Автоматизация полётной геометрической калибровки комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2

Б.С. Жуков, С.Б. Жуков, Т.В. Кондратьева, А.В. Никитин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

Разработана методика и программное обеспечение, позволяющие автоматизировать полётную геометрическую калибровку камер МСУ-201 и МСУ-202 комплекса многозональной спутни-ковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2. Камеры используют в качестве фотодетекторов три линейных ПЗС и имеют разрешение около 60 м в спектральных каналах 0,535–0,575; 0,63–0,68 и 0,76–0,90 мкм. Для калибровки используется банк контрольных точек (КТ), создаваемый на базе геореференцированых изображений Sentinel с разрешением 10 м в спектральных зонах, близких к зонам камер КМСС. Приводятся результаты калибровки камер, проведённой по изображениям прибрежной зоны Эгейского и Чёрного морей, на которых было распознано 287–714 КТ в зависимости от канала и камеры. Наибольшее число КТ было распознано в канале 0,76–0,90 мкм, наименьшее — в канале 0,535–0,575 мкм. В результате определены параметры геометрической модели камеры: эффективное фокусное расстояние спектральных каналов, параметры дисторсии каналов и параметры ориентации внутренней системы координат каналов в приборной системе координат, жёстко связанной с системой координат звёздных датчиков. Остаточное среднеквадратическое отклонение КТ от калиброванной проекционной функции каналов составило 0,23–0,42 пикселей.

Ключевые слова: КМСС-М, «Метеор-М» № 2, геометрическая калибровка, элементы внутреннего ориентирования, контрольные точки, КА Sentinel

Одобрена к печати: 30.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212

Введение

Комплекс многозональной спутниковой съёмки (КМСС-М) на КА «Метеор-М» № 2 является усовершенствованной версией комплекса КМСС на КА «Метеор-М» № 1 (Аванесов и др., 2013) и продолжает начатую КМСС ежедневную съёмку территории России и прилегающих стран в видимом и ближнем ИК-диапазонах со средним пространственным разрешением. Видеоданные КМСС, дополненные синхронной навигационной информацией, автоматически принимаются, обрабатываются в потоковом режиме, архивируются и каталогизируются на наземных приёмных станциях в Москве, Новосибирске и Хабаровске. Полученные материалы используются для решения широкого круга задач землепользования, экологического мониторинга, контроля чрезвычайных ситуаций, оценки ледовой обстановки на морях, реках, озёрах и водохранилищах и др.

Геометрическая калибровка камер КМСС и КМСС-М проводилась на Земле и ежегодно проверяется в полёте по контрольным точкам, выбираемым оператором на изображениях и на карте вручную (Никитин и др., 2011). Задачей данной работы являлась автоматизация полётной геометрической калибровки камер за счёт автоматического распознавания на изображении контрольных точек из созданного банка контрольных точек, что позволяет повысить точность калибровки, проанализировать её стабильность, а также использовать эту процедуру для географической привязки изображений по контрольным точкам.

Характеристики и видеоданные КМСС-М

Комплекс КМСС-М включает в себя две камеры с фокусным расстоянием 100 мм, условно обозначаемые МСУ-201 и МСУ-202, и одну камеру с фокусным расстоянием 50 мм, условно обозначаемую МСУ-250. Основные характеристики камер, входящих в состав КМСС-М, приведены в *табл. 1.* В фокальной плоскости каждой камеры находятся три линейных ПЗС-фотоприёмника за спектральными фильтрами, формирующими спектральные зоны каналов. Каналы 1 и 3 камер смотрят соответственно вперёд и назад по трассе полёта, каналы 2 — в надир. Камеры МСУ-201 и МСУ-202 устанавливаются на приборную платформу КА таким образом, что их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 14^{\circ}$ в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты. В результате обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер МСУ-201 и МСУ-202, примерно равной ширине полосы обзора МСУ-250.

Спектральные зоны МСУ-201 и МСУ-202 оптимизированы для исследования поверхности суши, а МСУ-250 — для исследования акваторий.

