

Высокоточный звёздный датчик ориентации нового поколения. Особенности конструкции и алгоритма работы

В. Ю. Дементьев, А. Н. Василейская

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: dementyev@cosmos.ru

Насущная потребность в высокоточных измерениях ориентации особо проявляется в задаче геопривязки снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эти данные используются для составления цифровых топографических карт и их последующей актуализации. Ключевая роль в решении данного вопроса отводится звёздным датчикам, обладающим приемлемой для этого точностью измерений. В статье дано описание современного высокоточного звёздного датчика ориентации производства Института космических исследований РАН. Его отличительной чертой является выход на качественно новый уровень технических показателей, и в первую очередь это относится к точности измерения угловой ориентации. Последняя составляет не менее единиц угловых секунд, а в большинстве случаев достигает десятых долей угловых секунд ($\sigma = 0,1$ угл. с), что подтверждается представленными в статье результатами стендовых испытаний. В пересчёте на ошибку геопривязки 1 угл. с влечёт за собой смещение около 2,5 м при съёмке в надир с высоты 500 км. Достижение показателя точности в единицы метров представляется вполне достаточным для составления цифровых карт и соответствует общепринятым мировым стандартам. В работе представлены основные факторы, оказывающие влияние на точность вычисления ориентации звёздным датчиком, и методы их компенсации. Обсуждается выбор элементной базы прибора с обоснованием принятых решений. Приведены конструктивные особенности звёздного датчика, включая применённые средства тепло- и радиационной защиты. Особое внимание уделено описанию режимов работы прибора и присущим им особенностям. Рассмотрено введение звёздных каталогов, построенных на базе современных каталогов Hipparcos и Gaia. Описаны проблемы, стоящие на пути их корректного использования в звёздном датчике. Проанализированы причины формирования собственного звёздного каталога с учётом разрешающей способности прибора, его преимущества и недостатки. Представлены последствия эксплуатации прибора при изменении условий среды — с воздуха на космический вакуум. Показана целесообразность уточнения модели оптической системы проведением повторной лётной геометрической калибровки. Она рекомендована сразу после выхода космического аппарата на орбиту и его термостабилизации. Метод лётной калибровки реализован в высокоточном звёздном датчике двояко. Один способ подразумевает установку сеанса связи с прибором и телеметрирование достаточного массива координат звёзд известного направления и спектрального класса с их последующей обработкой на Земле. Другой вариант заключается в возможности полностью автоматического пересчёта в специальном опциональном режиме. Прибор звёздной ориентации высокой точности разработан и успешно прошёл все испытания, предусмотренные наземной программой отработки. Его применение предполагается на перспективных космических аппаратах ДЗЗ.

Ключевые слова: ИКИ РАН, ДЗЗ, звёздный датчик, астроориентация, погрешность измерений ориентации

Одобрена к печати: 22.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-149-162

Введение

В настоящее время приборы звёздной ориентации широко используются в комплексе средств управления угловым положением космического аппарата. Наряду со средствами спутниковой навигации и гироскопами ими ведётся непрерывное управление движением космического аппарата любой степени манёвренности. В зависимости от назначения и целей космического аппарата состав и количество измерительных бортовых инструментов может различаться. Средства спутниковой навигации отвечают за определение местоположения космического аппарата на орбите, а звёздные датчики и гироскопы — за ориентацию и угловое движение космического аппарата. Совместная работа звёздных датчиков и гироскопов сложилась

с самых ранних этапов освоения космического пространства. Впервые это произошло в 1964 г. на космическом аппарате «Маринер-4» (*англ.* Mariner, *букв.* — моряк), использовавшем для своей ориентации три гироскопа и звёздный датчик, который наводился на звезду Канопус (https://en.wikipedia.org/wiki/Mariner_4). В настоящий момент это взаимодействие не прекращается и носит взаимодополняющий характер. Дело в том, что работа одного звёздного датчика может быть временно ограничена, когда оптическая обстановка вокруг радикально меняется. В этом случае их подменяют гироскопы или другие звёздные датчики, зачастую развёрнутые в противоположном направлении и располагающие другим углом обзора. Типичным примером подобного развития событий является обнаружение в зоне видимости приборов таких ярких ослепляющих объектов, как Солнце, или попадание под бомбардировку протонов в период повышенной солнечной активности. Также низкоорбитальные спутники связи подвергаются протонной атаке при пролёте над зоной Южно-Атлантической магнитной аномалии. Эта область простирается на площадь в 8 млн км и покрывает большую часть Южной Америки. В данном месте магнитное поле Земли ослаблено и внутренний радиационный пояс Земли располагается на минимальном расстоянии от поверхности нашей планеты (https://en.wikipedia.org/wiki/South_Atlantic_Anomaly).

Перечисленные измерительные устройства предназначены для решения ещё одной глобальной задачи, связанной с географической привязкой снимков дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Аванесов и др., 2019а). В этой задаче требования к точности проводимых измерений ориентации существенно выше. Чтобы свести к минимуму ошибку ориентации, используются показания не одного звёздного датчика, а нескольких. Во-первых, как уже было сказано, это служит своеобразной страховкой в экстренных случаях и помогает поддерживать непрерывность показаний ориентации. Во-вторых, обеспечивает выравнивание погрешности угловой ориентации по всем трём углам, включая азимутальное вращение вокруг оптической оси. Третьим пунктом сглаживается разночтение в показаниях приборов, исключаются аномальные и низкоточные измерения. На спутниках ДЗЗ используются, как правило, четыре прибора звёздной ориентации с разнесённым полем зрения. Только благодаря привлечению всех бортовых ресурсов и объединению результатов их показаний точность геопривязки может достигать приемлемого уровня для составления цифровых карт.

В одном из старейших отделов Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) — отделе оптико-физических исследований — разработкой, созданием и исследованием приборов звёздной ориентации занимаются уже в течение нескольких десятилетий. За этот период было изготовлено множество приборов различной модификации, надёжность которых подтверждена временем. Приборы звёздной ориентации ИКИ РАН успешно эксплуатировались и продолжают эксплуатироваться на борту космических аппаратов различного назначения. Среди них, например, метеорологический спутник «Метеор-М», спутники дистанционного зондирования Земли «Ресурс-П», «Ресурс-ДК» и др. (Аванесов и др., 2010, 2014, 2016).

