
ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

RESEARCH INSTRUMENTS AND METHODS

УДК 004.932.2, 528.7, 528.8

ДИСТОРСИЯ ФОТОАППАРАТУРЫ КАК ФАКТОР УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА СШИВКИ И ГЕОПРИВЯЗКИ РЕГИСТРИРУЕМЫХ С БОРТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

А. А. ЛОМАКО¹⁾, Ю. С. ДАВИДОВИЧ¹⁾, И. В. РАССКАЗОВ²⁾

¹⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С. П. Королёва,
ул. Ленина, 4а, 141070, г. Королёв, Россия

Проведена оценка влияния дисторсии фотоаппаратуры, установленной на борту Международной космической станции, на результаты автоматического совмещения и автоматизированной геопривязки изображений поверхности Земли. Описаны использованный подход к коррекции дисторсии на изображениях и методы автоматической

Образец цитирования:

Ломако АА, Давидович ЮС, Рассказов ИВ. Дисторсия фотоаппаратуры как фактор ухудшения качества сшивки и геопривязки регистрируемых с борта Международной космической станции изображений поверхности Земли. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2023;1:85–94. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-85-94>

For citation:

Lamaka AA, Davidovich YS, Rasskazov IV. Photographic equipment distortion as the quality degradation factor of the International Space Station onboard images of the Earth surface stitching and georeferencing. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2023;1:85–94. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2023-1-85-94>

Авторы:

Алексей Андреевич Ломако – научный сотрудник лаборатории дистанционной фотометрии отдела аэрокосмических исследований.

Юрий Сергеевич Давидович – стажер младшего научного сотрудника лаборатории оптико-физических измерений отдела аэрокосмических исследований.

Игорь Владимирович Рассказов – инженер 1-й категории.

Authors:

Aliaksei A. Lamaka, researcher at the laboratory of remote photography, department of aerospace research.

alekseylomako@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8535-8882>

Yury S. Davidovich, probationer of junior researcher at the laboratory of optical and physical measurement, department of aerospace research.

seg98001@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-8524-8683>

Igor V. Rasskazov, engineer of the 1st category.

igor.rasskazov1@rsce.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9426-7854>

сшивки изображений с помощью библиотеки компьютерного зрения OpenCV, а также методы автоматизированной геопривязки изображений на основе их соотношения с геопривязанными спутниковыми данными Sentinel-2 с применением программного комплекса *ArcGIS*. Представлены результаты оценки ошибок сшивки фотоизображений с проведением коррекции дисторсии и без нее при использовании различных алгоритмов выделения особых точек. Получены оценки невязок автоматизированной геопривязки при использовании различных методов растрового трансформирования данных, и выполнено сравнение результатов для изображений с коррекцией дисторсии и без нее. Показана необходимость проведения коррекции дисторсии для фотоизображений, получаемых с борта Международной космической станции.

Ключевые слова: компьютерное зрение; панорамное изображение; детекторы точек; дескрипторы точек; *ArcGIS*.

PHOTOGRAPHIC EQUIPMENT DISTORTION AS THE QUALITY DEGRADATION FACTOR OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION ONBOARD IMAGES OF THE EARTH SURFACE STITCHING AND GEOREFERENCING

A. A. LAMAKA^a, Y. S. DAVIDOVICH^a, I. V. RASSKAZOV^b

^aA. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus

^bS. P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia»,
4a Lenina Street, Korolev 141070, Russia

Corresponding author: A. A. Lamaka (alekseylomako@gmail.com)

The work is devoted to assessing the influence of the photographic equipment installed on board of the International Space Station distortion effects on the results of the Earth's surface images recorded by this photographic equipment automatic alignment, as well as on the results of automated georeferencing. The used approach to distortion correction in images is described. The methods used for automatic image stitching using the OpenCV computer vision library, as well as methods for automated images georeferencing based on their correlation with Sentinel-2 geotagged satellite data using the *ArcGIS* software package, are described. The results of estimating the errors of photographic images stitching using various algorithms for highlighting singular points in images are presented with a comparison of data with and without distortion correction. The results of estimating the residuals of automated georeferencing using various methods of raster data transformation are presented with a comparison of the results for images with and without distortion correction. The need for distortion correction for photographic images obtained from the International Space Station is shown.

Keywords: computer vision; panoramic image; point detectors; point descriptors; *ArcGIS*.

Введение

Фотоизображения поверхности Земли, получаемые с помощью спутниковых систем, в современных условиях становятся основным источником данных, важных для жизнедеятельности человека. Так, системы космического базирования используются для выявления очагов природных пожаров, контроля пожарной опасности торфяных массивов, оценки последствий крупномасштабных чрезвычайных ситуаций [1], мониторинга топливно-энергетического комплекса [2], источников океанских кольцевых волн [3], ледяного покрова морей [4], зон затопления при паводках и многих других задач.

