

Стендовое исследование погрешности определения энергетического центра яркости изображения звёзд в звёздных датчиках

Р. В. Бессонов, Е. В. Белинская, Н. Н. Брысин, С. В. Воронков,
С. А. Прохорова, Н. А. Строилов, А. А. Форш

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: brysin@mail.ru

В статье описан процесс измерения одного из типов методической ошибки звёздных датчиков и приводятся результаты её измерения. Эта разновидность методической ошибки представляет собой несовпадение вычисленного энергетического центра изображения точечного источника с центром его геометрической проекции в масштабах отдельного пикселя на приёмнике изображения. Настоящая работа является экспериментальным исследованием результатов, опубликованных в статьях, где приводится теоретическое описание и численное моделирование методической ошибки звёздных датчиков. Исследование проводилось на разработанном и созданном в ИКИ РАН стенде определения элементов внутреннего ориентирования (СОЭВО). СОЭВО способен обеспечить поворот звёздного датчика с высокими точностями позиционирования и измерения углового положения. В ходе работ на СОЭВО были выявлены систематические погрешности и отработана методика проведения измерительных операций.

Ключевые слова: звёздный датчик, БОКЗ, методическая погрешность, приёмник изображения

Одобрена к печати: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-82-89

В ИКИ РАН разработано и создано в специальном изолированном помещении автоматизированное рабочее место — стенд определения элементов внутреннего ориентирования (СОЭВО) (Бессонов и др., 2017). Работа на СОЭВО проходит в автоматическом режиме из-за высокой чувствительности приборов как к паразитным засветкам, так и присутствию в месте проведения замеров операторов с сервисной аппаратурой. СОЭВО позволяет проводить калибровку и проверку параметров звёздного датчика без присутствия оператора.

Основу СОЭВО составляют прецизионный поворотный стол СПЦ-383 (состоит из СП-382 и БУ-226) с установленным на его платформу вспомогательным поворотным столом PRS-200 фирмы PI miCos и высококачественный коллиматор с галогеновым осветителем. Испытываемый звёздный датчик закрепляется на вспомогательном поворотном столе. Структурная схема СОЭВО приведена на *рис. 1* (см. с. 83).

СП-382 со вспомогательным поворотным столом образуют двухосный поворотный стенд (ПС), обеспечивающий развороты исследуемого звёздного датчика вокруг вертикальной оси с помощью СПЦ-383 на угол α до 28° и вокруг горизонтальной оси на угол γ от -90° до $+90^\circ$ с помощью вспомогательного поворотного стола. В работах (Бессонов и др., 2017; Полушкин и др., 2016) представлена более подробная информация об устройстве СОЭВО.

Возможности СОЭВО позволяют проводить определение одного из видов методической ошибки — несовпадения вычисленного энергетического центра изображения точечного источника с центром его геометрической проекции. В представленной работе для данной ошибки во внутрипиксельном масштабе используется термин «методическая ошибка».

В ИКИ РАН ведутся работы по изучению данного типа методической ошибки звёздного датчика. Анализ её проявления был проведён в статье (Аванесов и др., 2009). Есть непосредственная связь между величиной методической ошибки и отношением размеров пикселя приёмника изображения и изображения звезды. Результаты детального численного моделирования показаны в работе (Беличенко и др., 2017). Для проверки результатов, приведённых в статьях (Аванесов и др., 2009; Беличенко и др., 2017), был проведён ряд экспериментов на СОЭВО с использованием звёздных датчиков семейства БОКЗ. Параллельно ставилась ещё одна задача: исследовать работу СОЭВО при работе с малыми угловыми перемещениями.

