Технология наземной обработки данных о координатах звёзд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса

Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.Н. Куркина, П.С. Сметанин

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

В статье представлены результаты работ по повышению точности измерения ориентации приборами БОКЗ-М60 и геопривязки данных Д33 КА «Ресурс-П» № 3 за счёт использования технологии наземной обработки данных о координатах звёзд. Реализованная технология подразумевает передачу на наземные пункты приёма информации о координатах звёзд на ПЗС-матрицах приборов БОКЗ-М60. Использование «сырой» информации с приборов БОКЗ-М60, полученной на длительных интервалах времени космического полёта, позволяет выполнить лётную калибровку и измерить дисторсию приборов, обеспечить отбраковку аномальных измерений и использовать уточнённую математическую модель прибора при наземной обработке их показаний. Технология показала свою эффективность и начинает распространяться на перспективных КА.

Ключевые слова: прибор звёздной ориентации, дистанционное зондирование Земли, геопривязка, погрешности ориентации, космический аппарат, наземная обработка данных

Одобрена к печати: 30.10.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38

Геопривязка данных ДЗЗ на современных космических аппаратах «Ресурс-П» (Кирилин и др., 2016) выполняется на основе измерений бортовых приборов, входящих в состав системы управления. Положение КА на орбите измеряется по показаниям бортовых средств спутниковой навигации. Показания бортовых спутниковых навигационных систем подвергаются баллистической фильтрации и обеспечивают погрешности оценки положения КА в доли метра.

Угловое положение КА и ориентация съёмочной аппаратуры определяются по измерениям нескольких одновременно работающих приборов звёздной ориентации. При съёмке в надир с высоты 500 км ошибка в угловой ориентации в 1 угл. с приводит к ошибке в геопривязке 2 м. На ошибку измерения параметров ориентации съёмочной аппаратуры влияют как случайные ошибки измерения, так и систематические ошибки знания взаимной ориентации звёздных приборов между собой и относительно съёмочной аппаратуры. Систематические ошибки возникают в том числе в связи термоупругими деформациями конструкции КА при движении его по орбите. Поэтому ошибки в измерении параметров ориентации съёмочной аппаратуры и приборов звёздной ориентации вносят определяющий вклад в погрешности геопривязки.

В целях повышения точности измерений приборов звёздной ориентации на КА «Ресурс-П» № 3 в экспериментальном режиме была реализована технология наземной обработки данных о координатах звёзд, полученных приборами БОКЗ-М60. Для этого приборами БОКЗ-М60, наряду со штатной, формировалась дополнительная телеметрическая информация, которая опрашивалась, буферировалась и передавалась на наземные пункты приёма и обработки информации по высокоскоростной радиолинии. В состав дополнительной информации входили координаты изображений звёзд, измеренные на ПЗС-матрицах приборов.

Полученная информация позволяет провести лётную геометрическую калибровку оптической системы приборов БОКЗ и уточнить параметры их математической модели. Фотограмметрические калибровочные параметры оптической системы приборов (фокусное расстояние и обобщённая дисторсия) зависят от температуры, давления и спектра излучения.

Таким образом, калибровочные параметры могут быть отличны для звёзд различных спектральных классов, изменяться после вывода KA из воздушной среды в космическое пространство и принимать определённые значения в соответствии с температурой эксплуатации. Кроме того, направления на звёзды известны с высокой точностью, а звёздное небо позволяет провести высокоточную лётную калибровку приборов. С учётом изложенного очевидно, что лётная калибровка, проводимая в условиях эксплуатации приборов, позволяет обеспечить более высокие точности измерения калибровочных параметров оптической системы приборов.

На рис. 1 представлено координатное поле ПЗС-матрицы одного из приборов БОКЗ-М60, установленного на КА «Ресурс-П» № 3. Точками показаны координаты звёзд, вычисленные в ходе обработки 6000 тактов измерений, на каждом из которых в среднем регистрируется от 10 до 12 звёзд. Таким образом, на рисунке отображены положения приблизительно 70 тыс. звёзд. Штрихами обозначены величины остаточных рассогласований, характеризующие отличия измеренных координат звёзд от их каталожного значения. Цветом обозначены спектральные классы звезды (В — синий, А — светло-зелёный, F — тёмно-зелёный, G — жёлтый, К — розовый, М — красный).

