

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

УДК 528.8, 004.932 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.10.1.31.41 EDN NWYYSU

**Разработка методов автоматического контроля
точности геореференцирования данных комплекса
мультиспектральной съемочной системы
КА «Метеор-М» № 2**

А. И. Васильев, к. ф.-м. н., *a.vasilyev@ntsomz.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматриваются особенности обработки, контроля и повышения точности геореференцирования L1B-данных КМСС «Метеор-М» № 2, формируемых в рамках наземного комплекса планирования, обработки и распространения данных (НКПОР) КА «Метеор-М». Для этого, во-первых, предложен подход к расчету геометрической модели снимка L1B-данных на основе дробно-рациональных полиномов (RPC-модели) в обеспечение последующего трансформирования изображений в картографическую проекцию. Во-вторых, для контроля точности геореференцирования трансформированных изображений разработан алгоритм сопоставления данных КМСС КА «Метеор-М» и данных OLI Landsat 8, используемых в качестве опорных данных. В-третьих, в обеспечение повышения точности геореференцирования сцен маршрута съемки в том числе не обеспеченных сопоставлением с опорным изображением, предложен подход вычисления параметров движения сканирующего сенсора на основе фотограмметрического уравнивания. Разработанные алгоритмы были апробированы на основе обработки около 8000 сцен L1B-данных КМСС «Метеор-М» № 2, отснятых за период 2017–2021 гг. В результате было установлено, что 20% рассматриваемых сцен НКПОР имеют ошибку геореференцирования более 30 пикселей и 10% сцен — ошибку более 2 пикселей. При этом учет систематической поправки позволяет нивелировать сцены с ошибками более 30 пикселей и довести до 60% долю сцен, имеющих ошибку менее 2 пикселей. Кроме того, по результатам фотограмметрического уравнивания общее количество сцен, для которых удалось обеспечить повторное сопоставление с опорой, возросло на 25%.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, «Метеор-М», КМСС, геореференцирование, контроль качества

**Development of the Automatic Control Methods
for the Georeferencing Data Accuracy of the Meteor-M No. 2
Spacecraft Multispectral Imaging System**

A. I. Vasilyev, *Cand. Sci. (Phys.-Math.)*, *a.vasilyev@ntsomz.ru*
Joint Stock Company “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses the features of processing, monitoring and improving the accuracy of georeferencing the L1B data of the multispectral imaging system (MSIS) of the “Meteor-M” No. 2 SC, formed within the ground-based complex for planning, processing and distribution of data (GCPPD) of the Meteor-M spacecraft. To achieve this, firstly, an approach is proposed for calculating the geometric model of an L1B data image based on fractional rational polynomials (RPC model) to ensure the subsequent transformation of images into a map projection. Secondly, to control the accuracy of georeferencing of transformed images, an algorithm was developed for comparing the MSIS data of the Meteor-M spacecraft and the OLI Landsat 8 data used as reference. Thirdly, in order to improve the accuracy of georeferencing of scenes of the survey route, including those not provided with comparison with the reference image, an approach is proposed for calculating the motion parameters of the scanning sensor based on photogrammetric adjustment. The developed algorithms were tested on the basis of processing about 8000 scenes of L1B data from the Meteor-M No. 2 MSIS, captured over the 2017–2021 period. As a result, it was found that 20% of the GCPPP analyzed scenes have a georeferencing error of more than 30 pixels, and 10% of the scenes have an error less than 2 pixels. Considering the systematic correction, it is possible to level the scenes with the errors larger than 30 pixels and halve the proportion of the scenes with an error of more than 2 pixels. Furthermore, according to the results of photogrammetric adjustment, the total number of scenes for which it was possible to provide rematch with the reference increased by 25%.

Keywords: Earth remote sensing, spacecraft, Meteor-M, KMSS, georeferencing, quality control

Введение

В состав орбитальной группировки российских метеорологических КА ДЗЗ типа «Метеор-М» (в 2022 г.) входят два действующих аппарата: «Метеор-М» № 2 и «Метеор-М» № 2-2. При этом бортовая аппаратура дистанционного зондирования Земли данных КА в том числе включает комплекс мультиспектральной съемочной системы (КМСС) среднего разрешения (GSD — 60–120 м), обеспечивающего возможность природноресурсного мониторинга территории РФ. Конструктивные особенности сенсора данного типа, а также алгоритмы формирования продуктов стандартной обработки подробно рассмотрены в работах [1, 2]. Применимость данных КМСС для формирования тематических и базовых продуктов ДЗЗ (индексных изображений, а также бесшовных сплошных покрытий) продемонстрирована в работах [3–5].

При этом предполетные исследования сенсора КМСС в части радиометрических оценок рассмотрены в работах [6, 7]. В свою очередь, результаты геометрической калибровки прибора в ходе эксплуатации КА, а также оценка сопоставимости измерений КМСС с измерениями MODIS КА Terra/Aqua приведены в [8, 9] и [10, 11] соответственно. Методические аспекты оценки качества данных оптико-электронных съемочных систем КА «Метеор-М» (включая КМСС) рассматриваются в статье [12].

Характерные особенности технологии автоматической потоковой обработки данных КМСС КА «Метеор-М» № 2 в рамках наземного комплекса планирования, обработки и распространения данных (НКПОР) продемонстрированы в публикации [13]. В соответствии с этой технологией в результате потоковой автоматической обработки данных КМСС КА «Метеор-М» № 2 обеспечивается формирование архива L1B-данных (начиная с 2014 г.). При этом геопроецирование данных съемки осуществляется на основе показаний бортовых навигационных систем КА (следует отметить, что наблюдаемые в ходе эксплуатации КА ДЗЗ ошибки показаний навигационных датчиков в том числе обуславливаются временными сбоями и/или отказом их работы). Соответственно формирование любых тематических и базовых продуктов ДЗЗ на основе предоставляемых в рамках НКПОР

стандартных продуктов, в том числе орторектифицированных, нецелесообразно без предварительной оценки их качества, в частности в части геопроецирования.

