

## Полётная геометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2

Б. С. Жуков<sup>1</sup>, Л. А. Гришанцева<sup>2</sup>, Т. В. Кондратьева<sup>1</sup>,  
А. В. Никитин<sup>1</sup>, Л. И. Пермитина<sup>2</sup>, И. В. Полянский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*  
*E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Научный центр оперативного мониторинга Земли*  
*АО «Российские космические системы», Москва, 127490, Россия*

В состав комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2, который был выведен на орбиту в июле 2019 г., входят две идентичные трёхзональные камеры с тремя взаимозаменяемыми ПЗС-линейками в каждом канале, имеющие разрешение в надире 55 м и суммарную полосу обзора 1020 км. Полётная геометрическая калибровка КМСС-2 была проведена по изображениям 32 маршрутов, снятым в августе–ноябре 2019 г., с использованием банка контрольных точек (КТ), созданного по данным Sentinel. На изображениях было распознано 534–3025 контрольных точек в зависимости от камеры, спектрального канала и ПЗС-линейки. Для каждой ПЗС-линейки определены основные элементы внутреннего ориентирования: фокусное расстояние, положение плоскости наблюдения и коэффициенты дисторсии, — и по ним рассчитана проекционная функция. Проверка точности калибровки проводилась по среднему смещению КТ на 16 дополнительных кадрах, которые ранее не использовались при калибровке. Среднеквадратическая ошибка геопривязки изображений составила 12–39 м вдоль и 16–30 м поперёк трассы полёта в зависимости от камеры, канала и ПЗС-линейки, максимальная ошибка — 96 м вдоль и 45 м поперёк трассы. Среднеквадратическая ошибка межканального совмещения изображений составила 3–4 м, максимальная — 8 м (0,15 пикселя). Результаты калибровки хранятся в файлах геометрической калибровки камер, которые используются для межканального совмещения и географической привязки изображений.

**Ключевые слова:** КМСС-2, «Метеор-М», полётная геометрическая калибровка, элементы внутреннего ориентирования, контрольные точки

Одобрена к печати: 19.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100

### Введение

В июле 2019 г. на орбиту был выведен космический аппарат (КА) «Метеор-М» № 2-2, в состав научной аппаратуры которого входит комплекс многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 (Полянский и др., 2019). КМСС-2 является усовершенствованной версией КМСС на КА «Метеор-М» № 1 и КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 (Аванесов и др., 2013).

Геометрическая калибровка камер КМСС-2 проводилась на Земле. Вследствие возможного изменения геометрических характеристик камер из-за перегрузок при запуске, а также факторов космической среды (изменение температуры, вакуум, невесомость) возникает необходимость периодической проверки калибровки камер в полёте. В данной работе описываются результаты полётной калибровки КМСС-2 на этапе лётных испытаний.

### Характеристики и видеоданные КМСС-2

КМСС-2 включает в себя две идентичные камеры МСУ-100 ТМ с фокусным расстоянием 125 мм, условно обозначаемые МСУ-221 и МСУ-222, основные характеристики которых приведены ниже. В отличие от КМСС и КМСС-М 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 обеспечивается формирование суммарной полосы обзора камер около 1020 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.

В каждом канале ПЗС-фотоприёмник (ПЗС — прибор с зарядовой связью) имеет три взаимозаменяемых линейки фотодиодов с числом активных элементов 7984, причём в каждый момент съёмки используется только одна линейка, а остальные являются запасными.

#### Технические характеристики камер КМСС-2

Фокусное расстояние объектива . . . . .	125 м
Относительное отверстие объектива . . . . .	1:4,3
Длина строки изображения . . . . .	7984 элементов
Угловое поле зрения . . . . .	$32^\circ$
Размер элемента ПЗС . . . . .	$9 \times 9$ 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 0,640–0,690 мкм 0,785–0,900 мкм
Число разрядов квантования . . . . .	10
Частота строк . . . . .	125 Гц

После получения и распаковки видеоданных КМСС-2 и сопутствующей навигационной информации от бортового синхронизирующего координатно-временного устройства (БСКВУ-М) для каждого маршрута съёмки формируются:

- исходные изображения маршрута в трёх спектральных зонах;
- навигационный файл, содержащий для каждой строки исходных изображений время регистрации, радиус-вектор КА в гринвичской геоцентрической системе координат (ГСК) и матрицу перехода из обобщённой системы координат звёздных датчиков (СКЗД) в ГСК.

