

Полётная геометрическая калибровка комплекса аппаратуры КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3

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

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: bzhukov@mail.ru

В июне 2023 г. на орбиту был выведен космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-3, в состав научной аппаратуры которого входит комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2, аналогичный установленному на КА «Метеор-М» № 2-2. Он включает две идентичные многозональные камеры с разрешением в надире 55 м, которые вместе покрывают полосу обзора 1020 км. Полётная геометрическая калибровка камер КМСС-2 была проведена по изображениям береговой линии и островов в Эгейском и Чёрном морях с использованием банка контрольных точек, созданного по данным Sentinel-2. На изображениях было распознано от трёх до девяти тысяч контрольных точек в зависимости от камеры и спектрального канала, углы наблюдения которых могут быть аппроксимированы общей проекционной функцией с остаточным среднеквадратическим отклонением 0,32–0,41 пикселя в направлении полёта и 0,52–0,57 пикселя в перпендикулярном направлении. Определены основные элементы внутреннего ориентирования спектральных каналов: фокусное расстояние, нормаль к плоскости наблюдения и коэффициенты дисторсии. Результаты калибровки хранятся в файлах геометрической калибровки камер, которые используются для межканального совмещения и географической привязки изображений.

Ключевые слова: КМСС-2, «Метеор-М» № 2-3, полётная геометрическая калибровка, элементы внутреннего ориентирования, контрольные точки

Одобрена к печати: 16.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193

Введение

В июне 2023 г. на солнечно-синхронную околоземную орбиту был выведен гидрометеорологический космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-3, в состав научной аппаратуры которого входит комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2, выполняющий ежедневную съёмку Земли в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, начатую аппаратурой КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и продолженную КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 (Аванесов и др., 2013; Полянский и др., 2019).

Уникальной особенностью аппаратуры КМСС-2 является сочетание достаточно высокопространственного разрешения от 55 м в надире и широкой полосы обзора более 1000 км при работе на круговой орбите высотой 820 км. Такие возможности продиктованы необходимостью ведения ежедневного оперативного космического мониторинга природных и техногенных процессов, происходящих на территории Российской Федерации, которая должна быть полностью отснята в течение трёх дней.

Целевая информация, получаемая на основе данных КМСС-2, предназначена для решения научных, природоохранных и хозяйственных задач, а в сочетании с данными других приборов дистанционного зондирования представляет интерес также и для поддержки фундаментальных научных исследований (Колбудаев и др., 2017; Плотников и др., 2020).

Наземный сегмент приёма и обработки данных КМСС-2 включает три региональных подразделения Научно-исследовательского центра космической гидрометеорологии «Планета» Росгидромета (Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды): Европейский, Сибирский и Дальневосточный центры, зоны видимости которых обеспечивают полное покрытие территории России, а также 68 территориальных центров. Ведущей организацией, осуществляющей оперативное управление, планирование космической съёмки, приём, обработку, каталогизацию и распространение целевой информации,

является Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦОМЗ) АО «Российские космические системы».

Характеристики КМСС-2

КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3 аналогичен установленному на КА «Метеор-М» № 2-2. Он включает в себя две камеры МСУ-100-ТМ с фокусным расстоянием 125 мм, которые на КА «Метеор-М» № 2-3 условно обозначаются МСУ-231 и МСУ-232. Их основные характеристики приведены ниже. Плоскости наблюдения всех трёх спектральных каналов камер КМСС-2 оптически совмещены (с точностью до нескольких десятков пикселей) в плоскости, перпендикулярной направлению полёта. В этой плоскости их оптические оси отклоняются от «вертикальной» оси космического аппарата на угол $\pm 15,2^\circ$, в результате чего обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер более чем 1000 км. Вследствие наклона оптических осей камер размер проекции пикселя в плоскости наблюдения изменяется от 55 м в надире до 80 м на краю полосы съёмки. Шаг отсчёта в направлении полёта определяется частотой строк 125 Гц и равен 53 м.

