

Разработка автоматического метода географической привязки изображений МСУ-МР полярно-орбитального спутника "Метеор-М" №1

С.Н. Катаманов

Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН

Владивосток, 690041, Россия

E-mail: sergey@satellite.dvo.ru

Представлены результаты исследований, проведённых при разработке автоматического метода географической привязки изображений, полученных радиометром МСУ-МР с российского спутника "Метеор-М" №1 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 геометрические 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. Вычислены оценки углов пространственного рассогласования между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра МСУ-МР относительно базовых каналов. Приведены и обсуждаются результаты апробации разработанного метода привязки на длительной серии данных МСУ-МР в Региональном спутниковом центре мониторинга окружающей среды (РСЦМОС) ДВО РАН. По [web-ссылке \(http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image\)](http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно визуально оценить результаты привязки предложенным методом.

Ключевые слова: Метеор-М, МСУ-МР, спутниковые изображения, географическая и межканальная привязка, реперные точки, углы ориентации спутниковой платформы (крен, тангаж и рысканье).

Введение

Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР), установленное на российском спутнике "Метеор-М" №1, предназначено для широкозахватной (не менее 2800 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 (справочные материалы, 2008). 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, карты и параметры растительного, снежного и ледового покровов. Открытый доступ к данным МСУ-МР и бесперебойная работа спутника "Метеор-М" №1 (запущен 17 сентября 2009 г.) в режиме опытной эксплуатации на протяжении более 4-х лет не привели к широкому использованию этих данных в практике дистанционного зондирования. Это было связано, в первую очередь, с трудностями организации первичной обработки данных: отсутствием корректных процедур калибровки (пересчёт отсчётов радиометра к геофизическим величинам) и невозможностью получения точной географической привязки изображений стандартными методами. В свою очередь, последнее ограничение затрудняет применение регрессионных мето-

дик на основе “*in situ*” и спутниковых измерений для создания соответствующих технологий получения информационных продуктов по данным МСУ-МР.

Данная работа посвящена исследованию возможности получения точной географической привязки изображений МСУ-МР, получаемых со спутника “Метеор-М” №1. В рамках исследования рассмотрены две основные проблемы, связанные с обработкой данных МСУ-МР. Первая проблема заключается в рассогласовании оптических осей датчиков отдельных каналов. Данное рассогласование приводит к тому, что суммарные изображения одного сеанса выглядят по-разному для различных каналов (т.е. они не могут быть совмещены простым наложением изображений одного канала с другими каналами). Для некоторых пар каналов эти рассогласования достигают величины в 3–5 пикселей изображения. 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 GCPs. Но расчёт реперных точек на изображениях некоторых каналов МСУ-МР имеет сравнительно низкие результаты исполнения, что обусловлено низкой контрастностью границ географических объектов и шумами в соответствующих каналах. Вторая проблема связана с тем, что у спутника “Метеор-М” №1 на протяжении полного сеанса приёма (длительностью до 15 минут) может происходить изменение углов ориентации платформы с радиометром в пространстве (крен, тангаж и рысканье). Такие ситуации затрудняют получение точной привязки изображения при использовании постоянных значений углов (вычисленных по GCPs).

В работе (Аванесов и др., 2010) было показано, что ошибки реализации орбитальной ориентации ИСЗ “Метеор-М” №1 могут достигать до $0,4^\circ$ по углам тангажа и крена и до $0,3^\circ$ по углу рысканья. Длительность по времени, в течение которой наблюдались максимальные отклонения величин каждого из углов, может не превышать 10–15 минут (Аванесов и др., 2010). Поэтому, если не учесть такие изменения значений углов в течение полного сеанса приёма, то это может привести к ошибкам привязки до 3–7 пикселей на изображении МСУ-МР. На спутнике “Метеор-М” №1 определение параметров ориентации осей системы координат выполняется астроизмерительными приборами БОКЗ-М, значения которых в режиме прямой передачи передаются с телеметрией только по радиолинии СМ-диапазона на частоте около 8 ГГц (справочные материалы, 2008; Аванесов и др., 2010). Но приём данных МСУ-МР со спутника “Метеор-М” №1 во многих спутниковых центрах (в частности, и в РСЦМОС ДВО РАН) ведётся только по радиолинии ДМ-диапазона на частоте около 1,7 ГГц (что позволяет использовать относительно недорогие станции приёма). Также в работе (Кузнецов, Нефедов, 2013) была описана специальная обработка телеметрических значений углов ориентации ИСЗ “Метеор-М” №1 с целью