Параметры	Камера			
	МСУ-201	МСУ-202	МСУ-250	
Фотоприёмники	3 линейных ПЗС			
Размер элементарного детектора, мкм	7			
Число активных элементов в строке	7926			
Фокусное расстояние, мм	10	00	50	
Спектральные каналы, мкм	№ 1: 0,7- № 2: 0,63 № 3: 0,53	-0,9 3-0,68 35-0,575	№ 1: 0,45-0,51 № 2: 0,37-0,45 № 3: 0,58-0,69	
Номинальный угол наклона плоскости наблюдения каналов вдоль трассы полёта, град	№ 1: 8,67 № 2: 0 № 3: -8,67		№ 1: 16,95 № 2: 0 № 3: -16,95	
Номинальный угол наклона камеры перпендикулярно плоскости орбиты, град		14	0	
Угловое разрешение, угл. с	14	,4	28,8	
Проекция элемента на поверхность, м (H = 830 км)	6	120		
Захват, км (<i>H</i> = 830 км)	960 (д камеј	цвумя рами)	940	
Разрядность АЦП/изображения, бит	16/8			
Динамический диапазон	5000			
Масса, кг	2	,9	2,3	
Максимальное энергопотребление, Вт	6	,8	6,8	

Takan	~ 1	Vanavina		***	VMCC N	1	VA.	Mamaan	N.C.	NG O
I a o / u u	a 1.	ларакте	ристики	камер		и на	ΝA«	wiereon	/- VI≫	INO Z
1 00 00000000		1 mp contro		1 com o p				11101000		

После получения и распаковки видеоданных КМСС-М для каждого маршрута съёмки формируются:

- исходные изображения маршрута *I*(*s*, *L*) в трёх спектральных зонах, где *L* номер снятой строки, *s* номер пикселя в строке (т.е. номер активного элементарного детектора в ПЗС-линейке);
- навигационный файл, содержащий для каждой строки *L* исходных изображений время регистрации, радиус-вектор КА **R**_{KA} в гринвичской геоцентрической системе координат нат (ГСК) и матрицу перехода из обобщённой системы координат звёздных датчиков (СКЗД) в ГСК **T**_{ГСК ← СКЗД}.

Типичная длина маршрута — 120–130 тыс. строк.

Навигационный файл создаётся на основе информации бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ-М), в состав которого входят: аппаратура формирования бортового времени и опорной сетки синхрочастот; аппаратура спутниковой навигации ГЛОНАСС/GPS, используемая для определения положения КА на орбите, и два звёздных датчика БОКЗ-М, используемых для измерения ориентации КА. Ошибка определения положения КА на орбите — 10-15 м (1 σ). Ошибка измерения ориентации звёздными датчиками — 2 угл. с (1 σ), что с высоты 830 км соответствует линейной ошибке на поверхности 8 м. Таким образом, ошибки навигационной информации значительно меньше размера элемента разрешения, что позволяет её непосредственно использовать как для калибровки камер КМСС-М, так и для геопривязки получаемых ими изображений. При разрешении камер можно не учитывать различие центра съёмки и точки измерения положения КА, определяемой положением антенн ГЛОНАСС/GPS.

Предварительная обработка видеоданных КМСС включает нарезание исходных изображений маршрута съёмки на отдельные кадры, имеющие примерно одинаковый размер по обеим координатам, их радиометрическую коррекцию, географическую привязку и трансформирование в проекцию UTM (Жуков и др., 2008).

Для географической привязки, помимо навигационного файла, используются файлы геометрической калибровки камеры, содержащие для каждого элементарного детектора *s* каждой ПЗС-линейки единичный вектор наблюдения e(s), рассчитываемый на основании результатов калибровки камеры. Базовой системой координат для расчёта вектора e(s) является обобщённая система координат звёздных датчиков. Однако для удобства компоненты e(s)представляются во вспомогательной приборной системе координат (ПСК) ХҮΖ, жёстко связанной с СКЗД (puc. 1). Центр ПСК находится в задней узловой точке объектива О, а ориентация её осей в СКЗД определяется номинальными углами установки камер и звёздных датчиков на КА. При этом номинально направление ПЗС-линеек совпадает с направлением оси $X \Pi CK$, а направление оптической оси объектива — с направлением оси $Z \Pi CK$. При отличии реальных углов установки от номинальных указанные направления будут различаться. Реальные значения углов установки камер и звёздных датчиков, которые в полёте могут отличаться от прокалиброванных на Земле и на практике обычно неизвестны, при полётной калибровке не используются. Вследствие постоянства матрицы перехода из ПСК в СКЗД для каждой строки изображения по $T_{\Gamma CK \leftarrow CK3Л}$ определена также матрица перехода из ПСК в ГСК $\mathbf{T}_{\Gamma C K \leftarrow \Pi C K}$