Знаковым событием в истории ИКИ РАН стал запуск самых первых образцов звёздных датчиков, относящихся теперь к уходящему «старому поколению», но заложивших фундамент становления «нового поколения». Это были самые настоящие приборы — «первопроходцы», срок службы которых поражает до сих пор. Они проработали более десяти лет на геостационарном спутнике «Ямал-100» и не прекращали своё функционирование вплоть до окончания миссии.

Самое продолжительное пребывание в космосе показали звёздные датчики, установленные на Международной космической станции (23 года) и спутнике связи «Ямал-202» (20 лет). Их запуск состоялся практически следом за спутником «Ямал-100». Это может показаться невероятным, но их функционирование не остановлено и продолжается по настоящий момент. Один из двух действующих спутников серии «Ямал-200» («Ямал-202») осенью 2023 г. поставит настоящий рекорд: двадцать лет непрерывного нахождения на орбите. Всё это время его управление поддерживается с помощью звёздных датчиков производства ИКИ РАН.

В начале 2000-х гг. в ИКИ РАН состоялось долгожданное появление полностью автономного звёздного датчика ориентации. Установка и предварительная обкатка прибора на нескольких краткосрочных спутниках позволили ввести его в контур управления на спутнике

ДЗЗ «Ресурс-ДК». Это была уже не просто выносная головка, а настоящее самостоятельное устройство, не требующее привлечения вычислительных мощностей бортовой вычислительной системы. Бесценный опыт первых приборов, испытавших на себе давление солнечных вспышек и радиационного поля в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии, предвосхитил создание специалистами ИКИ РАН алгоритмических подходов, повлиявших на все будущие поколения. Впервые было осуществлено частичное считывание информации с матрицы и реализовано фрагментарное слежение за звёздами. Это основной режим работы прибора, считающийся теперь привычным делом, но в то время он стал настоящим открытием. Была в разы повышена частота обновления информации и сделан серьёзный задел в помехозащищённости за счёт ухода от полнокадрового наблюдения. Одновременно стало возможным организовать два параллельных режима ориентации с гироскопов и звёздных датчиков. Последующий прогресс в развитии звёздных датчиков вывел их уже к прямому управлению космическим аппаратом при поддержке гироскопов на кратковременных участках потери ориентации.

В это же время параллельно с тематикой по дистанционному зондированию Земли в ИКИ РАН были развёрнуты работы по созданию уникальных приборов научного и служебного назначения, включающих звёздные и солнечные датчики ориентации для межпланетных космических миссий (Аванесов и др., 2009).

Потенциал, заложенный в разработке автономного звёздного датчика, был настолько велик, что следующие его модификации получили ещё одно неожиданное продолжение. В 2013 г. состоялся первый пуск ракеты-носителя с блоком выведения «Волга», задача которого состояла в выводе полезной нагрузки на рабочую орбиту. Одним из видов такой полезной нагрузки стал космический аппарат «Аист» № 1. Система управления «Волга» поддерживалась приборами звёздной ориентации ИКИ РАН. Особенность их эксплуатации — это функционирование на фоне работы двигателей ракеты-носителя и двигательной установки блока выведения. По показаниям приборов производился вывод полезной нагрузки на рабочую орбиту и затопление блока выведения «Волга». Несмотря на жёсткость условий, пуск был успешен и многократно повторен впоследствии. К настоящему моменту (осень 2023 г.) проведено уже шесть успешных запусков.

Многолетний опыт по развитию и совершенствованию приборов звёздной ориентации нашёл своё воплощение в новой разработке ИКИ РАН, получившей название «высокоточный звёздный датчик нового поколения» (рис. 1). Основные технические характеристики высокоточного звёздного датчика представлены ниже.

Основные характеристики высокоточного звёздного датчика ориентации

Частота обновления информации	8 Гц
Погрешность по трём осям X/Y/Z (1σ случайная) ...	0,3/0,3/3 угл. с
Энергопотребление (27 В).....	15 Вт
Масса	4 кг

Уже в самом названии заключён основной замысел создания нового прибора. Это звёздный датчик, в котором точность измерений ориентации должна быть на порядок выше относительно предыдущего поколения приборов и составлять единицы и доли угловых секунд. Поставленная амбициозная задача наметила разные подходы к её решению, обусловленные различной природой происхождения ошибки измерения ориентации. Были внесены изменения в элементные, конструкционные и алгоритмические особенности будущего прибора. Рассмотрим каждый из них более детально и начнём с описания оптической части прибора.



Рис. 1. Высокоточный звёздный датчик ориентации. Внешний вид прибора

Оптическая часть звёздного датчика

Чтобы достичь высокого углового разрешения, был осуществлён переход на широкоформатный фоточувствительный сенсор, выполненный по КМОП-технологии (комплементарная структура «металл-оксид-полупроводник», *англ.* CMOS, complementary metal-oxide-semiconductor) с уменьшенным размером пикселя. Угловой размер пикселя напрямую влияет на точность расчёта параметров ориентации, поскольку координаты энергетического центра звезды на матрице определяются в субпиксельном представлении.

КМОП — достаточно известная технология, которая получила бурное развитие в середине 1990-х гг. (<https://en.wikipedia.org/wiki/CMOS>). На сегодняшний день матрицы КМОП завоёвывают всё большую популярность у разработчиков звёздных датчиков и, можно сказать, практически вытеснили собой матричные фотоприёмники на основе ПЗС (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device), применявшиеся долгое время. Радиационно-стойкие, высокоскоростные, с низким уровнем шума и темнового тока в полезном сигнале, способные выполнять экспозицию в процессе считывания предыдущего кадра, — вот далеко не полный перечень преимуществ, объясняющих их всё возрастающую востребованность.

Применение КМОП-матрицы в звёздных датчиках мгновенно привело к возрастанию скорости считывания и оцифровки видеоданных. Существенно ускорился процесс внутреннего обмена и снизилась нагрузка на процессор, на вход которого стало поступать готовое и предварительно отфильтрованное цифровое изображение без посредников в виде аналого-цифрового преобразователя. Окончательное решение об оснащении КМОП-матрицей звёздных датчиков нового поколения было принято, когда был закрыт вопрос об уровне её шума и радиационной стойкости.