Типичная длина маршрута —  $\sim 100$  тыс. строк.

Предварительная обработка видеоданных КМСС-2 включает нарезание исходных изображений маршрута съёмки на отдельные кадры размером 9000 строк, имеющие примерно одинаковый размер по обеим координатам, их радиометрическую коррекцию, географическую привязку и трансформирование в проекцию UTM (Universal Transverse Mercator) (Жуков и др., 2008).

Для географической привязки помимо навигационного файла используются файлы геометрической калибровки камер, содержащие для каждого элементарного детектора  $s$  каждой ПЗС-линейки единичный вектор наблюдения  $e(s)$ , рассчитываемый по результатам 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), жёстко связанной с СКЗД. Ориентация осей ПСК в СКЗД определяется номинальными углами установки камер и звёздных датчиков на КА. При этом номинально направление ПЗС-линеек совпадает с направлением оси  $X$  ПСК, а направление оптической оси объективов — с направлением оси  $Z$

ПСК. Реальные значения углов установки камер и звёздных датчиков, которые в полёте могут отличаться от прокалиброванных на Земле и на практике обычно неизвестны, учитываются в калибруемых параметрах внутреннего ориентирования каналов камер.

## Методика и результаты геометрической калибровки камер

Задачей полётной геометрической калибровки камер КМСС-2 являлось определение проекционной функции  $e(s)$  в ПСК для каждой из трёх ПЗС-линеек в каждом канале камер.

Методы полётной калибровки космических съёмочных систем рассматриваются, например, в работах (Васильев, 2015; Катаманов, 2014; Современные..., 2015). В данном исследовании для калибровки камер КМСС-2 применяется метод, детально описанный в работе (Жуков и др., 2018), который основан на использовании созданного в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) банка контрольных точек (КТ) на основе изображений Sentinel, имеющих разрешение 10 м и точность географической привязки 12 м (3 $\sigma$ ) (<https://scihub.copernicus.eu/>). Эталонные изображения КТ выбираются в спектральных зонах Sentinel 0,56; 0,665 и 0,842 мкм, близких к спектральным зонам КМСС-2, в проекции UTM и имеют размер 192×192 пикселей размером 10 м (при загрузке до 60 м — 32×32 пикселя).

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

Методика калибровки включает следующие процедуры, проводимые независимо для каждой ПЗС-линейки каждого спектрального канала:

- выбор КТ, которые попадают в область, покрываемую изображением;
- определение области поиска КТ, которая с запасом перекрывает ошибку географической привязки изображений КМСС-2 (для данной работы принималась равной  $\pm 10$  пикселей);
- нахождение положения КТ на изображении корреляционным методом с пиксельной точностью, используя загруженные до 60 м эталонные изображения КТ, и его уточнение до 10 м с помощью изображений КТ с исходным разрешением;
- определение векторов направления наблюдения КТ в ПСК;
- определение элементов внутреннего ориентирования канала: эффективного фокусного расстояния, положения плоскости наблюдения и коэффициентов дисторсии в плоскости наблюдения и в перпендикулярном направлении, построение на их основе аппроксимирующей проекционной функции  $e(s)$ .

Для калибровки были взяты изображения береговой линии Эгейского и Чёрного морей, полученные в августе – ноябре 2019 г. на 32 маршрутах, с поочерёдным использованием для съёмки всех ПЗС-линеек в каждом канале. Общее число распознанных КТ составляло 534–3025 в зависимости от камеры, спектрального канала и ПЗС-линейки. Пример детектированных КТ на фрагменте одного из маршрутов показан на *рис. 1* (см. с. 96).