фильтрации недостоверных отсчётов (возникающих из-за сбоев в работе измерительной аппаратуры на борту спутника).

Используемые методы и данные

При разработке метода географической привязки данных МСУ-МР был использован подход, который был ранее применён для изображений MVISR полярно-орбитального ИСЗ FengYun-1D (Катаманов, 2013). Суть подхода состоит в моделировании всех основных аспектов формирования изображения радиометром на орбите. Для предсказания положения ИСЗ "Метеор-М" №1 на орбите была применена широко известная модель орбитального движения SGP4 (Vallado et al., 2006) в сочетании с прогнозными телеграммами NORAD TLE (Kelso, 1996). Сканирующая система радиометра МСУ-МР (Гектин и др., 2008; справочные материалы, 2008) относится к типу "cross-track" и практически полностью по всем основным параметрам соответствует радиометру AVHRR. Полный угол раствора сканера МСУ-МР составляет 108,03°. Решение прямой и обратной задач географической привязки изображений выполнялось с помощью алгоритмов, приведённых в работе (Эпштейн, Гербек, 2001). Для достижения пиксельной точности привязки данных МСУ-МР в разработанном методе используется процедура коррекции, которая вычисляет оптимальные значения углов ориентации спутниковой платформы с радиометром в пространстве. Вычисление углов основано на минимизации рассогласований между видимыми (модельными) и истинными (рассчитанными) положениями реперных точек на изображении. Для расчёта истинных положений GCPs был применён метод, который был ранее разработан и апробирован (Katananov, 2010) при автоматической привязке данных AVHRR (с ИСЗ серии NOAA), MVISR (с ИСЗ серии FengYun-1), MCVISSR (с ИСЗ серии FengYun-2), HiRID и HRIT (с ИСЗ серии MTSAT). При расчёте реперных точек на изображениях МСУ-МР предварительная фильтрация облачности не проводилась. Для определения истинных координат GCPs была использована база лэндмаркеров, созданная на основе географической контурной базы GSHHS (Wessel, Smith, 1996). Наглядный пример используемой базы лэндмаркеров и маски суша/вода приведён в работе (Катаманов, 2013).

Пространственное рассогласование каналов

Проблема пространственного рассогласования изображений отдельных каналов радиометра МСУ-МР была решена таким же образом, как для радиометра MVISR китайского спутника FengYun-1D (Катаманов, 2013). Были выбраны базовые каналы для

