

УДК 520; 528.8.04; 681.7

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

© 2024 г. Г. А. Аванесов^а, *, Я. Д. Эльяшев^а

^а Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

* E-mail: genrikh-avanesov@yandex.ru

Поступила в редакцию 23.08.2023 г.

После доработки 30.08.2023 г.

Принята к публикации 09.09.2023 г.

Представлена краткая история создания звездных датчиков ориентации в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) и каталогов звезд для них. Описан проведенный в начале 1970-х годов эксперимент по синхронной съемке звезд и земной поверхности с борта пилотируемых станций Салют-2, -3. Показаны трудности ввода фотоснимков в электронно-вычислительные машины (ЭВМ) того времени. На основе каталогов звезд SAO, Hipparcos и Gaia составлено около 11000 микрокаталогов вокруг наиболее ярких звезд небесной сферы. Каждый из них содержит в центре одну звезду с магнитудой до $7.8m$ и все звезды окружения до $13m$ в радиусе $15'$. Микрокаталоги объединены в “Базовый каталог звезд”, который в ближайшей перспективе будет использоваться для составления бортовых каталогов звезд для датчиков ориентации космических аппаратов семейства БОКЗ. Для работы с базовым каталогом разработаны и используются в тестовом режиме две программы: Catalog Guide и Star Manager. Первая программа предназначена для просмотра базового каталога, визуализации его фрагментов и составления списков звезд с заданными параметрами. Вторая программа носит расчетно-аналитический характер. В ней собраны математические модели звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ, а также математический аппарат, позволяющий детально моделировать наиболее тонкие элементы бортовой обработки данных. Обе программы могут работать в ручном и автоматическом режимах. Отработанная на нескольких звездах в ручном режиме последовательность действий затем может выполняться автоматически для больших списков звезд. В статье описываются структура и содержание базового каталога, а также иллюстрируется работа с ним с помощью специально разработанных для этой цели программ.

Ключевые слова: звездные величины, каталоги, микрокаталоги, датчики ориентации, моделирование, фотометрия, астрометрия, навигация, геопривязка, космическая съемка

DOI: 10.31857/S0320930X24010021, **EDN:** O1FHKM

ВВЕДЕНИЕ

Заимствованные из авиации приборы для определения направления на звезды появились на борту космических аппаратов (КА) в самом начале космической эры и эксплуатировались на протяжении нескольких десятилетий. За то время они достигли высокой степени совершенства, но сохранили при этом свой главный недостаток: чтобы измерить направление на звезду, прибор надо было сначала навести на нее с некоторой точностью. Каталоги этих приборов содержали около 20 наиболее ярких звезд, которые стали называться навигационными. Соответственно, угловые расстояния между ними были большие, а перенацеливание приборов требовало времени. В результате астрокоррекция гироскопов КА становилась сложной и продолжительной процедурой. Космической технике требовался звездный датчик, способный

за доли секунды зафиксировать изображение произвольного участка небесной сферы, распознать на нем звезды и, зная их небесные координаты, рассчитать текущие значения трехосной ориентации КА в инерциальном пространстве.

Именно такие приборы, содержащие в себе съемочную камеру на основе матричного приемника излучения и микропроцессор, в памяти которого размещен достаточно большой звездный каталог всего неба, были созданы в ИКИ РАН и внедрены в отечественную космическую технику в промышленном масштабе. На это ушло чуть более 50 лет. Из них десять лет ушло на предварительные исследования и эксперименты, еще десять ушло на отработку прототипов в космосе. Внедрение приборов пришлось на 1990-е годы прошлого века. Их эксплуатация началась на КА РКК “Энергия”: на спутниках связи Ямал-100 в 1999 г., на Международной космической станции в 2000 г. и на КА

