

Прибор звёздной ориентации высокой точности для КА ДЗЗ нового поколения

Р. В. Бессонов, Н. Н. Брысин, А. Н. Василейская,
С. В. Воронков, А. А. Кобелева, Н. А. Строилов

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

Настоящая обзорная статья посвящена техническим деталям создания прибора звёздной ориентации высокой точности нового поколения. Прибор предназначен для использования на космических аппаратах ДЗЗ высокого и сверхвысокого разрешения и применяется как в системе управления угловым движением, так и для обеспечения высокоточной геопривязки снимков ДЗЗ за счёт измерения параметров ориентации с погрешностями в доли угловой секунды. Созданный в ИКИ РАН прибор стал наиболее высокоточным прибором звёздной ориентации в мире, не считая американского аналога массой 25 кг. В статье описываются трудности, с которыми пришлось столкнуться разработчикам для обеспечения точности измерения параметров ориентации прибором в доли угловой секунды. Среди них проблемы оптимальной фокусировки оптической системы с узким диапазоном резкости, создание термостабильной конструкции, обеспечение радиационной стойкости КМОП-матрицы путём построения холодильника на основе элемента Пельтье. Использование светосильной широкопольной оптики с маленьким пикселем привело к тому, что диапазон фокусировки прибора составил величину около 10 мкм, тогда как фокальная плоскость объектива смещается на 40 мкм при переходе из воздуха в вакуум. Таким образом, для обеспечения работоспособности прибора и его характеристик в условиях реального полёта потребовалось создание высокоточных вакуумных и оптических стэндов и большой объём обработки.

Ключевые слова: прибор звёздной ориентации, высокоточная ориентация космических аппаратов, геопривязка снимков ДЗЗ, радиационная стойкость КМОП-матриц, построение термостабильных конструкций, стэнды для оптических измерений

Одобрена к печати: 15.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-114-118

В 2021 г. была закончена разработка прибора звёздной ориентации высокой точности, которая длилась 7 лет. Первые лётные образцы приборов поставлены для комплектования космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) нового поколения. По отношению к приборам предыдущего поколения (*рис. 1*, см. с. 115) в новой разработке улучшены технические характеристики в 5–10 раз практически по всем показателям: по частоте обновления информации, диапазону рабочих угловых скоростей и помехозащищённости. Но главная цель, которая преследовалась при разработке прибора, — это повышение точности его угловых измерений на порядок. В результате достигнутые характеристики по точности измерения ориентации составляют 0,4 доли угловой секунды (1 СКО (среднее квадратическое отклонение)). Разработанный прибор звёздной ориентации на текущий момент — наиболее высокоточный среди европейских фирм-производителей и уступает по точности только американскому прибору-аналогу HAST (*англ.* High Accuracy Star Tracker) производства компании Ball Aerospace, который при этом в 6 раз тяжелее прибора ИКИ РАН: 25 кг против 4 кг.

Звёздные приборы используются на КА ДЗЗ в системе управления угловым движением, работают в непрерывном режиме и измеряют параметры ориентации с частотой до 10 Гц в течение всего срока службы КА. Столь высокие точности измерений ориентации требуются для решения задачи геопривязки снимков ДЗЗ высокого разрешения к географической сетке координат с погрешностью единиц метров, что наряду с другими показателями определяет их качество. Погрешности измерения угловой ориентации КА в одну угловую секунду при съёмке с высоты 800 км приводят к погрешностям геопривязки 4–7 м в зависимости от угла тангажного наклона.



Рис. 1. Прибор звёздной ориентации предыдущего поколения (слева), прибор звёздной ориентации нового поколения (справа)

Задача снижения погрешностей измерения ориентации с единиц угловых секунд до долей угловых секунд потребовала решения целого комплекса технических вопросов: разделения совокупной погрешности измерения на составляющие, детального исследования каждой из них и нахождения мер по их снижению.