Другой важной составляющей высокоточного звёздного датчика стал светосильный объектив с фокусным расстоянием 60 мм. Завершающим элементом оптической части звёздного датчика становится бленда. Бленда предназначена для подавления паразитных засветок, исходящих от Солнца или других ярких излучателей. В высокоточном звёздном датчике она получила не совсем обычный способ крепления и была установлена на изостатические опоры теплоизолятора, которые минимизируют тепловой поток от Солнца на корпус прибора. Как показано в работе (Аванесов и др., 2019б), это направлено на устранение погрешности измерений, вызванной термоупругими деформациями. Это принципиально важная составляющая погрешности измерений, которая не учитывалась в предыдущем поколении приборов. Далее будут рассмотрены другие приёмы отвода тепла, а также вопрос о радиационной стойкости фотоприёмника.

Средства теплоизоляции и радиационной защиты

Между матрицей и объективом установлен узел тепловой развязки. Это необходимо, чтобы избежать взаимной передачи тепла, провоцирующей негативное влияние на точностные характеристики прибора. Аналогичная проблема теплообмена возникает между блендой и составной частью прибора. В данном случае тепловое излучение, передаваясь через бленду от Солнца, переносится на корпус прибора. Это вызывает тепловое расширение материалов и потенциально способствует образованию микродеформаций, что впоследствии сказывается на результате измерений. Данное обстоятельство отразилось на конструктивном исполнении прибора, в котором бленда стала теплоизолирована от остальной его части. Для стабилизации температурного режима прибор впервые для отечественных космических аппаратов будет расположен внутри приборного отсека и будет охлаждаться за счёт радиационного теплообмена с конструкцией космического аппарата.

Непреодолимую актуальность сохранил вопрос о возможности эксплуатации прибора на орбитах с умеренным и повышенным радиационным фоном. Известно, что при длительном воздействии радиационного излучения наступает постепенная деградация фотопри-

ёмника. Кумулятивный эффект от облучения приводит к скачку уровня фоновой подставки (темнового сигнала) и образованию «мёртвых участков» матрицы — битых пикселей, перестающих реагировать на световой поток от звёзд, что создаёт прямую угрозу точности выполняемых измерений. В связи с этим были проведены многочисленные испытания по радиационной стойкости КМОП-матрицы. После облучения нейтронами изучался вопрос её состояния, включая сравнительный анализ с ПЗС-матрицей. В отличие от КМОП-матрицы, ПЗС-матрицы содержат встроенный модуль охлаждения. В работе (Белинская и др., 2018) показано, что при отсутствии в КМОП-матрице охлаждения ПЗС-матрицы показывают лучшие результаты по радиационной стойкости. Однако указывается и следующий их недостаток, несвойственный для КМОП. В ПЗС-матрице наблюдается уменьшение эффективности переноса заряда, которое выражается в возникновении целого столбца матрицы с повышенным уровнем темнового сигнала. В результате для обеспечения радиационной стойкости КМОП-матрицы на уровне ПЗС была реализована система охлаждения элементами Пельтье. Требуемый уровень поддержания температуры кристалла матрицы будет находиться ниже 0 °С, а включение элементов Пельтье будет выполняться только в вакууме, чтобы не допустить преждевременного выпадения конденсата на Земле. В программно-математическое обеспечение также внесён ряд изменений по выделению битых пикселей и их дальнейшему игнорированию. Ограниченное число таких пикселей заносится в специальный буфер памяти и исключается из обработки в алгоритме определения ориентации.

Знание модели оптической системы. Лётная геометрическая калибровка

Одним из слагаемых определения ориентации с заданной точностью является знание модели оптической системы: это фокусное расстояние и обобщённая дисторсия. Указанные параметры определяются в процессе геометрической калибровки и необходимы для корректного приведения звёзд небесной сферы к её координатам на снимке. Это позволяет установить непреложную связь между звёздами на небесной сфере и их наблюдаемыми изображениями, помогает сгладить геометрические искажения оптики, в том числе хроматические аберрации. Метод геометрической калибровки основан на съёмке звёзд и является более предпочтительным, поскольку располагает высокоточными измерениями современных астрономических каталогов. Алгоритм калибровки сводится к процедуре сопоставления каталожных звёзд и их измеренных экземпляров, выравниванию методом наименьших квадратов с целью минимизации остаточных рассогласований и получению искомым параметров. Чем больше зона покрытия матрицы звёздами, тем выше качество калибровки. Недостаточная точность калибровки, закладываемая на Земле, приводит к ошибке в вычислении параметров ориентации. Это объясняет причину предъявления высоких требований к точности геометрической калибровки, необходимости моделирования оптической системы и её экспериментального подтверждения.

Сложность геометрической калибровки сопровождается ещё одним обстоятельством, а именно её зависимостью от множества внешних факторов: температуры, давления и спектра излучения. Это означает, что калибровочные параметры непостоянны и меняют значение при изменении условий эксплуатации среды. Наиболее остро данная проблема проявляется при переходе прибора из атмосферы в вакуум. В условиях космического вакуума калибровочные параметры частично аннигилируются. Поэтому для поддержания модели оптической системы в максимально точном состоянии был разработан метод лётной калибровки, в котором реализована передача дополнительной телеметрии. В состав этой информации входят координаты изображений звёзд, измеренные на фотоприёмнике. В работе (Аванесов и др., 2018) показано, что в результате повторной наземной геометрической калибровки удаётся снизить случайную составляющую погрешности измерений в два раза — до 1 угл. с. Этот результат был подтверждён двумя способами: анализом остаточных рассогласований (уменьшение в среднем до 1 мкм) и оценкой взаимного угла между оптическими осями приборов на продолжительном интервале опроса, приходящимся на несколько орбитальных витков.

В высокоточном звёздном датчике описанная технология внедрена как штатная. При этом пересчёт калибровочных параметров стал возможен самим прибором автоматически, с различной степени приближения. Заложённая настройка позволяет регулировать уровень точности посредством процента заполненности по полю матрицы. Для получения наилучшего результата этот параметр должен стремиться к единице (100 %), что означает равномерное покрытие всей поверхности матрицы изображениями звёзд.

