

## Вопросы обеспечения географической привязки снимков дистанционного зондирования Земли

Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, А. Н. Куркина, А. В. Никитин, А. А. Форш

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия  
E-mail: besson777@gmail.com*

Одной из важнейших характеристик спутниковых данных ДЗЗ является точность их геопривязки. Обеспечение точности геопривязки во многом определяется точностью измерения ориентации бортовыми средствами КА и точностью измерений приборов звёздной ориентации. Решение этих вопросов носит комплексный характер. Необходимо бороться со случайной составляющей погрешности определения ориентации звёздных датчиков, с медленно меняющимися и низкочастотными ошибками, в том числе вызванными термоупругими деформациями конструкции приборов и КА, использовать несколько звёздных приборов для построения равноточной ориентации. Вместе с этим требуется использовать гироскопы сверхвысокой точности. В работе показано, что на современных отечественных КА ДЗЗ реализован комплекс мер, а также внедрены приборы звёздной ориентации нового поколения, что в совокупности позволяет обеспечить геопривязку с точностью единиц метров. Основа перечисленных методов борьбы с медленно меняющимися и низкочастотными измерениями ориентации заключается в лётной фотограмметрической калибровке приборов звёздной ориентации по звёздам и построение термостабильной конструкции приборов и КА. Случайная составляющая погрешности измерения минимизируется за счёт использования более современных и высокоточных приборов звёздной ориентации, а также совместной обработки показаний нескольких приборов.

**Ключевые слова:** геопривязка данных ДЗЗ, прибор звёздной ориентации, ориентация космического аппарата

Одобрена к печати: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64

За последние годы в России произошли изменения в понимании и подходах к построению космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) высокого разрешения и их систем управления движением. Очевидно, что данные ДЗЗ высокого разрешения нужны для решения задач составления цифровых карт и моделей рельефа. Эти задачи требуют получения снимков земной поверхности, обладающих высокими радиометрическими показателями, высокоточной внутренней геометрией и адекватной разрешающей способности геопривязкой. Следует сказать, что с развитием цифровых оптико-электронных съёмочных систем и высокоскоростных радиолиний в наземные приёмные пункты регулярно начали поступать данные ДЗЗ с отечественных КА, таких как «Ресурс-П», «Аист-2Д» и др., высокого радиометрического качества (Бакланов и др., 2016). Также благодаря успехам в построении систем управления угловым движением этих КА с достаточно высокой точностью удаётся восстановить внутреннюю геометрию снимка ДЗЗ. В результате заказчикам стали поступать изображения земной поверхности с широкой полосой захвата и высоким разрешением. С учётом возможности глобального обзора спутниковыми средствами и скорости получения информации от них, снимки ДЗЗ с этих КА были немедленно востребованы.

При этом скоро стало понятно, что данные ДЗЗ далеко не полностью удовлетворяют заказчиков в вопросе точности географической привязки снимков на основе получаемых с борта данных. Для повышения точности геопривязки зачастую приходится использовать наземные ориентиры. Таким образом, возможности по оперативному построению и обновлению карт оказались сильно ограничены.

Можно считать, что на текущем этапе развития техники требуемый уровень точности геопривязки по показателю SE90 составляет единицы метров. Такая точность может считаться достаточной для составления цифровых карт. Подобные цифры указаны в большинстве

современных тактико-технических заданиях (ТТЗ) на КА ДЗЗ высокого разрешения. Именно такие точности геопривязки демонстрируют современные зарубежные КА.

Обеспечить геопривязку без использования опорных ориентиров на местности можно только на основании показаний бортовых измерительных приборов. К таким приборам относятся средства спутниковой навигации, которые позволяют определить положение центра масс КА на орбите, а также приборы звёздной ориентации и гироскопы, предназначенные для измерения параметров углового движения и ориентации КА.

Следует отметить, что благодаря развитым методам обработки показаний бортовых средств спутниковой навигации уже удаётся надёжно определять положение КА на орбите с точностью до долей метра. При этом ряд экспериментов по выделению составляющих погрешности геопривязки показывает, что основной вклад в совокупную ошибку геопривязки вносят погрешности в измерениях параметров ориентации. Ничего удивительного в этом нет: ошибка в угловой ориентации изделия на одну угловую секунду при съёмке с высоты 800 км приводит к ошибке геопривязки около четырёх метров. Таким образом, требуемый уровень точности измерения ориентации КА ДЗЗ высокого разрешения составляет доли угловой секунды. Очевидно, что обеспечение высокоточных измерений ориентации изделия на протяжении длительного времени — непростая задача, требующая решения целого комплекса технических вопросов, которые не возникали и не решались ранее.