Накопленные на протяжении нескольких витков координаты звёзд более или менее равномерно покрывают всё поле матрицы и используются для виртуальной геометрической калибровки.

По полученным измерениям осуществляется расчёт коэффициентов дисторсии путём аппроксимации полученных остаточных рассогласований степенными полиномами. Вид рассчитанных функций обобщённой дисторсии для четырёх приборов БОК3-М60 приведён на рис. $2 \, (\mathbb{N}_2 \, \mathbb{I} - \text{синий}, \mathbb{N}_2 \, \mathbb{I} - \text{зелёный}, \mathbb{N}_2 \, \mathbb{I} - \text{жёлтый}, \mathbb{N}_2 \, \mathbb{I} - \text{красный})$ (см. с. 33).

Видно, что описывающие поверхности графики имеют схожий характер, но отличаются численными значениями. Максимальное значение функции дисторсии составляет 4—6 мкм. Это означает, что при отсутствии учёта актуальных коэффициентов обобщённой дисторсии величина ошибки определения направления на одиночную звезду будет достигать 14—21 угл. с на краю поля зрения. Для прибора БОКЗ-М60 одному микрону соответствуют ~3,5 угл. с.

На $puc.\ 1$ справа показана картина остаточных рассогласований после применения уточнённых калибровочных параметров. Как видно, она уже не носит столь явный систематический характер, как на $puc.\ 1$, c.neba. Средняя величина остаточных рассогласований уменьшается до 0.9 мкм, т.е. почти в два раза.

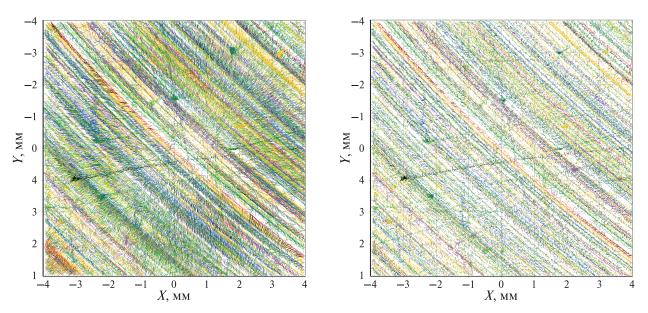
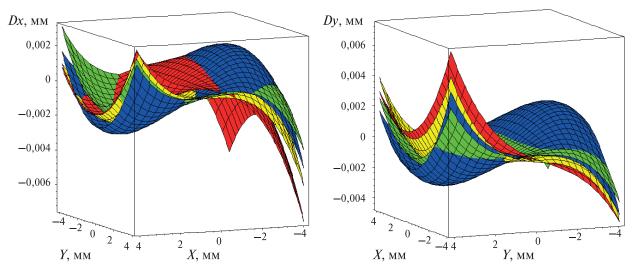


Рис. 1. Картина распределения звёзд и их остаточных рассогласований по полю матрицы до проведения лётной геометрической калибровки оптической системы (слева) и после неё (справа)



Puc. 2. Графики функций дисторсии приборов БОК3-М60 № 1—4 по осям *OX* и *OY*

Кроме того, на этом этапе обработки осуществляется отбраковка тех объектов, остаточные рассогласования которых по абсолютному значению превышают 3 мкм. Введение отбраковки позволяет исключить из обработки те звёзды, ошибки которых по тем или иным причинам не могли быть скомпенсированы за счёт повторной калибровки. Эти ошибки объясняются индивидуальными особенностями фоновой обстановки в ближайших окрестностях каталожных звёзд, по-разному воспринимаемой приборами с низким и высоким угловым разрешением. Звёздные датчики ориентации имеют низкое угловое разрешение в сравнении с астрономическими инструментами, с помощью которых составляются звёздные каталоги.

На *рис*. З приведены графики средних остаточных рассогласований по полю изображения на каждом такте работы приборов БОК3-М60 № 1 (красным цветом — по данным с борта, зелёным — после наземной обработки).