При калибровке съёмочных систем, в которых изображения одних и тех же участков земной поверхности получаются одновременно, например MCУ-MP на KA серии «Метеор-М», а также в случае систем высокого разрешения на KA «Канопус-В» и «Ресурс-П», разрешение которых может быть лучше точности навигационной

которых может оыть лучше точности навигационной информации, используется относительная геометрическая калибровка каналов, позволяющая избежать значительных межканальных смещений изображений даже при больших ошибках геореференцирования (Катаманов, 2014; Современные..., 2015). В случае камер КМСС-М значительный временной сдвиг изображений в разных каналах, составляющий 18–36 с для камер МСУ-201 и МСУ-202 и в два раза больший для камеры МСУ-50, определяет целесообразность независимой геопривязки, а значит, и независимой геометрической калибровки каналов, возможность которой обеспечивается малыми (по сравнению с разрешением камер) ошибками навигационной информации.

Рис. 1. Приборная система координат камеры и плоскость наблюдения одного из каналов



Малые навигационные ошибки позволяют также избежать необходимости оценки элементов внутреннего ориентирования одновременно с уточнением элементов внешнего ориентирования, как при калибровке систем высокого разрешения (Васильев, 2015).

Независимая геометрическая калибровка каналов по эталонным изображениям контрольных точек в тех же или близких спектральных зонах при малых (по сравнению с разрешением) ошибках навигационной информации может обеспечить в том числе и лучшую точность относительной калибровки каналов, чем прямая межканальная корреляция из-за возможных различий структуры изображений в разных спектральных зонах. Например, часто контрольные точки выбираются на береговой линии. Однако структура изображения границы «суша – вода» может быть существенно различной в ближнем ИК-диапазоне, где в силу малой прозрачности воды эта граница обычно чёткая и контрастная, и в зелёном участке спектра, где вода полупрозрачна и вследствие этого переход «вода – суша» часто размыт из-за рассеяния света на присутствующих в воде органических и неорганических взвесях, а также из-за просвечивающего мелководья.

Банк контрольных точек

Полётная геометрическая калибровка камер КМСС-М проводится по контрольным точкам (КТ) — хорошо распознаваемым и хорошо локализуемым участкам земной поверхности с известными географическими координатами.

В открытом доступе имеется глобальный банк KT Landsat (https://landsat.usgs.gov/landsat-8-ground-control-point-search), который содержит более 3 млн KT. Эталонные изображения КТ получены в диапазоне 1,55–1,75 мкм с разрешением 30 м, имеют размер 64×64 пикселей и представлены в проекции UTM. Основным недостатком банка KT Landsat для геометрической калибровки камер KMCC-M является отсутствие эталонных изображений KT в спектральных зонах KMCC-M. Кроме того, в работе (Storey et al., 2016) отмечены значительные ошибки географической привязки KT Landsat, составляющие ~40 м (20), которые планируется скорректировать путём привязки к опорным изображениям Sentinel.



Рис. 2. Распределение контрольных точек в районе Чёрного и Эгейского морей (КТ показаны жёлтым цветом; при разрешении снимка в 1 км многие КТ сливаются)

Для этого в ИКИ РАН разрабатывается банк КТ на основе изображений Sentinel (https:// scihub.copernicus.eu/), имеющих разрешение 10 м и точность географической привязки 12 м (3σ) (Languille et al., 2015). Эталонные изображения КТ выбираются в спектральных зонах 0,49; 0,56; 0,665 и 0,842 мкм в проекции UTM и имеют размер 192×192 пикселей, совпадающий в проекции на местность с размером КТ Landsat. В качестве критерия выбора КТ используется максимум минимальной среднеквадратичной производной яркости по направлению в окне определения КТ, аппроксимацией которого является известный критерий Харриса (Визильтер и др., 2010). Высота КТ определяется по модели SRTM. Дополнительно выдвигается требование надёжного распознавания КТ на протяжении года и отсутствия перепадов высоты более 30 м в пределах области определения КТ, которые могут приводить к относительным перспективным искажениям изображения более 0,5 пикселей на краях поля зрения камер КМСС-М. Указанным требованиям удовлетворяют в основном КТ, выбранные на береговой линии.