ИК (5) и видимого (2) спектральных диапазонов, относительно которых для остальных каналов были вычислены 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. Далее невязки в наборах GCPs для каждого изображения были пересчитаны относительно базовых каналов, т.е. вычитались соответствующие невязки по строке и столбцу изображения (Катаманов, 2013). 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), в результате чего решение последней задачи свелось к системе линейных уравнений. Для расчётов была использована длительная серия данных МСУ-МР, сформированных с июля 2011 г. по апрель 2014 г. (всего 3725 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 0,7 и значения RMS (Root Mean Square) и максимума модуля остаточных невязок в GCPs 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). Эти параметры определяют пространственные характеристики размещения конфигурации GCPs 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 тангажа между каналами видимого (1, 2 и 3) и ИК (4, 5 и 6) спектральных диапазонов наблюдались некоторые колебания в пределах 1,5 миллирадиана. На *рис. 1* приведены графики вычисленных значений (в миллирадианах) углов рассогласования между оптическими осями 5 (ИК) и 3 (видимого) каналов в зависимости от времени (месяц и год) формирования изображений. Причина этих колебаний может быть обусловлена тем, что датчики видимого и ИК спектральных диапазонов расположены в радиометре МСУ-МР по разные стороны двухстороннего сканирующего зеркала (Гектин и др., 2008; справочные материалы, 2008). В предложенном методе географической привязки данных МСУ-МР это не учитывается, так как информация о том, с какой стороны (слева или справа относительно направления движения ИСЗ "Метеор-М" №1 на орбите) расположены датчики каждого из спектральных диапазонов, отсутствует. Из полученных результатов следует, что

все каналы МСУ-МР между собой согласованы по углу рысканья. При этом величины угла рысканья между видимыми и ИК каналами имеют значительный разброс (достигающий 1,5 миллирадиана), но который является практически равномерным (смотрите *рис. 1*). Причина этого разброса также может быть вызвана тем, что датчики радиометра МСУ-МР расположены по разные стороны сканирующего зеркала. Также из полученных результатов следует, что все каналы видимого спектрального диапазона (1, 2 и 3) являются согласованными между собой по двум углам: крену и рысканью. В *табл. 1* приведены вычисленные оценки средних значений (в миллирадианах) углов для отдельных каналов радиометра МСУ-МР относительно базовых каналов.

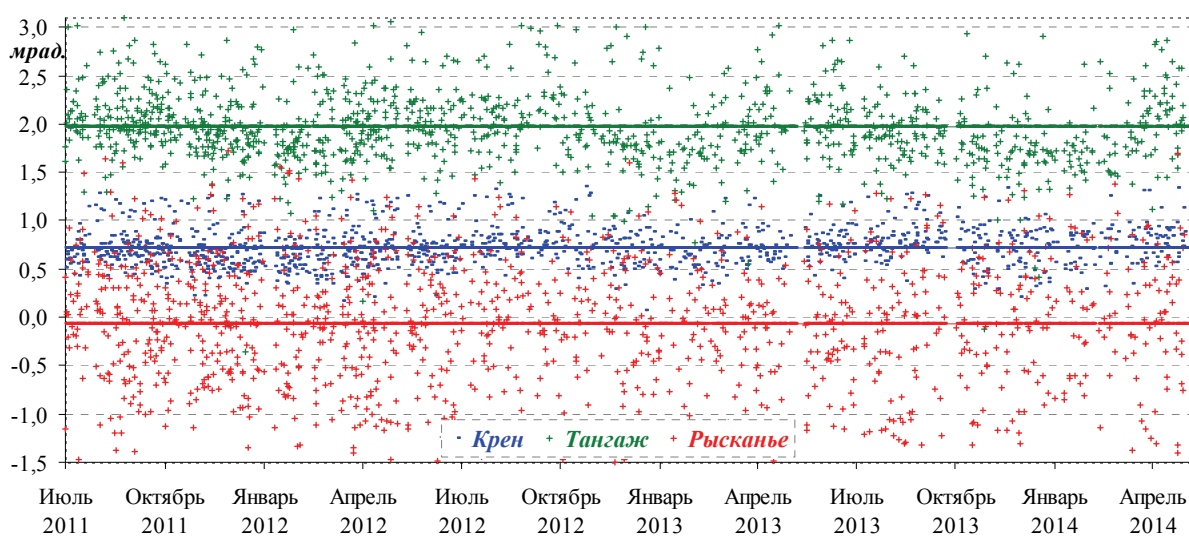


Рис. 1. Углы пространственного рассогласования между 5 и 3 каналами

Таблица 1. Углы пространственного рассогласования между каналами радиометра МСУ-МР