Снижение случайной составляющей погрешности в компактных габаритах прибора потребовало перехода на новые КМОП-фотосенсоры (комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник», *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) с меньшим размером пикселя и разработки качественно новой светосильной оптики. Это породило новые технические трудности, которые не возникали ранее. Диапазон резкости изображения в созданной оптической системе снизился до 10 мкм; это означало, что с такой точностью необходимо выставить и удержать положение фоточувствительной матрицы относительно объектива на протяжении всей миссии и испытаний во всём диапазоне нагрузок и температуры. Более того, оказалось, что при переходе в вакуум плоскость наилучшей фокусировки объектива смещается на 40 мкм; это означает, что при сборке прибора на воздухе он должен быть расфокусирован на такую величину и отправиться в космос несфокусированным, с пониманием того, что в вакууме изображение соберётся и достигнет требуемого качества.

Указанные особенности потребовали создания новых методов моделирования оптической системы, расчёта форм функций рассеяния точки (ФРТ) и погрешности определения энергетического центра изображений звёзд в зависимости от положения матрицы, температуры, вакуума и спектра звёзд. Потребовалось создание новых стендов, сочетающих термовакуумную камеру и высокоточные оптические измерения, а также методов оценки ФРТ по реальным изображениям и определения по ним положения оптимальной фокусировки.

На всё это накладывался ещё один технический аспект. Радиационная стойкость КМОП-матрицы, по структурным повреждениям накопленная за всю миссию, обеспечивалась только при температуре её кристалла ниже 0 °С. Понимание вопросов радиационной стойкости матрицы было достигнуто только после проведения большого количества радиационных испытаний по влиянию всех факторов космического пространства. Обеспечение радиационной стойкости фотоприёмника потребовало создания в приборе холодильника КМОП-матрицы на основе элементов Пельтье, а также узла тепловой развязки, установленного между матрицей и объективом. Таким образом, точность фокусировки должна обеспечиваться с учётом указанных конструктивных особенностей и только в вакууме, так как включение холодильника на воздухе приводит к выпадению конденсата. Кроме того, для подтверждения и исследования эффективности холодильника и его конструкции был создан макет прибора с КМОП-матрицей, облучённой нейтронами.

Другая составляющая погрешности прибора вызвана неточностью знания параметров калибровки его оптической системы: фокусного расстояния, координат главной точки, функции обобщённой дисторсии. Погрешности калибровки приводят к неточностям определения направлений на звёзды по измеренным, пусть и с высокой точностью, координатам их изображений на снимке. В результате моделирования было показано, что параметры калибровки изменяются от температуры, спектра звезды и вакуума. Это моделирование во многом влияло на разработку объектива и конструкции прибора. Для обеспечения высокоточной калибровки были разработаны методы и алгоритмы калибровки прибора по звёздам в ходе его штатной работы в космосе. Также были разработаны программные средства, внедрённые в наземные пункты приёма данных, которые должны обеспечить контроль и оценку указанных параметров.

Другая вновь выявленная погрешность прибора была вызвана влиянием звёзд-соседей с меньшим блеском на определение координат основных гидрируемых звёзд. Для учёта этого эффекта были разработаны методы моделирования и оценки погрешностей определения координат звёзд на изображениях прибора при наличии на их фоне звёзд-соседей, а также методы составления бортовых каталогов на основе компиляции астрономических каталогов Gaia (*англ.* Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) и Hipparcos (*англ.* High Precision Parallax Collecting Satellite). Кроме того, для дальнейшего исследования данного эффекта при лётной эксплуатации приборов на фоне их штатной работы в наземные пункты приёма будут многократно передаваться изображения звёзд и их окружения. В результате звёздный датчик впервые начинает использоваться как научный астрономический прибор для составления карты звёздного неба с низким угловым разрешением.