В рамках космического эксперимента «Ураган» на борту российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС) с 2019 г. работает созданная в Институте прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ по контракту с ПАО «Ракетно-космическая корпорация “Энергия” имени С. П. Королёва» система ориентации видеоспектральной аппаратуры (СОВА), основной задачей которой является автоматическое наведение поля зрения научной аппаратуры – видеоспектральной системы [5] и фотоаппаратов Nikon D5 с различными объективами – на объекты земной поверхности и их съемка [6]. Ориентирование поля зрения аппаратуры производится с помощью специального программного обеспечения СОВА, которое использует метод прогнозирования углов ориентации, учитывающий крены МКС [7]. Применение СОВА дает возможность получать связанные серии изображений поверхности Земли с метаданными, обеспечивающими предварительную грубую геопривязку изображений.

После регистрации фотоизображений или спектральных данных объектов поверхности Земли с использованием систем космического базирования производится их наземная обработка, в том числе атмосферная коррекция [8; 9] и геопривязка [10]. Для некоторых задач также выполняется сшивка нескольких изображений в мозаику.

Известно, что дисторсия фотосистем может оказывать существенное влияние на изображения, регистрируемые такими системами [11]. Так, например, для камер, устанавливаемых на беспилотные летательные аппараты, коррекция эффекта дисторсии позволяет снизить ошибку автоматического совмещения изображений на 12,5 % [12].

Искажения в изображениях, вызываемые дисторсией фотоаппаратуры высокого качества, часто незаметны для человеческого глаза. Сшивка и геопривязка получаемых с борта МКС изображений могут быть выполнены без предварительной коррекции дисторсии. Тем не менее коррекция обусловленных дисторсией искажений может повысить точность как сшивки, так и геопривязки данных изображений. Настоящее исследование посвящено оценке влияния дисторсии фотоаппаратуры на качество автоматического совмещения и автоматизированной геопривязки регистрируемых с борта МКС изображений поверхности Земли. Целями исследования были анализ необходимости проведения коррекции обусловленных дисторсией искажений в получаемых с борта МКС изображениях для решения обозначенных выше задач и поиск наилучших методов выделения и описания особых точек для автоматического совмещения изображений.

Материалы и методы исследования

Степень влияния дисторсии на результаты обработки изображений в настоящей работе оценивается для установленной на борту РС МКС фотоаппаратуры – камеры Nikon D5 с объективом AF-S Nikkor 200–400 мм. Наиболее часто используется конфигурация с фокусным расстоянием, равным 400 мм. Для аналогичной конфигурации оборудования проведен лабораторный эксперимент по определению коэффициентов радиальной и тангенциальной дисторсии с применением библиотеки компьютерного зрения OpenCV. В качестве калибровочной миры в этом эксперименте использовалась специальная шахматная доска (формат A4, размерность 12×8 квадратов), в белых квадратах которой расположены графические коды, позволяющие загородить большую часть доски, сохранив возможность точно определить положение углов доски (ChArUco) [11].

Для анализа были выбраны два набора снимков – изображения территории штата Калифорния (США) и изображения территории Амурской области (Россия), зарегистрированные в декабре 2020 г. (всего 25 снимков). За счет различий представленной на снимках местности обеспечивалась разнородность данных для анализа: на изображениях территории штата Калифорния присутствует множество линейных объектов антропогенного происхождения, а на изображениях территории Амурской области преобладают природные объекты, имеющие нелинейную форму.

Для сшивки фотоизображений может использоваться широкий спектр алгоритмов. Наиболее распространенными на сегодняшний день являются методы, основанные на поиске особых точек с описанием их характеристик дескрипторами (как правило, дескриптор – это вектор, который определенным образом описывает особую точку и дает возможность сравнивать различные точки между собой [11]). Существует множество алгоритмов (детекторов), позволяющих выделять особые точки на изображениях. В настоящей работе применялись детекторы Star, или CenSurE (*center surround extremum*) [13]), BRISK (*binary robust invariant scalable keypoints*) [14] и ORB (*oriented FAST and rotated BRIEF*) [15]. Большинство детекторов обладают собственными вычислителями дескрипторов, однако в исследовании также был использован дополнительный вычислитель дескрипторов FREAK (*fast retina keypoint*) [16], так как в некоторых случаях его комбинация с другими методами работает лучше, чем эти методы индивидуально [12]. Кроме того, детектор Star не имеет собственного вычислителя дескрипторов. Для поиска совпадений особых точек на двух изображениях применялся метод сопоставления полным перебором с метрикой Хэмминга [11]. Дополнительная фильтрация совпадений проводилась с использованием авторского метода, основанного на анализе распределений значений смещения особых точек в совмещаемых изображениях [12].