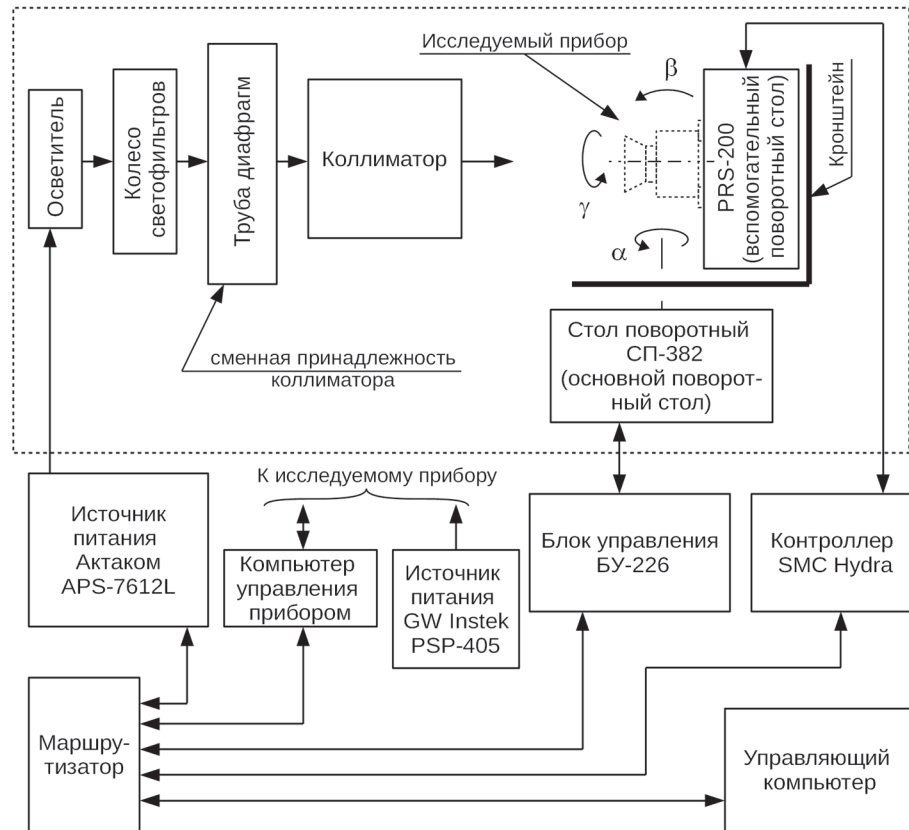


Рис. 1. Структурная схема СОЭВО

При выявлении методической ошибки предъявляется обязательное требование к большой точности измерения величины углового перемещения. Стоит отметить, что звёздные датчики, в частности приборы семейства БОКЗ, являются прецизионными датчиками ориентации в космическом пространстве и на испытательное оборудование накладываются жёсткие требования по заданию разворотов с сохранением стабильности углового положения в направлении, перпендикулярном к плоскости поворота.

Провести исследования непосредственно с поворотом звёздного датчика с малым, субпиксельным, угловым шагом, например $0,5$ угл.с, не удалось по причине невозможности СПЦ-383 стабильно выполнять последовательные перемещения на малый угол с одной попытки. Почти половина заданных положений достигалась со второй попытки, СПЦ-383 «промахивался» и выходил за пределы допустимых отклонений позиционирования. После этого СПЦ-383 начинал вращение в обратную сторону и позиционировался в нужной точке, но уже со второй попытки. Полученные при этом результаты показали нестабильность положения звёздного датчика в направлении, перпендикулярном к плоскости поворота.

Для выяснения причин был проведён эксперимент с поворотом звёздного датчика с номинальным угловым шагом 1° , который также показал наличие поворота между точками измерения величиной до $3,5$ угл.с в направлении, поперечном направлению перемещения. Схема изменения положений звёздного датчика представляла собой циклическую последовательность от 1-й точки до 5-й и в обратном направлении до 1-й точки. Результаты измерений звёздным датчиком положения центра яркости изображения точечного источника при шаге 1° приведены на рис. 2, на котором $\Delta\alpha$ и $\Delta\beta$ — приращения результатов измерения угловой координаты центра яркости относительно 1-й точки. График показывает, что положение по углу β зависит от направления разворота звёздного датчика. Учитывая, что в ходе эксперимента вспомогательный поворотный стол не был задействован, отклонения по углу β могут быть обусловлены нестабильностью элементов конструкции основного и вспомогательного поворотных столов.