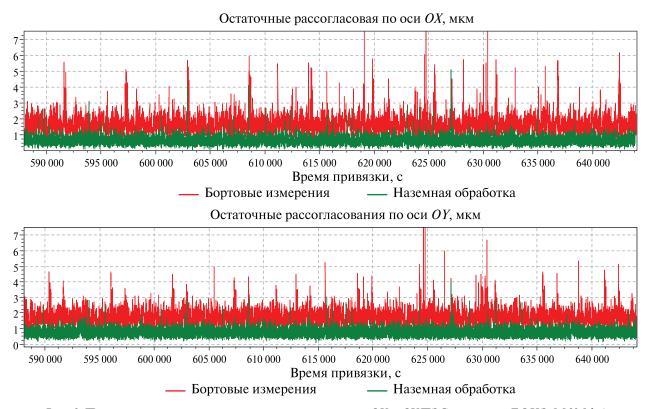
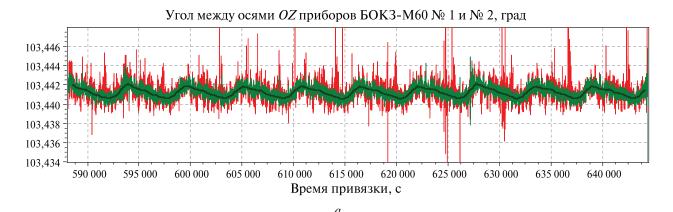


Рис. 3. Проекции остаточных рассогласований на оси ОХ и ОУ ПЗС-матрицы БОКЗ-М60 № 1





б Угол между осями *OZ* приборов БОК3-М60 № 1 и № 4

Время привязки, с

620 000

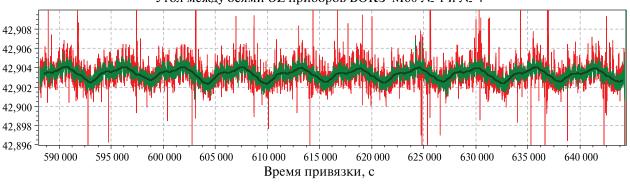
625 000

630 000

635 000

640 000

615 000



в Рис. 4. Угол между оптическими осями приборов: a — БОК3-М60 № 1–2; δ — БОК3-М60 № 1–3; ϵ — БОК3-М60 № 1–4

Всего на *рис.* 3 показаны данные с 55 тыс. тактов измерений приборов, выполненных за 9 орбитальных витков с 19:20 20 сентября по 11:00 21 сентября 2016 г. Видно, что средняя величина остаточных рассогласований каждого прибора уменьшилась с 1,5-2,0 до 0,7-0,9 мкм. Таким образом, можно констатировать, что за счёт наземной обработки удаётся уменьшить ошибки вычисления направлений на звёзды в проекциях на плоскость ПЗС-матрицы в 2 раза.

Оценить погрешности измерения приборов звёздной ориентации при штатной эксплуатации на борту КА можно ещё одним способом. Для этого следует измерить углы между одноимёнными осями пар приборов, опрос которых осуществляется синхронно. Измеренные значения конструкционных углов должны быть постоянными величинами; соответственно, их изменение во времени позволяет оценить возникающие случайные и систематические ошибки.

На *рис.* 4 отображено изменение взаимного угла между оптическими осями приборов (Никитин и др., 2011) на рассматриваемом временном интервале (20–21 сентября 2016 г.) при

120,014 · 120,012 · 120,006 · 120,004 · 120,002 · 120,00

590 000

595 000

600 000

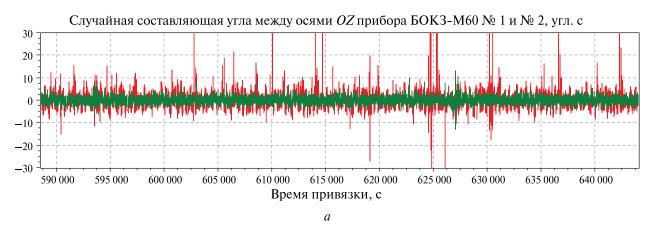
605 000

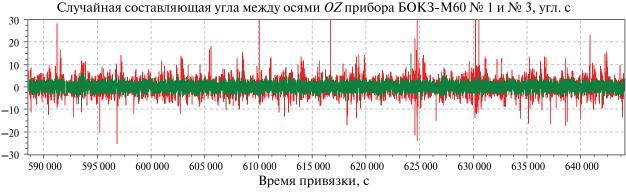
610 000

обработке данных бортовыми средствами (красный цвет) и после наземной коррекции измерений (зелёный цвет).