Особенность фокусировки высокоточного звёздного датчика. Дефокусировка изображения при переходе в вакуум и барическая поправка

Звёздный датчик фокусируется на Земле, в воздушной среде. В процессе наземной фокусировки выбирается положение матрицы относительно плоскости наилучшего изображения объектива, обеспечивающее требуемое изображение звезды. При изменении среды с воздуха на вакуум плоскость наилучшего изображения смещается в сторону объектива. Как показано в работе (Строилов и др., 2022), для высокоточного звёздного датчика величина этого сдвига составляет 35 мкм и влечёт за собой дефокусировку изображения. Кроме того, при включении элементов Пельтье КМОП-матрица приближается к объективу на расстояние около 10 мкм. Дефокусировка может исказить форму изображения звезды и неблагоприятно сказаться на точности локализации. Это подразумевает проведение дополнительных исследований, контролирующих степень дефокусировки как в воздухе, так и в специальных камерах, моделирующих космический вакуум. Подобное стендовое оборудование уже создано в ИКИ РАН и обладает обширным функционалом по исследованию оптических характеристик звёздного датчика (Бессонов и др., 2017). С помощью этой установки, например, осуществляется оценка качества наземной фокусировки и определяется барическая поправка — разница между фокусным расстоянием прибора на воздухе и в вакууме. В качестве примера на *рис. 2* показан один из этапов проверки фокусировки прибора на Земле в лаборатории ИКИ РАН.

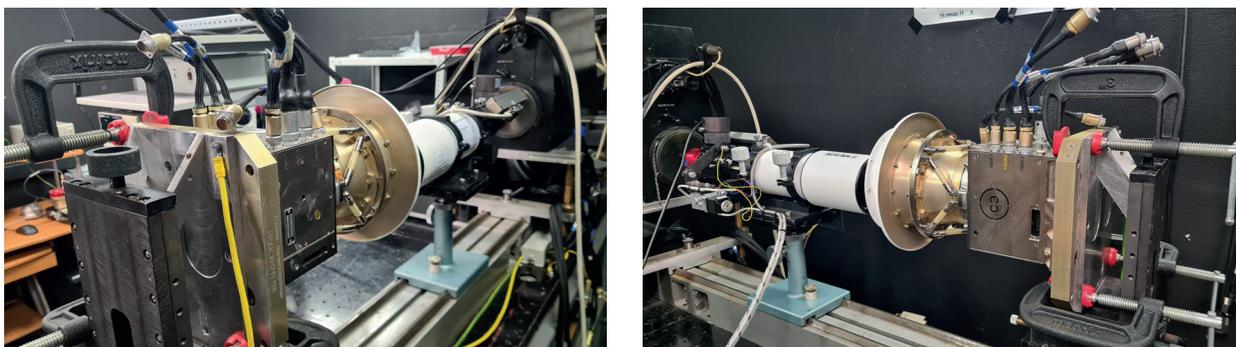


Рис. 2. Проверка фокусировки и фотометрических характеристик высокоточного звёздного датчика на специальном стендовом оборудовании ИКИ РАН

Для математического описания исходного изображения звезды на матрице используется её аппроксимация двумерной функцией Гаусса или её ближайшими аналогами. Аргументами этой функции выступают параметры сигмы (σ), определяющие колоколообразную форму звезды по двум осям, соосным сторонам матрицы. Её рекомендуемое значение лежит в пределах $[0,6; 0,8]$. Значение сигмы вне этого диапазона соответствует двум крайним областям: острой фокусировки и расфокусировки. При проведении экспериментов на воздухе и в вакууме была подобрана оптимальная настройка фокусировки, ограждающая от попадания в эти области. Было найдено значение сигмы, при котором форма изображения звезды практически не меняется для двух состояний среды. В работе (Строилов и др., 2022) показано, что параметр σ лежит в допустимом коридоре для обоих случаев и составляет: $\sigma = 0,7$ — на воздухе и $\sigma = 0,6$ — в вакууме.

Бортовой звёздный каталог. Два метода коррекции

Несоответствие измеренных и каталожных значений координат для отдельных звёзд приводит к образованию систематической ошибки измерения, которая накладывается на общий результат вычисления параметров ориентации. В работе (Аванесов и др., 2019в) исследованы причины таких отклонений на основе уникального по своей ценности космического эксперимента, транслировавшего на Землю большой объём телеметрической информации со звёздных приборов ИКИ РАН, функционирующих в космосе. Была сформирована доказательная база, подтверждающая, что положение центра изображения каталожной звезды определяется влиянием соседних звёзд и подвержено смещению. Величина этого смещения может колебаться от нескольких угловых секунд до нескольких десятков угловых секунд. Вероятную опасность представляют звёзды, расположенные в радиусе нескольких угловых минут от каталожной. Эффект от такого присутствия в общем случае индивидуален и может проявляться по-разному: постоянным или переменным отклонением, когда изображение центра звезды концентрируется вокруг одной или нескольких групп измерений. Полученные результаты нашли логическое продолжение в следующем цикле работ (Аванесов и др., 2019г, д), посвящённых корректировке бортового каталога двумя основными методами: введением поправочных коэффициентов на основе многочисленной статистики измерений и использованием материалов современного астрономического каталога Gaia.

Каталог Gaia — это звёздный каталог, созданный космическим телескопом Gaia и ставший преемником проекта Hipparcos (https://en.wikipedia.org/wiki/Gaia_catalogues). В нём представлена карта распределения звёзд нашей Галактики, постоянно пополняемая и содержащая более 1 млрд объектов с точностью выше 25 μ s (миллионных долей угловой секунды). Для сравнения, в каталоге SAO (*англ.* Smithsonian Astrophysical Observatory) содержится 258 997 звёзд до 9,5 звёздной величины (https://en.wikipedia.org/wiki/Smithsonian_Astrophysical_Observatory_Star_Catalog). Каталог SAO являлся базовым для старого поколения звёздных датчиков.

Опубликование в открытой печати материалов каталога Gaia изменило подход к построению звёздного каталога. Впервые открылась возможность подробно изучить влияние звёзд-соседей, входящих в окружение каталожных звёзд (включая самые слабые звёзды, обладающие наименьшим блеском). А также компенсировать недостаток их близкого расположения внесением соответствующих исправлений в бортовой каталог.

