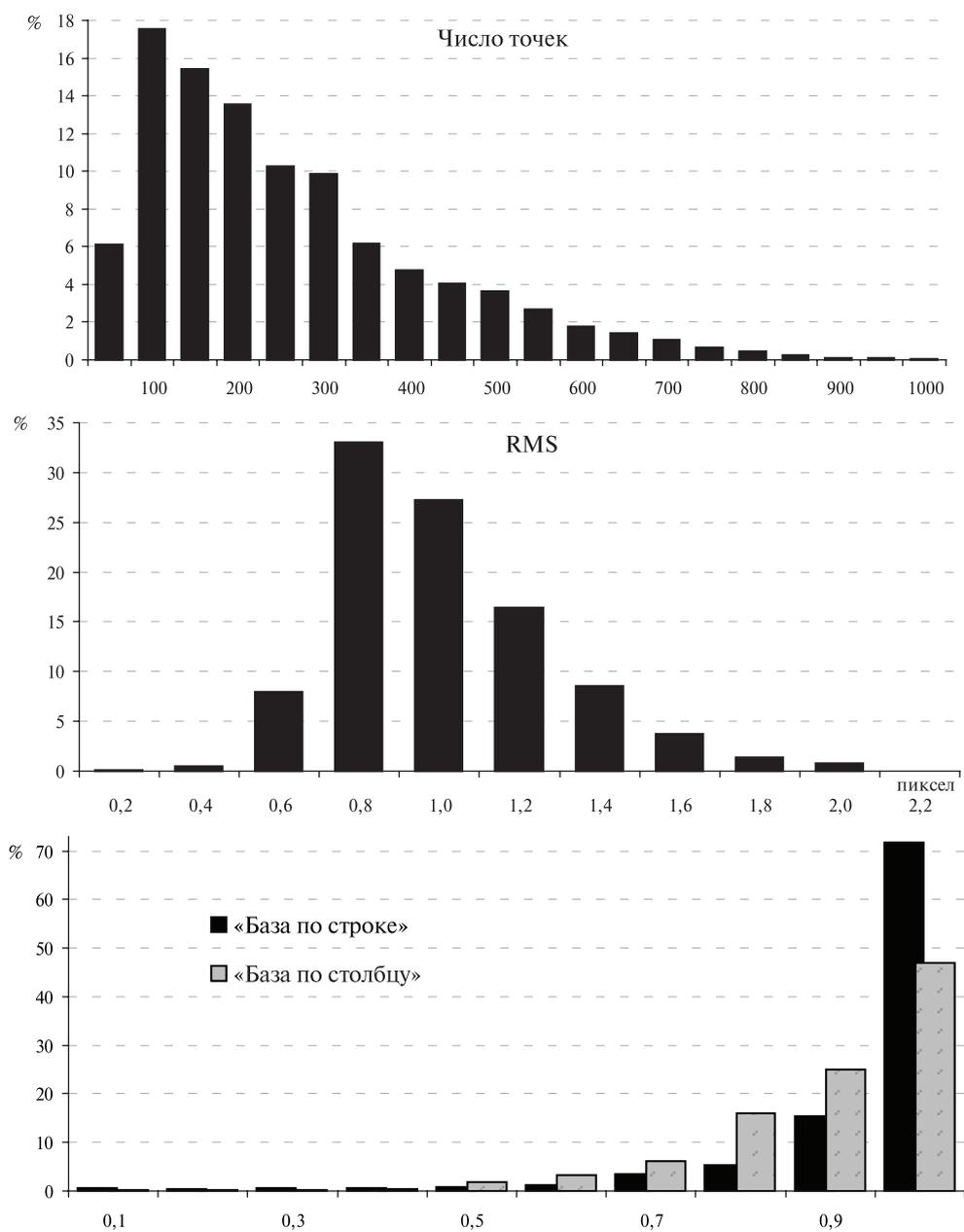


Рис. 6. Распределения количества изображений МСУ-МР № 2 в зависимости от параметров рассчитанных конфигураций реперных точек

Среднее число правильно рассчитанных точек на изображениях МСУ-МР № 2 составило 233 шт. На *рис. 6* в центре приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин RMS остаточных невязок в реперных точках. Из данных распределений следует, что в результате проведённой коррекции привязки 94 % изображений МСУ-МР № 2 имеют величину RMS, не превышающую 1,4 пиксела. На *рис. 6* внизу приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин параметров «база по строке» и «база по столбцу» (определение см. выше). Из анализа данных гистограмм видно, что количество изображений МСУ-МР № 2, у которых величины указанных параметров оказались меньше 0,5, составили не более 3 %.