Как видно по приведённым иллюстрациям, в изменении угла между оптическими осями явно заметна низкочастотная составляющая, период которой совпадает с периодом обращения КА вокруг Земли. Анализ показывает, что данные систематические колебания обусловлены температурными деформациями конструкции, возникающими при орбитальном движении КА. Систематическая составляющая (термоупругая ошибка), нанесённая на график темно-зелёным цветом, была получена путём последовательного усреднения ряда измерений на протяжении 1000 с. Величина амплитуд витковых термоупругих колебаний для различных пар приборов варьируется от 3 до 6 угл. с.

На графиках *рис.* 5 приведена случайная составляющая погрешности измерения параметров ориентации, представляющая собой разницу измеренного взаимного угла между оптическими осями пар приборов и выделенной низкочастотной (систематической) составляющей.





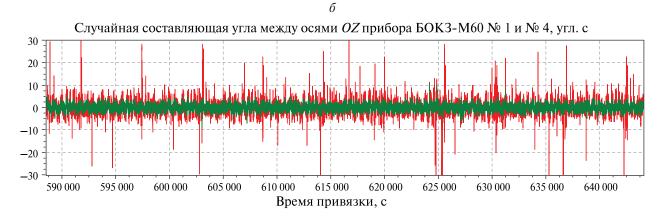


Рис. 5. Случайная составляющая угла между оптическими осями приборов: a — БОК3-М60 № 1–2; δ — БОК3-М60 № 1–3; ϵ — БОК3-М60 № 1–4

Графики характеризуют случайную составляющую ошибки измерения параметров ориентации приборами БОКЗ-М60 при штатной работе на борту КА (красный цвет) и после наземной коррекции измерений (зелёный цвет).

Из графиков *рис*. 5 видно, что в результате наземной обработки удаётся снизить случайную составляющую погрешности измерений приборов в 2-2,3 раза — с 2 угл. с (при штатной работе) до 0,9-0,8 угл. с (после наземной обработки). Это хорошо согласуется с оценкой эффективности полётной калибровки на основе величины остаточных рассогласований.

Характеристики систематической и суммарной составляющих углов между парами приборов приведены в *таблице*.

Статисти	гческие ха	ірактеристи	іки угла
между опті	ическими	осями пар	приборов

№ при- боров	Амплитуда систематической составляющей, угл. с	Наземная обработка		Бортовая обработка	
		СКО суммарной составляющей, угл.с	СКО случайной составляющей, угл.с	СКО суммарной составляющей, угл.с	СКО случайной составляющей, угл.с
1-2	5,58	1,54	0,84	2,28	1,91
1-3	4,81	1,43	0,95	2,20	1,95
1-4	6,41	1,58	0,90	2,50	2,06
2-3	5,11	1,25	0,99	2,14	1,96
2-4	6,57	1,75	0,95	2,57	2,00
3-4	2,94	1,08	0,78	1,94	1,77

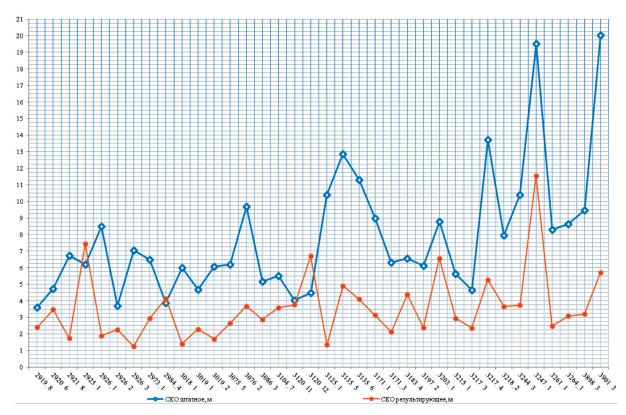
Достигнутые результаты в части уменьшения погрешностей измерений приборов звёздной ориентации привели к аналогичному эффекту в части геопривязки данных ДЗЗ (Ахметов и др., 2017). Для оценки погрешностей геопривязки использовались съёмки городов, координаты объектов на которых известны с высокой точностью. На *рис.* 6 (см. с. 37) приведены СКО геопривязки ориентиров до применения технологии наземной обработки данных о координатах звёзд и после. Как видно на рисунке, среднее значение СКО геопривязки ориентиров на представленном интервале до применения технологии уточнения показаний приборов звёздной ориентации составляет 7,8 м, а после — 3,6 м.