Ещё одна составляющая погрешности, которая не учитывалась в предыдущих приборах, но, как было показано, имела принципиальное значение, вызвана термоупругими деформациями конструкции прибора. Для минимизации этой погрешности были разработаны методы моделирования и расчёта её величины. Было проведено огромное количество расчётов, в результате каждого из которых менялась конструкция прибора. В общей сложности было осуществлено более 30 шагов модернизации конструкции прибора и реализованы оригинальные решения. В частности, бленда прибора установлена на изостатические опоры теплоизолятора, которые минимизируют тепловой поток от Солнца на измерительный базис прибора. Изменена конструкция космического аппарата: звёздный прибор впервые для отечественных КА размещён в приборном отсеке и для него реализована бленда-радиатор, которая обеспечивает его тепловой режим, и др.

После изготовления прибора необходимо было доказать, что расчётные величины термоупругих деформаций соответствуют действительности. Для этого потребовалось создание стендовой базы (*рис. 2*, см. с. 117), основанной на базе термовакuumной камеры с оптическими входами, набора коллиматоров и автоколлиматоров, а также разработка методов измерения термоупругих деформаций и погрешностей прибора, вызванных ими. В результате огромной работы по настройке стенда и отработке методов испытаний длительностью в три года было показано, что расчётные величины полностью соответствуют эксперименту. Например, расчётом показано, что при включении холодильника Пельтье КМОП-матрица придвигается к объективу на 13 мкм, ровно такие величины измеряются в экспериментах, которые проходят со всеми приборам. Таких приборов изготовлено уже двадцать.

Отдельно следует сказать о программном обеспечении прибора, в которое вошли все наработки, накопленные в предыдущих поколениях приборов, а также реализованы новые функции: выделение и устранение дефектных пикселей на изображении без наличия затвора на фоне штатной работы, свёртка изображений звёзд на большой угловой скорости, помехозащищённое кодирование Хемминга, исправление ошибок всей памяти прибора и др. Кроме того, прибор в основном построен на отечественной элементной базе, а отработка его алгоритмов и подтверждение точностных характеристик потребовала большого количества испытаний как на стендах, так и на реальных звёздах в статике и на поворотных платформах. В общей сложности на отработку программно-математического обеспечения прибора ушёл год непрерывающихся испытаний.