Анализ качества сшивки снимков проводился по парам последовательно зарегистрированных пересекающихся изображений поверхности Земли. На каждом изображении из пары с помощью описанных выше детекторов выделялись 10 000 особых точек, по которым осуществлялось гомографическое преобразование одного из изображений (данные, получаемые с использованием COBA, регистрируются под различными углами к поверхности Земли, что вызывает линейные геометрические искажения). После этого в трансформированном изображении снова выделялись особые точки, и по дескрипторам определялись совпадающие точки на трансформированном и нетрансформированном изображениях (рис. 1).

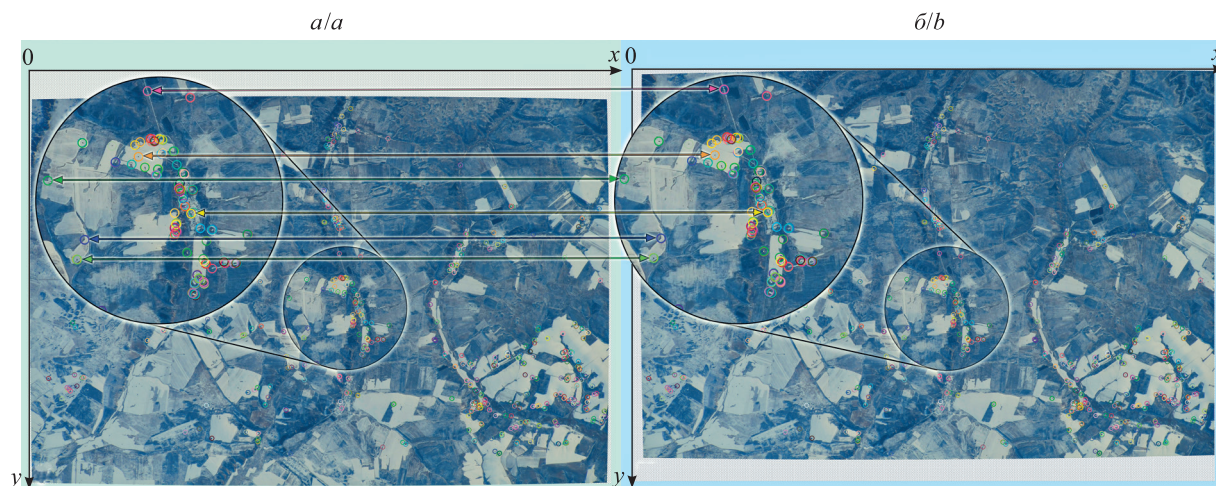


Рис. 1. Сопоставление двух изображений с выделением особых точек (детектором ORB):
 a – нетрансформированное изображение; b – трансформированное изображение

Fig. 1. Comparison of two images with the search for keypoints (ORB detector):
 a – untransformed image; b – transformed image

Таким образом, формировался список из пар особых точек. Далее для каждой из пар точек вычислялось расстояние в пикселях между ними при наложении изображений на одну и ту же координатную плоскость xOy . Среднеквадратичное значение такого расстояния для всех пар точек из списка принималось за ошибку комбинирования двух изображений.

В качестве основы для геопривязки фотоизображений, получаемых с борта МКС, использовались регистрируемые спутниковой системой Sentinel-2 (developers.planet.com/docs/data/sentinel211c) RGB-изображения формата GeoTIFF с проведенной цветокоррекцией для прикладных задач визуализации. Точность наведения СОБА с борта МКС на объекты поверхности Земли позволяет осуществлять поиск спутниковых данных для первичной грубой геопривязки по координатам объекта наведения. За счет высокой периодичности съемки Sentinel-2 одних и тех же территорий удалось выделить безоблачные изображения на даты, близкие к датам съемки с борта МКС. Конечная геопривязка изображений осуществлялась с помощью инструмента «Автоматическая пространственная привязка растра» программного комплекса ArcGIS (desktop.arcgis.com). В качестве методов смещения растровых данных использовались интерполирующие полиномы различных порядков, подгонка, сплайн-интерполяция, а также метод проективного преобразования [17].

Показателем для оценки качества геопривязки является общая среднеквадратическая ошибка, вычисляемая как квадратный корень из суммы квадратов ошибок всех связей между привязываемым изображением и снимком с известными координатами. Данное значение характеризует степень согласования трансформации между всеми опорными точками (связями). Таким образом, этот параметр не говорит о точности геопривязки, а только указывает на успешность трансформации одного изображения по отношению к другому изображению при заданных начальных условиях (выбранных опорных точках). Тем не менее, так как в настоящем исследовании опорные точки выбираются автоматически и в большинстве случаев являются идентичными для изображений с коррекцией дисторсии и без нее, описанный параметр невязки можно использовать для сравнительной оценки влияния дисторсии на результат геопривязки.