По представленным в статье материалам можно судить о высокой эффективности технологии наземной обработки «сырых» данных о координатах звёзд. Погрешность (СКО) измерений параметров трёхосной ориентации КА снижается с 2-3 до 1-1,5 угл. с. При этом погрешность (СКО) геопривязки снимков ДЗЗ улучшается до уровня 3-4 м, что соответствует мировому уровню требований потребителей к материалам космической съёмки.

Проведённые эксперименты и исследования показали возможности дальнейшего повышения точности угловых измерений как за счёт снижения термоупругой деформации конструкции КА, так и путём устранения других составляющих погрешностей приборов звёздной ориентации: методической ошибки измерения координат звёзд на фоточувствительной матрице, спектральной зависимости калибровочных параметров оптической системы приборов — а также посредством создания уточнённых звёздных каталогов, учитывающих влияние звёздного фона на координаты звёзд.

Описанная в данной статье технология уже начинает внедряться как штатная и, очевидно, имеет перспективы на дальнейшее развитие, а ряд алгоритмов, используемых при наземной обработке «сырых» данных, постепенно будут переноситься на борт.

Авторы статьи пользуются случаем выразить свою признательность сотрудникам РКЦ «Прогресс» Зининой И. И., Мятову Г. Н., Филатову А. В. и Стекловой А. А., а также сотруднику Рязанского государственного радиотехнического университета Кузнецову А. Е. за неоценимую помощь в подтверждении полученных результатов путём измерения фактической точности геопривязки снимков по наземным ориентирам.



Puc. 6. СКО геопривязки координат объектов на снимках городов до применения технологии наземной обработки данных о координатах звёзд и после неё

Литература

- 1. *Ахметов Р. Н.*, *Еремеев В. В.*, *Кузнецов А. Е.*, *Мятов Г. Н.*, *Пошехонов В. И.*, *Стратилатов Н. Р.* Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44—53.
- 2. *Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Стратилатов Н. Р., Бакланов А. И., Федоров В. М., Новиков М. В.* Космический аппарат «Pecypc-П» // Геоматика. 2016. URL: http://geomatica.ru/clauses/50/.
- 3. *Никитин А. В., Дунаев Б. С., Красиков В. А.* Наземный эксперимент по синхронному определению параметров угловой инерциальной ориентации тремя приборами БОКЗ-М // 2-я Всерос. научнотехн. конф. «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. Таруса, 13–16 сент. 2010. М.: ИКИ РАН, 2011. С. 62–69.

Technology for ground processing of data on the stars' coordinates in order to improve the accuracy of georeferencing Earth images from space

G. A. Avanesov, R. V. Bessonov, A. N. Kurkina, P. S. Smetanin

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

The paper presents the results of work to improve the accuracy of measuring orientation by the BOKZ-M60 star trackers, and georeferencing remote sensing data, obtained from the Resurs-P No. 3 spacecraft due to use of the technology for ground stars' coordinates processing. The implemented technology involves the transmission to the ground data receiving points of data about the stars' coordinates

on the CCD-arrays of the BOKZ-M60 star trackers. The use of "raw" BOKZ-M60 data, obtained at long intervals of space flight allows to perform flight calibration and measure the instruments distortion, to ensure the rejection of abnormal measurements and to use a refined instruments mathematical model during ground processing of their readings. The technology has shown its effectiveness and has begun its way to routine application in future spacecrafts.

Keywords: star tracker, Earth remote sensing, geo-referencing, orientation errors, spacecraft, ground data processing

Accepted: 30.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38

References

- 1. Akhmetov R. N., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti ot KA "Resurs-P" (Highprecision geolocation of Earth surface images from the Resurs-P spacecraft), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53.
- 2. Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Stratilatov N. R., Baklanov A. I., Fedorov V. M., Novikov M. V., Kosmicheskii apparat "Resurs-P" (Spacecraft Resurs-P), *Geomatica*, 2016, URL: http://geomatica.ru/clauses/50/.
- 3. Nikitin A. V., Dunaev B. S., Krasikov V. A., Nazemnyi experiment po sinkhronnomu opredeleniyu parametrov uglovoi inertsialnoi orientatsii tremya priborami BOKZ-M (Ground Experiment on the Simultaneous Determination of Parameters of the Inertial Angular Orientation of the Three Devices BOKZ-M), 2-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov" (2nd All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc., Tarusa, 13–16 Sept., 2010, Moscow: IKI RAN, 2011, pp. 62–69.