Ямал-200 в 2003 г. В РКК “Энергия” звездным датчикам ИКИ РАН было присвоено название: “Блок определения координат звезд”, сокращенно БОКЗ. Эксплуатация приборов на этих КА оказалась успешной и не закончилась до сих пор, в связи с чем эту не слишком благозвучную аббревиатуру не стали менять. Сегодня разрабатываемые и изготавливаемые ИКИ РАН приборы успешно эксплуатируются на многих отечественных КА. В состав каждого прибора из многочисленного теперь семейства приборов БОКЗ всегда входит звездный каталог, особенности которого соответствуют их основным параметрам.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Регулярные работы по наблюдению звезд небесной сферы в интересах решения навигационных задач начались в ИКИ РАН с момента его создания в 1965 г. Инициировались они руководителями большой и высококвалифицированной группы специалистов во главе с д. т. н. Б.Н. Родионовым¹ и к. т. н. Я.Л. Зиманом², перешедшими в ИКИ РАН из Московского института геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

Большую роль в постановке и развитии этих работ в ИКИ РАН сыграла статья Я.Л. Зимана “Определение ориентации космических аппаратов по снимкам звезд”, вышедшая в журнале *Космические исследования* в 1969 г. (Зиман, Томилова, 1969). В ней ничего не говорилось о звездных датчиках ориентации, но заложенные в ней принципы распознавания звезд и определения по ним параметров ориентации КА в инерциальном пространстве указывали на целесообразность поиска приборных решений задачи.

Следует иметь в виду, что в то время для съемки звезд и земной поверхности использовалась исключительно фотографическая техника. При этом очень актуальной считалась задача автоматизации процесса геопривязки космических снимков. Для решения этой и ряда сопутствующих задач по предложению ИКИ РАН на пилотируемых станциях Салют-2, -3 в 1970–1973 гг. был поставлен эксперимент по синхронной съемке звезд небесной сферы и объектов земной поверхности. Для этого в ИКИ РАН была выполнена доработка аэрофотоаппаратов АФА БА (рис. 1). На каждой станции устанавливалось по два аппара-

та: для съемки звезд — в жилом отсеке, для съемки земной поверхности — в переходном отсеке. Одновременность съемки обеспечивалась специальным синхронизирующим устройством.

В фотоаппаратах подсвечивались часы и координатные метки, что затем использовалось при обработке данных.

К моменту проведения эксперимента в ИКИ РАН были подготовлены средства обработки данных. Впервые для этой цели должна была использоваться ЭВМ БЭСМ-4, оборудованная устройством ввода изображений на основе фототелеграфного аппарата (рис. 2).

ЭВМ того времени не были приспособлены для работы с изображениями. Проблемой было и подключение фототелеграфного аппарата к ней. Машина не могла воспринимать непрерывный

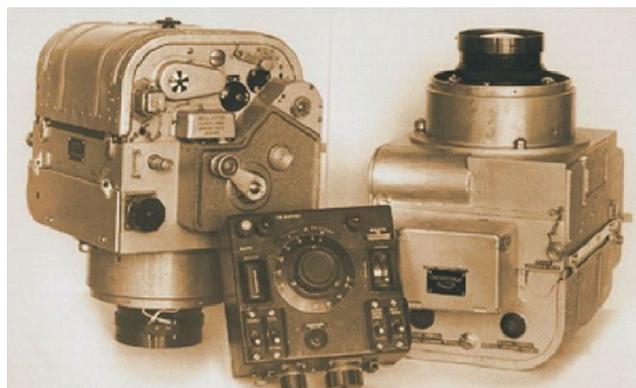


Рис. 1. Аэрофотоаппараты АФА БА-210, адаптированные для установки на станцию Салют.



Рис. 2. Фототелевизионное устройство ввода изображений в ЭВМ БЭСМ-4 на базе фототелеграфного аппарата “Нева”.

¹ Родионов Борис Николаевич, 1921–2015 гг., доктор технических наук, профессор. С 1957 по 1966 гг. заведовал кафедрой аэрофотосъемки МИИГАиК. В 1967 г. создал в ИКИ РАН и возглавлял до 1973 г. отдел иконики и космометрии, затем вернулся к преподавательской работе.