Данное обстоятельство подтверждается в работе [14]. Для формирования высокоуровневых информационно-продуктов ДЗЗ по данным КМСС авторы предлагают использовать фрагменты/гранулы орторектифицированных сцен, точность которых оценивается на основе экстремально-корреляционного поиска относительно эталона (данных, имеющих известную точность географической привязки). Более того, по результатам обработки более 7 млн км² (по данным съемки за 2020 г.) в публикации приводится нормализованное распределение, демонстрирующее аномалии геопроецирования фрагментов/гранул орторектифицированных сцен. Вместе с тем нелинейный характер процедуры орторектификации не позволяет судить о природе ошибок на основе данного нормализованного распределения.

Таким образом, разработка методов автоматического контроля и повышения точности геопроецированных L1B-данных (не прошедших орторектификацию) архива НКПОР КМСС КА «Метеор-М» № 2 является актуальной, в том числе с целью оценок ошибок геопроецирования данных КМСС (без учета поправок за орторектификацию).

Общая методология контроля качества геопроецирования данных КМСС КА «Метеор-М» № 2

Для контроля и повышения точности геопроецирования данных ДЗЗ традиционно применяются фотограмметрические пакеты (например, Erdas Imagine, Photomod). В рамках данных пакетов обеспечивается задание множества соответствий между пиксельными координатами \mathbf{p} изображений снимков и пространственными координатами \mathbf{R} соответствующих точек местности (далее опорные точки), используемых для последующей оценки точности геометрической модели снимка. В свою очередь, оценка параметров заданной геометрической модели снимка Q осуществляется на основе

фотограмметрического уравнивания (минимизации остаточных невязок на опорных точках)

$$\sum_i \|Q(\mathbf{p}_i, \mathbf{R}_i, \boldsymbol{\theta})\|^2 \rightarrow \min,$$

$\{\mathbf{p}_i, \mathbf{R}_i\}$ — множество опорных точек, $\boldsymbol{\theta}$ — параметры геометрической модели снимка.

При этом в зависимости от выбора геометрической модели снимка выделяют внешние параметры, определяющие линейное и угловое положение КА, а также внутренние параметры съёмочной системы, в частности обеспечивающие компенсацию различных аберраций (например, дисторсия). Соответственно внутренние параметры съёмочной системы определяются в рамках геометрической калибровки, последующее уточнение которых не требуется, при оценке внешних параметров в рамках фотограмметрического уравнивания.

Применительно к данным КМСС КА «Метеор-М» № 2 результаты геометрической калибровки приведены в публикации [8], демонстрирующие остаточную невязку менее 1 пикселя. Следовательно, природа ошибок геоцентрирования, наблюдаемая, в частности, в [14], обуславливается нештатным режимом работы бортовых навигационных систем и/или ограничениями алгоритмических моделей обработки данных.

Далее в рамках статьи рассматриваются особенности специализации приведенного общего подхода к фотограмметрической обработке в обеспечение автоматического контроля и повышения качества геоцентрирования Л1В-данных КМСС КА «Метеор-М» № 2 архива Оператора КС ДЗЗ. Для этого, во-первых, предложен алгоритм задания геометрической модели снимка в виде дробно-рациональных полиномов (RPC-модели). Во-вторых, для контроля точности геоцентрирования RPC-модели разработан алгоритм автоматического поиска опорных точек на основе сопоставления сцен КМСС КА «Метеор-М» № 2 и эталонных данных. В-третьих, предложен алгоритм вычисления параметров движения сканирующего сенсора на основе фотограмметрического уравнивания в обеспечение уточнения параметров геоцентрирования сцен маршрута съёмки, для которых не обеспечивается надёжный поиск опорных точек. Для предлагаемых

алгоритмических решений выполняется апробирование на основе обработки около 10 000 сцен Л1В-данных архива НКПОР КМСС «Метеор-М» № 2.

Построение геометрической модели снимка КМСС на основе дробно-рациональных полиномов

В соответствии с [1] Л1В-данные КМСС КА «Метеор-М» № 2 представляются в виде набора условных квадратных кадров. При этом каждый такой кадр (или сцена) сопровождается изображениями спектральных каналов и соответствующими грид-файлами. Каждый грид-файл включает набор узлов (с шагом в 100 пикселей по строкам и столбцам изображений Л1В-данных) в следующем составе: (u_{ij}, v_{ij}) пиксельные координаты узла на изображении спектрального канала, географические координаты (L_{ij}, B_{ij}) узла на эллипсоиде WGS84, зенитный и азимутальный углы соответственно $(\theta_{ij}, \varphi_{ij})$ углового положения КА в локальной СК, связанной с началом координат в точке (L_{ij}, B_{ij}) , расстояние до КА, а также угловое положение Солнца в локальной СК. На рис. 1 для некоторого ij -узла грид-файла рассмотрим следующие СК:

$X_S Y_S Z_S$ — система координат КА, связанная с положением КА в момент съёмки ij -узла,

$X_{ij} Y_{ij} Z_{ij}$ — ij -локальная система координат, связанная с положением ij -го узла грид-файла на эллипсоиде WGS84;

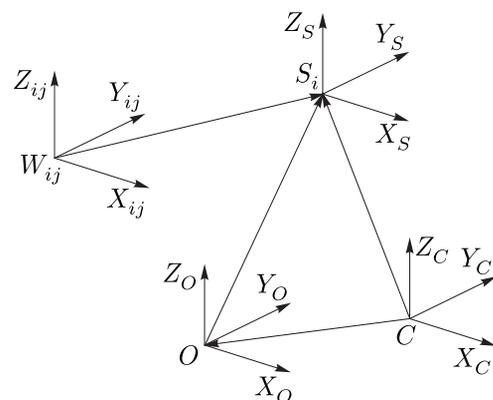


Рис. 1. Связи систем координат, используемых для формирования RPC-модели снимка

$X_O Y_O Z_O$ — локальная система координат снимка, заданная для центральной точки сцены (или грид-файла);

$X_C Y_C Z_C$ — геоцентрическая СК.