№ канала (спектральный диапазон, μm)	Углы относительно 2 канала			Углы относительно 5 канала		
	Крен, мрад.	Тангаж, мрад.	Рысканье, мрад.	Крен, мрад.	Тангаж, мрад.	Рысканье, мрад.
1 (0,5–0,7)	-0,009963	-0,888016	0,007335	0,534453	0,000462	-0,020846
2 (0,7–1,1)	—	—	—	0,555909	0,879758	-0,060009
3 (1,6–1,8)	0,033774	1,117962	-0,050566	0,723791	1,965759	-0,072974
4 (3,5–4,1)	-0,837925	-0,285068	0,085633	-0,106575	0,649706	-0,008169
5 (10,5–11,5)	-0,572185	-0,871843	0,054309	—	—	—
6 (11,5–12,5)	-0,172153	-3,37222	0,004532	0,313774	-2,752392	-0,058199

Результаты географической привязки изображений по GCPs

Анализ результатов привязки изображений МСУ-МР по реперным точкам показал, что значительные отклонения спутниковой платформы в пространстве от номиналь-

ного положения на протяжении полного сеанса приёма в большинстве случаев не наблюдались (если такое явление происходило, то обычно не более 2-х раз). Поэтому вначале была оценена возможность точной привязки данных МСУ-МР с использованием постоянных углов положения спутниковой платформы для полного сеанса. Были рассчитаны GCPs для той же серии данных МСУ-МР, которая использовалась при оценке углов межканального рассогласования (см. выше). При этом реперные точки для каждого сеанса рассчитывались одновременно по всем доступным каналам МСУ-МР (для ночных сеансов изображения видимых каналов отсутствуют, и в периоды размораживания радиационного холодильника ИК каналы отключаются). Затем по рассчитанным невязкам в GCPs были вычислены постоянные углы положения платформы (т.е. для всех изображений принималась гипотеза о постоянстве углов в течение полного сеанса приёма).

Далее для указанной серии данных МСУ-МР были построены гистограммы распределений количества изображений (в процентах от общего числа) в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных на них GCPs (по которым выполнялась оценка углов ориентации платформы). На *рис. 2* вверху приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от числа рассчитанных для них GCPs. В данном случае при определении числа реперных точек считалось что, если по одному и тому же лэндмаркеру были рассчитаны несколько точек с учётом всех каналов, то эти точки отождествлялись как одна. На *рис. 2* в центре приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от значений RMS (в пикселах) остаточных невязок в GCPs, т.е. рассчитанных после проведения коррекции привязки (с учётом вычисленных углов). Из данного распределения следует, что для около 95% изображений в результате проведенной коррекции привязки величина RMS остаточных невязок в GCPs не превышает 1,5 пиксела. На *рис. 2* внизу приведена гистограмма распределения количества изображений в зависимости от величин “база по строке” и “база по столбцу” конфигураций рассчитанных GCPs, которые определяют пространственные характеристики размещения конфигураций точек на изображениях (определение смотрите выше). Из анализа данной гистограммы видно, что количество изображений, у которых величины параметров “база по строке” и “база по столбцу” меньше 0,5 около 4% и 7% соответственно. Низкие величины последних показателей и высокие показатели предыдущих распределений (по количеству GCPs и значениям RMS остаточных невязок) свидетельствует о том, что большинство изображений МСУ-МР формировалось при незначительных отклонениях платформы ИСЗ "Метеор-М" №1 от номинального положения в течение полного сеанса приёма (т.е. приводящих к ошибке привязки не более 1–2 пикселов).