² Зиман Ян Львович, 1922–2009 гг., доктор технических наук, профессор, лауреат Государственной премии СССР, почетный штурман гражданской авиации, заслуженный деятель науки России. Участник ВОВ, штурман бомбардировочной авиации, 400 боевых вылетов и 200 на спецзадания, кавалер четырех орденов и четырнадцати медалей. В 1973 г., после ухода из ИКИ Б.Н. Родионова, возглавил вновь образованный отдел исследования Земли из космоса и руководил им до 1988 г. В дальнейшем, вплоть до кончины в 2009 г., продолжал работать в ИКИ РАН в должности главного научного сотрудника.

поток информации. Ей требовалось время для перекачки данных из оперативной в долговременную память. Структура формируемого фототелеграфным аппаратом сигнала этого не предусматривала. О вводе крупноформатных снимков земной поверхности в такие ЭВМ не могло быть и речи. Но для ввода снимков звезд было найдено очень простое решение. На негативах наиболее яркие звезды отображались светлыми точками на практически черном фоне. Число ярких звезд на снимках практически никогда не превышало 20. С учетом разрешающей способности фототелеграфного аппарата, 5 лин/мм, на каждую звезду приходилось порядка 10 пикселей. При общем числе пикселей на одном снимке звезд порядка одного миллиона устранить смысловую избыточность фототелеграфного сообщения оказалось достаточно просто путем введения в схему сопряжения с ЭВМ порогового устройства, допускающего оцифровку только тех пикселей, которые превышают некоторый заданный уровень.

Таким образом, отработка алгоритмов и программно-математического обеспечения для автоматического распознавания звезд на снимках была начата в ИКИ РАН в 1970-х годах. Интересно и то, что заложенные в то время принципы в значительно усовершенствованном виде используются в современных звездных приборах, эксплуатируемых на многих отечественных КА в наше время (Аванесов и др., 1983; 2000; 2003).

Выполняемые в ИКИ РАН съемки звезд ни в коем случае не преследовали цели создания собственного звездного каталога. В библиотеке института уже в начале 1970-х годов имелось восемнадцать томов бумажной версии каталога SAO (Star Catalog..., 1966).

К середине 1970-х годов в ИКИ РАН было создано несколько образцов телевизионных камер на основе ПЗС-матриц “Калимантан” производства ВНИИ ЭЛП, Ленинград, которые начали активно использоваться для наблюдения звезд. К 1979 г. концепция нового звездного прибора полностью созрела. Сформировались и представления о том, каким набором свойств должен обладать его каталог звезд. В первую очередь каталог должен иметь данные по всему небу для возможности использования датчиков при любой ориентации аппарата. Точность каталога, составляющего метрологическую основу прибора, должна быть значительно выше его собственных измерительных возможностей. Знание параметров собственных движений звезд должно быть достаточным для использования каталогов на борту КА

на протяжении десятков лет. Кроме того, в каталоге должна содержаться информация о яркости и цветности звезд, так как спектральная чувствительность приборов может значительно отличаться от спектральной чувствительности инструментов, использовавшихся для создания каталога, что может привести к значительным расхождениям в оценке интегральной яркости звезд.

В конце 1970-х годов концепция нового звездного датчика ориентации сформировалась полностью. Она неоднократно докладывалась на семинарах и совещаниях с участием специалистов космической промышленности и очень быстро получила поддержку в РКК “Энергия”. Смысл предложения ИКИ РАН без особых разъяснений понял в то время главный в СССР специалист по системам управления КА Борис Евсеевич Черток³. Вслед за ним идею разработки нового звездного прибора поддержал Юрий Павлович Семенов, в то время заместитель Генерального конструктора РКК “Энергия”. Спустя какое-то время в ИКИ РАН стало известно, что для разработки и производства предложенных институтом звездных датчиков ориентации предполагается создать специальное предприятие.

С позиций сегодняшнего дня кажется удивительной скорость принятия управленческих решений и их исполнения, но уже в 1982 г. новое предприятие было создано и начало работать в тесном сотрудничестве со специалистами ИКИ. В соответствии с веяниями того времени, оно было создано в ГДР как подразделение крупного промышленного предприятия “Карл-Цейсс” Йена.