Учитывая, что угловые координаты КА для каждого ij -го узла грид-файла определяют проецирующий луч, допустимо выполнить пересчет из ij -локальных СК к локальной СК снимка/сцены. В таком случае массив проецирующих векторов позволяет сформировать 3D-грид (рассматривая допустимый для сцены диапазон высот) для расчета RPC-модели снимка [15]. При этом положение k -го узла 3D-грида на проецирующем векторе в ij -локальной СК определяется следующим образом ($h_k \in [H_{\min}; H_{\max}]$):

$$\mathbf{R}_{ijk} = \begin{bmatrix} \operatorname{tg} \theta_{ij} \cdot \cos \varphi_{ij} \\ \operatorname{tg} \theta_{ij} \cdot \sin \varphi_{ij} \\ 1 \end{bmatrix} \cdot h_k.$$

Общий алгоритм формирования RPC-модели снимка приведен на рис. 2. При этом следует отметить, что на основе сформированного 3D-грида допустимо рассчитывать RPC-модель также и для изображений спектральных каналов, трансформированных на среднюю плоскость (в частности, в картографическую проекцию UTM). Далее данные трансформированные на среднюю плоскость изображения в соответствии с [16] будем обозначать L1C-продуктом.

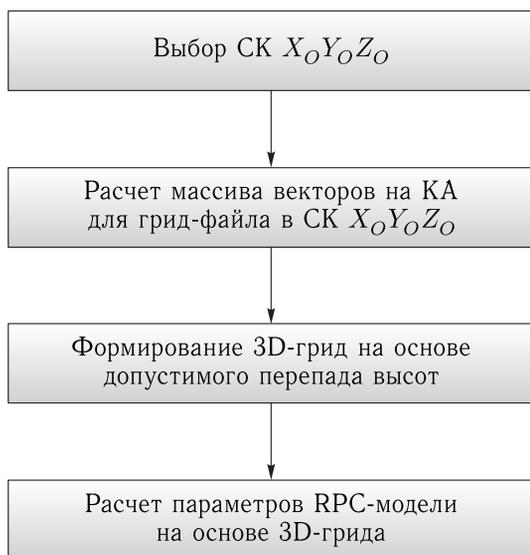


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров RPC-модели

Анализ применимости RPC-модели оценивался на основе обработки 1000 сцен L1B-данных КМСС КА «Метеор-М» №2 (за январь 2017 г.). В результате обработки для каждой сцены оценивалась максимальная ошибка несоответствия между пиксельными координатами узлов грид-файла и пиксельными координатами, рассчитываемыми на основе RPC-модели для соответствующих узлов 3D-грида. На рис. 3 приведена статистика распределения рассчитанных максимальных ошибок для обработанных сцен, демонстрирующая для около 80% наблюдений максимальную невязку не более 1 пикселя.

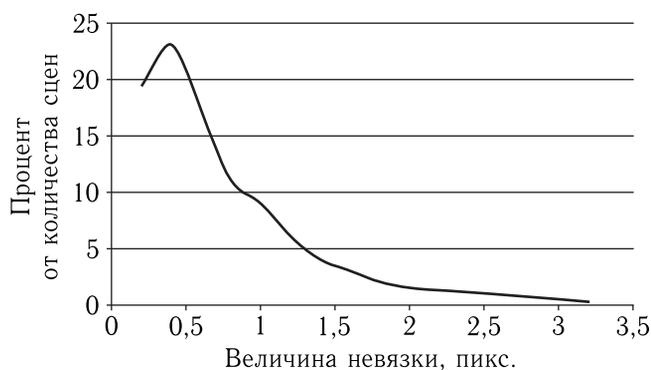


Рис. 3. Распределение процентного количества сцен в зависимости от максимальной ошибки на узлах 3D-грида при RPC-аппроксимации

Таким образом, для L1B-данных НКПОР допустимо формирование геометрической модели снимка в виде дробно-рациональных полиномиальных функций, рассчитываемых на основе грид-файлов и обеспечивающих среднеквадратичную ошибку менее 1 пикселя (оцениваемую на множестве узлов 3D-грида).