На *рис. 2* (см. с. 204) показаны КТ в районе Чёрного и Эгейского морей, которые используются для калибровки камер КМСС-М.

Методика геометрической калибровки камер

Задачей полётной геометрической калибровки камер КМСС-М является определение проекционной функции каждого канала **e**(*s*) в приборной системе координат.

Поскольку эталонные изображения KT представлены в проекции UTM, для калибровки используются геореференцированные изображения KMCC-M также в проекции UTM с разрешением $\Delta = 60$ м.

Методика включает следующие процедуры.

- Выбор КТ. По данным географической привязки изображений КМСС-М определяются минимальные и максимальные значения UTM-координат, покрываемых изображением, и из каталога выбираются те КТ, которые попадают в данную UTM-зону и данный географический интервал. Операции по следующим п. 2–5 выполняются для каждой из N выбранных КТ.
- Определение области поиска КТ. Координаты центра области поиска *i*-й КТ на геореференцированном изображении КМСС-М (*u_{i,0}*, *v_{i,0}*) определяются по UTM-координатам КТ. Размер области поиска центра КТ принимается равным ±5 пикселей относительно (*u_{i,0}*, *v_{i,0}*), что с запасом перекрывает ошибку географической привязки изображений КМСС-М.
- 3. *Нахождение положения КТ на изображении с пиксельной точностью*. На первом этапе эталонные изображения КТ загрубляются до разрешения 60 м. Положение КТ в области поиска на изображении находится путём максимизации нормированного коэффициента корреляции:

$$\rho = \frac{\sum_{u,v} (A(u,v) - \overline{A})(B(u,v) - \overline{B})}{\sqrt{\sum_{u,v} (A(u,v) - \overline{A})^2 \sum_{u,v} (B(u,v) - \overline{B})^2}}$$

при последовательном сдвиге окна поиска в области поиска с шагом 1 пиксель. Здесь A(u, v) — изображение окна поиска на геореференцированном изображении КМСС-М; B(u, v) — эталонное изображение КТ; \overline{A} и \overline{B} — средние значения яркости изображений A(u, v) и B(u, v). Размер окна поиска и размер эталонного изображения КТ принимался равным 21×21 пикселей. Если коэффициент корреляции оказывается меньше заданного порога ($\rho < 0.8$), КТ считается неопознанной.

4. Уточнение координат КТ на изображении с субпиксельной точностью. Уточнение проводится путём последовательного пересчёта загрубленного до 60 м эталонного изображения КТ при его сдвиге с шагом 10 м и его корреляции с образом КТ на изображении КМСС-М, найденным на предыдущем шаге. В результате с субпиксельной точностью находятся координаты центра КТ на георефенцированном изображении (u_i, v_i) и по ним путём интерполяции также с субпиксельной точностью определяются его координаты на исходном изображении маршрута (s_i, L_i) .

5. Определение вектора направления наблюдения КТ в ПСК. Используя номер строки L_i, по навигационному файлу путём интерполяции находятся радиус-вектор КА R_{KA} и матрица перехода из ГСК в ПСК Т_{ПСК ← ГСК}, соответствующие моменту съёмки центра КТ. Отсюда определяется единичный вектор наблюдения КТ в ПСК:

$$\mathbf{e}_i(s_i) = a\mathbf{T}_{\Pi C K \leftarrow \Gamma C K}(\mathbf{R}_i - \mathbf{R}_{KA}),$$

где **R**_{*i*} — радиус-вектор центра КТ в ГСК; *а* — нормировочный коэффициент.

- 6. Определение элементов внутреннего ориентирования канала. Геометрическую калибровку канала можно проводить по одному изображению с достаточным количеством КТ или накапливать КТ по совокупности изображений. Координаты s_i и соответствующие им единичные векторы наблюдения e_i (i = 1, ..., N) используются для нахождения следующих геометрических параметров канала, определяющих его проекционную функцию (Никитин и др., 2011):
 - плоскости наблюдения канала, проходящей через ПЗС-линейку канала и узловую точку *O* объектива, нормаль к которой находится путём МНК-решения системы *N* уравнений e_in = 0; плоскость наблюдения канала вместе с проекцией на неё оси *Z* ПСК определяет внутреннюю систему координат (BCK) канала;
 - эффективного фокусного расстояния *F* и коэффициентов *b_k* полинома, описывающего дисторсию в плоскости наблюдения, которые находятся путём МНК-решения системы уравнений:

$$\beta_i = \arctan\left(\frac{(s_i - s_0)d}{F}\right) + \sum_{k=0}^5 b_k (s_i - s_0)^k,$$