Результаты и их обсуждение

На основе исходных фотоизображений сформирован ряд данных, представляющий собой набор из 22 пар пересекающихся изображений размером 5568×3712 пк, которые были зарегистрированы с борта МКС камерой Nikon D5 с объективом AF-S Nikkor 200–400 мм (для всех изображений фокусное расстояние составляло 400 мм) с применением СОБА. Для изображений с коррекцией дисторсии и без нее определены ошибки комбинирования при использовании различных детекторов и вычислителей дескрипторов особых точек. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, при применении всех рассмотренных детекторов и вычислителей дескрипторов изображения с коррекцией дисторсии демонстрируют лучшие результаты при сшивке, чем изображения без коррекции дисторсии, как по средним значениям ошибок, так и по разбросу этих значений. При использовании детектора BRISK с собственным вычислителем дескрипторов среднее значение ошибок комбинирования изображений без коррекции дисторсии превышает аналогичную величину для изображений с коррекцией дисторсии на 23 % (0,84 пк), при использовании детектора Star с вычислителем дескрипторов

FREAK – на 29 % (1,41 пк), при использовании детектора ORB с собственным вычислителем дескрипторов – на 38 % (1,08 пк), а при использовании детектора ORB с вычислителем дескрипторов FREAK – на 39 % (1,30 пк). Такое различие среднего значения ошибок можно считать существенным, что говорит о важности проведения коррекции дисторсии перед выполнением автоматического совмещения изображений.

Помимо влияния дисторсии на результаты комбинирования изображений, проведенное исследование позволяет оценить качество работы различных детекторов и вычислителей дескрипторов особых точек применительно к сшивке изображений земной поверхности, регистрируемых с борта МКС. Средние ошибки сшивки изображений с проведением коррекции дисторсии отличаются достаточно существенно. Так, средняя ошибка, полученная при использовании детектора и вычислителя дескрипторов BRISK, на 32 % (0,90 пк) превышает среднюю ошибку, полученную при использовании детектора и вычислителя дескрипторов ORB. Наименьшую среднюю ошибку сшивки регистрируемых с борта МКС изображений обеспечивает применение детектора ORB в совокупности с собственным вычислителем дескрипторов. Однако при использовании совместно с детектором ORB вычислителя дескрипторов FREAK разброс