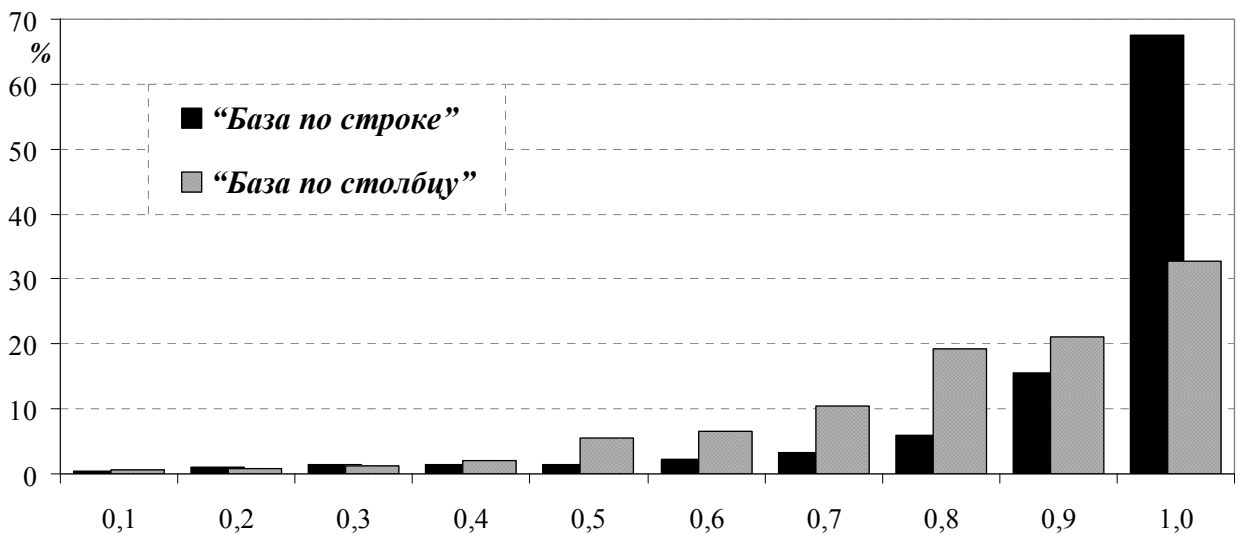
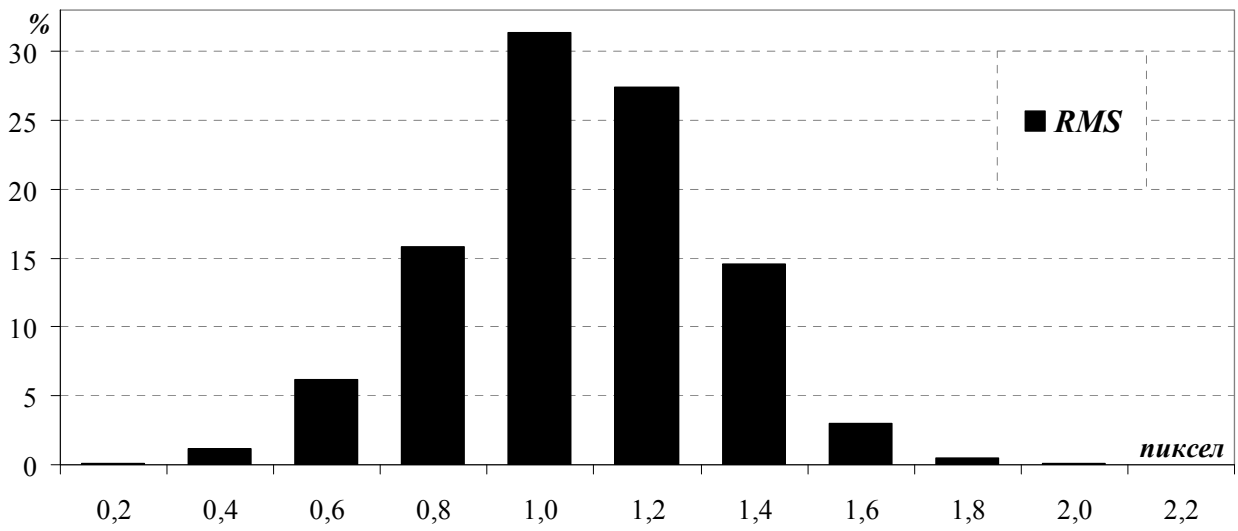
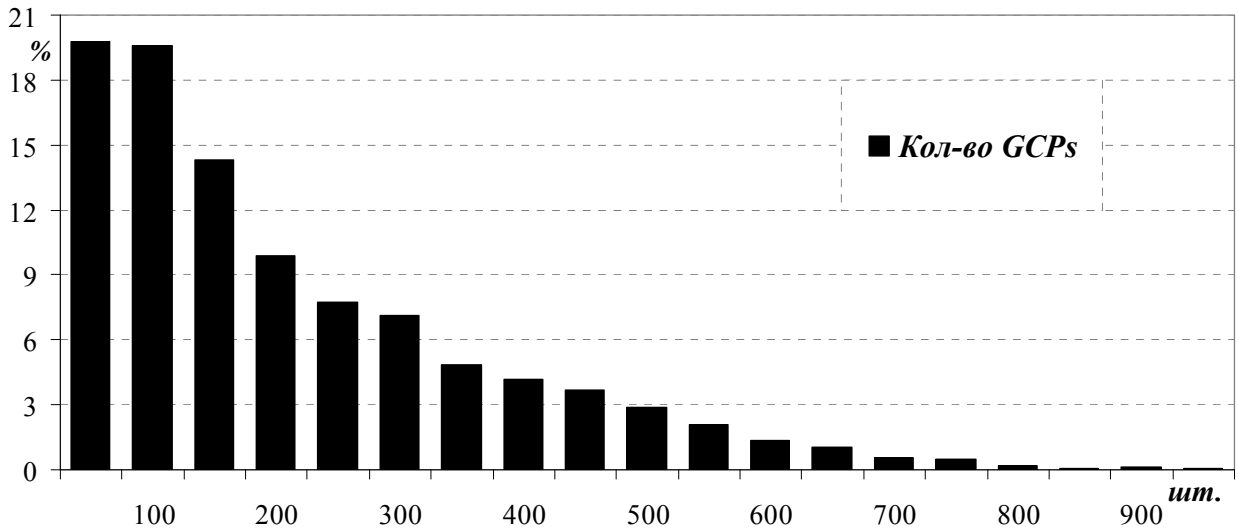



