Стенды для определения фотограмметрических параметров высокоточных звездных датчиков

Р.В. Бессонов¹, Н.Н. Брысин¹, И.В. Полянский¹, С.В. Воронков¹, Е.В. Белинская¹, Н.А. Строилов¹, Г.С. Полищук², В.П. Трегуб², Д.С. Завгородний²

¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия E-mail: brysin@mail.ru ²AO «ЛОМО», Санкт-Петербург, 194044, Россия E-mail: vptreg@rambler.ru

Актуальным вопросом для современных астрометрических задач является повышение точности определения координат звезд. Среди факторов, которые накладывают определенные ограничения на точность звездного датчика, можно выделить аберрации объектива, кривизну поверхности фотоприёмника и неточности сборки звездного датчика. Для снижения влияния этих факторов необходима разработка стендового оборудования, предназначенного для высокоточного определения оптических характеристик звёздных датчиков как фотограмметрических приборов. При определении оптических характеристик требуется учесть условия, в которых будет эксплуатироваться звездный датчик. Существенное влияние оказывает давление среды, в которых будет эксплуатироваться звездный датчик. Существенное влияние оказывает давление среды, в которой находится звездный датчик. Из-за того, что эксплуатация звёздных датчиков происходит в условиях вакуума, определение фотограмметрических параметров необходимо проводить также в условиях вакуума. Авторами разработана методика определения фотограмметрических параметров звездных датчиков, предусматривающая определение фокусного расстояния и параметров дисторсии в условиях нормального давления, проведение контроля качества фокусировки оптической системы и определение величины изменения фотограмметрической системы и определение величины в вакуум. Для проведения работ по данной методике были разработаны стенды. В статье также приводится описание стендов.

Ключевые слова: стендовое оборудование, фокусное расстояние, фотограмметрия, звездный датчик

Одобрена к печати: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-107-117

Для решения некоторых астрометрических задач, например, координатной привязки изображений земной поверхности субметрового разрешения, требуется с высокой точностью определять собственную ориентацию аппаратуры в космическом пространстве. Анализ современных подходов при построении звездных датчиков (ЗД) такими производителями, как Sodern, Jena-Optronic, ИКИ РАН и др. (Аванесов и др., 2015), показывает, что появление новой элементной базы позволяет реализовать в ЗД алгоритмы, компенсирующие расчетным путем влияние конструктивных погрешностей, что приводит к увеличению точности звездного датчика.

Для определения углового расстояния между наблюдаемыми звездами ЗД использует разность между координатами изображения этих звезд и значение фокусного расстояния. Таким образом, для перевода из линейных координат в угловые используется значение фокусного расстояния, которое, как правило, полагается постоянной величиной по всему полю зрения и для всех спектральных классов звезд. Однако такое упрощение допустимо лишь при невысоких требованиях к точности прибора. Существенную погрешность, зависящую от угла падения, также вносят неточности сборки прибора, например, неперпендикулярность оптической оси объектива к фоточувствительному полю приемника изображения. К тому же для линзовых объективов необходимо учесть хроматические аберрации, поэтому процесс определения элементов внутренней ориентации ЗД с линзовыми объективами должен учитывать хроматизм оптической системы.

Описанные выше причины возникновения погрешностей определения ориентации имеют постоянный характер. Следовательно, их влияние может быть компенсировано расчётным путем. Для этого требуется провести комплекс мероприятий по анализу характера этих искажений и условий, им соответствующих.

Для программной компенсации погрешностей высокоточных приборов звездной ориентации следует учитывать следующие параметры:

1) фокусное расстояние ЗД в вакууме;

2) параметры дисторсии;

3) хроматические аберрации;

4) положение главной точки;

5) качество фокусировки прибора.

В ходе фотограмметрической калибровки (далее по тексту – калибровка) происходит определение вышеуказанных параметров.