Заключение

С помощью метода реперных точек уточнена номинальная величина угла поля зрения (FOV) для радиометра МСУ-МР № 2, которая составила 110,3°. Вычислены оценки значений углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра МСУ-МР № 2 относительно базовых каналов. Эти оценки позволяют проводить межканальную привязку данных МСУ-МР № 2 с подпиксельной точностью и совместно использовать для коррекции привязки рассчитанные наборы реперных точек по изображениям разных каналов. На основе установленной зависимости вычисленных углов положения платформы ИСЗ «Метеор-М» № 2 от долготы ближайших узлов витков орбиты предложен и апробирован подход прогнозирования параметров коррекции привязки. При прогнозировании привязки выполняется перенос вычисленных значений одного или нескольких углов по реперным точкам на изображениях, которые были сформированы на близлежащих витках орбиты (с одинаковым направлением). Представлены результаты географической привязки изображений МСУ-МР, полученных с ИСЗ «Метеор-М» № 2 с октября 2014 г. по май 2017 г. Приведены и проанализированы гистограммы распределений количества изображений МСУ-МР № 2 в зависимости от основных параметров, влияющих на качество географической привязки. На сайте РСЦМОС ДВО РАН представлена галерея автоматически привязанных RGB-изображений, построенных по данным МСУ-МР № 2 (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image). Разработанные методики и полученные результаты также позволят значительно ускорить введение в оперативную обработку данных аналогичного радиометра МСУ-МР, который будет функционировать на следующем полярно-орбитальном ИСЗ «Метеор-М» № 2-2 (запуск запланирован на 2018 г.).

Работа, связанная с решением проблемы пространственного рассогласования каналов МСУ-МР № 2, была поддержана РНФ (проект № 14-50-00034 «Технологии мониторинга и рационального использования морских биологических ресурсов»). Работы, связанные с прогнозированием параметров коррекции привязки и апробацией автоматического метода привязки изображений МСУ-МР № 2, были поддержаны РФФИ (проект № 17-05-41152). В работе использованы информационные ресурсы центра коллективного пользования РСЦМОС ДВО РАН.

Литература

1. *Акимов Н. П., Бадаев К. В., Гектин Ю. М., Рыжаков А. В., Смелянский М. Б., Фролов А. Г.* Многозональное сканирующее устройство малого разрешения МСУ-МР для космического информационного комплекса «Метеор-М». Принцип работы, эволюция, перспективы // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2015. Т. 2. № 4. С. 30–39.
2. *Александрин А. И., Дьяков С. Е.* Кросс-калибровка данных ИК-каналов радиометра МСУ-МР спутника «Метеор-М» № 2 // 13-я Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. конф. Москва, ИКИ РАН, 16–20 ноября 2015. С. 8.

3. Еремеев В. В., Князьков П. А., Кузнецов А. Е., Ермаков В. А., Никонов О. А. Комплекс оценки качества видеоданных МСУ-МР и КМСС космического аппарата «Метеор-М» № 2 // Вопросы электротехники. Труды ВНИИЭМ. 2014. Т. 143. № 6. С. 29–36.
4. Катаманов С. Н. Разработка автоматического метода географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника «Метеор-М» № 1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 276–285.
5. Катаманов С. Н. Автоматический метод географической привязки изображений AVHRR/3 от полярно-орбитальных спутников серии MetOp // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 63–74.
6. Катаманов С. Н. Результаты географической привязки изображений AVHRR/NOAA в условиях оперативной обработки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 187–202.
7. Филей А. А., Рублев А. Н., Зайцев А. А. Радиометрическая интеркалибровка коротковолновых каналов многоканального спутникового устройства КА «Метеор-М» № 2 по радиометру AVHRR КА «Метор-А» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 251–263.
8. Rosborough G. W., Baldwin D., Emery W. J. Precise AVHRR image navigation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1994. V. 32. P. 644–657.
9. Vallado D. A., Crawford P. S., Hujak R., Kelso T. S. Revisiting spacetrack report No. 3. AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, CO. 21–24 August 2006. 94 p.
10. Wessel P., Smith W. H. F. A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. No. B4. P. 8741–8743.