Стало ясно, что единственный бортовой инструмент, который способен измерить угловую ориентацию с требуемой точностью, — это звёздный датчик. Более того, одного звёздного датчика недостаточно: для построения равноточной ориентации и исключения из обработки углов, измеряемых с низкой точностью, необходима совместная обработка данных как минимум от двух приборов звёздной ориентации. Для примера можно сказать, что использование только одного прибора звёздной ориентации БОКЗ-М60 на борту КА для решения задачи геопривязки приводило к погрешностям 100 м и более.

Опыт показал, что трёх приборов БОКЗ-М60 тоже может оказаться недостаточно. Причины для этого две. Во-первых, увеличение количества одновременно работающих приборов позволяет усреднять их показания, что повышает точность измерения ориентации и геопривязки. Во-вторых, в случае засветки одного из приборов Солнцем или Землёй, что регулярно происходит на активно маневрирующих КА ДЗЗ, невозможно обеспечить точность геопривязки при временном отказе одного из датчиков ориентации. В связи с этим все отечественные разработчики КА, которые преодолели этап создания съёмочных систем, столкнулись с вопросом геопривязки данных ДЗЗ и осознали необходимость установки четвёртого прибора звёздной ориентации БОКЗ на борт КА, хотя ранее не видели в этом необходимости.

Вышесказанное показывает новизну вопроса геопривязки и изменение в его понимании в нашей стране. Об этом также говорит тот факт, что до сих пор ни в одном техническом задании (ТЗ) на прибор звёздной ориентации нет требования о его использовании для решения задач геопривязки данных ДЗЗ. В соответствии с существующими и вновь выпускаемыми ТЗ звёздные датчики предназначены только для использования в системе управления ориентацией, где требования по точности существенно ниже. Хотя, очевидно, что без использования высокоточных приборов звёздной ориентации задача оперативной геопривязки с требуемой точностью не решается.

Следует заметить, что использование высокоточного гироскопа может продлить точностную готовность КА и тем самым допустить временную засветку одного из звёздных приборов, т.е. снизить требования к количеству звёздных датчиков на борту. Однако в этом случае должен использоваться гироскоп сверхвысокой точности, суммарная накопленная ошибка по углу которого на интервале 10–15 мин (возможное время засветки звёздного датчика) не будет превышать долей угловой секунды, т.е. эти гироскопы должны иметь нестабильность нуля лучше, чем  $10^{-3}$  град/ч. Подобные точности достигаются только в самых лучших и дорогостоящих мировых образцах гироскопов космического применения: КИНД-34-20 (Россия), Asrtix 200 (Европа) (<http://spaceequipment.airbusdefenceandspace.com/avionics/fiber-optic-gyroscopes/astrix-200/>) и SIRU (США) (Scrabble Space Inertial Reference Unit, <https://www.northropgrumman.com/Capabilities/SSIRU/Pages/default.aspx>).

Кроме того, совместная фильтрация показаний гироскопа и приборов звёздной ориентации при работе их на участке съёмки позволяет повысить точность измерения ориентации. Участок съёмки обычно длится 5–10 с. За это время КА преодолевает 50–100 км. За такой интервал времени гироскоп, даже обладающий нестабильностью нуля  $10^{-2}$  град/ч, практически не имеет дрейфа, и путём интегрирования его показаний одновременно с калибровкой смещения нуля по показаниям звёздных датчиков можно получить высокоточное относительное движение КА. Начальное положение КА, относительно которого ведётся интегрирование гироскопов, оценивается по измерениям нескольких приборов звёздной ориентации. Важно понимать, что съёмка с борта КА ДЗЗ высокого разрешения осуществляется в режиме управляемого трёхосного поворота. Его угловая скорость обычно составляет 0,5–0,7 град/с, что необходимо для компенсации скорости бега изображения. Это ведёт как к ошибкам в измерениях гироскопов, вызванным погрешностью масштабного коэффициента, так и к ошибкам в измерениях приборов звёздной ориентации, у которых точность измерений снижается с увеличением угловой скорости. Всё это говорит о сложности вопроса достижения высокоточных измерений ориентации во время съёмки и необходимости принятия целого ряда мер (Аванесов и др., 2016).

Для снижения случайной составляющей погрешности измерений звёздных датчиков в отечественной практике реализовано несколько способов. Разработан и реализован метод лётной калибровки элементов внутреннего ориентирования звёздных датчиков по звёздам (Аванесов и др., 2018б). В ходе накопления опыта и исследований было выяснено, что фотограмметрическая калибровка звёздных датчиков, проведённая при наземных испытаниях, искажается после вывода КА на орбиту. Показано, что элементы внутреннего ориентирования искажаются при изменении давления окружающей среды, т.е. при переходе прибора из воздушного пространства в космический вакуум, а также зависят от температуры, механических деформаций и спектра излучения звёзд. После выхода КА на орбиту и его термостабилизации приборы звёздной ориентации оказываются в определённых условиях, для которых целесообразно провести повторную лётную калибровку. Такая калибровка проводится по звёздам, направления на которые известны с высокой точностью, — звёздное небо выступает в качестве высокоточного стенда, вынесенного на орбиту. Более того, оказывается, что построить аналогичный по точности стенд в наземных условиях невозможно, а реализованный метод лётной калибровки позволяет проводить её параллельно со штатной работой приборов практически непрерывно, поддерживая фотограмметрическую калибровку приборов звёздной ориентации в максимально точном состоянии.