Повышение требований к точностным характеристикам приборов астроориентации делает актуальной задачу повышения точности стендового оборудования. Создание стендовой базы для работы с высокоточными ЗД, имеющими погрешность порядка нескольких десятых угловой секунды, представляет существенную сложность. Актуальными являются и задачи по отработке и исследованию высокоточных приборов звездной ориентации, например, исследование влияния термоупругости на оптические характеристики прибора.

При прямолинейном подходе в разработке стендового оборудования потребуется разместить все измерительное оборудование вместе с прибором звездной ориентации внутри вакуумной камеры. Причем и оборудование, и прибор внутри вакуумной камеры должны быть размещены на жестком основании во избежание взаимного смещения в процессе калибровки. Это приводит к необходимости увеличить массу и габариты вакуумной камеры, и, поскольку выбор высокоточных средств измерения, способных работать в вакууме, крайне ограничен, реализация этого подхода влечет большие временные и финансовые затраты. По этой причине целесообразной оказывается разработка стендового оборудования, позволяющего проводить как исследования оптических характеристик, так и предварительную высокоточную калибровку звездного датчика при атмосферном давлении, а также позволяющего учитывать изменение оптических характеристик при переходе в вакуум.

В ходе разработки стендового оборудования авторами была выработана методика калибровки на двух стендах, состоящая из трех последовательных этапов, приведенных в *табл.* 1. На этапе \mathbb{N} 1 в вакууме контролируется качество юстировки прибора – подтверждается, что в условиях вакуума объектив прибора создает резкое изображение бесконечно удаленных источников света на приемнике изображения. На этапе \mathbb{N} 2 производится высокоточная калибровка при нормальном давлении, в результате которой определяются коэффициенты полиномов, описывающих дисторсию, положение главной точки и фокусное расстояние прибора. Данные параметры определяются независимо для нескольких спектральных диапазонов, чтобы проконтролировать влияние хроматических аберраций объектива на точность работы прибора. На этапе № 3 проводится определение барической поправки – разницы между фокусным расстоянием прибора в условиях нормального давления и вакуума. Этапы № 1 и № 3 проводятся на стенде контроля фокусировки (СКФ), имеющем в своем составе вакуумную камеру. Этап № 2 проводится на стенде определения элементов внутреннего ориентирования (СОЭВО).

№ эmana	Давление среды вокруг прибора	Калибруемый параметр	Название стенда
1	Вакуум	Контроль качества фокусировки	Стенд контроля фокусировки
2	Нормальное	Высокоточная калибровка дисторсии, положения главной точки и фокусного расстояния для разных длин волн	Стенд определения элементов внутреннего ориентирования
3	Вакуум	Определение барической поправки	Стенд контроля фокусировки

Таблица 1. Содержание этапов калибровки приборов звездной ориентации

Согласно терминологии фотограмметрии, фокусное расстояние прибора, положение главной точки и коэффициенты полинома, описывающие дисторсию, называются элементами внутреннего ориентирования. Для определения элементов внутреннего ориентирования звездного датчика с учетом аберрационных искажений объектива (этап \mathbb{N} 2) проводятся измерения по множеству координат на приемнике изображения. Для этого необходимо использовать двухосный стенд, который позволяет определить элементы внутреннего ориентирования звездных датчиков с линзовыми объективами. Функциональная схема такого стенда, поясняющая принципы его работы, приведена на *рис 1*. На *рис. 2* показано распределение точек – изображений точечной диафрагмы, в которых происходит измерение, – по полю зрения звездного датчика.



Рис. 1. Функциональная схема стенда для определения элементов внутреннего ориентирования звездных датчиков



Рис. 2. Распределение точек, в которых происходит измерение, по полю зрения звездного датчика

На углозадающем поворотном столе, обеспечивающем разворот по углу α_{rot} (см. *рис. 1*), закреплен вспомогательный поворотный стол, на котором установлен кронштейн со звёздным датчиком. С помощью вспомогательного поворотного стола можно осуществлять развороты приемника изображения по углу γ . На оптическом столе располагается коллиматор с точечной диафрагмой, который освещает входной зрачок объектива звездного датчика. Причем входной зрачок объектива располагается на оси вращения углозадающего поворотного стола, на котором установлен кронштейн со звёздным датчиком. Ось вращения вспомогательного поворотного стола совпадает с оптической осью звездного датчика. Осветитель коллиматора имеет возможность использовать сменные оптические фильтры для осуществления измерений в нужном спектральном диапазоне длин волн. Конструкция СОЭВО показана на *рис. 3*.