Контрольные точки, полученные на разных маршрутах, хорошо ложатся на общую проекционную функцию (*рис. 2*, см. с. 97). Для большей наглядности измеренные векторы наблюдения  $e = (e_x, e_y, e_z)$  представляются связанными с ними углами:

$$\theta = \arctg(e_y/e_z), \quad \varphi = \arctg(e_x/e_z),$$

угол  $\theta$  характеризует наклон направления наблюдения в ПСК вдоль трассы полёта, угол  $\varphi$  — поперёк трассы.

*Рисунок 3* (см. с. 98) иллюстрирует калиброванные проекционные функции  $e(s)$  для всех каналов камер КМСС-2 в виде функций углов наблюдения  $\theta(s)$  и  $\varphi(s)$ . Для лучшего представления межканальных различий функций  $\varphi(s)$  показана также их разность с функцией  $\varphi(s)$  первой ПЗС-линейки в канале 1. Наименьшее угловое расхождение каналов обеих камер достигается при выборе ПЗС-линейки 3 в 1-м канале и ПЗС-линейки 1 во 2-м и 3-м каналах,

которые, таким образом, представляют оптимальную конфигурацию ПЗС-линеек, рекомендуемую для штатной эксплуатации. В этом случае угловое расхождение каналов не превышает 5,5 угл. мин в направлении полёта и 3,5 угл. мин в поперечном направлении. При этом разница во времени съёмки одних и тех же участков поверхности Земли в разных каналах с высоты 820 км не превышает 0,1 с, что при угловом дрейфе КА не более 0,005 град/с приведёт к угловому рассогласованию каналов не более чем на четверть пикселя. Поэтому относительная межканальная калибровка каналов стабильна по отношению к угловому дрейфу КА.