Контроль точности геогеоцентрирования сцены на основе сопоставления с опорными данными

Для контроля точности геогеоцентрирования рассмотрим подход на основе сопоставления изображений L1C-данных КМСС КА «Метеор-М» №2 (GSD — 60 м) и данных OLI Landsat 8, предоставляемых в виде опорного покрытия (включает

данные спектральных каналов — Рап (GSD — 15 м) и NIR (GSD — 30 м)), сформированного из безоблачных сцен, отснятых за летний период 2017–2018 гг., на основе технологии [17]. В таком случае формализованная математическая постановка задачи сопоставления изображения I и опорного покрытия I' может быть записана в следующем виде:

$$\begin{aligned} M(I, I') &\rightarrow \{\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i\}, \\ G: \{\mathbf{p}'_i\} &\rightarrow \{X_i, Y_i\}, \\ RPC: \{X_i, Y_i, DEM(X_i, Y_i)\} &\rightarrow \{\mathbf{q}_i\}, \\ \frac{1}{N} \cdot \sum_i \|\mathbf{p}_i - W \cdot [\mathbf{q}_i \ 1]^T\|^2 &\rightarrow \min, \end{aligned}$$

$M(I, I')$ — оператор сопоставления изображений, определяющий множество пар пиксельных координат соответствий на сопоставляемых изображениях (для сопоставления спектральных каналов видимого диапазона применялись опорные данные Рап, для NIR-канала — опорные данные NIR);

$\{\mathbf{p}_i, \mathbf{p}'_i\}$ — пары пиксельных координат соответствий для изображения I и опорного покрытия I' соответственно;

$G: R^2 \rightarrow R^2$ — функция определения плановых географических координат на основе пиксельных (опорного покрытия I');

$DEM: R^2 \rightarrow R$ — функция определения высоты ЦМР (например, <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>) на основе плановых географических координат;

$RPC: R^3 \rightarrow R^2$ — RPC-модель снимка, определяющая пиксельные координаты на изображении на основе положения точки в пространстве;

W — 3×2 матрица поправок (соответствует сдвигу либо аффинному преобразованию [18]);

N — количество опорных точек.

Опираясь на подход [19], в рамках данной статьи в качестве оператора M сопоставления изображений применялся метод SIFT на основе реализации [20]. При этом в виду значительных размеров растровых изображений сцен 1С-данных КМСС (более $10\,000 \times 10\,000$ пикселей) для обработки использовалась следующая поблочная стратегия сопоставления. Во-первых, выполнялось разбиение изображения снимка КМСС на блоки (512×512 пикселей каждый). Во-вторых, сопоставление каждого блока с соответствующим фрагментом опорного

покрытия (определяется на основе первичной географической привязки снимка КМСС). В-третьих, оценка систематической поправки на основе пар соответствий найденных по всем блокам. Для оценки итоговой аффинной поправки применялся метод RANSAC [21], в том числе обеспечивающий оценку согласованности найденных соответствий RPC-модели снимка. При этом в рамках поблочного сопоставления фильтрация ложных соответствий выполнялась на основе следующего критерия:

$$\sum_i \Theta(\delta - \|\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i - \mathbf{p}\|) \rightarrow \max,$$

δ — предельно допустимый порог (является параметром алгоритма) несогласованности пиксельных координат соответствий оцениваемой модели сдвига \mathbf{p} ;

$\Theta(\blacksquare)$ — функция Хевисайда (кусочно-постоянная функция, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице — для положительных).

Таким образом, для оценки качества геоференцирования сцены определяется остаточная невязка с учетом систематической поправки ε_W и без учета систематики ε_0 на основе следующих соотношений

$$\begin{aligned} \varepsilon_W &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_i \|\mathbf{p}_i - W \cdot [\mathbf{q}_i \ 1]^T\|^2}, \\ \varepsilon_0 &= \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_i \|\mathbf{p}_i - \mathbf{q}_i\|^2}. \end{aligned}$$

Пример результатов сопоставления данных спектрального NIR-канала данных КМСС КА «Метеор-М» №2 и данных опорного покрытия приведен на рис. 4. Синим цветом отмечены блоки изображения, для которых найдены соответствия — опорные точки: зеленые — невязка до 1,5 пикселей, желтые — невязка до 3 пикселей, красные — невязка более 3 пикселей. При этом в рамках экспериментов допускается, что зеленые и желтые согласуются с RPC-моделью, красные — не согласуются.

Кроме того, для отбора блоков (пригодных для оценки качества) применялись дополнительные условия достаточного их количества и распределенности: 1) количество блоков, содержащих более 10 опорных точек, должно быть более половины всех анализируемых блоков сцены; 2) блок

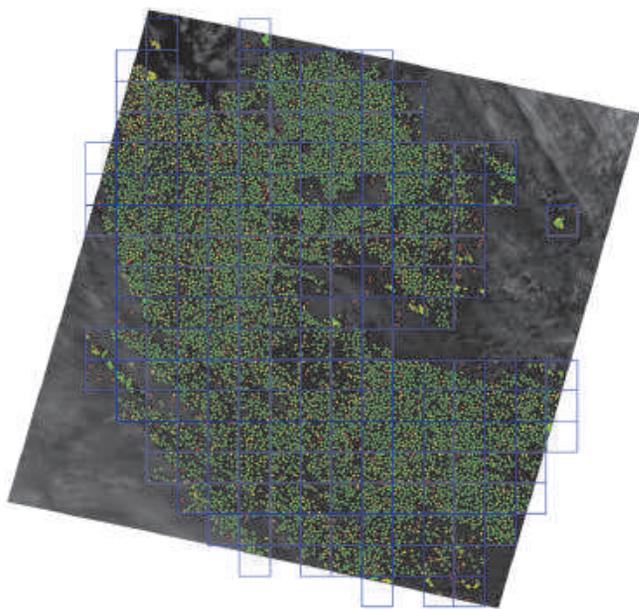


Рис. 4. Пример автоматического поиска опорных точек на изображении NIR-канала L1С-данных КМСС КА «Метеор-М» №2

не согласован с RPC-моделью, если количество красных опорных точек внутри блока более половины (при общем количестве опорных точек внутри блока более 10); 3) количество несогласованных блоков должно быть не более двух. Для объективной оценки общего количества анализируемых блоков в том числе учитывалась маска воды (например, <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod44w.php>) и облаков (при наличии).