Технические характеристики камер КМСС-2

Фокусное расстояние объектива	125 мм
Относительное отверстие объектива	1:4,3
Длина строки изображения	7984 элементов
Угловое поле зрения	32°
Размер элемента ПЗС-линейки	9×9 мкм
Угловое разрешение	15 угл. с
Размер проекции пикселя в плоскости наблюдения ($H = 820$ км) ..	55–80 м
Шаг отсчёта в направлении полёта	53 м
Наклон оптической оси камер в плоскости, перпендикулярной направлению полёта	$\pm 15,2^\circ$
Полоса захвата двумя камерами ($H = 820$ км)	1020 км
Число спектральных каналов	3
Спектральные зоны (на уровне 0,5)	0,520–0,590 мкм (канал 3) 0,640–0,690 мкм (канал 1) 0,785–0,900 мкм (канал 2)
Число разрядов квантования	10
Частота строк	125 Гц

Методика и результаты геометрической калибровки

В данном сообщении приводятся результаты полётной геометрической калибровки камер КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3, которая выполнялась по методике, применявшейся на предыдущих комплексах КМСС и описанной в работах (Жуков и др., 2018, 2019).

Полётная геометрическая калибровка проводится на основе синхронно получаемых навигационных данных, которые включают для каждой строки исходных изображений КМСС-2 время регистрации, радиус-вектор КА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК) и матрицу перехода из обобщённой системы координат звёздных датчиков (СКЗД) в ГСК.

Задачей геометрической калибровки является определение единичного вектора наблюдения $e(s)$ для каждого элементарного детектора s каждой ПЗС-линейки (ПЗС — прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device). Фактически полётная калибровка проводится в СКЗД, в которой предоставляются данные об ориентации КА, используемые для геопривязки изображений. Однако для наглядности представления векторы $e(s)$ определяются в условной приборной системе координат (ПСК), жёстко связанной с СКЗД, с исполь-

зованием номинальных углов установки камер и звёздных датчиков на КА. Реальные углы установки камер и звёздных датчиков на практике неизвестны. Они могут отличаться от калиброванных на земле и измениться в полёте. Их отличие от номинальных отражается и учитывается в калибруемом распределении $e(s)$ в ПСК.

Для калибровки используется созданный банк контрольных точек (КТ) на основе изображений Sentinel-2 (<https://scihub.copernicus.eu/>), имеющих разрешение 10 м и точность географической привязки 12 м (3σ) (Languille et al., 2015). Эталонные изображения КТ выбираются по геореференцированным изображениям, полученным съёмочной системой MSI (*англ.* Multispectral Instrument) на КА Sentinel-2 в спектральных зонах 0,56; 0,665 и 0,842 мкм, близких к спектральным зонам КМСС-2. Эталонные изображения представлены в универсальной поперечной проекции Меркатора UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator) и имеют размер 192×192 пикселя, где пиксель равен 10 м (при закруглении до 60 м — 32×32 пикселя).

Для калибровки используются геореференцированные изображения КМСС-2 также в проекции UTM с разрешением $\Delta = 60$ м.

Методика калибровки включает следующие процедуры, проводимые независимо для каждой линейки фотоприёмников:

- выбор КТ, которые попадают в область, покрываемую изображением, и определение их области поиска КТ, которая с запасом перекрывает ошибку географической привязки изображений КМСС-2;
- нахождение положения КТ на изображении корреляционным методом с пиксельной точностью с использованием закругленных до 60 м эталонных изображений КТ и его уточнение до 10 м по изображению КТ с исходным разрешением;
- пересчёт положения КТ на исходном изображении, где положение и ориентация СКЗД в момент съёмки каждой строки известна по навигационным данным, а координата в строке соответствует номеру элементарного детектора;
- определение векторов направления наблюдения КТ в ГСК и их преобразование в ПСК с использованием данных о положении и ориентации КА;
- определение элементов внутреннего ориентирования канала (эффективного фокусного расстояния, положения плоскости наблюдения и коэффициентов дисторсии в плоскости наблюдения и в перпендикулярном направлении) и построение на их основе аппроксимирующей проекционной функции $e(s)$.

Для калибровки использовались 30 кадров МСУ-231 и 34 кадра МСУ-232, полученных в августе – ноябре 2023 г., с изображением береговой линии и островов в Эгейском и Чёрном морях. Примеры полученных изображений с детектированными КТ показаны на *рис. 1* и *2* (см. с. 188).