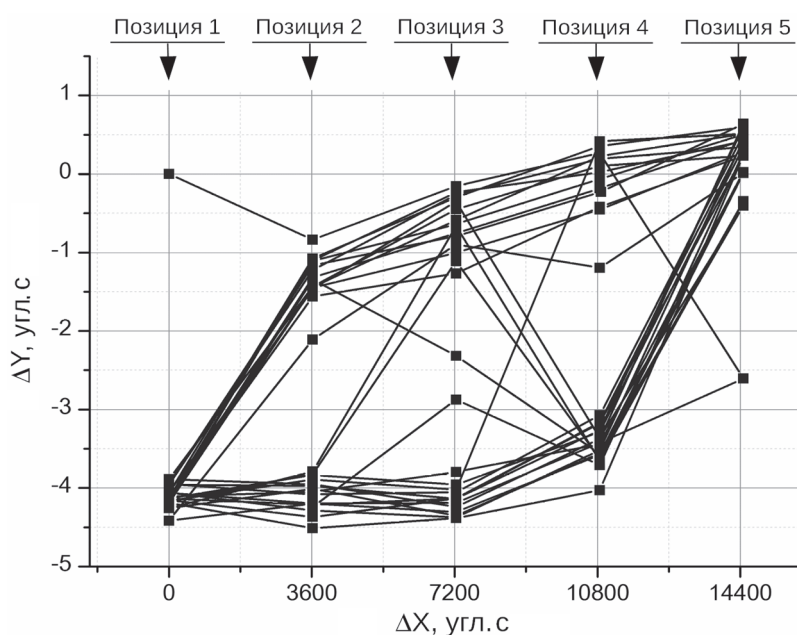


Рис. 2. Приращения координат ΔX и ΔY положения центров изображений бесконечно удалённого точечного источника при повороте звёздного датчика с номинальным угловым шагом 1°

Управление приводом поворотного стола СПЦ-383 при выполнении серии программных разворотов в заданные угловые положения производится автоматически по заранее написанному сценарию. Во время проведения первой серии измерений, показавшей ошибку по углу β , использовался алгоритм, в котором поворот звёздного датчика к следующему положению был последовательным. В СПЦ-383 предусмотрен алгоритм поворота, предусматривающий, что в начале движения разворот идёт в полушаговом режиме работы с плавным увеличением частоты вращения вплоть до максимально допустимой. При приближении к заданному значению угла частота снижается до 50 шагов в секунду; за 10 угл. мин до установки в заданное угловое положение привод переходит в микрошаговый режим; за 10 угл. с до установки в заданное угловое положение плавно включается электромагнитный зажим поворотного стола и привод доводит шпиндель в заданное угловое положение на тормозе. При попадании фактического углового положения в диапазон допустимого отклонения положения от номинального происходит отключение двигателя поворотного стола. В публикации (Полушкин и др., 2016) показано, что погрешность позиционирования цифрового поворотного стола СПЦ-383 в автоматическом режиме не превышает 1 угл. с.

Работы по изучению нестабильности углового положения оси шпинделя СПЦ-383 были выполнены специалистами Производственного объединения «Корпус» (Полушкин и др., 2018). На нескольких образцах поворотного стола были проведены исследования, в которых с помощью автоколлиматора и многогранной призмы проверялись пространственные угловые отклонения шпинделя под воздействием червяка главной червячной передачи в заданных угловых положениях. Одновременно проводилась проверка точности позиционирования СПЦ-383 в автоматическом режиме с различными значениями погрешности позиционирования. Для подтверждения того, что отклонение оси вращения шпинделя поворотного стола СП-382 обусловлено отклонением геометрических размеров шпинделя и втулки подшипника скольжения от номинала, детали поворотных столов были проверены на координатно-измерительной машине. Проведённый анализ конструкции СПЦ-383 показал, что зазор в подшипнике скольжения не превышает допустимого значения 3 мкм, что может привести к угловому отклонению шпинделя $\pm 1,5$ угл. с под воздействием усилий червяка. Учитывая, что максимальные отклонения шпинделя происходят при смене направления вращения, так как поступательная сила давления червяка на червячное колесо меняет направление, максимальное приращение $\Delta\beta$ появится при смене направления вращения.