Первый способ коррекции бортового каталога подразумевает накопление значительного объёма статистического материала, достаточного для определения поправок каталожных звёзд с учётом их ближайших окрестностей (статистический метод). В работе (Аванесов и др., 2019г) показано снижение систематической ошибки измерений координат звёзд на примере коррекции фрагмента бортового каталога. Вместе с тем полученные результаты можно распространить только на определённый класс приборов с определённым угловым разрешением. При этом серия приборов, принадлежащих одному классу, должна иметь идентичные показатели по фотометрии и фокусировке. Идея второго метода основывается на математическом моделировании, в котором осуществляется проецирование звёздного каталога (Gaia) и его пропускание через модель звёздного датчика. Сложностью использования этого метода является разработка математической модели звёздного датчика ориентации, равноценно замещающей реальный прибор. Исследование обоих методов продолжается и включено в рамки научной программы по составлению атласа звёздного неба высокоточным звёздным датчиком.

Режимы работы высокоточного звёздного датчика

Для обсуждения особенностей алгоритма работы звёздного датчика остановимся на описании режимов его функционирования. Их насчитывается всего три. Режим «начальная ориентация» (НО), режим «текущая ориентация» (ТО) и режим «слежение». В режиме НО априорная информация об ориентации неизвестна. При запуске этого режима прибор выполняет съёмку

видимого изображения, попадающего в его поле зрения. На запечатлённом снимке выделяются изображения звёзд и определяются координаты их энергетических центров. Далее проводится отождествление полученной конфигурации звёзд со звёздами бортового каталога, хранящимся в памяти прибора. На основе этой процедуры рассчитывается ориентация звёздного датчика относительно второй экваториальной системы координат в виде кватерниона ориентации.

Решив задачу НО, прибор переходит в режим «слежение», в котором проводится анализ отдельных участков матрицы («фрагментов») на основе данных о предыдущих измерениях. Режим ТО тождественен режиму НО, за одним лишь исключением: наличием известной априорной информации об ориентации, которая сужает круг поиска по каталогу и осуществляет переход в режим «слежение» значительно быстрее.

Особенности режима НО/ТО

Отметим основные новшества в режимах НО/ТО, способствовавшие повышению таких технических характеристик звёздного датчика, как точность, надёжность, быстродействие, помехозащищённость и др.

1. Для каждого режима работы был отведён современный астрономический каталог со своей квотой звёзд, необходимой для ускоренного решения задачи распознавания (Hipparcos, Gaia). При формировании каждого каталога уделялось внимание учёту близкорасположенных звёзд. Ранее было отмечено, что на снимке близко расположенные звёзды подвержены слиянию в один общий объект. Это нежелательное явление приводит к смещению истинного энергетического центра звезды, что, в свою очередь, влияет на точность расчёта ориентации. Ранее, в старом поколении звёздных датчиков, использовался только один каталог (единственного размера), без дифференциации звёзд на одиночные и двойные.

2. В целях повышения надёжности работы прибора было увеличено число проецируемых фрагментов на матрицу — до 20. Во избежание ложного распознавания минимальное число распознанных объектов, требуемых для расчёта ориентации, было поднято до 4. Ранее использовалось 10 фрагментов и 3 объекта для успешного решения задачи распознавания.

3. Для расчёта порога в приборе было реализовано промежуточное экспонирование: строчное сканирование отдельных строк матрицы, взятых по всему периметру исходного разрешения. Найденное значение порога в дальнейшем используется в процедуре локализации по результатам следующего экспонирования. Выбор порога отсечки определяет корректное отделение изображения звезды от фона. От правильности этого выбора зависит результат определения истинного энергетического центра звёзд, а следовательно, и точности локализации.

4. Процедура экспонирования совмещена с процедурой фильтрации, которая стала выполняться средствами ПЛИС (программируемые логические интегральные схемы). Ранее преобладало строгое разделение операций и последовательное их исполнение, без совмещения. Процедура фильтрации выполнялась программным образом скользящим окном (без априорного расчёта порога).

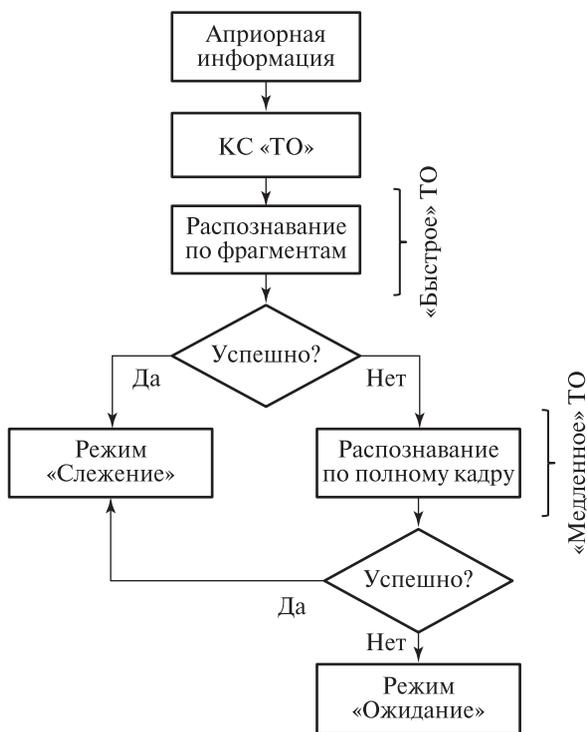


Рис. 3. Схема режима «текущая ориентация»

Новый подход избавлен от временных издержек, неизбежных для последовательно составленного алгоритма. Многочисленные испытания доказали его эффективность и состоятельность, что нашло продолжение в других инициативных разработках ИКИ РАН (Прохорова и др., 2019).

5. Для быстрого возобновления работы прибора было проведено разделение режима ТО на два подрежима: быстрое ТО и медленное ТО. В целях наискорейшего возвращения в режим «слежение» выполняется предварительная попытка распознавания по фрагментам (быстрое ТО). В случае отказа осуществляется традиционный переход на полнокадровое распознавание в радиусе заданного сектора и его ближайших соседей (медленное ТО). На *рис. 3* (см. с. 156) приведена упрощённая схема режима «текущая ориентация».