Рис. 3. Стенд определения элементов внутреннего ориентирования. Светозащитная конструкция не показана

Кратко, процесс получения данных об элементах внутреннего ориентирования осуществляется следующим образом. На каждом отдельном кадре звездного датчика присутствует только одно изображение бесконечно удаленного источника. Для измерений в пределах всего поля зрения углозадающий поворотный стол пошагово по углу α_{rot} поворачивает кронштейн с прибором в пределах поля зрения прибора, устанавливая его в заданные угловые положения. После каждого прохода звездный датчик поворачивается вокруг собственной оптической оси с шагом по углу γ. Затем полосовой оптический фильтр осветителя коллиматора меняется на следующий и весь процесс повторяется для другого спектрального диапазона.

Для экранирования прибора от световых помех в ходе процесса измерений на СОЭВО предусмотрена светозащитная конструкция. С целью уменьшения механических нагрузок на стол поворотный цифровой СПЦ-383 (производства ПО «Корпус», г. Саратов) кронштейн снимается с поворотного стола во время монтажа и демонтажа прибора. Перед установкой кронштейна с прибором производится балансировка с помощью подвижки противовесов, входящих в конструкцию кронштейна. Установка кронштейна с прибором на СПЦ-383 и его снятие происходит с помощью подъемного механизма.

Основные характеристики СОЭВО приведены в табл. 2.

N₫	Параметр	Ед. изм.	Значение					
1	Диапазон выходных напряжений источника питания для прибора	В	от 5 до 30					
2	Световой диаметр коллиматора	ММ	150					
3	Фокусное расстояние коллиматора	ММ	1600					
4	Погрешность измерения углового положения СПЦ-383	угл. секунда	0,3					
5	Диапазон углов поворота прибора в горизонтальной пло- скости (в пределах проекции поля зрения ЗД на горизон- тальную плоскость)	градус	± 20					
6	Диапазон углов поворота прибора в вокруг его оптиче- ской оси	градус	± 90					
7	Основные параметры светофильтров: Диапазон «1» Диапазон «2» Диапазон «3» Диапазон «4» Диапазон «5» Диапазон «6»	λ/Δλ	400/10 480/10 550/10 650/10 800/10 950/10					

Таблица 2. Основные характеристики СОЭВО

Примечание: λ/Δλ – центральная длина волны / ширина полосы пропускания спектральной характеристики светофильтра.

Для проведения калибровки приборов звездной ориентации в условиях вакуума разработан второй стенд – стенд контроля фокусировки (СКФ). Как видно из *табл.* 1, СКФ используется для проведения двух операций – контроля качества фокусировки и определения барической поправки. Методика контроля фокусировки (этап \mathbb{N} 1) заключается в последовательном перемещении точечной диафрагмы вдоль оптической оси коллиматора и регистрации прибором изображения точечной диафрагмы. При расположении приемника изображения в фокальной плоскости объектива прибора на матрице получается четкое (сфокусированное) изображение бесконечно удаленных объектов, в данном случае – апертуры точечной диафрагмы. Если приемник изображения смещен и не совпадает с фокальной плоскостью объектива, то прибор зарегистрирует нечеткое, расфокусированное изображение точечной диафрагмы. Перемещая точечную диафрагму вдоль оптической оси коллиматора, можно добиться четкого изображения точечной диафрагмы на приёмнике изображения. Схема контроля фокусировки прибора приведена на *рис. 4*.