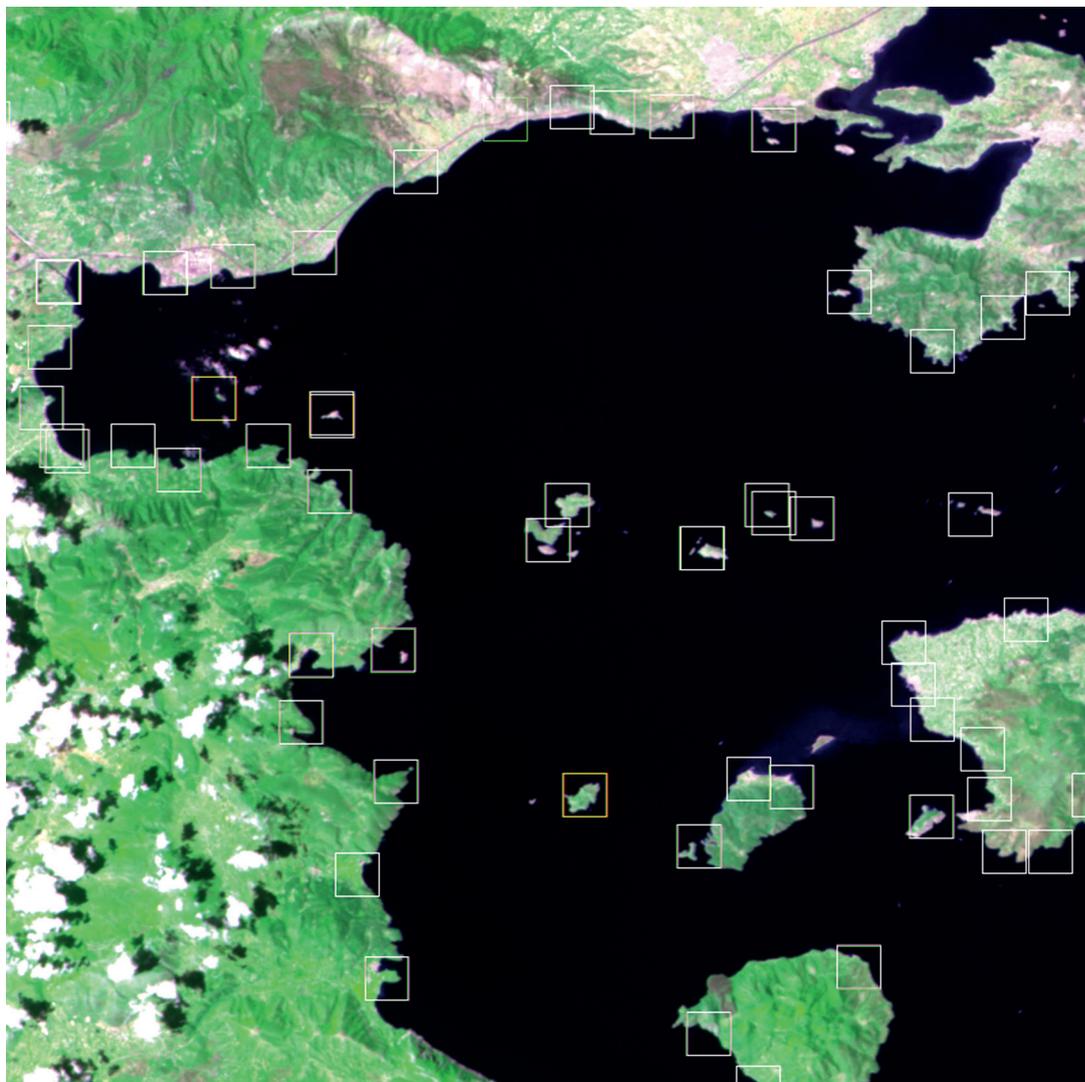


Рис. 1. Распознанные контрольные точки Sentinel на фрагменте изображения МСУ-221. Контрольные точки, распознанные в канале 1, показаны зелёным цветом; в канале 2 — красным; в канале 3 — синим; в каналах 1 и 2 — жёлтым; в каналах 1 и 3 — пурпурным; в каналах 2 и 3 — сине-зелёным; во всех трёх каналах — белым цветом

Проверка точности калибровки проводилась по среднему смещению КТ на 16 дополнительных кадрах, которые ранее не использовались при калибровке. Среднеквадратическая ошибка геопривязки изображений составила 12–39 м вдоль трассы полёта в зависимости от камеры, спектрального канала и ПЗС-линейки и 16–30 м — поперёк трассы; максимальная ошибка — 96 м вдоль и 45 м поперёк трассы. Повышенная ошибка геопривязки вдоль трассы полёта, вероятно, связана с погрешностями привязки времени. Среднеквадратическая ошибка межканального совмещения изображений составила 3–4 м, максимальная — 8 м (0,15 пикселя).