Как показывает опыт, лётная калибровка позволяет снизить случайную погрешность измерений приборов звёздной ориентации в 2–2,5 раза. Для приборов БОКЗ-М60 удалось достигнуть величины случайной составляющей погрешности измерений направлений оптических осей приборов лучше одной угловой секунды. В результате проведённой лётной калибровки и использования совместной обработки данных от четырёх приборов звёздной ориентации и гироскопа удалось повысить точность геопривязки с 10 до 4 м. Полученный при работе с этим КА результат является лучшим показателем, достигнутым в нашей стране, и соответствует мировым требованиям.

В настоящее время на смену старым приборам БОКЗ-М, БОКЗ-М60 и др. идёт новое поколение приборов звёздной ориентации. Случайная составляющая погрешности измерений в них в несколько раз ниже, чем у предыдущего поколения. Точностные характеристики прибора БОКЗ-МР, использование которого закладывается в современных КА ДЗЗ, оцениваются на уровне 0,4 угл. с, тогда как аналогичные показатели у приборов БОКЗ-М60 находятся на уровне 1,2 угл. с. Как было показано для прибора БОКЗ-М60, с учётом проведения лётной калибровки эти показатели могут быть даже лучше. Разработан и создан (однако пока не планируется к установке ни в один КА) прибор БОКЗ-ВТ, обладающий случайной составляющей погрешности на уровне 0,2 угл. с. Следует отметить, что аналогичный по уровню точности прибор существуют только в США, но его масса в несколько раз превышает отечественную разработку.

Совместная фильтрация показаний приборов позволяет устранить случайные ошибки измерений, однако значительный вклад в суммарную ошибку определения ориентации вызван

систематическими ошибками в знании взаимной ориентации между системами координат измерительных приборов и съёмочной системой ДЗЗ. Эти ошибки можно разделить на две составляющие: постоянную или медленно меняющуюся ошибку и ошибку, вызванную термоупругими деформациями.

Эти ошибки имеют различную физическую природу и период изменения. Первая составляющая ошибки вызвана погрешностями первичной (наземной) калибровки и механическими факторами, возникающими при выводе КА на орбиту. Со временем возможны медленные, с темпом несколько угловых секунд в месяц, изменения, вызванные дегазацией конструкции и пластической деформацией материалов. Вторая составляющая погрешности, вызванная нагревом и охлаждением конструкции, а также её термоупругими деформациями, зачастую имеет более короткий период и повторяется от одного орбитального витка к другому.

Постоянная или медленно меняющаяся составляющая погрешности устраняется периодической калибровкой матриц взаимной ориентации. Для этого разработаны и реализованы методы калибровки взаимной ориентации систем координат звёздных датчиков и аппаратуры ДЗЗ, основанные на измерениях направлений на ориентиры на местности и показаниях приборов звёздной ориентации. Периодическое, а в идеальном случае — квазинепрерывное использование данного метода позволяет исключить постоянную и медленно меняющуюся ошибку в знании взаимной ориентации систем координат ДЗЗ приборов звёздной ориентации с высокой точностью.

Для солнечно-синхронных КА термоупругие деформации конструкции как приборов, так и всего космического аппарата имеют период в один орбитальный виток и практически не поддаются калибровке. Поэтому с этим видом погрешности следует бороться конструктивными методами. В первую очередь должна быть реализована система терморегулирования КА, обеспечивающая стабилизацию температур на протяжении длительного времени с точностью единиц и долей градусов Цельсия, а материалы конструкции КА должны иметь безусловность и стабильность в условиях космического вакуума. Кроме того, как выяснилось, даже построение термостабилизированной конструкции КА не является достаточным. Значительный вклад в термоупругие деформации вносят сами приборы звёздной ориентации. Вызвано это тем, что их бленды находятся в открытом космическом пространстве и на одну часть витка на них попадает солнечный тепловой поток, а на другой они работают как радиаторы и излучают тепло в космос. В результате витковое изменение температуры на блендах приборов может достигать 100 °С и более. Естественно, это не может не приводить к возникновению термоупругих деформаций и погрешностей в измерении ориентации. Как расчётным, так и экспериментальным путём на ряде КА показано, что подобные термоупругие деформации могут приводить к поворотам оптической оси прибора на 5–7 угл. с и более. Подобные величины термоупругих деформаций ограничивают дальнейшее развитие точностных характеристик приборов. Для устранения термоупругих деформаций в приборах БОКЗ-МР и современных КА ДЗЗ «Ресурс-ПМ» был реализован комплекс мер, позволяющий снизить амплитуды угловых поворотов оптической оси приборов, вызванных термоупругими деформациями, до 0,1 угл. с. Данный комплекс мер основан на отделении бледны от измерительного базиса прибора и обеспечении её термостабилизации, в том числе средствами КА (Аванесов и др., 2018а).