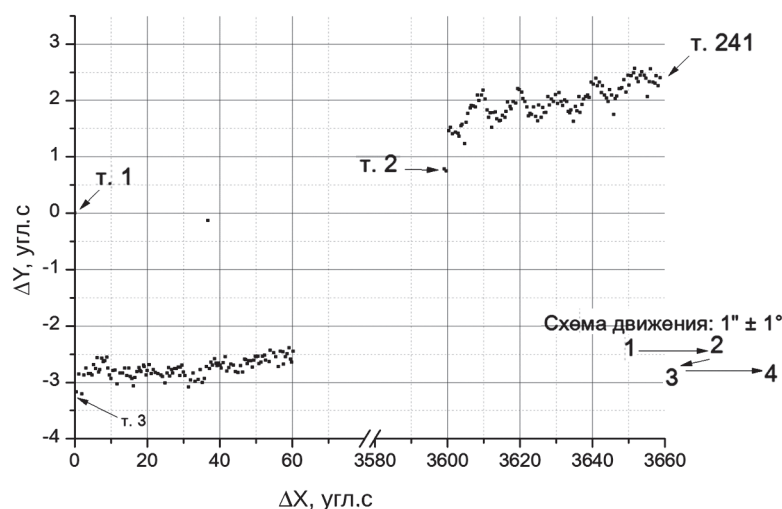


Рис. 3. Результаты измерений положения центра яркости изображения точечного источника в звёздном датчике по новой методике. Приращения координат ΔX и ΔY — положение центров изображений бесконечно удалённого точечного источника

В результате проведённого исследования конструкции СПЦ-383 были найдены причины появления ошибок и даны рекомендации по внесению изменений в методику проведения исследования звёздных датчиков с малыми угловыми перемещениями. В итоге было принято решение об изменении схемы поворотов СПЦ-383. Вместо последовательного перемещения с малым угловым шагом звёздный датчик должен повернуться из исходного положения в заданное, находящееся на угловом расстоянии 1° , и затем — в обратном направлении на угол $1^\circ - 1$ угл.с. После чего снова изменить направление движения и повернуться на угол 1° и т.д. Таким образом, будут проведены измерения методической ошибки с малым угловым шагом одновременно в двух областях приёмника изображения. На рис. 3 показано распределение угловых положений, в которых производились замеры. Данное распределение подтверждает, что новая схема движения позволяет проводить измерения с малым горизонтальным угловым перемещением, в которых вертикальная составляющая перемещений минимизирована.

С использованием новой схемы движения были проведены измерения методической ошибки двух различных звёздных датчиков, в которых используются приёмники изображения с активным пикселем (англ. — active pixel sensor). Параметры этих звёздных датчиков приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры звёздных датчиков, использованных при измерении методической ошибки

Параметр	ОГ-32	ОГ-ВТ
Фокусное расстояние объектива, мм	32	125
Относительное отверстие объектива	1:1,7	1:4
Размер пикселя, мкм	5,5×5,5	6,4×6,4
Угловой размер пикселя, угл. с	35,45	10,56
Размер поля изображения, мкм	2048×2048	5120×3840
Угловое поле зрения, град	28,2×28,2	18,7×18,7

Результаты измерений продемонстрированы на рис. 4–6 (см. с. 86). График на рис. 4 показывает, что новая схема движения звёздных датчиков на СПЦ-383 позволила минимизировать их нежелательное угловое перемещение в направлении, ортогональном направлению поворота СПЦ-383. Разброс положения центра изображений имеет преимущественно случайный характер, а присутствующим трендом можно пренебречь из-за его незначительной величины.