В это же время в Венгрии уже были развернуты работы по созданию съемочной системы для наблюдения кометы Галлея с автоматических межпланетных станций (АМС) проекта Вега. Несколько позже в Болгарии началась разработка съемочной системы для наблюдений спутника Марса Фобоса с борта АМС Фобос. Все эти разработки основывались на ПЗС-матрицах, велись они с участием специалистов ИКИ РАН, внедрявших накопленный к тому времени опыт создания и эксплуатации камер на основе отечественных ПЗС-матриц.

Все эти проекты впоследствии были осуществлены и оказались вполне успешными (Телевизионная..., 1989; Телевизионные..., 1994).

В ходе совместных работ над звездным датчиком ориентации ИКИ РАН передавал НП “Карл-Цейсс” Йена, свои наработки по технологии первичной обработки изображений звезд, их рас-

³ **Борис Евсеевич Черток**, 1912–2011 гг., доктор технических наук, академик РАН, лауреат Ленинской премии, Герой социалистического труда, кавалер многих орденов и медалей, один из основоположников теории и практики создания систем управления ракетами и космическими аппаратами.

познаванию по звездному каталогу и расчету параметров ориентации. Кроме того, специалисты ИКИ РАН передавали свой опыт разработки конструкции – схемотехнические решения по построению камер на основе ПЗС-матриц. Сегодня все это уже стало общеизвестным, но 40 лет тому назад было принципиально новым. Достаточно сказать, что в то время пригодные для создания звездного датчика ПЗС-матрицы существовали только в СССР и США.

В советское время на предприятии “Карл-Цейсс” Йена, при участии специалистов ИКИ РАН, был изготовлен комплект из трех оптических звездных датчиков (ОЗД) “Астро”, который в 1989 г. был установлен на пилотируемой станции Мир. Формируемая приборами информация подвергалась на борту первичной обработке с целью сокращения избыточности. Определение ориентации станции выполнялось наземными средствами. В них использовался составленный в ИКИ РАН каталог на 8500 звезд, основанный на каталоге SAO. На рис. 3 показан комплект из трех приборов, установленных на станцию Мир. Он успешно проработал на борту станции до конца ее жизни. Затопление станции в 2001 г. осуществлялось по показаниям этих приборов...

В дальнейшем, после объединения Германии, это подразделение “Карл-Цейсс” Йена стало самостоятельным предприятием и получило название “Йена-Оптроникс”. Во главе предприятия встали западные немцы, не пожелавшие поддерживать контакты с ИКИ РАН. Со временем оно стало вторым после французской фирмы “Sodern” предприятием в Европе, выпускающим звездные датчики ориентации и другую высоко-



Рис. 3. Система оптических звездных датчиков “Астро”.

технологичную продукцию, не вспоминая о своем советском прошлом.

Таким образом, сотрудничество с НП “Карл-Цейсс” Йена после 1991 г. ушло в прошлое, а с предприятием “Йена-Оптроникс” оно так и не началось. В связи с этим в том же году в ИКИ РАН было принято решение о разработке многоцелевого, полностью автономного звездного датчика ориентации своими силами с перспективой организации мелкосерийного производства приборов для нужд отечественной космической промышленности.

Разработка звездного датчика началась в рамках проекта Марс-96, где был запланирован прибор “навигационная камера”. В дальнейшем он и стал прототипом приборов БОКЗ для МКС и КА Ямал-100 и Ямал-200. Навигационная камера для проекта Марс-96 и звездный датчик БОКЗ для МКС показаны на рис. 4.