Рис. 2. Распределения количества изображений МСУ-МР в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных GCPs

Для непосредственной оценки результатов привязки разработанным методом была создана галерея RGB-изображений данных МСУ-МР, принятых со спутника "Метеор-М" №1 на приёмную станцию в РСЦМОС ДВО РАН. Данная галерея размещена по web-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН. При построении RGB-изображений из галереи использовались следующие комбинации каналов МСУ-МР с учётом вычисленных углов рассогласования (табл. 1): 3–2–1 (для нисходящих витков орбиты) и 4–5–6 (для восходящих витков орбиты). На каждом RGB-изображении (построенном в масштабах 1:11, 1:5 и 1:1) определённым цветом (красным, зелёным и жёлтым) отмечен эталонный береговой контур на основе данных базы GSHHS (Wessel, Smith, 1996), который был наложен с учётом проведённой коррекции привязки по GCPs (т.е. использовались вычисленные углы). Также в указанной галерее для каждого сеанса приведено полутоновое (gray scale) изображение (в масштабе 1:3) одного из каналов МСУ-МР (для нисходящих витков орбиты – 3, для восходящих витков орбиты – 5) с обозначенными автоматически рассчитанными реперными точками (символом «») и векторами рассчитанных невязок (отмечены красным тоном). Из визуального анализа RGB-изображений, представленных в галерее, видно, что, если отклонения платформы ИСЗ "Метеор-М" №1 от номинального положения в течение полного сеанса были незначительными, то рассогласование эталонного и видимого на изображении береговых контуров лежит в пределах одного пиксела.