где β_i — углы направления на КТ в плоскости наблюдения; *d* — расстояние между центрами элементарных детекторов (7 мкм);

 коэффициентов *a_k* полинома, описывающего дисторсию в плоскости, перпендикулярной плоскости наблюдения, которые находятся путём МНК-решения системы уравнений:

$$\alpha_{i} = \sum_{k=0}^{5} a_{k} (s_{i} - s_{0})^{k}$$

где α_i — углы направления на КТ перпендикулярно плоскости наблюдения.

7. Определение проекционной функции канала. По элементам внутреннего ориентирования канала рассчитываются единичные векторы наблюдения для всех элементарных детекторов в ПСК е(s), которые сохраняются в файлах геометрической калибровки камеры.

Результаты калибровки

С использованием разрабатываемого банка КТ проводилась калибровка камер МСУ-201 и МСУ-202. Поскольку камера МСУ-250, имеющая более низкое пространственное разрешение и меньший спрос у пользователей, включается лишь эпизодически, имеющихся данных для её геометрической калибровки недостаточно. На изображениях МСУ-201 района Эгейского и Чёрного морей было детектировано 395-714 КТ в зависимости от канала, на изображениях МСУ-202 — 287-546 КТ. Детектированные КТ в основном лежали на береговой линии. Наибольшее число КТ было детектировано в канале 1 (0,7-0,9 мкм), где контраст «суша – вода» максимален, наименьшее — в канале 3 (0,535-0,575 мкм). На *рис. 3* (см. с. 207) для примера показан фрагмент изображения МСУ-201 с детектированными КТ.

Для большей наглядности будем характеризовать измеренные векторы наблюдения в ПСК $\mathbf{e}_i = (e_{i,x}, e_{i,y}, e_{i,z})$ связанными с ними углами (см. *puc*. *1*):

$$\theta_i = \operatorname{arctg}(e_{i,y}/e_{i,z}), \quad \varphi_i = \operatorname{arctg}(e_{i,x}/e_{i,z}),$$

угол θ характеризует наклон направления наблюдения в ПСК вдоль трассы полёта, угол φ — поперёк трассы.

Распределение углов θ и ϕ для детектированных КТ в спектральных каналах камер МСУ-201 и МСУ-202 показано на *рис.* 4 и 5 (см. с. 208, 209). Вследствие отличия углов установки камер и звёздных датчиков на КА от номинальных угол θ отличается от номинальных значений (+8,67° — для канала 1; 0° — для канала 2; -8,67° — для канала 3) и несколько изменяется вдоль ПЗС-линейки. На этих же рисунках показаны остаточные отклонения данных углов от аппроксимирующей проекционной функции. Их среднеквадратическое отклонение, отнесённое к угловому разрешению камер, лежит в пределах 0,2–0,4 пикселей и примерно соответствует точности установления корреляции.



Рис. 3. Детектированные контрольные точки Sentinel на фрагменте изображения МСУ-201. Контрольные точки, детектированные в канале 1, показаны зелёным цветом, в канале 2 — красным, в канала ле 3 — синим, в каналах 1 и 2 — жёлтым, в каналах 1 и 3 — пурпурным, в каналах 2 и 3 — сине-зелёным, во всех трёх каналах — белым цветом



Puc. 4. Углы θ и φ наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения Δθ и Δφ от калиброванной проекционной функции для камеры MCУ-201



Puc. 5. Углы θ и φ наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения Δθ и Δφ от калиброванной проекционной функции для камеры МСУ-202

В *табл.* 2 приведены калиброванные элементы внутреннего ориентирования каналов камер.