В результате представленный комплекс методов и конструктивных решений позволяет сказать, что в нашей стране сделан существенный шаг в понимании вопросов геопривязки и построения КА ДЗЗ высокого разрешения, которые в ближайшем будущем должны быть выведены на орбиту и начать передавать данные ДЗЗ высочайшего качества, не уступающие по своим характеристикам мировым лидерам.

## Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П., Беличенко М., Дементьев В., Строилов Н., Брысин Н., Шевелев В., Квашинин А., Завгородний Д.С. Исследование погрешностей определения параметров ориентации прибора высокой точности БОКЗ-ВТ // 5-я Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тез. Таруса. 5–8 сент. 2016. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 14.
2. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Брысин Н.Н., Квашинин А.С., Шевелев В.Е. (2018а) Пути снижения термоупругих деформаций приборов звездной ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 90–105.
3. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С. (2018б) Технология наземной обработки данных о координатах звёзд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 2018. Т. 15. № 6. С. 31–38.
4. Бакланов А.И., Блинов В.Д., Горбунов И.А., Забиякин А.С., Малахов И.А. Аппаратура высокого разрешения для перспективного космического аппарата «Ресурс-ПМ» // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 2. С. 30–35.

## Issues of providing geographic referencing of Earth remote sensing images

G. A. Avanesov, R. V. Bessonov, A. N. Kurkina, A. V. Nikitin, A. A. Forsh

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*  
*E-mail: besson777@gmail.com*

One of the most important characteristics of satellite remote sensing data is the accuracy of their geo-referencing. Ensuring the accuracy of geo-referencing is largely determined by the accuracy of measuring the orientation by onboard spacecraft and the measurement accuracy of stellar orientation instruments. The solution to these issues is complex. It is necessary to deal with the random component of the error in determining the orientation of stellar sensors, use several stellar instruments to build equal-current orientation, and deal with slowly changing and low-periodic errors, including those caused by thermoelastic deformations of the instrument and spacecraft design. Along with this it is necessary to use gyroscopes of ultrahigh accuracy. The work shows that a set of measures has been implemented on modern domestic Earth remote sensing spacecraft, and new-generation stellar orientation devices have been introduced, which together allows for geo-referencing with an accuracy of units of meters. The basis of these methods of dealing with slowly varying and low-period orientation measurements is the flight photogrammetric calibration of stellar orientation devices by stars and the construction of a thermostable design of devices and spacecraft. The random component of the measurement error of orientation is minimized through the use of more modern and high-precision stellar orientation instruments, as well as the joint processing of the readings of several instruments.

**Keywords:** geo-referencing of Earth remote sensing data, star tracker, spacecraft orientation

Accepted: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64

## References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P., Belichenko M., Dement'ev V., Stroilov N., Brysin N., Shevelev V., Kvashnin A., Zavgordnii D. S., Issledovanie pogreshnostei opredeleniya parametrov orientatsii pribora vysokoi tochnosti BOKZ-VT (The study of errors in determining the orientation parameters of the high precision device BOKZ-VT), 5-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov" (5<sup>th</sup> All-Russia Scientific and

- Technological Conf. “Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control”), Book of Abstracts, Tarusa, Sept. 5–8, 2016, Moscow: IKI RAN, 2016, p. 14.
2. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Brysin N. N., Kvashnin A. S., Shevelev V. E. (2018a), Puti snizheniya termouprugikh deformatsii priborov zvezdnoi orientatsii (Ways of decreasing thermoelastic deformations of the star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 90–105.
  3. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P. S. (2018b), Tekhnologiya nazemnoi obrabotki dannykh o koordinatakh zvezd v tselyakh povysheniya tochnosti geoprivyazki snimkov Zemli iz kosmosa (Technology for ground processing of data on the stars’ coordinates in order to improve the accuracy of georeferencing Earth images from space), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 31–38.
  4. Baklanov A. I., Blinov V. D., Gorbunov I. A., Zabaykin A. S., Malakhov I. A., Apparatura vysokogo razresheniya dlya perspektivnogo kosmicheskogo apparata “Resurs-PM” (High-resolution equipment for the promising spacecraft Resource-PM), *Vestnik Samarskogo universiteta, Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2016, Vol. 15, No. 2, pp. 30–35.