Заключение

Вычислены оценки значений углов пространственного рассогласования (крен, тангаж и рысканье) между оптическими осями датчиков отдельных каналов радиометра МСУ-МР спутника "Метеор-М" №1 относительно базовых каналов. Данные оценки позволяют проводить межканальную привязку данных МСУ-МР с подпиксельной точностью и совместно использовать для коррекции привязки рассчитанные наборы реперных точек по изображениям разных каналов. Представлены результаты географической привязки изображений МСУ-МР (сформированных с июля 2011 г. по апрель 2014 г.) после проведения коррекции по GCPs с вычислением постоянных значений углов положения спутниковой платформы для полного сеанса приёма. Приведены гистограммы распределений количества изображений МСУ-МР в зависимости от статистических параметров конфигураций рассчитанных реперных точек. По web-ссылке (http://www.satellite.dvo.ru/gallery/sat_image) сайта РСЦМОС ДВО РАН размещена галерея RGB-изображений, по которым можно визуально оценить привязку данных МСУ-МР по

реперным точкам. Разработанные методики и полученные результаты позволят значительно ускорить введение в оперативную обработку данных аналогичного радиометра МСУ-МР, который функционирует на следующем полярно-орбитальном ИСЗ "Метеор-М" №2 (запущен 8 июля 2014 г.). Предполагается, что вышеуказанные проблемы обработки данных МСУ-МР с большой вероятностью будут иметь место и в случае со спутником "Метеор-М" №2. Предложенный подход привязки позволит значительно улучшить качество получаемых тематических и композиционных продуктов, при построении которых используются данные МСУ-МР с полярно-орбитальных российских ИСЗ "Метеор-М" №1 и №2.

Работа поддержана Программами фундаментальных исследований Президиума РАН и грантами ДВО РАН.

Литература

1. *Аванесов Г.А., Красилов В.А., Никитин А.В., Сазонов В.В.* Оценка точности определения параметров ориентации осей системы координат астроизмерительного прибора БОКЗ-М по экспериментальным данным: Препринт № 74. М.: ИПМ РАН, 2010. 37 с.
2. *Гектин Ю.М., Акимов Н.П., Фролов А.Г., Смелянский М.Б.* Многоканальный сканирующий радиометр с широкой полосой обзора: Пат. 2324151 РФ // Бюл. 2008. № 13. 10 с.
3. *Катаманов С.Н.* Разработка автоматического метода географической привязки изображений MVISR полярно-орбитального спутника FengYun-1D // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 85–93.
4. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 1: Справочные материалы под ред. *Макриденко Л.А., Волкова С.Н., Трифонова Ю.В. и др.* М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. 143 с.
5. *Кузнецов А.Е., Нефедов В.И.* Модель цифрового совмещения гидрометеорологической спутниковой информации // Вестник РГРТУ. № 3 (45). 2013. С. 8–13.
6. *Эпштейн Ю.С., Гербек Э.Э.* Метод точной географической привязки изображений AVHRR NOAA // Электронный журнал "Исследовано в России". 2001. № 41. С. 456–464.
7. *Katamanov S.N.* Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery // Proc. 1st Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications. Vladivostok, Russia. 2010. P. 269–274.
8. *Kelso T.S.* Orbital Data on the WWW // Satellite Times. 1996. Vol. 2. No. 5. P. 80–81.
9. *Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J.* Precise AVHRR Image Navigation // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 1994. Vol. 32. P. 644–657.
10. *Vallado D.A., Crawford P., Hujsak R., Kelso T.S.* Revisiting Spacetrack Report #3 // AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf. Keystone. CO. 21–24 August 2006. 94 p.
11. *Wessel P., Smith W.H.F.* A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline database // J. of Geophys. Res. 1996. Vol. 101. No. B4. P. 8741–8743.