		МСУ-201		МСУ-202			
	Канал 1	Канал 2	Канал 3	Канал 1	Канал 2	Канал 3	
Число КТ	714	449	395	546	384	287	
<i>F</i> , мм	101,256	100,041	101,119	101,318	100,182	101,324	
n _x	0,005077	-0,005760	-0,006126	0,002240	0,002430	0,002278	
n_{v}	0,988323	0,999983	0,988610	0,988161	0,999993	0,988935	
n_z	-0,152290	-0,001113	0,150378	-0,153406	-0,002693	0,148332	
a_0	-1,84396e-05	9,40513e-06	2,15126e-05	-1,90125e-05	1,76044e-05	3,92323e-05	
a_1	5,56771e-09	1,32460e-10	-3,72747e-09	4,56480e-10	-2,94542e-09	-2,17311e-08	
a_2	5,30306e-12	-2,14708e-12	-6,73076e-12	5,66290e-12	-4,89346e-12	-9,03434e-12	
a_3	-6,54304e-16	-1,96775e-16	-5,63767e-16	1,84009e-17	5,39232e-16	3,66839e-15	
a_4	-8,22688e-20	-4,99585e-20	5,28011e-20	-8,12567e-20	4,63355e-20	-1,25794e-19	
<i>a</i> ₅	2,32686e-23	-1,09242e-23	8,30521e-24	-1,81903e-24	-4,27937e-23	-1,76898e-22	
<i>b</i> ₀	-8,28960e-04	9,99983e-04	-2,31715e-03	9,93598e-04	3,67806e-03	3,14736e-03	
b_1°	7,47094e-09	5,10083e-09	9,67157e-09	1,69914e-08	1,53509e-08	-5,67665e-09	
b_2	-1,58721e-11	-2,57557e-11	-4,38283e-12	-2,03741e-12	-1,54830e-11	-1,04735e-11	
b_3	-1,18093e-15	-3,30901e-15	-1,23088e-15	-3,03506e-15	-3,23302e-15	8,73401e-16	
b_4	1,18432e-19	1,72753e-19	-8,92744e-20	-2,63113e-19	1,87951e-20	-3,69818e-19	
<i>b</i> ₅	-5,38065e-23	3,32544e-23	-5,78099e-23	3,49284e-23	2,12767e-24	-1,81013e-22	
σ_{θ} , пиксель	0,25	0,29	0,33	0,35	0,23	0,34	
σ_{ϕ} , пиксель	0,32	0,35	0,42	0,21	0,35	0,40	

Таблица 2. Калиброванные элементы внутреннего ориентирования каналов камер МСУ-201 и МСУ-202

Заключение

Разработана методика и программное обеспечение автоматической полётной геометрической калибровки камер КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 по контрольным точкам на земной поверхности. С этой целью использовался банк КТ, создаваемый в ИКИ РАН на основе изображений Sentinel. Остаточное среднеквадратическое отклонение контрольных точек от калиброванной проекционной функции составило 0,23–0,42 пикселей в зависимости от камеры и канала.

Задачей дальнейшей работы является расширение банка контрольных точек и его использование для проверки стабильности геометрической калибровки камер КМСС-М.

Литература

- 1. *Аванесов Г.А., Полянский И.В., Жуков Б.С., Никитин А.В., Форш А.А.* Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исследование Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
- 2. *Васильев А. И.* Калибровка съемочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203–214.
- 3. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю., Бондаренко А. В., Осоков М. В., Моржин А. В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. М.: Физматгиз, 2010. 672 с.
- 4. Жуков Б. С., Василейский А. С., Жуков С. Б., Зиман Я. Л., Полянский И. В., Бекренев О. В., Пермитина Л. И. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. № 1. С. 260–266.

- 5. *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.
- 6. Никитин А. В., Дунаев Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В. Определение геометрических параметров многозональных сканирующих устройств МСУ-100, МСУ-50 на лабораторном стенде и в условиях полета космического аппарата «Метеор-М» // 2-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 13–16 сент. 2010. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 289–307.
- Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / ред. Еремеев В. В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.
- Languille F., Déchoz C., Gaudel A., Greslou D., de Lussy F., Trémas T., Poulain V. Sentinel-2 geometric image quality commissioning: first results // Proc. SPIE. Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI. 2015. V. 9643. DOI: 10.1117/12.2194339.
- Storey J., Roy D. P., Masek J., Gascon F., Dwyer J., Choate M. A note on the temporary misregistration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery // Remote Sensing of Environment. 2016. V. 186. P. 121–122. URL: https://dx.doi.org/10.1016/j. rse.2016.08.025.