Общее число распознанных КТ в каналах камер составляло от 2844 до 8610. Направления на КТ, полученные в ПСК на разных изображениях, хорошо ложатся на общую аппроксимирующую функцию (*рис. 3* и *4*, см. с. 189 и 190). Здесь для большей наглядности измеренные векторы наблюдения в ПСК представляются углами и φ , которые характеризуют наклон направления наблюдения вдоль и поперёк трассы полёта соответственно. Точки, соответствующие отдельным КТ, полученные в разное время на протяжении четырёх месяцев и под разными углами, на графиках $\vartheta(s)$ и $\varphi(s)$ сливаются в общие кривые. Более детально разброс результатов калибровки можно проследить на графиках отклонений этих углов от аппроксимирующей функции $\Delta\vartheta(s)$ и $\Delta\varphi(s)$. Указанные отклонения носят случайный характер, в подавляющем большинстве случаев не превышают 1 пикселя (15 угл. с) и характеризуются среднеквадратическим отклонением 0,32–0,41 пикселя в направлении полёта и 0,52–0,57 пикселя в перпендикулярном направлении (*таблица*). Большое количество использованных при калибровке КТ, которые покрывают всю длину ПЗС-линеек (около 8000 элементарных детекторов), сравнительно малый разброс углов наблюдения отдельных КТ в ПСК относительно общей аппроксимирующей функции при отсутствии систематических отклонений результатов, полученных на протяжении четырёх месяцев под разными углами наблюдения, свидетельствуют о репрезентативности и устойчивости проведённой калибровки.



Рис. 1. Фрагмент изображения, полученного камерой МСУ-231 21.08.2023 в 10:19:00.020 МДВ (московское декретное время) в районе Керченского пролива; квадратами обозначены распознанные контрольные точки; R (англ. red, красный) — канал 1, G (англ. green, зелёный) — канал 2, B (англ. blue, синий) — канал 3