Особенности режима «слежение»

Режим «слежение» — основной режим прибора, в котором выдача данных об ориентации производится каждые 0,125 мс. Для возможности работы прибора на высоких значениях угловой скорости были предложены и внедрены несколько оригинальных идей. К их числу, например, относится подбор оптимальной экспозиции, являющейся переменной величиной. Вариация экспозиции зависит от скорости углового движения космического аппарата. В условиях её нарастания задача алгоритма состоит в удержании заданной точности работы за счёт неустанного контроля за размером звезды, зафиксированной на фотоприёмнике. Главная цель — не дать возможности расползтись её изображению на непозволительное число пикселей и, как следствие, не потерять истинный энергетический центр звезды и сохранить точность локализации. При исчерпании возможности понижения экспозиции применяются методы фрагментарного бинирования, в которых проводится свёртка изображения и «слипание» нескольких пикселей в один. Это позволяет продлить функциональность прибора в динамике, но побочно приводит к снижению точности. Фрагментарное бинирование, заложенное в приборе, может применяться как однократно, так и многократно, как выборочно, так и ко всей группе фрагментов в зависимости от внешних обстоятельств. Последним ресурсом в борьбе с нарастающей скоростью служит полнокадровое бинирование, которое предусматривает четырёхкратное сжатие исходного разрешения.

В результате отличительной особенностью режима «слежение» в высокоточном звёздном датчике стал отход от традиционной системы жёстких настроек, применявшихся ранее. Начали преобладать такие черты алгоритма, как гибкость, скорость реакции на изменение внешней обстановки и оперативная подстройка параметров прибора к непредсказуемости космического полёта. Перечисленный набор качеств продиктован естественным желанием сохранить до последнего высокую точность измерений и не прекратить выполнение целевой задачи управления на высоких и сверхвысоких скоростях углового движения. Высокоточный звёздный датчик нового поколения к этому всецело готов.

Оценка случайной составляющей погрешности измерения ориентации по результатам стендовых испытаний

Для подтверждения случайной погрешности измерения ориентации высокоточным звёздным датчиком были проведены стендовые испытания, содержащие съёмку звёздного неба в виде её цифровой модели. Для этих целей прибор устанавливался на стенд динамических испытаний, традиционно используемый в ИКИ РАН при наземной отработке звёздных датчиков ориентации различных модификаций (Кондратьева, 2005). Специальное программное обеспечение, входящее в состав стенда, позволяет моделировать движение орбитального полёта космического аппарата. Однако в данном эксперименте рассматривалось исключительно статичное положение, т. е. моделировался неподвижный участок звёздного неба. Отображение звёзд на экране монитора формировалось одним пикселем с учётом их звёздной величины. При этом возможности программного построения изображений звёзд таковы, что кадры,

полученные прибором на стенде, практически неотличимы от соответствующих кадров с реального неба (Аванесов и др., 2021).

Координаты выбранного участка небесной сферы составили: прямое восхождение $\alpha = 45^\circ$, склонение $\delta = 0^\circ$ (рис. 4). Суть эксперимента заключалась в получении от прибора продолжительной сессии измерений с её последующей статистической обработкой.

Наблюдения показали, что в течение всего съёма данных прибором стабильно проецировалось 20 фрагментов вокруг выбранных каталожных звёзд. Все они были благополучно идентифицированы, локализованы и распознаны. После извлечения угловых координат — прямого восхождения, склонения и азимута — из кватерниона ориентации были построены соответствующие графики ориентации во времени за вычетом средней составляющей. Среднеквадратическое отклонение (СКО = 1σ) всех трёх углов составило: 0,148; 0,109 и 0,512 угл. с соответственно. Таким образом, это полностью удовлетворяет требованиям технического задания на прибор (см. с. 151) и возможности прибора по точности даже превосходят приведенные цифры.

В качестве примера на рис. 5 приведён график угла склонения во времени.

Как видно из рис. 5, высокоточный звёздный датчик проводит расчёт ориентации, а СКО погрешности составляет 0,1 угл. с. Это подтверждает правильность выбора конструкционных и алгоритмических решений, заложенных в высокоточном звёздном датчике и обеспечивающих заданную точность работы прибора.

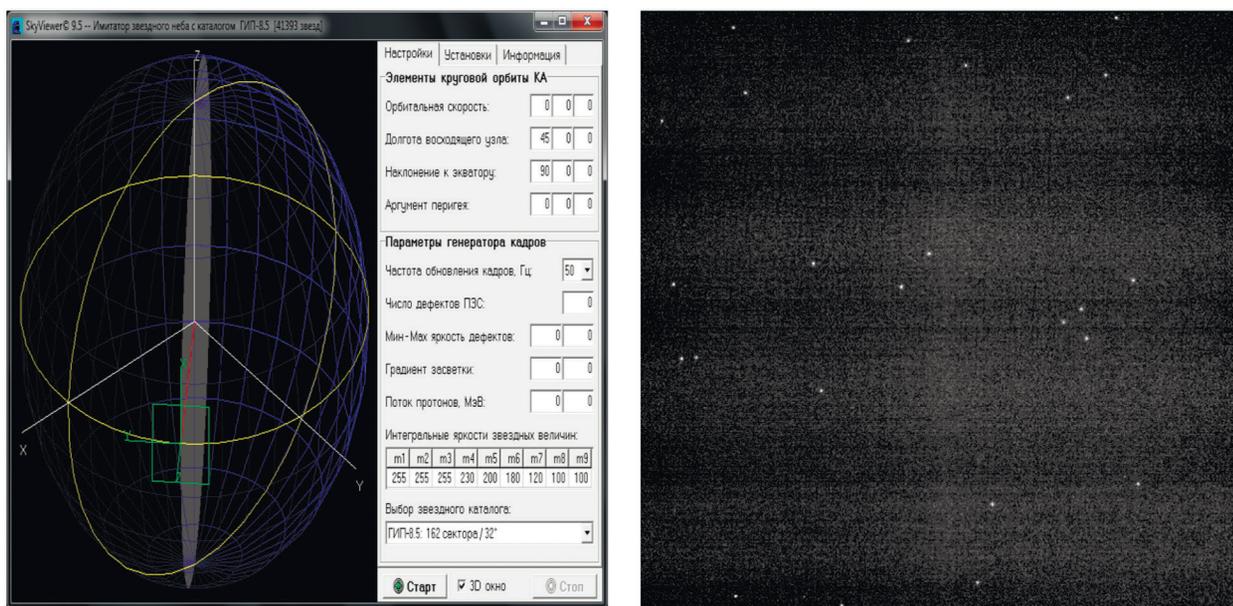


Рис. 4. Моделирование статичного участка звёздного неба на стенде динамических испытаний и его фоторегистрация прибором (координаты участка: $\alpha = 45^\circ$ и $\delta = 0^\circ$)