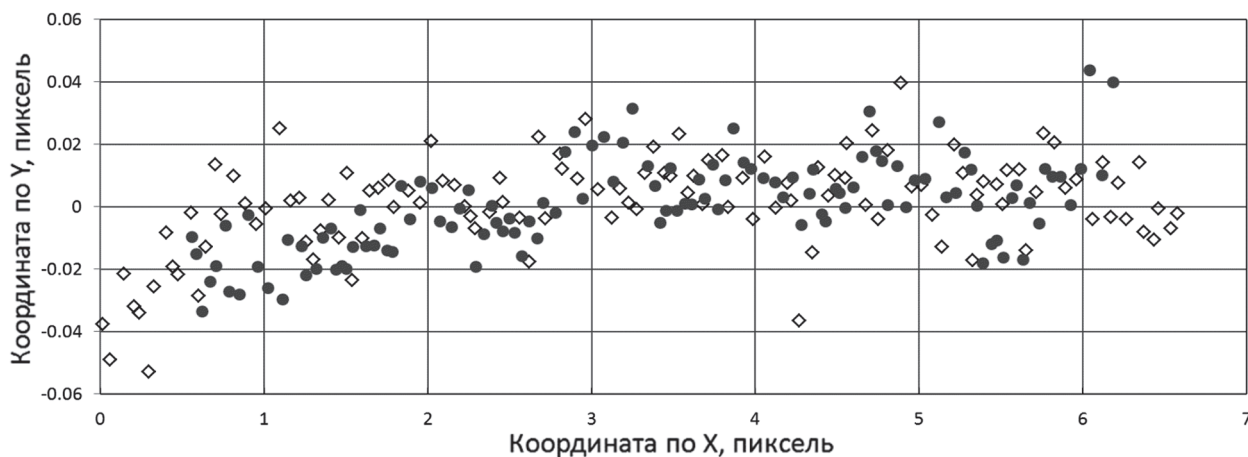


Рис. 4. Результаты измерений относительного изменения положения центра яркости изображения точечного источника на ОГ-32 (ромбы) и ОГ-ВТ (круги) в направлении, ортогональном повороту звёздных датчиков

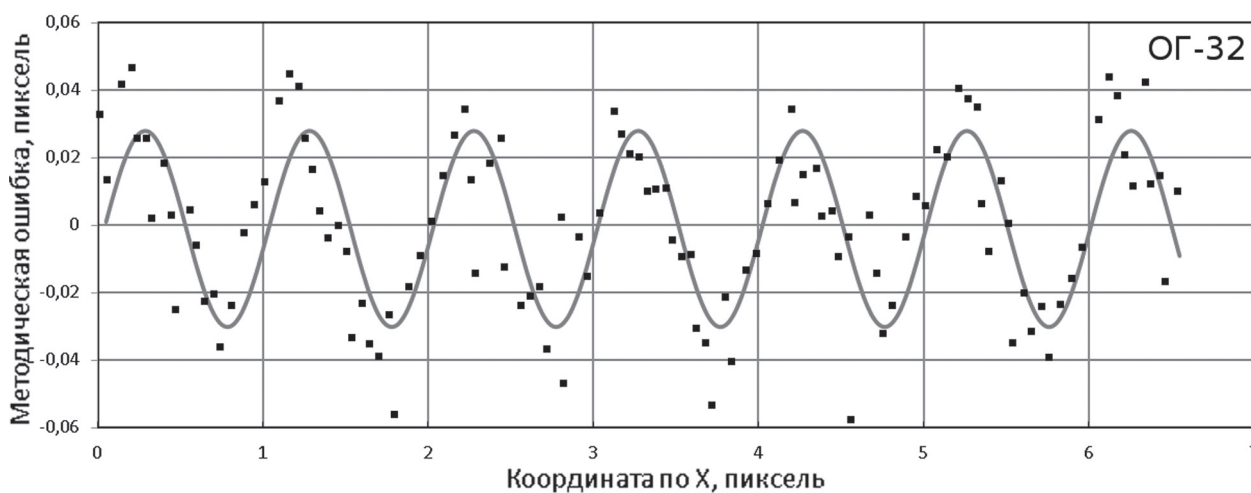


Рис. 5. Результаты измерений методической ошибки на ОГ-32. Квадратами показаны результаты замеров, линией — аппроксимация синусоидой