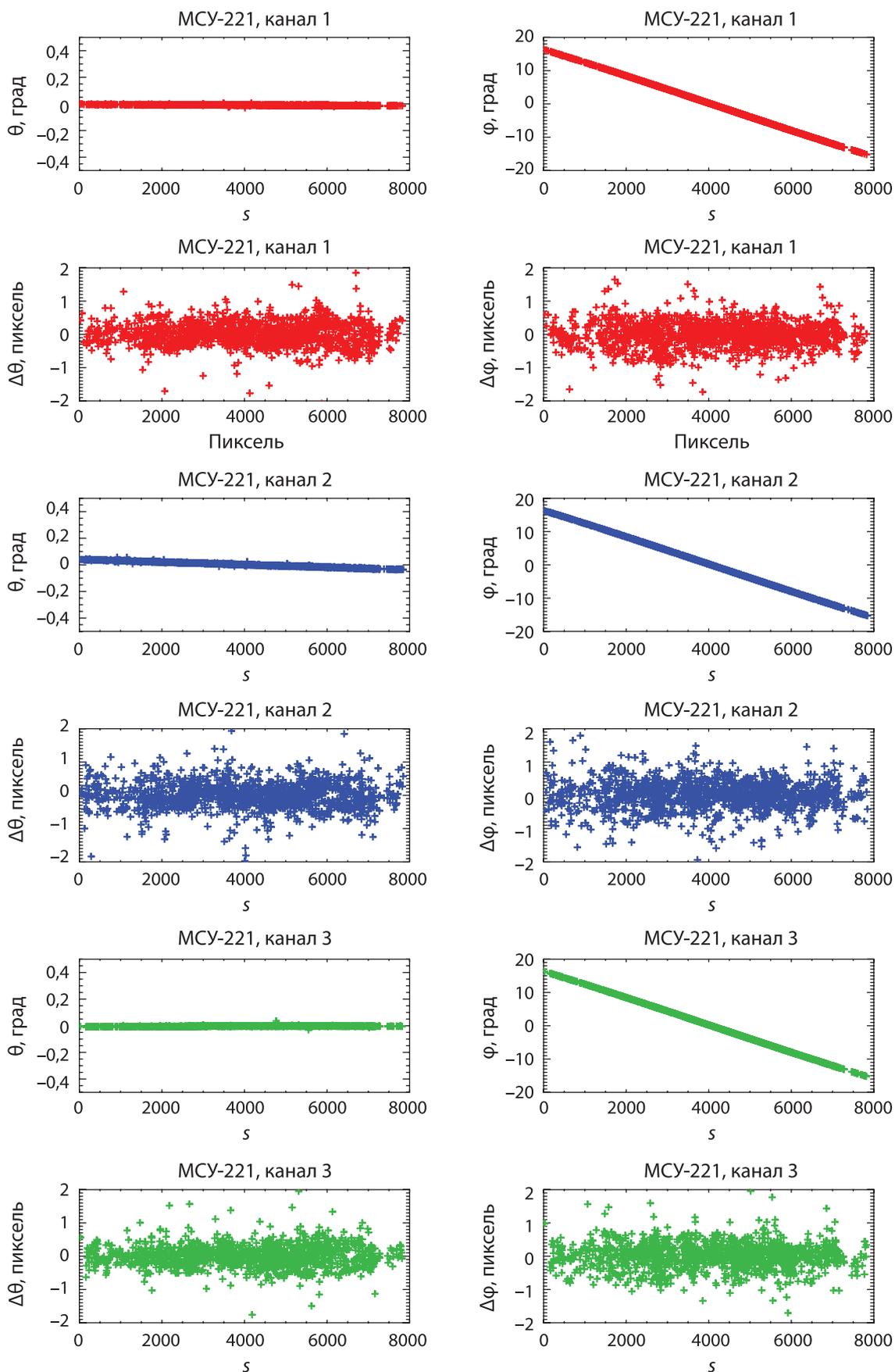


Рис. 2. Углы  $\theta$  и  $\phi$  наблюдения контрольных точек в ПСК и их остаточные отклонения  $\Delta\theta$  и  $\Delta\phi$  от аппроксимирующей проекционной функции в зависимости от номера элементарного детектора  $s$  (на примере оптимальной комбинации ПЗС-линеек камеры МСУ-221)