Повышение точности геогеографического маршрута съемки на основе фотограмметрического уравнивания

В соответствии с [1] маршрут съемки КМСС КА «Метеор-М» №2 содержит множество сцен, формируемых путем фрагментированные маршрута на условные «квадратные» сцены/кадры (в среднем маршрут включает 10–12 сцен). При этом нередко встречаются съемки, при которых контроль точности в рамках маршрута может быть обеспечен только для отдельных несмежных сцен (например,

вследствие наличия облачности). С целью согласования геогеографического маршрута съемки сцен, не прошедших контроль точности, со сценами, его прошедшими, рассмотрим подход к определению/уточнению параметров движения КА на основе найденного множества опорных точек.

В рамках данного подхода опорные точки, найденные для сцен L1С-данных КМСС КА «Метеор-М» №2, пересчитываются для L1В-данных с использованием соответствующих RPC-моделей. В таком случае связь пространственных и пиксельных координат опорных точек будет определяться уравнением коллинеарности следующего вида:

$$\mathbf{R}_k = \mathbf{R}_S(t) + m \cdot \mathbf{A}(\vartheta(t)) \cdot [x_k \quad y_k \quad -f]^T,$$

где \mathbf{R}_k — географические координаты k -й опорной точки в абсолютной СК;

$\{\mathbf{R}_S(t), \vartheta(t)\}$ — линейное и угловое положение КА в момент времени t ;

\mathbf{A} — матрица поворотов из СК камеры (связана с центром фотографирования сенсора в момент времени t) в абсолютную СК;

m — масштабный множитель;

f — фокусное расстояние;

$(x_k; y_k)$ — координаты k -й опорной точки в фокальной плоскости сенсора в момент времени t , рассчитанные на основе пиксельных координат $(u_k; v_k)$ опорной точки изображения L1В-данных с учетом параметров съемочной системы (в частности, коэффициентов дисторсии).

Учитывая линейный сканерный тип сенсора КМСС, момент времени наблюдения k -й опорной точки в зависимости от ее номера строки v на изображении спектрального канала L1В-данных определяется следующим образом:

$$t(v) = [v] \cdot \mu + t_0,$$

$[\blacksquare]$ — оператор округления до целого числа снизу;

μ — строчная частота сканирования сенсора;

t_0 — время съемки, соответствующее нулевой строке L1В-данных.

В свою очередь, параметры движения КА вычисляются на основе решения задачи фотограмметрического уравнивания (относительно параметров,

определяющих положение КА) в следующем виде (n — индекс спектрального канала):

$$\sum_{n,k} \left[\left(x_{n,k} + f \frac{X'_{n,k}}{Z'_{n,k}} \right)^2 + \left(y_{n,k} + f \frac{Y'_{n,k}}{Z'_{n,k}} \right)^2 \right] \rightarrow \min,$$

$$\begin{bmatrix} X'_{n,k} \\ Y'_{n,k} \\ Z'_{n,k} \end{bmatrix}^T = A^T (\mathbf{\vartheta}(t_{n,k})) \cdot (\mathbf{R}_{n,k} - \mathbf{R}_S(t_{n,k})).$$

Для описания линейного и углового положений КА в соответствии с [22] применялись полиномиальные модели. При этом параметры полиномов линейного положения оценивались на основе грид-

файла L1B-данных НКПОР: 1) для каждой строки узлов вычисляется положение КА (путем усреднения положений КА, рассчитываемых для каждого узла строки); 2) оценка параметров полинома на основе метода наименьших квадратов для всего маршрута. Применение полинома 4-й степени для задания траектории движения КА показало ошибку аппроксимации не более 1 м. В свою очередь, параметры полиномов углового положения КА (в частности, 3-й степени) оценивались на основе фотограмметрического уравнивания.

На рис. 5 приведен пример результатов уравнивания маршрута съемки КМСС КА «Метеор-М» №2 (виток — 37 251, камера — 201) в виде скатерограмм невязок на опорных точках,