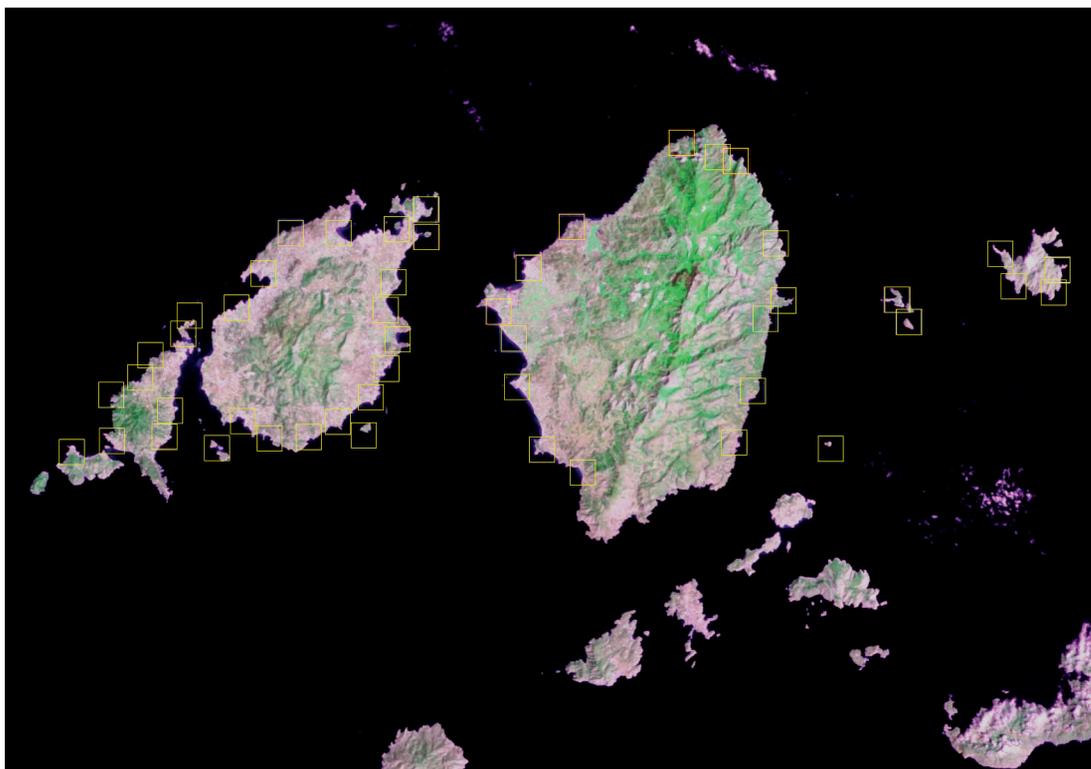


Рис. 2. Фрагмент изображения, полученного камерой МСУ-232 25.08.2023 в 10:27:25.021 МДВ камерой МСУ-232 над островами в Эгейском море; квадратами обозначены распознанные контрольные точки; R — канал 1, G — канал 2, B — канал 3

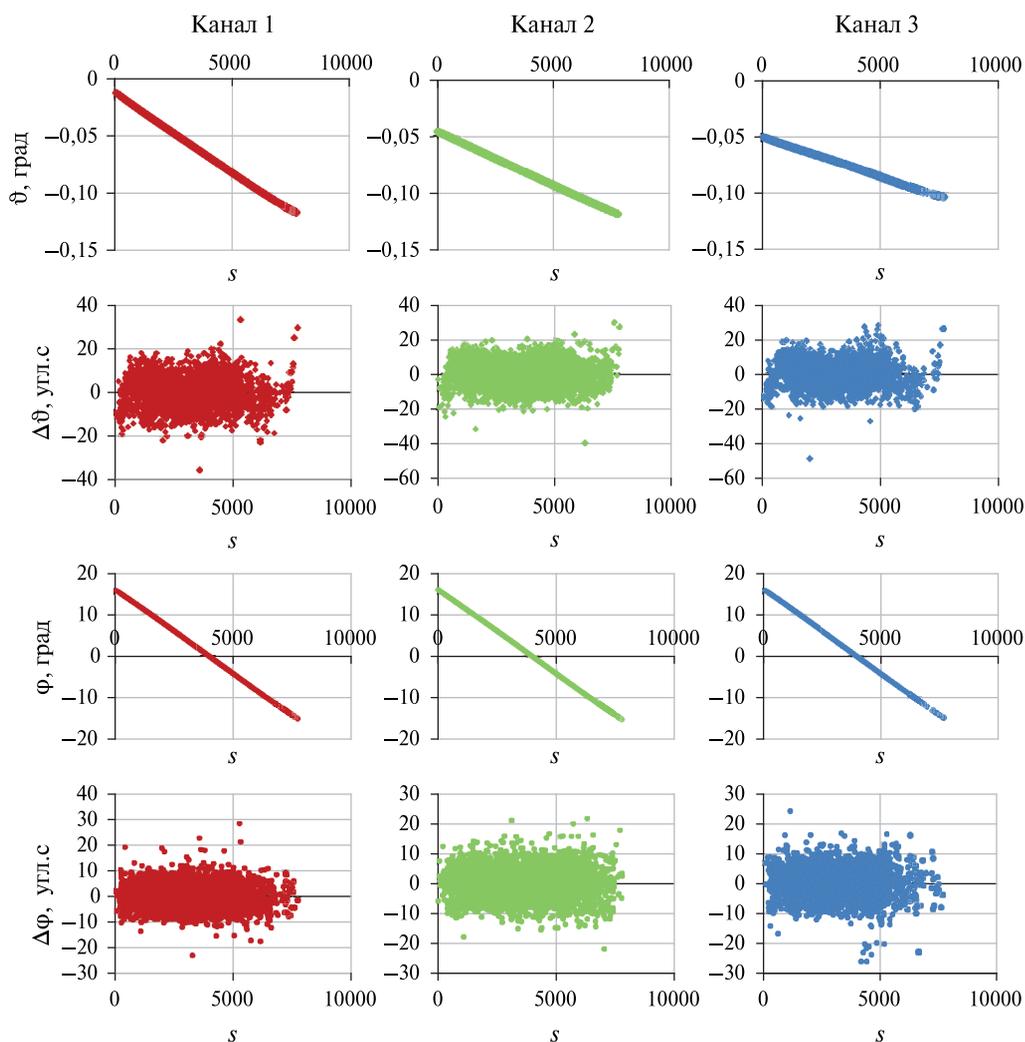


Рис. 3. Углы ϑ и φ наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения $\Delta\vartheta$ и $\Delta\varphi$ от калиброванной проекционной функции для камеры МСУ-231