Automation of in-flight geometric calibration of multispectral satellite imaging system KMSS-M on board Meteor-M No. 2 satellite

B. S. Zhukov, S. B. Zhukov, T. V. Kondratieva, A. V. Nikitin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

In-flight geometric calibration technique and software were developed for MSU-201 and MSU-202 cameras of the Multispectral Satellite Imaging System (KMSS-M) on board Meteor-M No. 2 satellite. The push-broom CCD cameras have a resolution of 60 m in three spectral bands of 0.535-0.575, 0.63-0.68 and $0.76-0.90 \mu m$. The calibration is performed using a bank of ground control points (GCP) that is being developed on the basis of geo-referenced Sentinel images with the resolution of 10 m in the spectral bands similar to KMCC-M bands. The calibration is demonstrated using KMSS-M images of Aegean and Black sea shore, where from 287 to 714 GCP were recognized depending on channel and camera. The maximal GCP number were recognized in $0.76-0.90 \mu m$ channel, the minimal — in $0.535-0.575 \mu m$ channel. As a result, the parameters of the geometric camera model were defined: channel effective focal lengths and distortion parameters, as well as the orientation parameters of the channel reference systems in the auxiliary camera reference system that is fixed in the basic star sensor reference system. The residual GCP root-mean-square deviation from the projection function ranged from 0.23 to 0.42 pixel.

Keywords: KMSS-M, Meteor-M No. 2, in-flight geometric calibration, interior orientation parameters, ground control points, s/c Sentinel

Accepted: 30.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-212

References

1. Avanesov G.A., Polyanskiy I.V., Zhukov B.S., Nikitin A.V., Forsh A.A., Kompleks mnogozonal'noi sputnikovoi s"emki na bortu KA "Meteor-M" No. 1: tri goda na orbite (Multispectral Satellite Imaging System aboard the Meteor-M No. 1 spacecraft: Three years in orbit), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 2, pp. 74–83.

- 2. Vasil'ev A. I., Kalibrovka s"emochnoi apparatury kosmicheskogo apparata "Kanopus-V" v protsesse ego ekspluatatsii (Calibration of Kanopus-V satellite sensor during its operation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 1, pp. 203–214.
- 3. Vizil'ter Yu. V., Zheltov S. Yu., Bondarenko A. V., Osokov M. V., Morzhin A. V., *Obrabotka i analiz izobrazhenii v zadachakh mashinnogo zreniya* (Image processing and analysis in technical vision problems), Moscow: Fizmatgiz, 2010, 672 p.
- Zhukov B. S., Vasileiskii A. S., Zhukov S. B., Ziman Ya. L., Polyanskii I. B., Bekrenev O. V., Permitina L. I., Predvaritel'naya obrabotka videodannykh KMSS c KA "Meteor-M" (KMSS/Meteor-M imaging data preprocessing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, No. 1, pp. 260–266.
- Katamanov S. N., Razrabotka avtomaticheskogo metoda geograficheskoi privyazki izobrazhenii MSU-MR polyarno-orbital'nogo sputnika "Meteor-M" No. 1 (Development of automatic navigation method 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.
- 6. Nikitin A. V., Dunaev B. S., Kondratieva T. V., Polyanskii I. V., Opredelenie geometricheskikh parametrov mnogozonal'nykh skaniruyushchikh ustroistv MSU-100, MSU-50 na laboratornom stende i v usloviyakh poleta kosmicheskogo apparata "Meteor-M" (Determination of geometrical parameters of multispectral scanners MSU-100 and MSU-50 on a laboratory bench and in flight on Meteor-M), *2-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov*" (2nd All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc., Tarusa, 13–16 Sept., 2010, Moscow: IKI RAN, 2011, pp. 289–307.
- 7. *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Modern technologies of Earth remote sensing data processing), V.V. Eremeev (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2015, 460 p.
- 8. Languille F., Déchoz C., Gaudel A., Greslou D., de Lussy F., Trémas T., Poulain V., Sentinel-2 geometric image quality commissioning: first results, *Proc. SPIE*, *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI*, 2015, Vol. 9643, DOI: 10.1117/12.2194339.
- 9. Storey J., Roy D. P., Masek J., Gascon F., Dwyer J., Choate M., A note on the temporary misregistration of Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) and Sentinel-2 Multi Spectral Instrument (MSI) imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Vol. 186, pp. 121–122, URL: https://dx.doi.org/10.1016/j. rse.2016.08.025.