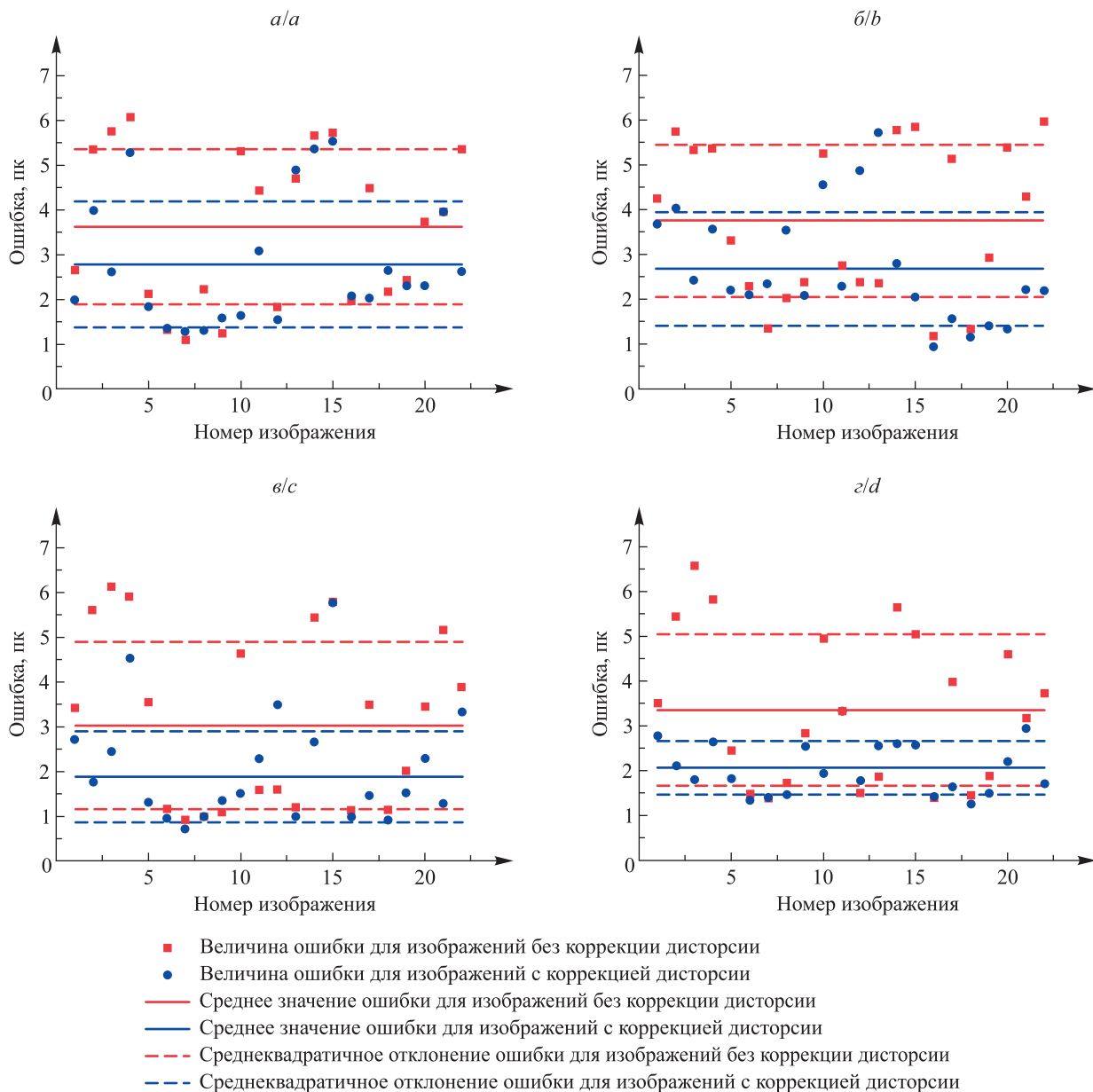


Рис. 2. Ошибки комбинирования для ряда изображений с коррекцией дисторсии и без нее при использовании различных детекторов и вычислителей дескрипторов:
а – BRISK; б – Star + FREAK; в – ORB; г – ORB + FREAK

Fig. 2. Combination errors for a number of images with and without distortion correction using different detectors and descriptor calculators:
а – BRISK; б – Star + FREAK; в – ORB; г – ORB + FREAK

значений ошибки уменьшается в 1,7 раза (на 0,40 пк) при увеличении среднего значения ошибки всего в 1,1 раза (на 0,18 пк). Средние ошибки сшивки изображений без проведения коррекции дисторсии отличаются менее значительно. Наибольшие различия (19 % (0,70 пк)) отмечены для детектора Star с вычислителем дескрипторов FREAK и детектора ORB с собственным вычислителем дескрипторов. На основании определенных величин ошибок можно сделать вывод, что в задаче сшивки изображений земной поверхности наилучшим из рассмотренных вариантов является комбинация детектора ORB с вычислителем дескрипторов FREAK.

Для геопривязки 25 изображений, полученных с борта МКС, использовались спутниковые изображения Sentinel-2, покрывающие всю область съемки объекта, координаты которого были заданы в космическом эксперименте на борту РС МКС при регистрации данных. Результаты определения невязок при автоматизированной геопривязке с применением программного комплекса *ArcGis* в зависимости от выбранного метода интерполяции при трансформировании изображений с коррекцией дисторсии и без нее представлены на рис. 3. Перед анализом полученных результатов выполнялась проверка на наличие выбросов по критерию Кохрена, в результате чего часть изображений была исключена из выборки.