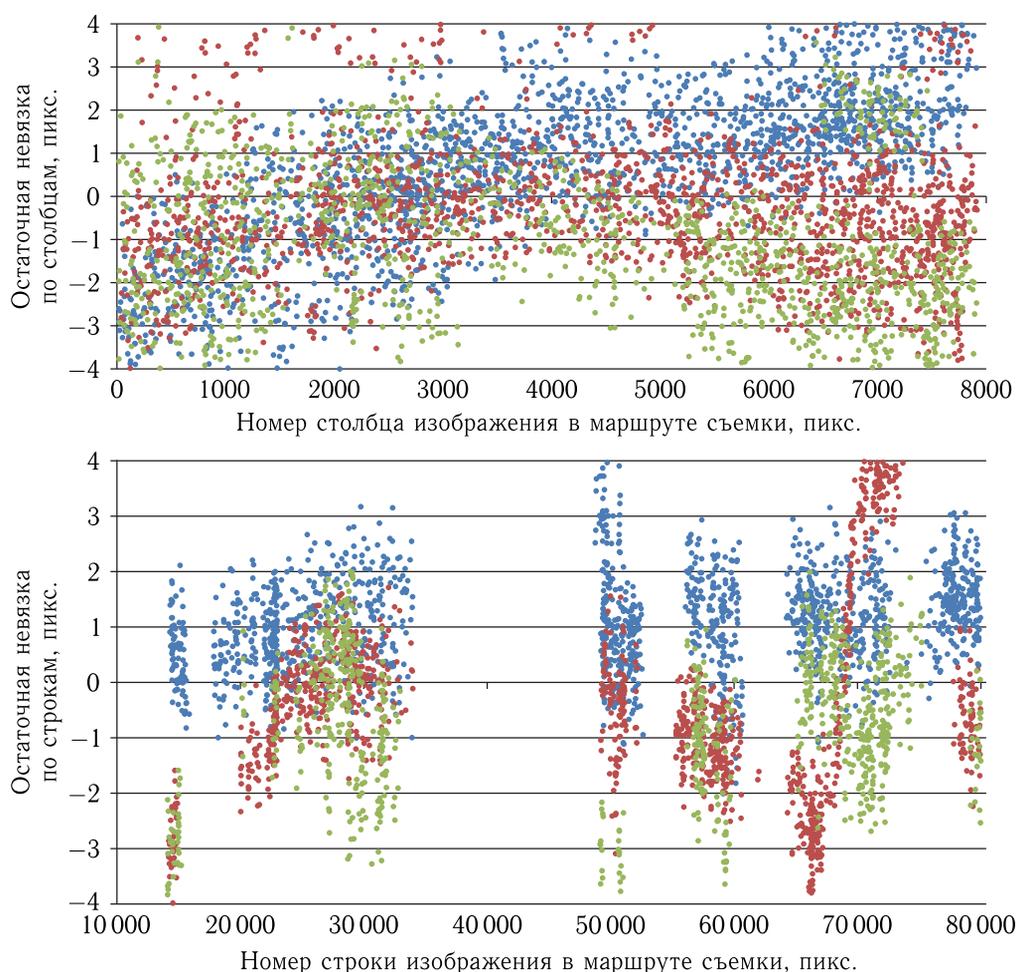


Рис. 5. Распределение невязок на опорных точках (синие — NIR-, красные — Red-, зеленые — Green-канал) по результатам фотограмметрического уравнивания маршрута съемки КМСС КА «Метеор-М» №2 (виток — 37 251, камера — 201): сверху — по строкам (вдоль съемочного маршрута); снизу — по столбцам (поперек съемочного маршрута)

найденных для отдельных сцен маршрута съемки (более 5000). Данные скатерограммы демонстрируют распределение опорных точек вдоль (см. рис. 5, верхний рисунок) и поперек съёмочного маршрута (см. рис. 5, нижний рисунок) и соответствующую величину невязок, показывающую согласованность рассчитанных параметров движения для множества опорных точек. Кроме того, на рис. 6 показано распределение количества опорных точек в зависимости от абсолютной величины абсолютной остаточной невязки (корень от суммы квадратов невязки по столбцу и строке изображения).



Рис. 6. Распределение количества опорных точек в зависимости от величины абсолютной невязки по результатам фотограмметрического уравнивания маршрута съемки КМСС КА «Метеор-М» № 2 (виток — 37 251, камера — 201)

Таким образом, для повышения точности геоуравнивания маршрута съемки предлагается определять/уточнять параметры линейного и углового положения КА на основе фотограмметрического уравнивания с использованием опорных точек, найденных для сцен маршрута в рамках контроля точности их геоуравнивания. В свою очередь, уточненные параметры обеспечивают пересчет грид-файла и RPC-модели L1B-данных.

Результаты апробации алгоритмов контроля и повышения качества геоуравнивания данных КМСС «Метеор-М» № 2

Приведенные алгоритмы апробировались на основе обработки около 10 000 сцен (соответствует 1000 маршрутов съемки) КМСС КА «Мете-

ор-М» № 2, выполненной за период 2017–2021 гг. по всем континентам (за исключением Антарктиды). При этом для приблизительно 8000 сцен L1B-данных НКПОР, рассматриваемых маршрутов съемки, была выполнена оценка качества геоуравнивания (с учетом выше рассматриваемых условий сопоставления). На рис. 7 приведена логарифмированная (\lg) гистограмма количества сцен в зависимости от величины ϵ_0 . Данный график демонстрирует значительное количество сцен (около 20%), для которых наблюдается ошибка геоуравнивания более 30 пикселей.

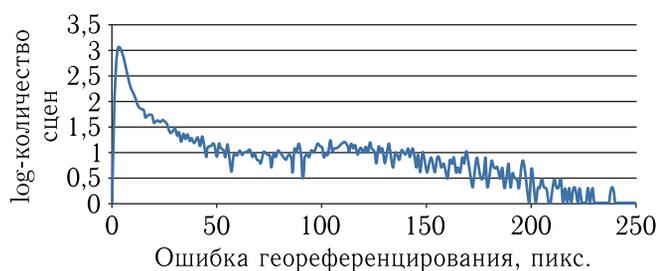


Рис. 7. Логарифмированная (\lg) гистограмма количества сцен в зависимости от величины ошибки геоуравнивания (без учета систематики)

Учет систематической поправки позволяет существенно улучшить точность геоуравнивания сцен. На рис. 8 приведена скатерограмма средних невязок, оцененных для опорных точек сцены, без учета (показано синим цветом) и с учетом (показано красным цветом) систематики. Соответствующее данной скатерограмме процентное распределение в зависимости от ошибки геоуравнивания приведено на рис. 9. Распределение показывает, что более 90% сцен имеют первичную точность геоуравнивания хуже 2 пикселей. При этом учет систематической поправки позволяет сократить эту долю до 40%.

Кроме того, в результате маршрутного уточнения удалось обеспечить повторный контроль точности геоуравнивания для около 10 000 сцен рассматриваемых маршрутов съемки, т. е. первичная выборка увеличилась на 25%. На рис. 10 приведено распределение процентного количества новых сцен в зависимости от величины ошибки геоуравнивания без учета (показано синим цветом) и с учетом (показано красным цветом) систематической поправки.