При обработке данных рассчитывается распределение отношения I_m суммы уровней сигнала *m* наиболее ярких пикселей к суммарному уровню сигнала всех пикселей изображения точечной диафрагмы в зависимости от величины смещения точечной диафрагмы в коллиматоре. Соотношение описывается следующим выражением (яркость пикселей упорядочена по убыванию, $B_1 > B_2 > ... > B_N$):

$$I_{m} = \frac{\sum_{i=1}^{m} B_{i}}{\sum_{i=1}^{N} B_{i}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где *N* – число пикселей в изображении точечной диафрагмы; *B_i* – уровень сигнала отдельного пикселя локализованного объекта.

Фокусировка прибора считается допустимой, если вертикальная ось, обозначающая положение изображения бесконечно удаленного объекта (прямая $x_{\kappa} = 0$ на *puc. 5*), пересекает зону допустимой расфокусировки прибора, принятой равной 85% от максимального значения I_m (см. *puc. 5*).



Рис. 4. Схема контроля взаимного положения фокальной плоскости объектива и приемника изображения



Рис. 5. Пример допустимой фокусировки прибора (линия хк = 0 пересекает зону допустимой фокусировки); хк – смещение точечной диафрагмы в коллиматоре, хк = 0 – положение точечной диафрагмы, соответствующее положению ее изображения в бесконечности

Методика определения величины барической (этап № 3) поправки основана на применении оптического элемента – расщепителя, который представляет собой две плоскопараллельные стеклянные пластины, образующие между собой небольшой угол. На сторонах пластин, обращенных друг к другу, нанесено диэлектрическое зеркальное покрытие. В результате проходящий через расщепитель параллельный пучок света испытывает множественное переотражение, что приводит к образованию веерообразного распределения параллельных световых пучков, лежащих в одной плоскости с определённым угловым периодом. Угловой период между выходящими пучками не зависит от давления среды, в которую помещен расщепитель, т. к. угол отражения лучей всегда равен углу падения.

В оптико-физическом отделе ИКИ РАН была проведена работа по исследованию изменения элементов внутреннего ориентирования модели звездного датчика при переходе из стандартного давления в вакуум. Результаты этой работы показывают, что для того, чтобы алгоритмически учесть изменение значений элементов внутреннего ориентирования, достаточно пересчитать только значение фокусного расстояния для условий вакуума при неизменных параметрах дисторсии. При этом различием в значениях параметров дисторсии можно пренебречь.

Барическая поправка – разница между полученным значением фокусного расстояния и значением, полученным на этапе определения элементов внутреннего ориентирования. Принцип определения барической поправки состоит в определении углового периода веерообразного распределения пучков света на выходе специального оптического элемента – расщепителя при нормальном давлении посредством прибора с использованием уже известных для этого прибора значений элементов внутреннего ориентирования. После создания в вакуумной камере давления от 0,1 до 10 мм рт. ст. посредством прибора снова определяется угловой период веерообразного распределения световых пучков. Подбором величины фокусного расстояния по методу наименьших квадратов, при остальных неизменных значениях элементов внутреннего ориентирования, добиваются наибольшего совпадения значений углового периода, зарегистрированного прибором при нормальном давлении и в вакууме. Схема определения барической поправки приведена на *рис. 6*.



Рис. 6. Схема стенда при определении барической поправки для фокусного расстояния

Конструкция СКФ показана на *рис.* 7. На оптическом столе установлены длиннофокусный и короткофокусный коллиматоры с точечными диафрагмами. Для проведения операций с прибором в условиях вакуума СКФ имеет в своем составе вакуумную камеру, внутри которой имеется расщепитель, поворотный стол, поворачивающий расщепитель, и термостол – теплообменник с протекающим внутри него жидким теплоносителем. Температуру термостола регулирует термостат, находящийся в соседнем помещении и соединенный шлангами и кабелем с вакуумной камерой. Пониженное давление (вакуум) внутри вакуумной камеры создает форвакуумный насос АСР40. Помимо этого, конструкция вакуумной камеры имеет электрические герморазъемы типа Dsub50 для подключения прибора и оборудования внутри камеры, оптическое окно для ввода излучения коллиматоров в вакуумную камеру и два оптических окна для обеспечения визирования зеркального куба автоколлиматорами.