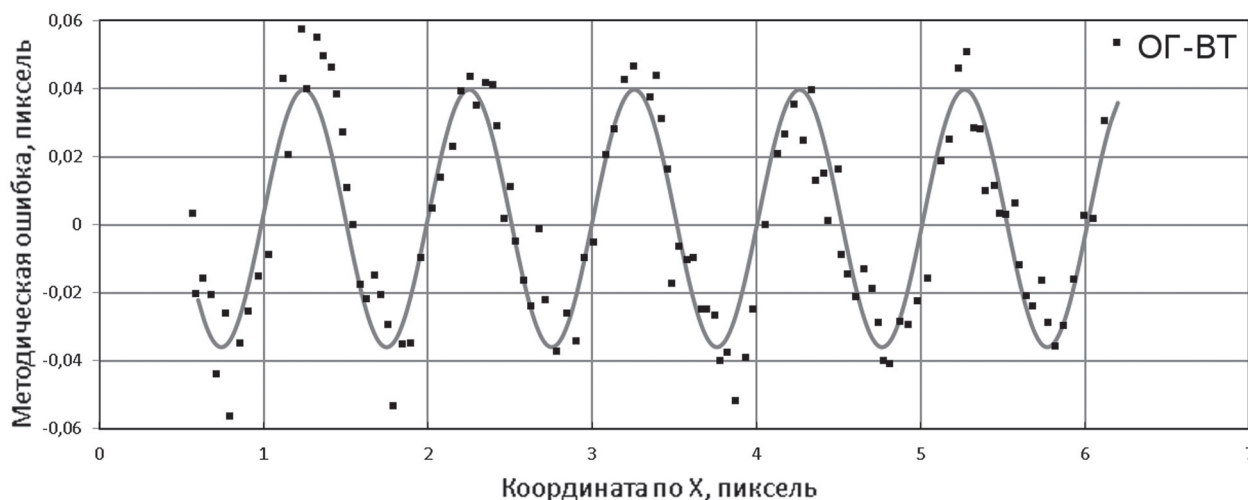


Рис. 6. Результаты измерений методической ошибки на ОГ-ВТ. Квадратами показаны результаты замеров, линией — аппроксимация синусоидой

Методическая ошибка является разницей между измеренным на СОЭВО углом поворота звёздных датчиков и угловым перемещением центра изображения бесконечно удалённого источника. Для пересчёта линейного перемещения на приёмнике изображения в соответствующее угловое используется известное соотношение:

$$\alpha = \operatorname{arctg} \left[\frac{xd_{\text{НОМ}}}{f} \right], \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние объектива звёздного датчика; x — координата на приёмнике изображения; $d_{\text{НОМ}}$ — линейный размер пикселя.

Полученные данные показали наличие искомой методической ошибки — при рассмотрении графиков на *рис. 5* и *б* можно увидеть периодические составляющие. Согласно исследованию (Аванесов и др., 2009), методическая ошибка является синусоидальной функцией с периодом, равным размеру пикселя, и имеет математическое ожидание, равное 0. По этой причине сглаживание и аппроксимация полученных данных производилась посредством синусоиды. Аппроксимирующая функция имеет вид:

$$f(x) = A \cdot \sin \left[2\pi \frac{x}{p} \right], \quad (2)$$

где A — амплитуда, т.е. максимальная величина ошибки; p — период аппроксимирующей синусоидальной функции.

Нахождение параметров A и p , входящих в уравнение (2), производилось с помощью метода наименьших квадратов. Результаты расчётов этих параметров приведены в *табл. 2*. Полученные аппроксимирующие синусоидальные функции также показаны на *рис. 5* и *б*.

Таблица 2. Параметры аппроксимирующей функции

Параметр	ОГ-32	ОГ-ВТ
Амплитуда A , мкм	0,16	0,24
Период p , мкм	5,533	6,363
Отношение периода p к размеру пикселя, отн. ед.	1,0051	1,0058
Отношение амплитуды A методической ошибки к размеру пикселя, %	2,9	3,8

В результате проведённых исследований было показано, что СОЭВО, созданный на базе поворотного стола СПЦ-383, позволяет производить контроль звёздных датчиков. Причём СОЭВО предоставляет возможность проводить испытания в автоматическом режиме без присутствия оператора в помещении, что особенно важно для высокоточных образцов звёздных датчиков. В ходе отладки СОЭВО были выявлены систематические погрешности и отработана методика проведения измерительных операций.

Проведённый эксперимент подтвердил наличие зависимости погрешности определения энергетического центра изображения звезды от положения относительно пикселей приёмника изображения и возможность её измерения на СОЭВО. Параметры аппроксимации полученных точек соответствуют теоретическим расчётам (Аванесов и др., 2009) и реальным характеристикам прибора.

Литература

1. Аванесов Г.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В. Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС матрице и коррекция методической ошибки // Всерос. научно-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 421–446.