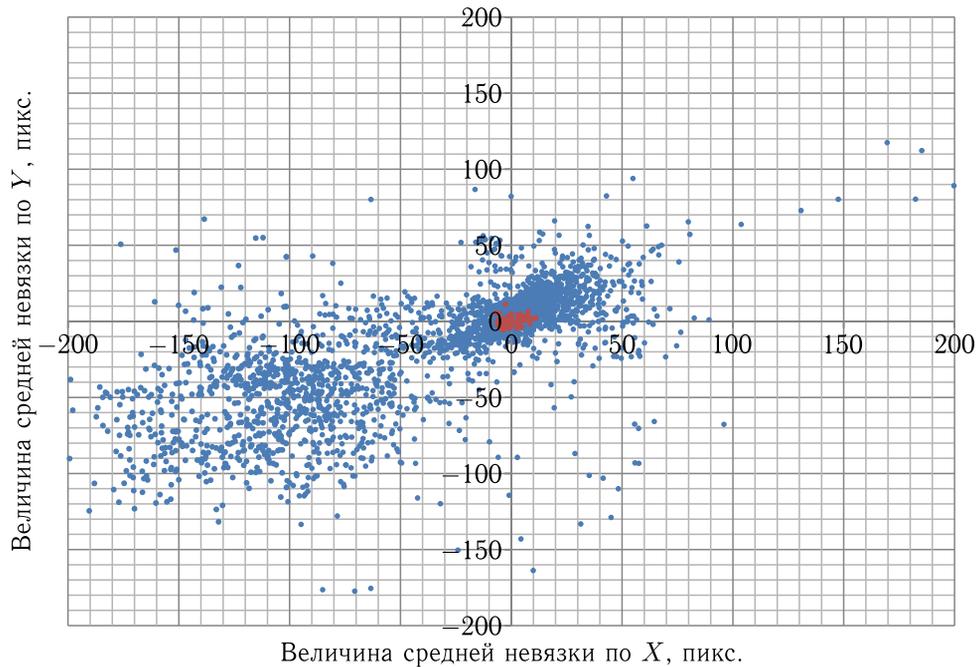


Рис. 8. Скаттерограмма величин средних невязок для сцен по результатам оценки качества. Точками отмечены величины средней невязки для сцен: синим — рассчитанны без учета систематики, красным — с учетом

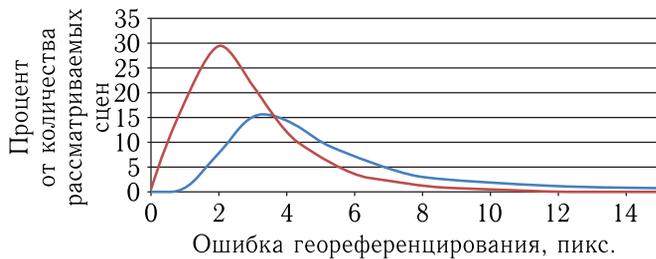


Рис. 9. Распределение процентного количества сцен в зависимости от величины ошибки геореференцирования: синим цветом — оценки для ε_0 , красным цветом — для ε_W

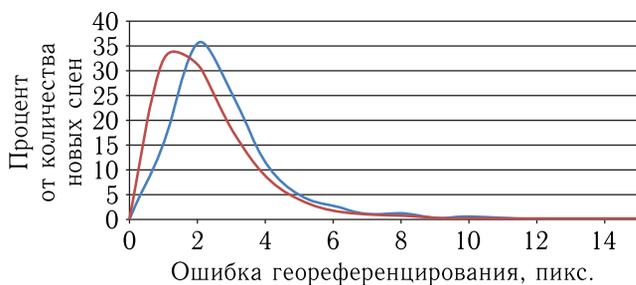


Рис. 10. Распределение процентного количества новых сцен, для которых были детектированы опорные точки после маршрутного уравнивания, в зависимости от величины ошибки геореференцирования: синие — оценки для ε_0 , красные — оценки для ε_W

Заключение

В рамках данной работы выполнен анализ качества данных архива НКПОР КМСС КА «Метеор-М» №2 в части точности геореференцирования при учете, что штатная технология НКПОР ориентирована на использования показаний бортовых навигационных систем, при формировании L1B-продуктов архива. В обеспечение проведения анализа (с целью контроля и повышения точности геореференцирования) в статье предлагаются алгоритмические решения: 1) построение геометрической модели снимка на основе RPC-модели; 2) оценка систематической поправки к RPC-модели сцены на основе сопоставления с опорными данными; 3) повышение точности геореференцирования на основе фотограмметрического уравнивания.

По результатам апробации (анализируются около 8000 сцен, отснятых за период съемки 2017–2021 гг.) предлагаемых решений для 10% рассматриваемых сцен архива НКПОР наблюдается ошибка геореференцирования до 2 пикселей, при этом около 20% сцен имеет ошибку геореференцирования 30–300 пикселей. Учет систематической поправки позволяет обеспечить точность

геореференцирования не хуже 2 пикселей для 60 % сцен и нивелировать ошибку более 30 пикселей. Кроме того, наблюдается увеличение на 25 % количества сцен, пригодных для повторной оценки качества по результатам фотограмметрического уравнивания (уточнения параметров движения КА).

Дополнительный анализ приведенных распределений позволяет оценить точность навигационных систем КМСС КА «Метеор-М» №2 (в среднем — не лучше 3 пикселей, см. рис. 9). При этом точность прогнозных моделей движения КА, используемых при сбоях навигации, имеет ограниченный разброс (до 300 пикселей, см. рис. 7–8), а также систематическую составляющую (распределение смещено относительно центра). В свою очередь, предлагаемые алгоритмы уточнения позволяют улучшить точность геореференцирования (в среднем до 2 пикселей) относительно исходной точности обрабатываемых сцен (около 75 % сцен — хуже 3 пикселей, см. рис. 9).