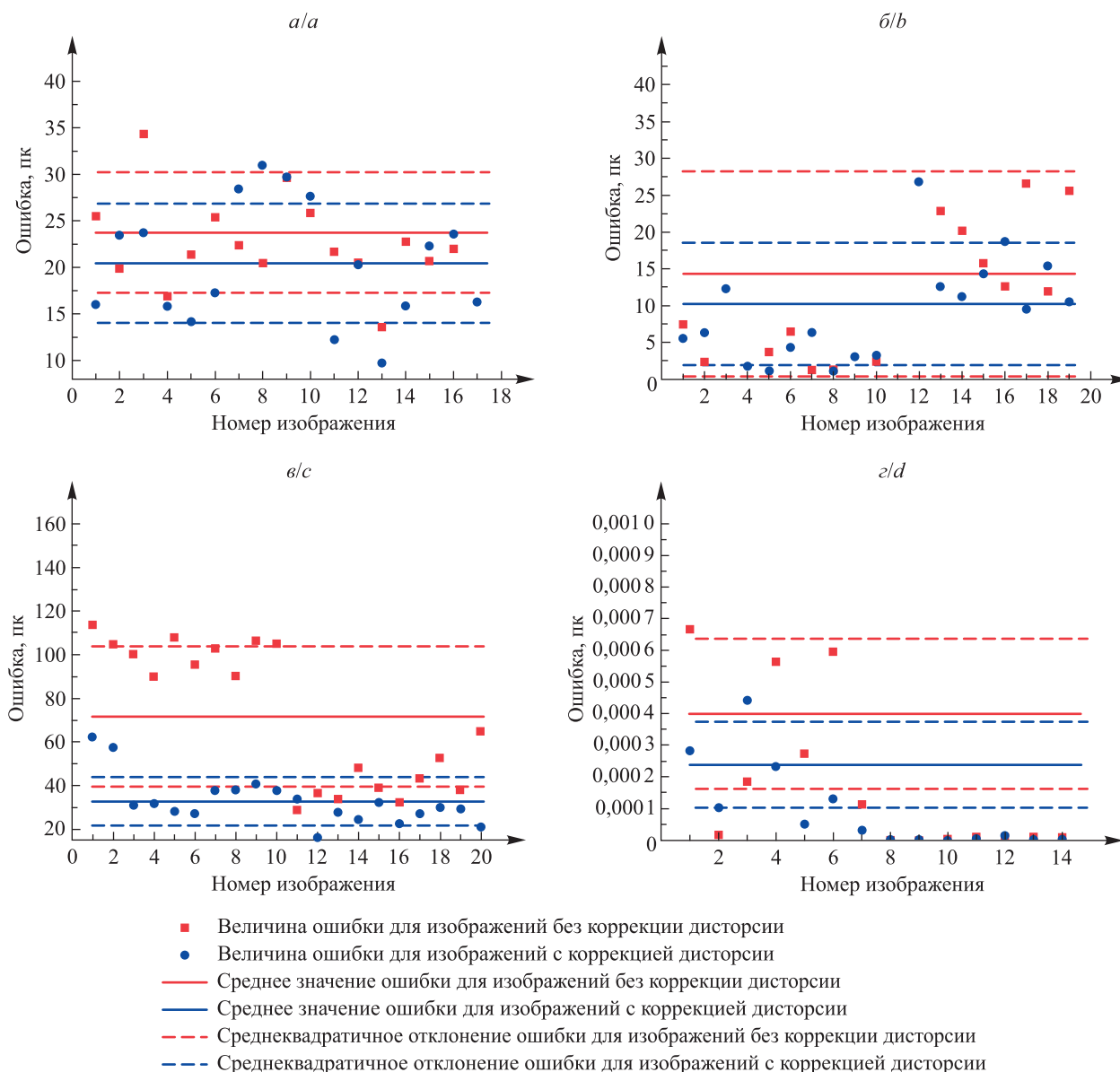


Рис. 3. Невязки геопривязки для ряда изображений с коррекцией дисторсии и без нее при использовании различных методов интерполяции:

а – полиномиальная интерполяция; б – подгонка;

в – проективное преобразование; г – сплайн-интерполяция

Fig. 3. Georeferencing residuals for a number of images

with and without distortion correction using various interpolation methods:

а – polynomial interpolation; б – fitting; в – projective transformation; г – spline interpolation

Как видно из рис. 3, при использовании всех исследованных методов интерполяции коррекция дисторсии на изображениях уменьшает как среднее значение невязок, проявляющихся при автоматизированной геопривязке, так и разброс значений ошибки. Наибольшая разница (54 %) в среднем значении невязок для изображений с коррекцией дисторсии и без нее выявлена в случае применения проективного преобразования, наименьшая (14 %) – в случае применения полиномиальной интерполяции. При использовании подгонки эта разница составила 28 %, а при использовании сплайн-интерполяции – 40 %. Таким образом, дисторсия оказывает существенное влияние на результаты привязки, что говорит о необходимости проведения коррекции дисторсии на этапе предварительной обработки изображений.

Большинство методов автоматизированной геопривязки чувствительны к количеству опорных точек: как правило, чем выше количество опорных точек, тем точнее осуществляется геопривязка. Кроме того, скорость геопривязки с использованием описанного в работе метода на порядок ниже скорости автоматической сшивки изображений. То есть временные затраты на последовательную геопривязку ряда изображений будут в несколько раз превышать временные затраты на сшивку этого ряда изображений и последующую геопривязку комбинированного изображения. Исходя из данного факта, была предпринята попытка геопривязки мозаики из 5 изображений, полученных с борта МКС, к спутниковому изображению Sentinel-2 (рис. 4).