Число найденных КТ и параметры калибровки

Параметр	МСУ-231			МСУ-232		
	канал 1	канал 2	канал 3	канал 1	канал 2	канал 3
Число КТ	3654	5158	2844	7939	8610	7548
Фокусное расстояние, мм	125,103	125,195	125,107	125,016	125,108	125,024
СКО по ϑ , угл. с/пиксели	4,8/0,32	5,0/0,33	4,8/0,32	6,2/0,41	6,0/0,40	6,0/0,40
СКО по φ , угл. с/пиксели	8,1/0,54	8,0/0,53	7,8/0,52	8,6/0,57	8,3/0,55	8,3/0,55

Максимальное угловое расхождение каналов на краю поля зрения достигает ~ 400 угл. с (около 30 пикселей): для МСУ-232 — в направлении полёта, для МСУ-231 — в поперечном направлении (рис. 5, см. с. 190). При угловом дрейфе КА не более 0,005 град/с это приведёт к угловому рассогласованию каналов геометрически скорректированных изображений не более чем на четверть пикселя.

Проекционная функция каналов $e(s)$ в ПСК хранится в файлах геометрической калибровки, которые предоставляются пользователям и используются при геометрическом совмещении и геопривязке изображений по навигационным данным при предварительной обработке изображений (Жуков и др., 2008).

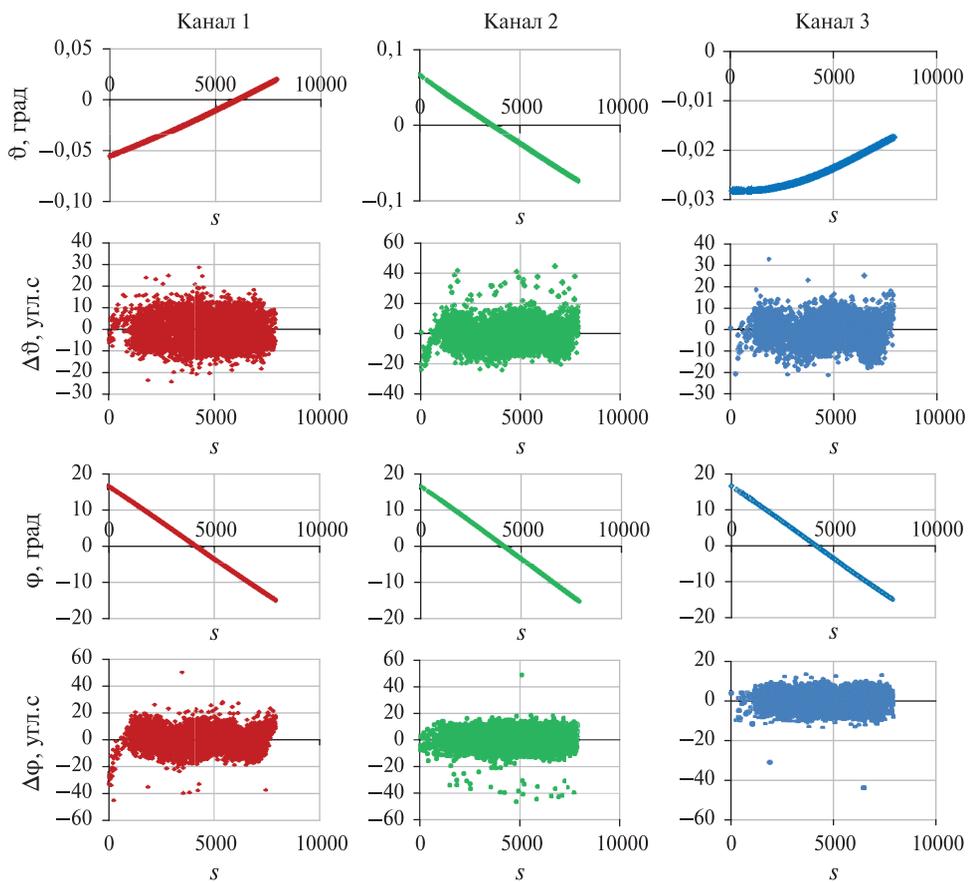


Рис. 4. Углы θ и φ наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения $\Delta\theta$ и $\Delta\varphi$ от калиброванной проекционной функции для камеры МСУ-232