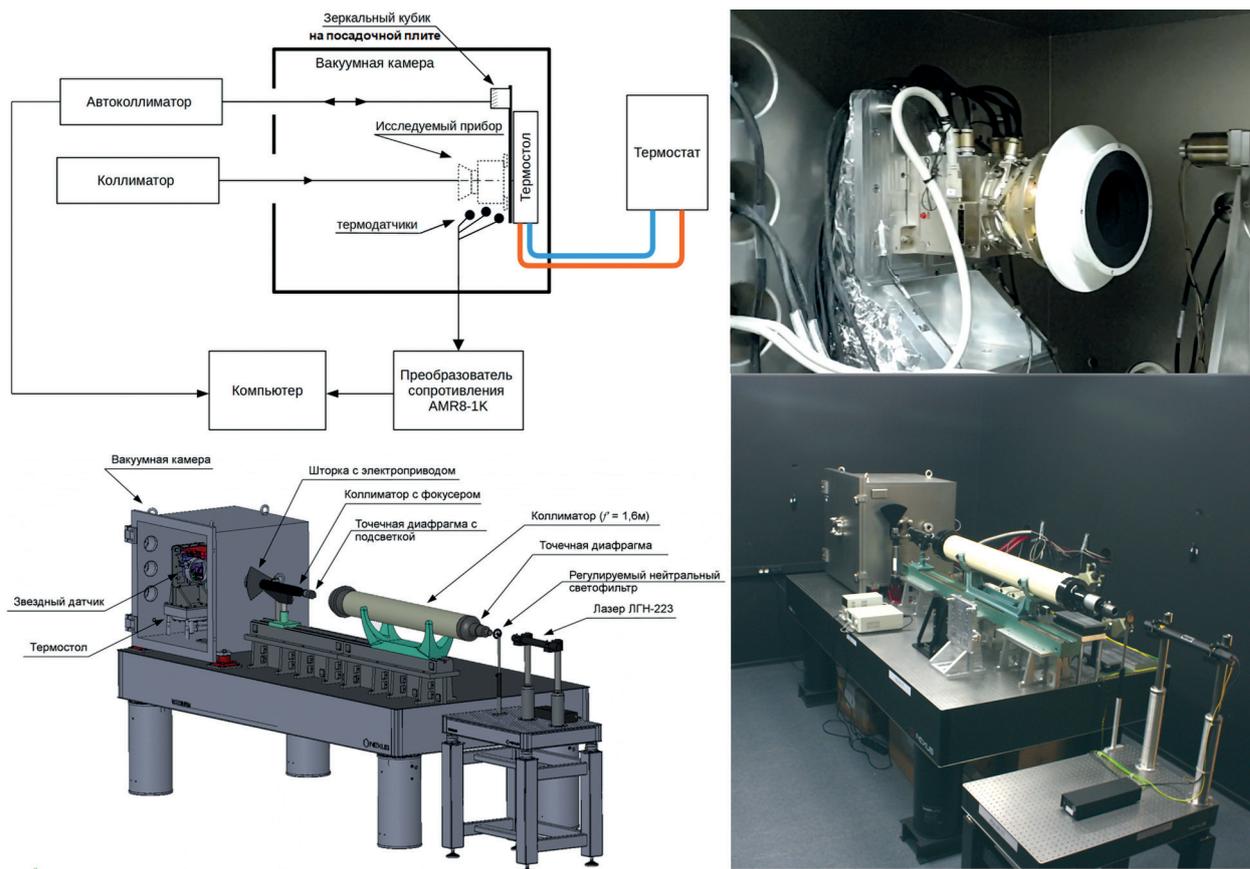


Рис. 2. Стенд для контроля фокусировки и измерения величин термоупругих деформаций прибора

С уверенностью можно сказать, что прибор звёздной ориентации высокой точности является одной из наиболее сложных разработок, доведённых до промышленного производства, среди аппаратуры, созданной в области оптико-электронного приборостроения в последнее десятилетие, а его создание, безусловно, — выдающийся результат деятельности Института космических исследований РАН.

High precision star orientation device for a new generation remote sensing spacecraft

R. V. Bessonov, N. N. Brysin, A. N. Vasileiskaya,
S. V. Voronkov, A. A. Kobeleva, N. A. Stroilov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: besson@cosmos.ru*

The article reviews the technical details of creating a new generation stellar orientation device. The device is intended for use on remote sensing satellites of high and ultra-high resolution both for use in the angular motion control system and for providing high-precision georeferencing of remote sensing images by measuring orientation parameters with errors of fractions of an arc second. The device created in the Space Research Institute has become the most high-precision stellar orientation device in the world, not counting the American analogue weighing 25 kg. The article describes the difficulties that the developers had to face in order to ensure the accuracy of measuring the orientation parameters

by the device in fractions of an arc second. Among them are the problems of ensuring optimal focusing of an optical system with a narrow range of sharpness, building a thermally stable design, ensuring the radiation resistance of a CMOS matrix by building a refrigerator based on a Peltier element. The use of high-aperture wide-field optics with a small pixel led to the fact that the focusing range of the device was about 10 μm , while the focal plane of the objective shifted by 40 μm when passing from air to vacuum. Thus, to ensure the operability of the device and its characteristics in real flight conditions, it was necessary to create high-precision vacuum and optical stands and a large amount of testing.

Keywords: stellar orientation device, high-precision orientation of spacecraft, remote sensing images georeferencing, radiation resistance of CMOS matrices, construction of thermally stable structures, stands for optical measurements

Accepted: 15.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-114-118