Navigation results for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite Meteor-M No. 2

S. N. Katamanov¹, V. A. Kachur^{1,2}

¹ *Institute of Automation and Control Processes of FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia*
E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

² *Far Eastern Federal University, Vladivostok 690950, Russia*

The development results of an automatic navigation method for MSU-MR images obtained during a full receiving session of Russian satellite Meteor-M No. 2 are presented. The method is based on the orbital motion model SGP4 (with propagation NORAD TLE sets) and a mathematical model of physical image deformation. Pixel accuracy of navigation for each image is achieved by computing satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) based on ground control points that are automatically defined in an image or forecasting. The estimates for misalignment angles between the optical sensor axes of the individual channels of MSU-MP radiometer relative to the base channels are calculated and presented. At navigation forecasting, the values of one or several satellite attitude angles, calculated from ground control points on the images received on close satellite orbits with the same direction, are transferred. The navigation results are presented and discussed for the long series of MSU-MR imagery obtained from 2014 to 2017 in the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CRSME FEB RAS). Outcomes of MSU-MR automatic navigation can be obtained in the RGB image gallery at the CRSME FEB RAS website (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image).

Keywords: Meteor-M, MSU-MR, satellite images, navigation, channel-to-channel registration, ground control points, satellite attitude (roll, pitch and yaw), navigation attitude forecasting, close orbits

Accepted: 20.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-9-18

References

1. Akimov N. P., Badaev K. V., Gektin Yu. M., Ryzhakov A. V., Smeljansky M. B., Frolov A. G., *Mnogozonal'noe skaniruyushchee ustroystvo malogo razresheniya MSU-MR dlya kosmicheskogo informatsionnogo kompleksa "Meteor-M". Printsip raboty, evolyutsiya, perspektivy (Multiband scanner of low spatial resolution MSU-MR for space-based informational system Meteor-M. The principle of operation and development prospects)*, *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy*, 2015, Vol. 2, No. 4, pp. 30–39.
2. Aleksanin A. I., Dyakov S. E., *Kross-kalibrovka dannykh IK-kanalov radiometra MSU-MR sputnika Meteor-M No. 2 (Cross-calibration of IR-channels of MSU-MP radiometer on board Meteor-M No.2)*, *13-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (13th Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space")*, Book of Abstracts, 16–20 November 2015, Moscow, IKI RAN, 2015, p. 8.
3. Eremeev V. V., Knyaz'kov P. A., Kuznetsov A. E., Ermakov V. A., Nikonov O. A., *Kompleks otsenki kachestva videodannykh MSU-MR i KMSS kosmicheskogo apparata "Meteor-M" No. 2 (Complex for assessing the quality of video data from MSU-MR and KMSS on board Meteor-M No. 2)*, *Voprosy elektromekhaniki. Trudy VNIIEM*, 2014, Vol. 143, No. 6, pp. 29–36.
4. Katamanov S. N., *Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MSU-MR polyarno-orbital'nogo sputnika "Meteor-M" No. 1 (Development of automatic method navigation for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite "Meteor-M" No. 1)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 276–285.
5. Katamanov S. N., *Avtomaticheskii metod geograficheskoi privyazki izobrazhenii AVHRR/3 ot polyarno-orbital'nykh sputnikov serii MetOp (Automatic method navigation of AVHRR/3 imagery from polar-orbital MetOp satellites)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 63–74.
6. Katamanov S. N., *Rezultaty geograficheskoi privyazki izobrazhenii AVHRR/NOAA v usloviyakh operativnoi obrabotki (NOAA/AVHRR images navigation results in operational processing conditions)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 187–202.
7. Filei A. A., Rublev A. N., Zaitsev A. A., *Radiometricheskaya interkalibrovka korotkovolnovykh kanalov mnogokanal'nogo sputnikovogo ustroystva KA "Meteor-M" No. 2 po radiometru AVHRR KA Metop-A (Radiometric cross-calibration of shortwave channels of Multi-Channel Scanning Unit on board Meteor-M No. 2 relative to spectroradiometer AVHRR on board Metop-A)*, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 251–263.
8. Rosborough G. W., Baldwin D., Emery W. J., *Precise AVHRR image navigation*, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1994, Vol. 32, pp. 644–657.
9. Vallado D. A., Crawford P. S., Hujsak R., Kelso T. S., *Revisiting spacetrack report No. 3*, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone, CO. 21–24 August 2006, 94 p.
10. Wessel P., Smith W. H. F., *A global, self-consistent, hierarchical, high-resolution shoreline database*, *J. Geophys. Res.*, 1996, Vol. 101, No. B4, pp. 8741–8743.