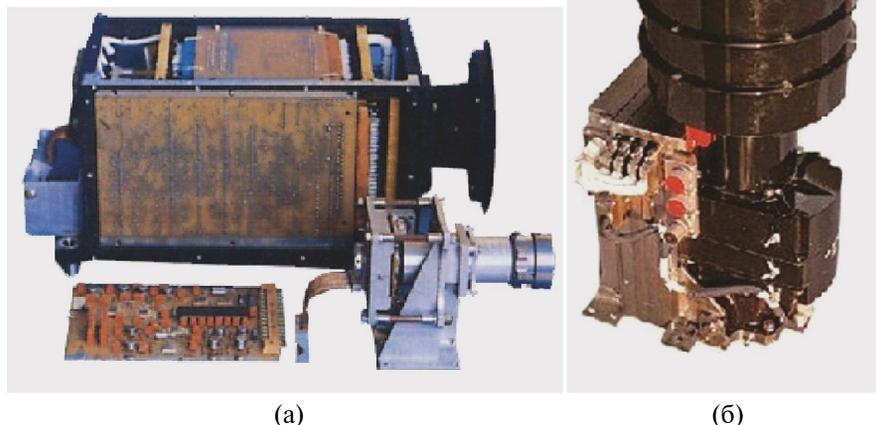


Рис. 4. Первые звездные датчики ИКИ РАН: (а) – навигационная камера проекта Марс-96; (б) – прибор БОКЗ для МКС.

В проекте Марс-96 обработка данных от навигационной камеры должна была выполняться в одном из четырех процессоров, входивших в состав многопроцессорной вычислительной системы (МВС), разработанной и изготовленной ИКИ РАН для этого же проекта. В его памяти хранился каталог на 8500 звезд, составленный на основе каталога SAO. До конца 1990-х годов никакой альтернативы каталогу SAO фактически не было.

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЗВЕЗДНЫХ КАТАЛОГОВ В ДАТЧИКАХ ОРИЕНТАЦИИ КА

Широко распространенные в настоящее время в отечественной и зарубежной космической технике звездные датчики ориентации используют малогабаритную оптику, параметры которой несравнимы с параметрами астрономических инструментов, с помощью которых составляются звездные каталоги. Огромная разница в угловом разрешении тех и других приборов приводит к тому, что измеренные звездными датчиками ориентации координаты звезд зачастую отличаются от значений, указываемых в звездных каталогах (Аванесов и др., 2018б). Несоответствие измеренных и каталожных значений координат звезд приводит к ошибкам вычисления параметров ориентации, заметность которых растет по мере совершенствования звездных датчиков. Однако отсутствие достаточной статистики измерений, а также недостаток средств и методов обработки данных долгое время не позволяли сформировать надежную доказательную базу для подтверждения наблюдаемого явления и его количественной оценки.

В начале 2000-х годов была сделана попытка провести эксперимент по исследованию работы звездных приборов в реальных условиях эксплуатации. Предполагалось, что на фоне штатной работы приборов БОКЗ-М на борту КА Ямал-200 с них будет считываться и передаваться на Землю “сырая” информация. Такой режим работы приборов на этом аппарате был штатным. Однако проект Ямал-200 был коммерческим. Средств на оплату дополнительных работ не нашлось, пришлось ждать удобного случая.

Случай представился не скоро, в 2016 г. Объектом исследования стали четыре звездных датчика ориентации БОКЗ-М60, разработанные и изготовленные в ИКИ РАН и установленные на КА Ресурс-П № 3. В этом эксперименте предполагалось использовать наземную обработку данных от звездных датчиков для повышения точности геопривязки снимков земной поверхности, получаемых съемочной системой этого КА (Аванесов и др., 2018а). Спустя 40 с лишним лет после полета станций Салют-2, –3 задача геопривязки

снимков по измерениям параметров ориентации КА по звездам не потеряла свою актуальность.

КА Ресурс-П № 3 был выведен на околоорбитальную солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 475 км и наклоном 97.276° 13 марта 2016 г. Период обращения КА вокруг Земли составляет около 5600 с.

Звездные приборы БОКЗ-М60 установлены в верхней части корпуса аппарата попарно. Углы между визирными осями приборов в паре (№ 31 и № 32, № 30 и № 33) составляют $\sim 43^\circ$ – 45° . Плоскости, образованные визирными осями парных приборов, взаимно перпендикулярны (Аванесов и др., 2018г).