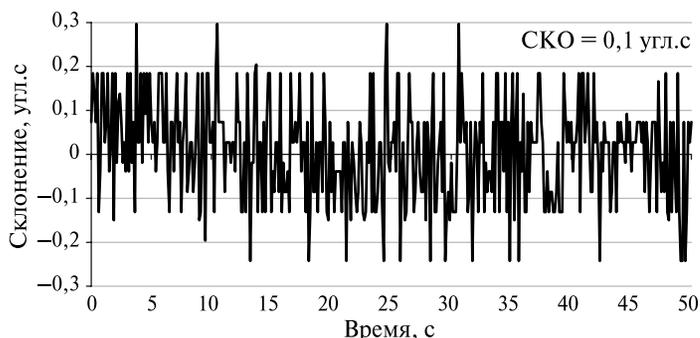


Рис. 5. График угла склонения, зарегистрированный высокоточным звёздным датчиком на стенде динамических испытаний (статика)

Заключение

Представлен звёздный датчик ориентации повышенной точности разработки ИКИ РАН. Он предназначен для управления угловым движением космического аппарата, а также геопривязки снимков ДЗЗ с субсекундной точностью. Рассмотрено расщепление суммарной погрешности прибора на отдельные составляющие и предложены методы их снижения. Приведено описание конструкции, состав и основные режимы работы звёздного датчика. Перечислены основные технические характеристики. По результатам стендовых испытаний проведена оценка случайной составляющей погрешности определения ориентации, подтверждающая точность работы прибора.

Относительно предыдущего поколения приборов в высокоточном звёздном датчике ориентации впервые внедрены специальные средства теплозащиты, направленные на подавление термоупругих деформаций. Для этих целей была модернизирована как конструкция звёздного датчика, так и конструкция самого космического аппарата. Также были разработаны методы лётной калибровки прибора по звёздам в ходе его штатной работы в космосе. На базе последних редакций астрономического каталога Gaia в сочетании с результатами лётной эксплуатации предыдущего поколения были пересмотрены подходы к комплектации бортового звёздного каталога, не учитываемые ранее. Наряду с целевой задачей управления ДЗЗ планируется продолжение научной программы по составлению атласа звёздного неба посредством наблюдений звёздного датчика.

Литература

1. *Аванесов Г. А., Жуков Б. С., Краснопевицева Е. Б.* Задачи, решаемые телевизионной системой навигации и наблюдения в проекте «Фобос-Грунт» // 1-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы определения ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 239–250.
2. *Аванесов Г. А., Дунаев Б. С., Красиков В. А., Куделин М. И., Форш А. А.* Датчики звездной ориентации семейства БОКЗ. Опыт 11-летней эксплуатации в космосе // 2-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тез. М.: ИКИ РАН, 2010. С. 3.
3. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Залылова Р. Г., Филатов А. Д.* Опыт эксплуатации и перспективы развития приборов звездной ориентации БОКЗ // 4-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тез. М.: ИКИ РАН, 2014. С. 3.
4. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Форш А. А., Куделин М. И.* Результаты летных испытаний приборов БОКЗ // 5-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тез. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 6–7.
5. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н., Сметанин П. С.* Технология наземной обработки данных о координат звезд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 31–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
6. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Куркина А. Н. и др.* (2019а). Вопросы обеспечения географической привязки снимков дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 59–64. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64.
7. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Квашин А. С., Шевелев В. Е.* (2019б) Пути снижения термоупругих деформаций приборов звездной ориентации // 6-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 44–63.
8. *Аванесов Г. А., Бессонов Р. В., Сметанин П. С., Филиппова О. В., Эльяшев Я. Д.* (2019в) Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // 6-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 103–114.
9. *Аванесов Г. А., Куркина А. В., Филиппова О. В., Эльяшев Я. Д.* (2019г). Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // 6-я Всероссийская научно-техн. конф.

- «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 130–141.
10. Аванесов Г. А., Строилов А. Н., Филиппова О. В., Шамис В. А., Эльяшев Я. Д. (2019д) Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // 6-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 141–158.
 11. Аванесов Г. А., Шамис В. А., Эльяшев Я. Д. Моделирование изображений звездного неба в задачах наземной отработки датчиков ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 82–94. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94.
 12. Белинская Е. В., Кобелева А. А., Сметанин П. С. и др. Сравнение эффектов структурных повреждений в матрицах КМОП и ПЗС, применяемых в звездных датчиках на примере CMV4000 и ФППЗ «Лев-4» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
 13. Бессонов Р. В., Брысин Н. Н., Полянский И. В. и др. Стендовое оборудование для определения оптических характеристик звездных датчиков // 5-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. ИКИ РАН. 2017. С. 51–61.
 14. Кондратьева Т. В. Моделирование параметров движения космических аппаратов и внешних условий космического пространства в процессе наземных испытаний звездных координаторов: препринт. Пр-2120. М.: ИКИ РАН, 2005. 18 с.
 15. Прохорова С. А., Сметанин П. С., Фори А. А. Развитие алгоритмов фильтрации первичных данных в звездном датчике ориентации // 6-я Всероссийская научно-техн. конф. «Современ. проблемы ориентации и навигации косм. аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 158–174.
 16. Строилов Н. А., Белинская Е. В., Брысин Н. Н. и др. Критерии и методы фокусировки высокоточных измерительных систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 119–130. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-119-130.