Development of automatic navigation method for MSU-MR imagery of polar-orbital satellite “Meteor-M” No.1

S.N. Katamanov

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

The development results of an automatic navigation method for MSU-MR images obtained during a full receiving session of the Russian satellite Meteor-M No.1 are presented. The method is based on the orbital motion model SGP4 (with propagation NORAD TLE sets) and a mathematical model of Meteor-M-1/MSU-MR physical image deformation. Pixel navigation accuracy is achieved by computing satellite attitude angles (roll, pitch and yaw) based on ground control points that are automatically defined in an image. The misalignment angles between the optical channel sensor axes of the Meteor-M-1/MSU-MR radiometer are calculated. The approbation results of the new navigation method are presented and discussed for long series of Meteor-M-1/MSU-MR data received at the Center for Regional Satellite Monitoring of Environment of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences (CRSME FEB RAS). Examination of the navigation results of the proposed method can be performed visually by RGB-images gallery on 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).

References

1. Avanesov G.A., Krasikov V.A., Nikitin A.V., Sazonov V.V., Otsenka tochnosti opredeleniya parametrov orientatsii osei sistemy koordinat astroizmeritel'nogo pribora BOKZ-M po eksperimental'nym dannym (Accuracy estimation of determining attitude of coordinate systems of the star sensor BOKZ-M by experimental data), *Preprint of IPM RAN*, 2010, No. 74, 37 p.
2. Gektin Yu.M., Akimov N.P., Frolov A.G., Smelyanskii M.B. Mnogokanal'nyi skaniruyushchii radiometr s shirokoi polosoi obzora (Multichannel scanning radiometer with a wide swath), *Russian Patent Bull.* 2008, No. 13, 10 p.
3. Katamanov S.N., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MVISR polyarno-orbital'nogo sputnika FengYun-1D (Development of automatic method navigation for MVISR imagery of polar-orbital satellite FengYun-1D), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 85–93.
4. Makridenko L.A., Volkova S.N., Trifonova Yu.V., *Kosmicheskii kompleks gidrometeorologicheskogo i okeanograficheskogo obespecheniya “Meteor-3M” s kosmicheskim apparatom “Meteor-M” No.1* (Space complex hydro-meteorological and oceanographic software “Meteor-3M” spacecraft “Meteor-M” No.1), Moscow: NPP VNIIEEM, 2008, 143 p.
5. Kuznetsov A.E., Nefedov V.I., Model' tsifrovogo sovmeshcheniya gidrometeorologicheskoi sputnikovoi informatsii (Model of combining digital satellite hydrometeorological information), *Vestnik RGRU*, No. 3 (45), 2013, pp. 8–13.
6. Epshtein Yu.S., Gerbek E.E., Metod tochnoi geograficheskoi privyazki izobrazhenii AVHRR NOAA (Method accurate navigation of NOAA/AVHRR imagery), *Electronic journal “Issledovano v Rossii”*, 2001, No. 41, pp. 456–464.
7. Katamanov S.N., Automatic navigation of one pixel accuracy for meteorological satellite imagery, *Proc. 1st Russia and Pacific Conf. on Computer Technology and Applications*, Vladivostok, Russia, 2010, pp. 269–274.
8. Kelso T.S., Orbital Data on the WWW, *Satellite Times*, 1996, Vol. 2, No. 5, pp. 80–81.
9. Rosborough G.W., Baldwin D., Emery W.J., Precise AVHRR Image Navigation, *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.*, 1994, Vol. 32, pp. 644–657.
10. Vallado D.A., Crawford P.S., Hujsak R., Kelso T.S., Revisiting Spacetrack Report #3, *AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conf.*, Keystone, CO, 21–24 August 2006, 94 p.
11. Wessel P., Smith W.H.F. A Global, Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Shoreline database, *J. of Geophys. Res.*, 1996, Vol. 101, No. B4, pp. 8741–8743.