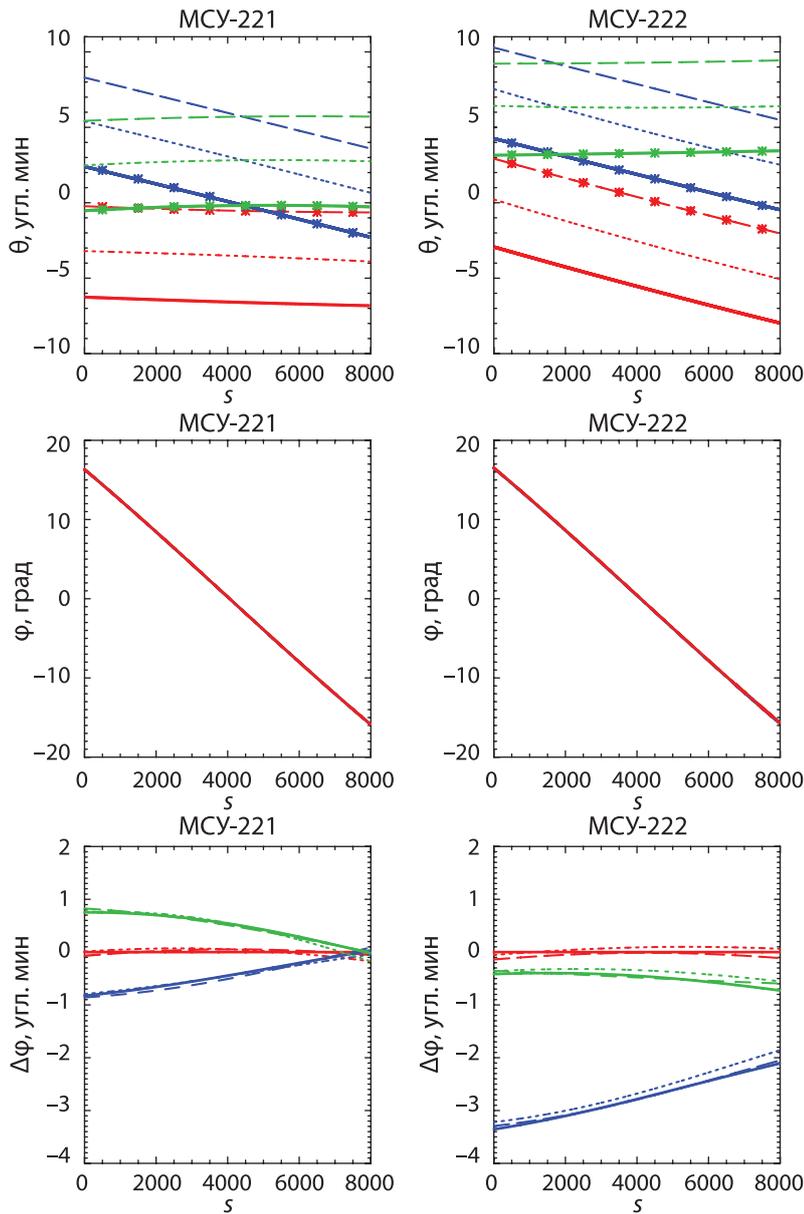


Рис. 3. Зависимость углов наблюдения вдоль трассы  $\theta$  (верхний ряд), поперек трассы  $\phi$  (средний ряд) и разности углов  $\phi$  между данной ПЗС-линейкой и первой ПЗС-линейкой первого канала  $\Delta\phi$  (нижний ряд) от номера элементарного детектора  $s$  для камер КМСС-2 по результатам калибровки: канал 1 — красный цвет, канал 2 — синий, канал 3 — зелёный; ПЗС-линейка 1 — сплошная линия, ПЗС-линейка 2 — пунктирная, ПЗС-линейка 3 — штриховая. Звёздочками обозначен оптимальный выбор ПЗС-линейек

Проекционная функция  $e(s)$  каналов хранится в файлах геометрической калибровки, которые используются при геометрическом совмещении и геопривязке изображений по навигационным данным в процессе предварительной обработки изображений. При наличии ошибок в навигационных данных возможны погрешности геопривязки изображений, которые могут дополнительно корректироваться по контрольным точкам или опорным изображениям (см. например, работу (Современные..., 2015)). Другим источником ошибок геопривязки, особенно при больших углах наблюдения на краях поля зрения, являются отклонения высоты поверхности от референц-эллипсоида WGS-84, на которые проектируются изображения (для устранения этого эффекта предусмотрена процедура орторектификации, которая также требует геопривязки данных с субпиксельной точностью). Однако и в этих случаях относительная межканальная калибровка каналов существенно не нарушается, что облегчает проведение указанных процедур дополнительной географической привязки и орторектификации.

## Заключение

На этапе лётных испытаний комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-2 на КА «Метеор-М» № 2-2 проведена полётная геометрическая калибровка входящих в его состав камер с использованием банка КТ, созданного на основе изображений Sentinel. Определены основные параметры внутреннего ориентирования всех фотоприёмных линеек спектральных каналов камер: фокусное расстояние, положение плоскости наблюдения, коэффициенты дисторсии, — и на их основе построены проекционные функции, сохраняемые в файлах геометрической калибровки. Показано, что при использовании результатов калибровки и корректных навигационных данных межканальное совмещение изображений и их геопривязка могут быть проведены с субпиксельной точностью, что является необходимым условием успешной эксплуатации КМСС-2 в штатном режиме. На протяжении эксплуатации КМСС-2 планируется ежегодная проверка стабильности его геометрической калибровки.