High precision star orientation tracker of new generation: Features of the design and algorithm of operation

V. Yu. Dementyev, A. N. Vasileiskaya

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: dementyev@cosmos.ru

An urgent need for high-precision orientation measurements is particularly in demand in the task of georeferencing Earth remote sensing images. These data is used to compile digital topographic maps and their subsequent updating. A key role in solving this issue is assigned to stellar sensors with acceptable measurement accuracy. The article describes a modern high-precision stellar orientation sensor manufactured by Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Its distinctive feature is the achievement of a qualitatively new level of technical indicators and, first of all, this applies to the accuracy of angular orientation measurements. The latter is at least one, and in advantage reaches tenths of angular seconds ($\sigma = 0.1$ angular seconds), which is confirmed by the results of bench tests presented in the article. In terms of geo-referencing error, one angular second entails a displacement of about 2.5 meters when shooting at a nadir from a height of 500 km. Achieving an accuracy index of units of meters is quite enough to compile digital maps and complies with generally accepted international standards. The paper presents the main factors influencing the accuracy of orientation calculation by a star sensor and methods for their compensation. The choice of the element base of the device is discussed with the justification of the decisions made. The design features of the star sensor, including the applied means of heat and radiation protection, are considered. Special attention is paid to the description of the operating modes of the device and their inherent features. The introduction of star catalogs based on modern Hipparcos and Gaia catalogs is considered. The problems that stand in the way of their correct use in the star sensor are described. The reasons for the formation of our own star catalog taking into account the resolution of the device are considered, its advantages and disadvantages are discussed. The consequences of operating the device when environmental conditions change — from air to space vacuum — are presented. The expediency of refining the optical system model by conducting repeated flight geometric calibration is shown. It is recommended immediately

after the spacecraft enters orbit and its thermal stabilization. The flight calibration method is implemented in a high-precision star sensor in two ways. One method involves setting up a communication session with the device and telemetry of a sufficient array of coordinates of stars, a known direction and spectral class, with their subsequent processing on Earth. Another method implies the possibility of fully automatic recalculation in a special optional mode. The high-precision star orientation device was developed and successfully passed all the tests specified by the ground testing program. Its application is expected on prospective remote sensing spacecrafts.

Keywords: IKI RAS, remote sensing, star tracker, astroorientation, orientation measurement error

Accepted: 22.12.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-149-162

References

1. Avanesov G. A., Zhukov B. S., Krasnopevtseva E. B., Tasks solved by the television navigation and observation system in the Phobos-Grunt project, *1-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy opredeleniya orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 1st All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2009, pp. 239–250 (in Russian).
2. Avanesov G. A., Dunayev B. S., Krasikov V. A., Kudelin M. I., Forsh A. A., Stellar orientation sensors of the BOX family. The experience of 11 years of operation in space, *2-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (2nd All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Book of Abstr., Moscow: IKI RAN, 2010, p. 3 (in Russian).
3. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Forsh A. A., Zalyalova R. G., Filatov A. D., Operational experience and prospects for the development of BOKZ star orientation devices, *4-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (4th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Book of Abstr., Moscow: IKI RAN, 2014, p. 3 (in Russian).
4. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Forsh A. A., Kudelin M. I., Results of flight tests of BOKZ devices, *5-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (5th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Book of Abstr., Moscow: IKI RAN, 2016, pp. 6–7 (in Russian).
5. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N., Smetanin P. S., Technology for ground processing of data on the stars coordinates in order to improve the accuracy of georeferencing Earth images from space, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15. No. 6, pp. 31–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38.
6. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Kurkina A. N. et al. (2019a), Issues of providing geographic referencing of Earth remote sensing images, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 59–64 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-59-64.
7. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Brysin N. N., Kvashnin A. S., Shevelev V. E. (2019b), Ways of decreasing thermoelastic deformations of the star trackers, *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 6th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2019, pp. 44–63 (in Russian).
8. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Smetanin P. S., Filippova O. V., Eliashev Ya. D. (2019c), Features of coordinate measuring by opto-electronic star trackers with different angular resolutions, *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 6th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2019, pp. 103–114 (in Russian).
9. Avanesov G. A., Kurkina A. V., Filippova O. V., Eliashev Ya. D. (2019d), An experiment for the correction of the onboard catalogue fragment of the BOKZ-M60 star tracker, *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 6th All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2019, pp. 130–141 (in Russian).
10. Avanesov G. A., Stroilov A. N., Filippova O. V., Shamis V. A., Eliashev Ya. D. (2019e), Adaptation of star catalogues for their application in star trackers, *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennyye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. 6th All-Russia Scientific

- and Technological Conf. “Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control”), Moscow: IKI RAN, 2019, pp. 141–158 (in Russian).
11. Avanesov G. A., Shamis V. A., Eliashev Ya. D., Modeling of images of the starry sky in problems of ground testing of orientation sensors, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 2, pp. 82–94 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94.
 12. Belinskaya E. V., Kobeleva A. A., Smetanin P. S. et al., Comparison of the structural damage effects in CMOS and CCD used in star trackers by the example of CMV4000 and Lev-4 CCD, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 119–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-119-130.
 13. Bessonov R. V., Brysin N. N., Polyanskiy I. V. et al., The benches equipment for the optical characteristics determination of star trackers, *5-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov”* (Proc. 5th All-Russia Scientific and Technological Conf. “Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control”), Moscow: IKI RAN, 2017, pp. 51–61 (in Russian).
 14. Kondratyeva T. V., *Modelirovanie parametrov dvizheniya kosmicheskikh apparatov i vneshnikh usloviy kosmicheskogo prostranstva v protsesse nazemnykh ispytaniy zvezdnykh koordinatov* (Modeling of spacecraft motion parameters and external conditions of outer space in the process of ground tests of stellar coordinates): Preprint, Pr-2120, IKI RAN, 2005, 18 p. (in Russian).
 15. Prokhorova S. A., Smetanin P. S., Forsh A. A., Development of algorithms for filtering primary data in the star tracker, *6-ya Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov”* (Proc. 6th All-Russia Scientific and Technological Conf. “Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control”), Moscow: IKI RAN, 2019, pp. 158–174 (in Russian).
 16. Stroilov N. A., Belinskaya E. V., Brysin N. N. et al., Criteria and methods for focusing high-precision optical measuring systems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 119–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-119-130.