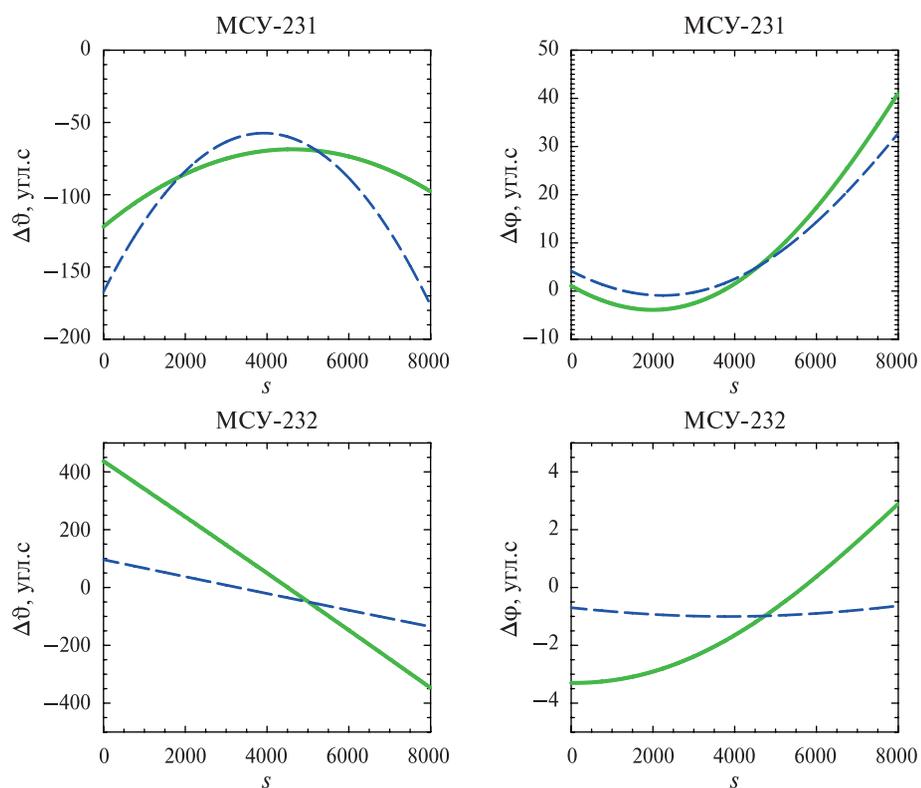


Рис. 5. Угловое расхождение каналов камер КМСС-2 относительно канала 1 вдоль трассы полёта (угол $\Delta\theta$) и поперёк трассы полёта (угол $\Delta\varphi$)

Точность геопривязки изображений КМСС-2 в оперативном режиме контролируется и при необходимости корректируется по среднему смещению КТ на изображении (Жуков и др., 2021). Значительные ошибки геореференцирования изображений с использованием результатов калибровки и навигационной информации, которые были отмечены на предыдущих приборах этой серии, в основном были связаны с некорректной навигационной информацией вследствие использования для измерения ориентации одного звёздного датчика. В случае систематических ошибок геореференцирования при наличии корректной навигационной информации геометрическая калибровка камер КМСС-2 повторяется и файлы геометрической калибровки обновляются.

Заключение

Проведена полётная геометрическая калибровка камер КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-3, которая при наличии корректной навигационной информации обеспечивает субпиксельную точность геопривязки получаемых изображений.