## Литература

1. *Аванесов Г. А., Полянский И. В., Жуков Б. С., Никитин А. В., Фори А. А.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки на борту КА «Метеор-М» № 1: три года на орбите // Исслед. Земли из космоса. 2013. № 2. С. 74–83.
2. *Васильев А. И.* Калибровка съёмочной аппаратуры космического аппарата «Канопус-В» в процессе его эксплуатации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 203–214.
3. *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. Т. 5. № 1. С. 260–266.
4. *Жуков Б. С., Жуков С. Б., Кондратьева Т. В., Никитин А. В.* Автоматизация полётной геометрической калибровки Комплекса многозональной спутниковой съёмки КМСС-М на КА «Метеор-М» № 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 201–212.
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. *Полянский И. В., Жуков Б. С., Кондратьева Т. В., Прохорова С. А., Сметанин П. С.* Комплекс многозональной спутниковой съёмки среднего разрешения для гидрометеорологических космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 83–92.
7. *Современные технологии обработки данных дистанционного зондирования Земли / ред. Еремеев В. В. М.: Физматлит, 2015. 460 с.*

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

**B. S. Zhukov<sup>1</sup>, L. A. Grishantseva<sup>2</sup>, T. V. Kondratieva<sup>1</sup>,  
A. V. Nikitin<sup>1</sup>, L. I. Permitina<sup>2</sup>, I. V. Polyanskiy<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: bzhukov@iki.rssi.ru*

<sup>2</sup> *Research Center for Earth Operative Monitoring  
Russian Space Systems JSC, Moscow 127490, Russia*

KMSS-2 multispectral satellite imaging system on board Meteor-M No. 2-2 satellite, which was put into orbit in July 2019, consists of two identical multispectral cameras with three interchangeable CCD lines in each of three spectral channel. It has 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 Aegean and Black Seas shores acquired in August – November, 2019 from 32 orbits and a bank of Sentinel-based ground control points (GCP). The total number of recognized GCPs varied from 534 to 3025 depending on camera, channel and CCD line. The interior calibration parameters of each CCD line were defined, including focal length, observation plane and distortion coefficients and used to construct the projection function. Calibration accuracy was tested using the average GCP displacement in 16 images that were not used in calibration. The RMS georeferencing error was 12 to 39 m along track and 16 to 30 m cross track depending on CCD line, while the maximal error was 96 and 45 m along and cross track respectively. The RMS-error of interchannel coregistration was 3 to 4 m, with the maximal error of 8 m (0.15 of the pixel size). 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, in-flight geometric calibration, interior calibration parameters, ground control points

Accepted: 19.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-93-100

## References

1. Avanesov G. A., Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Nikitin A. V., Forsh A. A., Kompleks mnogozonol'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. Vasilyev 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. Zhukov B. S., Vasileiskii A. S., Zhukov S. B., Ziman Ya. L., Polyanskiy I. B., Bekrenev O. V., Permitina L. I., Predvaritel'naya obrabotka videodannykh KMSS s KA "Meteor-M" (KMSS/Meteor-M imaging data pre-processing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, No. 1, pp. 260–266.
4. Zhukov B. S., Zhukov S. B., Kondratieva T. V., Nikitin A. V., Avtomatizatsiya poletnoi geometricheskoi kalibrovki Kompleksa mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki KMSS-M na KA "Meteor-M" No. 2 (Automation of in-flight Geometric Calibration of Multispectral Satellite Imaging System KMSS-M onboard Meteor-M No. 2 Satellite), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 201–212.
5. 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. Polyanskiy I. V., Zhukov B. S., Kondratieva T. V., Prokhorova S. A., Smetanin P. S. Kompleks mnogozonol'noi sputnikovoi s'emki srednego razresheniya dlya gidrometeorologicheskikh kosmicheskikh apparatov (Medium-resolution multispectral satellite imaging system for hygrometeorological spacecraft), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 83–92.
7. *Sovremennye tekhnologii obrabotki dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Modern technologies of Earth remote sensing data processing), Moscow: Fizmatlit, 2015, 460 p.