Таким образом, результаты анализа на значительной выборке архива демонстрируют целесообразность применения данных решений в рамках штатных и перспективных технологий НКПОР КА «Метеор-М». При этом дальнейшее развитие предлагаемых методов целесообразно проводить в части увеличения доли сцен с точностью геореференцирования лучше 1 пикселя, в том числе для высокоточного сведения изображений спектральных каналов цветосинтезированных ортопродуктов.

Список литературы

1. Жуков Б.С., Жуков С.Б., Клименко О.Я., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Полянский И.В. Руководство пользователя видеоданными КМСС. КБДУ.201231.014 РПВ. Версия 2. АНО «Космос — наука и техника». М., 2012. С. 59.
2. 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.
3. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Коршунов А.П., Михаленков Р.А., Салимонов Б.Б., Стремов А.С. Архитектура геoinформационного сервиса «Банк базовых продуктов» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2016, т. 13, № 5. С. 39–51.
4. Селин В.А., Марков А.Н., Васильев А.И., Коршунов А.П. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 40–48.
5. Марков А.Н., Васильев А.И., Ольшевский Н.А., Крылов А.В., Салимонов Б.Б., Синяев П.А., Михаленков Р.А., Волкова Е.В. Технологии ведения банка базовых продуктов ДЗЗ для задач цифровой экономики РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, т. 17, № 5. С. 79–90.
6. Василейский А.С., Жуков Б.С., Жуков С.Б., Куркина А.Н., Полянский И.В. Относительная радиометрическая калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки (КМСС). Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», г. Таруса. 22–25 сентября 2008 г. Сб. трудов. ИКИ РАН. 2009 г. С. 562–574.
7. Гаврилов В.Р. Методы и средства предполетной и бортовой радиометрической калибровки оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ. 7-я Международная выставка испытательного и контрольно-измерительного оборудования. Метрология, измерения и испытания в ракетно-космической отрасли, г. Москва. 27 октября 2020 г. <https://www.testing-control.ru> (Дата обращения 19.01.2023).
8. 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.
9. Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Пермитина Л.И., Полянский И.В. 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.
10. Жуков Б.С., Кондратьева Т.В., Полянский И.В., Пермитина Л.И. Полетная радиометрическая кросс-калибровка комплекса многозональной спутниковой съемки на КА «Метеор-М» №1 по спектрорадиометру MODIS на КА Terra // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2014, т. 11, №2. С. 123–137.
11. *Кондратьева Т.В., Жуков Б.С., Полянский И.В.* Радиометрические характеристики комплексов многозональной спутниковой съемки КМСС-М на КА «Метеор-М» №2 и КМСС-2 на КА «Метеор-М» №2-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2020, т. 17, №7. С. 67–76.
 12. *Еремеев В.В., Князьков П.А., Кузнецов А.Е., Ермаков В.А., Никонов О.А.* Комплекс оценки качества видеоданных датчиков МСУ-МР и КМСС космического аппарата «Метеор-М» №2 // Вопросы электромеханики, 2014, т. 143. С. 29–35.
 13. *Бекренев О.В., Жуков Б.С., Гришанцева Л.А., Полянский И.В.* Особенности автоматической потоковой обработки данных КМСС космического комплекса «Метеор-3М» // Геоматика, 2015, №2. С. 32–36.
 14. *Плотников Д.Е., Колбудаев П.А., Жуков Б.С., Матвеев А.М., Барталев С.А., Егоров В.А., Кашицкий А.В., Прошин А.А.* 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.
 15. *Grodecki J., Dial G.* IKONOS Geometric Accuracy // Proceedings of Joint Workshop of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and IV/7 on High Resolution Mapping from Space 2001, University of Hannover, Germany, Sept. 19–21, 2001.
 16. *Стремов А.С., Васильев А.И., Марков А.Н.* Об уровнях обработки данных российских космических систем ДЗЗ // Дистанционное зондирование Земли из космоса в России, 2019, вып. 2. С. 26–31.
 17. *Васильев А.И., Михеев А.А., Евлашкин М.А., Ольшевский Н.А.* Технологии формирования и предоставления глобального опорного покрытия Земли на основе данных Landsat. Доклад на XVIII Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, 16–20 ноября 2020 г. <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=174&thesis=8262> (Дата обращения 19.01.2023).
 18. *Титаров П.С.* Оценка точности ориентирования снимков PLEIADES // Ракурс, Москва, Россия, 2013. https://racurs.ru/upload/iblock/734/PleiaDES_Titarov_Racurs.pdf (Дата обращения 19.01.2023).
 19. *Кузнецов А.Е., Пошехонов В.И., Рыжиков А.С.* Технология автоматического контроля точности геопривязки спутниковых изображений по опорным снимкам от КА «Landsat-8» // Цифровая обработка сигналов, 2015, №3. С. 37–42.
 20. *Vasilyev A.I., Boguslavskiy A.A., Sokolov S.M.* Parallel SIFT-detector implementation for images matching. Proc. of the 21st Conference on Computer Graphics and Vision, GraphiCon'2011, September 26–30, 2011, Moscow. P. 173–176.
 21. *Fischler M.A., Bolles R.C.* Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM, 1981, vol. 24, iss. 6. P. 381–395.
 22. *Poli D.A.* Rigorous Model for Spaceborne Linear Array Sensors // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, vol. 73, №2. P. 187–196.

Дата поступления рукописи
в редакцию 28.10.2022
Дата принятия рукописи
в печать 01.02.2023