Литература

1. Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С., Никитин А. В., Фори А. А. Комплекс многозональной спутниковой съемки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
2. Жуков Б. С., Василейский А. С., Жуков С. Б. и др. Предварительная обработка видеоданных КМСС с КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 260–266.
3. Жуков Б. С., Жуков С. Б., Кондратьева Т. В., Никитин А. В. Автоматизация полетной геометрической калибровки Комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 201–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-2012.
4. Жуков Б. С., Гришанцева Л. А., Жуков С. Б. и др. Полетная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 93–100. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
5. Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Полянский И. В. Коррекция автоматической географической привязки изображений комплекса многозональной спутниковой съемки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 75–81. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.
6. Колбудаев П. А., Плотников Д. Е., Лупян Е. А., Барталев С. А. Предварительная обработка данных МСУ-100М («Метеор-М» № 2) для решения задач количественной оценки характеристик земной поверхности // 7-я Международ. научно-техн. конф. «К. Э. Циолковский — 160 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика»: сб. тез. 4–6 окт. 2017, Рязань. 2017. С. 350–353.
7. Плотников Д. Е., Колбудаев П. А., Жуков Б. С. и др. Публикация коллекции мультиспектральных измерений прибором КМСС-М (КА «Метеор-М» № 2) для количественной оценки характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 276–282. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276–282.
8. Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Прохорова С. А., Сметанин П. С. Комплекс многозональной спутниковой съемки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
9. Languille F., Déchoz C., Gaudel A. et al. Sentinel-2 geometric image quality commissioning: first results // Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI: Proc. SPIE. 2015. V. 9643. Article 964306. DOI: 10.1117/12.2194339.

In-flight geometric calibration of multispectral satellite imaging system KMSS-2 on board Meteor-M No. 2-3 satellite

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

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru

Multispectral satellite imaging system KMSS-2 was put into orbit in June 2023 on board Meteor-M No. 2-3 satellite. The instrument is similar to the one on board Meteor-M No. 2-2. It consists of two identical multispectral cameras with a nadir resolution of 55 m and covers a total swath of 1020 km. KMSS-2 in-flight geometric calibration was performed using images of the shoreline and islands in Aegean and Black seas and a bank of Sentinel-based ground control points. The total number of recognized ground control points during calibration varied from approximately 3000 to 9000 depending on camera and channel. Their observation angles could be approximated by a common projection function with a root-mean-square deviation of 0.32 to 0.41 pixels in flight direction and 0.52 to 0.57 pixels in the perpendicular direction. The internal calibration parameters of each spectral channel were defined, including focal length, normal to the observation plane and distortion coefficients. The calibration results are stored in the calibration files that are used along with navigation data for KMSS-2 image coregistration and georeferencing.

Keywords: KMSS-2, Meteor-M No. 2-3, in-flight geometric calibration, interior calibration parameters, ground control points

Accepted: 16.01.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-185-193

References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Nikitin A. V., Forsh A. A., 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 (in Russian).
2. Zhukov B. S., Vasileiskii A. S., Zhukov S. B. et al., KMSS/Meteor-M imaging data pre-processing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, No. 1, pp. 260–266 (in Russian).
3. Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kondratieva T. V., Nikitin A. V., Automation of in-flight Geometric Calibration of Multispectral Satellite Imaging System KMSS-M on-board Meteor-M No. 2 Satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 201–212 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-201-2012.
4. Zhukov B. S., Grishantseva L. A., Kondratieva T. V. et al., In-flight geometric calibration of KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 93–100 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100.
5. Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Polyanskiy I. V., Correction of automatic image georeferencing for the KMSS-2 multispectral satellite imaging system on-board Meteor-M No. 2-2 satellite, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 75–81 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-75-81.
6. Kolbudaev P. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A., Bartalev S. A., Preliminary data processing of MSU-100M (Meteor-M No. 2) for solving problems of quantitative assessment of the characteristics of the earth's surface, *7-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "K. E. Tsiolkovskii — 160 let so dnya rozhdeniya. Kosmonavtika. Radioelektronika. Geoinformatika"* (7th Intern. Scientific and Technical Conf. "K. E. Tsiolkovsky — 160 years since birth. Cosmonautics. Radionics. Geoinformatics"), Book of abstr., Ryazan, 2017, pp. 350–353 (in Russian).
7. Plotnikov D. E., Kolbudaev P. A., Zhukov B. S. et al., The collection of multispectral KMSS-M (Meteor-M No. 2) satellite data aimed at quantitative assessment of the Earth surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 7, No. 7, pp. 276–282 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-276-282.

8. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hygrometeorological spacecraft, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 86–92 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-83-92.
9. Languille F., Déchoz C., Gaudel A. et al., Sentinel-2 geometric image quality commissioning: first results, *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI: Proc. SPIE*, 2015, Vol. 9643, Article 964306, DOI: 10.1117/12.2194339.