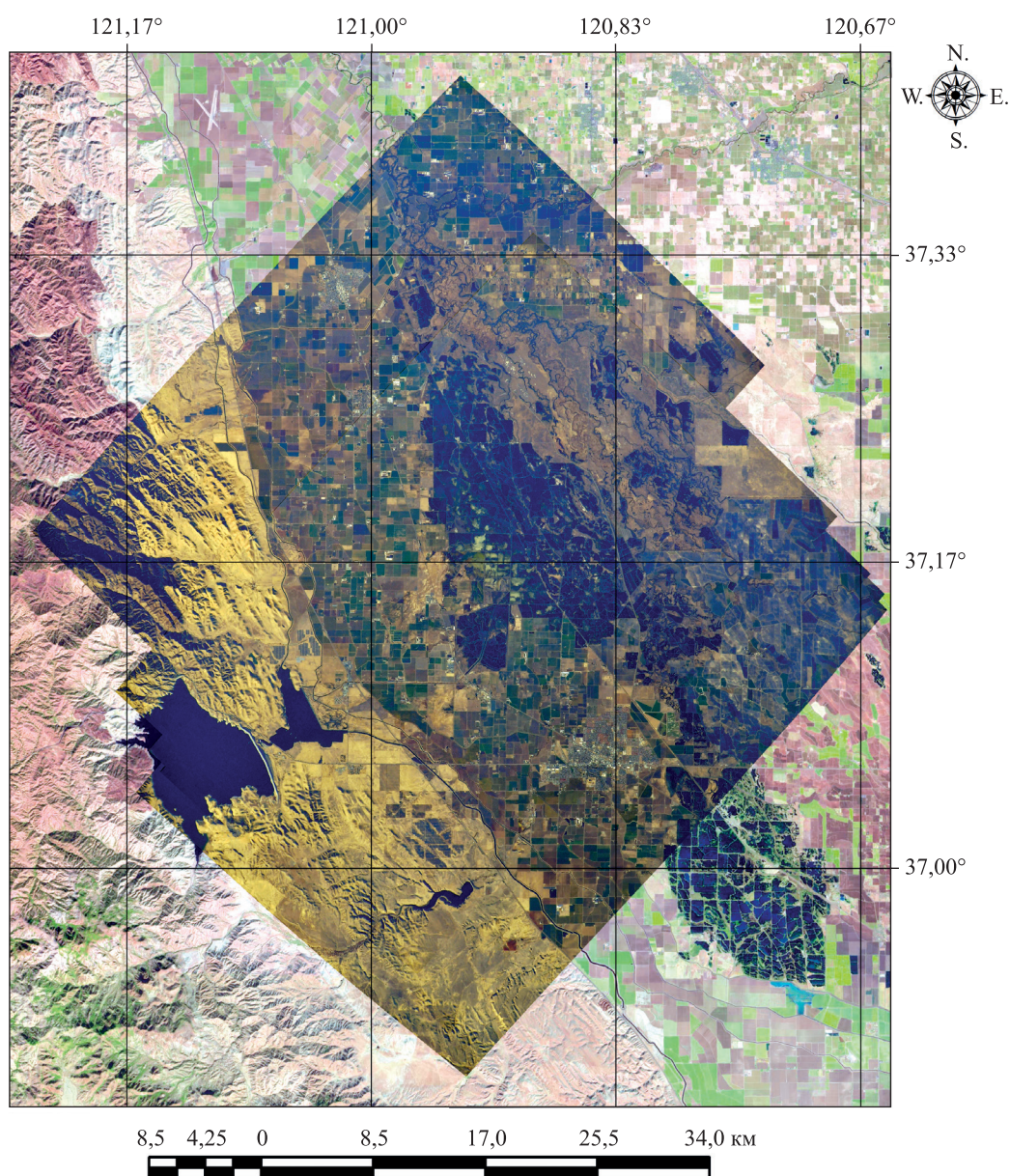


Рис. 4. Геопривязка комбинированного изображения
Fig. 4. Georeferencing of the composite image

Количество опорных точек для геопривязки, детектированных в автоматическом режиме, в комбинированном изображении превышало их количество в отдельных изображениях примерно в 2 раза. Невязки, вычисленные для комбинированного изображения, для всех рассмотренных методов трансформации оказались существенно выше средних значений, представленных на рис. 3, а в случае использования сплайн-интерполяции наблюдалось отклонение от среднего значения на 400 %. Причиной этому могут быть ошибки сшивки изображений на этапе формирования мозаики. Таким образом, предварительное формирование мозаики изображений не дает преимуществ при необходимости дальнейшей геопривязки изображения, а, наоборот, вносит искажения, приводящие к увеличению средней величины ошибки геопривязки.

Заключение

Проведенное исследование показало, что дисторсия фотоаппаратуры оказывает существенное влияние на ошибки, которые проявляются при сшивке изображений, получаемых с борта МКС, методами на основе поиска особых точек. При использовании различных комбинаций детекторов и вычислителей дескрипторов особых точек разница в среднем значении ошибки сшивки для изображений с коррекцией дисторсии и без нее варьируется от 23 % (детектор и вычислитель дескрипторов BRISK) до 39 % (детектор ORB и вычислитель дескрипторов FREAK). Наилучшей комбинацией для сшивки изображений, получаемых с борта МКС, является совместное использование детектора ORB и вычислителя дескрипторов FREAK в силу одновременно невысокого среднего значения ошибки сшивки (2,01 пк) и наименьшего среднеквадратичного отклонения ошибки сшивки (0,60 пк).