Основные характеристики СКФ приведены в табл. 3.

Стенд контроля фокусировки позволяет регулировать температуру посадочного места прибора в диапазоне от -20°C до +40°C, а также имеет в своем составе 8-канальный измеритель температуры с миниатюрными термодатчиками, которые можно точечно разместить на приборе. Для контроля углового положения посадочной плоскости прибора кронштейн, на котором расположена посадочная плоскость, оснащен зеркальным кубом, напротив двух граней которого в стенках вакуумной камеры имеются отдельные оптические окна. Через данные окна осуществляется контроль углового положения граней зеркального куба, соответственно, и всего кронштейна с посадочной плоскостью с помощью двух автоколлиматоров, расположенных перпендикулярно друг к другу (*рис. 8*).



Рис. 7. Стенд контроля фокусировки

N₂	Параметр	Ед. изм.	Значение
1	Световой диаметр длиннофокусного коллиматора	ММ	150
2	Номинальное фокусное расстояние длиннофо- кусного коллиматора	ММ	1600
3	Номинальное фокусное расстояние короткофо- кусного коллиматора	ММ	445
4	Световой диаметр короткофокусного коллиматора	ММ	50
5	Диапазон перефокусировки короткофокусного коллиматора	ММ	50
6	Диапазон углов поворота расщепителя	градус	0÷360
7	Диапазон температуры посадочного места ЗД	°C	$-20 \div +40$
8	Рабочий диапазон давления внутри вакуумной камеры	мм. рт. ст	0,1 ÷ 10
9	Длина волны излучения лазерного осветителя	НМ	632,8

Таблица 3.	Основные	характеристики	СКФ
------------	----------	----------------	-----

Результаты отработки высокоточных ЗД на СОЭВО и СКФ стендах будут опубликованы в дальнейших работах.



Рис. 8. Контроль углового положения посадочной плоскости прибора в вакуумной камере

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Форш А.А., Куделин М.И. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звездной ориентации семейства БОКЗ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. № 1 (58). С. 3–12.

Test benches for the determination of star tracker photogrammetric parameters

R.V. Bessonov¹, N.N. Brysin¹, I.V. Polyanskiy¹, S.V. Voronkov¹, E.V. Belinskaya¹, N.A. Stroilov¹, G.S. Polischuk², V.P. Tregub², D.S. Zavgorodniy²

> ¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: brysin@mail.ru ²Joint Stock Company LOMO, Saint Petersburg 194044, Russia E-mail: vptreg@rambler.ru

Improving the accuracy of the stars' coordinates determination is the actual issue for solving modern astrometric tasks. Among the factors imposing certain limitations on the star sensor accuracy there are the lens aberration, the curvature of the photo sensor surface and insufficiently precise star sensor assembly. To reduce the influence of these factors it is necessary to develop test bench equipment for high-precision determination of the star sensor as photogrammetric instrument. For the determination of optical characteristics operation conditions of the star sensor are to be taken into account. In particular, the pressure of star sensor environment has a significant effect. Due to the fact that the star sensor operates in vacuum, the determination of photogrammetric parameters also needs to be carried out in vacuum.

The authors have developed a special technique to determine photogrammetric parameters of the star trackers, such as focal length and distortion parameters under normal pressure conditions. The technique also provides for control of the focusing quality of optical system and the determination of the change in the photogrammetric focal length of the star sensor during the transition from the normal pressure to vacuum. The test benches that have been developed for providing these works are also described in the article.

Keywords: test bench equipment, focal length, photogrammetry, star tracker

Accepted: 14.02.2017 DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-107-117

References

1. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Forsh A.A., Kudelin M.I., Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya priborov zvezdnoy orientatsii semeystva BOKZ (The analysis of current state as well as development prospects of BOKZ family star orientation devices), *Izvestiya vyisshih uchebnyih zavedeniy. Priborostroenie*, 2015, Vol. 1 (58), pp. 3–12.