В качестве фотоприемного устройства в приборах БОКЗ-М60 используется ПЗС-матрица “Лев-3” форматом 512×512 пикселей размером 16×16 мкм. Объектив имеет фокусное расстояние 60 мм и относительное отверстие 1:2. Поле зрения прибора $8^\circ \times 8^\circ$. Угловое разрешение $55''$ /пиксель. Работа приборов синхронизирована внешней секундной меткой, привязанной к бортовому времени с точностью 100 мкс.

Экспериментальные данные формировались всеми приборами БОКЗ-М60 на фоне их штатной работы в составе системы управления движением КА. Формируемая приборами информация поступала в запоминающее устройство и передавалась на наземные пункты приема во время сеансов связи (Аванесов и др., 2018г; 2021а).

В состав “сырых” данных входила информация, используемая в бортовых приборах в каждом цикле измерений:

- дата и точное время выполнения каждого измерения. *Использовались для учета собственного движения звезд, эффекта годичной аберрации, а также явлений прецессии и нутации;*
- значения проекций вектора центра масс и линейной скорости аппарата на оси гринвичской системы координат. *Использовались для последующего расчета проекции линейной угловой скорости на оси инерциальной системы координат (ИСК) и позволяют учесть эффект спутниковой аберрации;*
- штатная информация об ориентации, формируемая приборами БОКЗ-М60. *Использовалась для сравнения результатов наземной обработки со штатной работой приборов на борту КА;*
- измеренные прибором координаты локализованных на ПЗС-матрице объектов;
- интегральные яркости локализованных объектов в единицах младшего разряда (ЕМР) АЦП;
- размеры локализованных объектов в числе пикселей матрицы.

Сбор информации с приборов БОКЗ-М60 продолжался с 19 сентября 2016 г. по 12 февраля 2017 г. За это время от четырех приборов было получе-

но $\sim 52 \times 10^6$ телеметрических кадров, содержащих координаты в среднем 10 звезд на ПЗС-матрицах приборов и сопутствующую информацию. На рис. 5 схематически показана карта покрытия небесной сферы кадрами, полученными четырьмя приборами за время эксперимента.

Бортовой каталог приборов БОКЗ М-60 на КА Ресурс-П № 3 был составлен на основе каталога SAO. В него вошли 8713 звезд до 7.5m. Отбор звезд в бортовой каталог осуществлялся с целью обеспечения наличия как минимум шести из них в произвольном положении кругового поля зрения прибора диаметром 8° на небесной сфере. Позднее для звезд, распознанных в ходе эксперимента, была проведена их идентификация по каталогам SAO, Hipparcos (The Hipparcos and Tycho Catalogues, 1997) и Gaia (Gaia Collaboration, 2018).

По получении “сырых” данных была выполнена их обработка бортовой программой, что выявило следующее:

1. Наземная обработка “сырых” данных бортовой программой не выявила существенных отличий результатов от полученных на борту.

2. Из 8713 звезд бортового каталога в зону эксперимента попало около 6000 звезд. В зону наблюдения всеми четырьмя приборами попало около 1200 звезд. В зоне наблюдения двумя приборами оказалось 3600 звезд.

3. Систематизированы данные о случайных и систематических ошибках измерений координат звезд каждым прибором и парами приборов. По полученным результатам составлены соответствующие списки звезд.

При обработке группы из $\sim 10^6$ телеметрических кадров измерений, выполненных двумя приборами на 176 витках полета, были получены следующие результаты (Аванесов и др., 2018 г). В каждом кадре приборы фиксировали положение 10–12 звезд. При этом координаты каждой из 1184 распознанных на этих витках звезд фиксировались прибором в среднем около 2000 раз. Оказалось, что в обработанном массиве данных число звезд, осредненные небесные координаты которых совпадают с каталожными значениями с точностью до $1''$, не превышает 5.2%. Невелико оказалось и число звезд, координаты которых значительно, на величину от $3''$ до $30''$, отличаются от каталожных значений. Их оказалось 5.7%. Отличие измеренных координат остальных 89.1% звезд от их каталожных значений лежит в пределах от $1''$ до $3''$. Приведем несколько примеров.