2. Беличенко М. Л., Бессонов Р. В., Завгородний Д. С., Эльяшев Я. Д., Прохорова С. А. Исследование ошибок определения координат энергетических центров изображений звезд на фотоприемной матрице прибора звездной ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 67–77.
3. Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Полянский И. В., Воронков С. В., Белинская Е. В., Строилов Н. А., Полушук Г. С., Трегуб В. П., Завгородний Д. С. Стенды для определения фотограмметрических параметров высокоточных звездных датчиков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 107–117.
4. Полушкин А. В., Калдымов Н. А., Дмитриев Н. В., Нахов С. Ф., Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Полянский И. В. Методы и средства для оценки технических характеристик звездных датчиков при наземных испытаниях // Сборник материалов 23-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (МКИНС). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 401–406.
5. Полушкин А. В., Борчанинов Д. Г., Слестин И. В., Калдымов Н. А., Нахов С. Ф., Брысин Н. Н., Строилов Н. А., Базина Е. А., Сливко Н. А., Будков В. А. Результаты применения аппаратно-программного комплекса для определения методической ошибки звездных датчиков // Сборник материалов 25-й Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (МКИНС). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 168–173.

The test bench study of star image energy center determination error in star trackers

R. V. Bessonov, E. V. Belinskaya, N. N. Brysin, S. V. Voronkov,
S. A. Prokhorova, N. A. Stroilov, A. A. Forsh

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: brysin@mail.ru

The article describes the process of measuring one of a methodical error type and the results of its measurement. This kind of a methodical error is a discrepancy between the calculated energy center of a pinhole source image and its geometrical projection center at the scale of a single image sensor pixel. This work is an experimental study of the results published in works where a theoretical description and the methodical error numerical modeling of star sensors are provided. The study was carried out at the test bench developed and created in IKI RAS for the determination of interior orientation elements (SOEVO). SOEVO is capable to provide turn of the star tracker with both a high positioning accuracy and a high angular position measurement. In work flow on SOEVO systematic errors were revealed and the measuring technique was improved.

Keywords: star tracker, BOKZ, methodical error, image sensor

Accepted: 19.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-82-89

References

1. Avanesov G. A., Kondratieva T. V., Nikitin A. V., Issledovanie smeshcheniya energeticheskogo tsentra izobrazhenii zvezd otnositel'no geometricheskogo tsentra na PZS matritse i korrektsiya metodicheskoi oshibki (Study of the displacement of the energy center of the stars images relative to the geometric center of the CCD and the correction of methodological errors), *Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary Problems of Spacecraft Attitude Determination and Control"), Proc., Moscow: IKI RAN, 2009, pp. 421–446.

2. Belichenko M. L., Bessonov R. V., Zavgorodnij D. S., Elyashev Ya. D., Prokhorova S. A., Issledovanie oshibok opredeleniya koordinat energeticheskikh tse ntrov izobrazhenii zvezd na fotopriemnoi matritse pribora zvezdnoi orientatsii (The study of errors in determining the coordinates of the energy centers of the star images on the star tracker's photodetector), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 67–77.
3. Bessonov R. V., Brysin N. N., Polyanskiy I. V., Voronkov S. V., Belinskaya E. V., Stroilov N. A., Polishchuk G. S., Tregub V. P., Zavgorodnij D. S., Stendy dlya opredeleniya fotogrammetricheskikh parametrov vysokotochnykh zvezdnykh datchikov (Test benches for determining the photogrammetric parameters of high-precision star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 107–117.
4. Polushkin A. V., Kaldymov N. A., Dmitriev N. V., Naxov S. F., Bessonov R. V., Brysin N. N., Polyanskiy I. V., Metody i sredstva dlya otsenki tekhnicheskikh kharakteristik zvezdnykh datchikov pri nazemnykh ispytaniyakh (Methods and tools for assessing the technical characteristics of stellar sensors during ground tests), *Sbornik materialov XXIII MKINS* (Proc. XXIII MKINS), St. Petersburg: AO "Kontsern CNII Elektropribor", 2016, pp. 401–406.
5. Polushkin A. V., Borchaninov D. G., Slistin I. V., Kaldymov N. A., Nakhov S. F., Brysin N. N., Stroilov N. A., Bazina E. A., Slivko N. A., Budkov V. A., Rezul'taty primeneniya apparatno-programmno-go kompleksa dlya opredeleniya metodicheskoi oshibki zvezdnykh datchikov (Results of applying the hardware-software complex for definition of methodical errors of the star trackers), *Sbornik materialov XXV MKINS* (Proc. XXV MKINS), St. Petersburg: AO "Kontsern CNII Elektropribor", 2018, pp. 168–173.