Дисторсия фотоаппаратуры также оказывает большое влияние на автоматизированную геопривязку изображений, получаемых с борта МКС, к спутниковым изображениям Sentinel-2. При использовании различных методов трансформации изображений разница в среднем значении невязки для изображений с коррекцией дисторсии и без нее варьируется от 14 % (полиномиальная интерполяция) до 54 % (проективное преобразование).

Таким образом, влияние дисторсии на результаты сшивки и геопривязки изображений можно считать существенным, что свидетельствует о необходимости проведения коррекции дисторсии на этапе предварительной обработки изображений.

Автоматизированная геопривязка панорамного снимка, сшитого из ряда изображений, полученных с борта МКС, осуществляется с большими значениями невязки, чем привязка отдельных изображений из данного ряда, несмотря на существенное увеличение количества опорных точек для привязки. Это говорит о целесообразности выполнения геопривязки отдельных изображений вместо выполнения геопривязки комбинированного изображения в случаях, когда точность привязки имеет более высокий приоритет, чем скорость обработки.

Библиографические ссылки

1. Сенюшкин НС, Суханов АВ, Шарина АВ. Особенности системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. *Молодой ученый*. 2010;11(1):120–122.
2. Беляев МЮ, Десинов ЛВ, Караваев ДЮ, Легостаев ВП. Использование съемки земной поверхности с МКС в интересах топливно-энергетического комплекса. *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2013;4:75–90.
3. Беляев МЮ, Виноградов ПВ, Десинов ЛВ, Кумакшев СА, Секерж-Зенькович СЯ. Идентификация по фотоснимкам из космоса источника океанских кольцевых волн вблизи острова Дарвин. *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. 2011;1:70–83.
4. Кучма МО, Лотарева ЗН, Корнева ЛА, Шапилова ЮА. Применение нейронной сети для детектирования ледяного покрова Дальневосточных морей по данным прибора VIIRS космического аппарата NOAA-20. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2022;19(2):32–42. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-32-42.
5. Беляев БИ, Беляев МЮ, Сармин ЭЭ, Гусев ВФ, Десинов ЛВ, Иванов ВА и др. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС. *Космическая техника и технологии*. 2016;2:70–79.
6. Беляев БИ, Беляев МЮ, Боровихин ПА, Голубев ЮВ, Ломако АА, Рязанцев ВВ и др. Система автоматической ориентации научной аппаратуры в эксперименте «Ураган» на Международной космической станции. *Космическая техника и технологии*. 2018;4:70–80.
7. Ломако АА, Станчик ВВ, Литвинович ГС, Бручковский ИИ, Беляев БИ, Беляев МЮ. Метод прогнозирования углов ориентации научной аппаратуры при съемке с борта Международной космической станции с использованием платформы наведения. *Доклады БГУИР*. 2021;19(2):22–30. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-2-22-30.
8. Беляев МЮ, Беляев БИ, Иванов ДА, Катковский ЛВ, Мартинов АО, Рязанцев ВВ и др. Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть I. Методика для спектров. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;15(6):213–222. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-213-222.
9. Беляев МЮ, Беляев БИ, Иванов ДА, Катковский ЛВ, Мартинов АО, Рязанцев ВВ и др. Атмосферная коррекция данных, регистрируемых с борта МКС. Часть II. Методика для изображений и результаты применения. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018;15(6):223–234. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-223-234.

10. Бурцев МА, Волкова ЕЕ, Десинов СЛ, Кудякова СТ. Формирование архива геопривязанных данных МКС на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» [Интернет]. В: *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Тезисы 19-й Всероссийской открытой конференции с международным участием; 15–19 ноября 2021 г.; Москва, Россия*. Москва: Институт космических исследований Российской академии наук; 2021 [протитировано 22 ноября 2022 г.]. с. 79. Доступно по: <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=197&thesis=8961>.
11. Кэлер А, Брэдки Г. *Изучаем OpenCV 3*

14. Leutenegger S, Chli M, Siegwart RY. BRISK: binary robust invariant scalable keypoints. In: *2011 International conference on computer vision; 2011 November 6–13; Barcelona, Spain*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011. p. 2548–2555. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126542.
15. Rublee E, Rabaud V, Konolige K, Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. In: *2011 International conference on computer vision; 2011 November 6–13; Barcelona, Spain*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 2011. p. 2564–2571. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
16. Alahi A, Ortiz R, Vanderghelynst P. FREAK: fast retina keypoint. In: *2012 IEEE conference on computer vision and pattern recognition; 2012 June*