На рис. 6 показан фрагмент карты участка небесной сферы с нанесенными красными и синими точками координатами звезды SAO 98456, измеренными в разное время приборами № 31 и № 32 более чем по 1000 раз. Каталогное положение звезды обозначено крестом. Осредненные координаты центра звезды по обоим приборам показаны зеленой точкой. Для каждого отдельного прибора измеренный центр отстоит от каталожного значения на $0.36''$ и на $0.67''$ по приборам № 31 и № 32 соответственно. Для приборов с угловым разрешением $55''/\text{пиксель}$ — это очень неплохой результат. Приведенный справа снимок той же звезды, взятый из Паломарского обзора (The Palomar Digital Sky Survey) (<https://sites>).

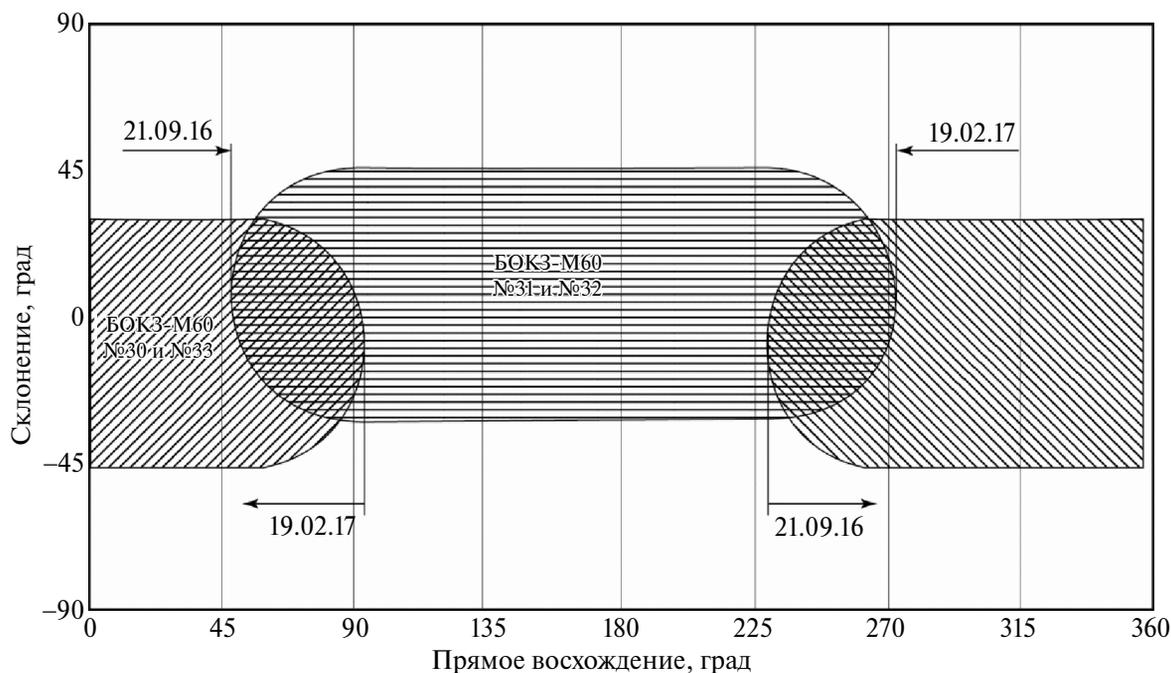


Рис. 5. Карта покрытия небесной сферы кадрами с четырех приборов БОКЗ-М60 КА Ресурс-П № 3 за время эксперимента.

astro.caltech.edu/~george/dposs/dposs_pop.html), показывает отсутствие в ближайших окрестностях звезды ярких возмущающих объектов.

Фрагмент карты выполнен в равнопромежуточной проекции небесной сферы на плоскость. В качестве нулевой точки выбраны координаты рассматриваемой звезды. По осям отложены разности между измеренным и каталожным положе-

нием звезды. Все показанные на рисунке угловые расстояния измерены по правилам сферической геометрии.

Все последующие примеры относятся к звездам, демонстрирующим большие значения систематических ошибок.

На рис. 7, построенном по тем же принципам, показан случай наблюдения двумя приборами

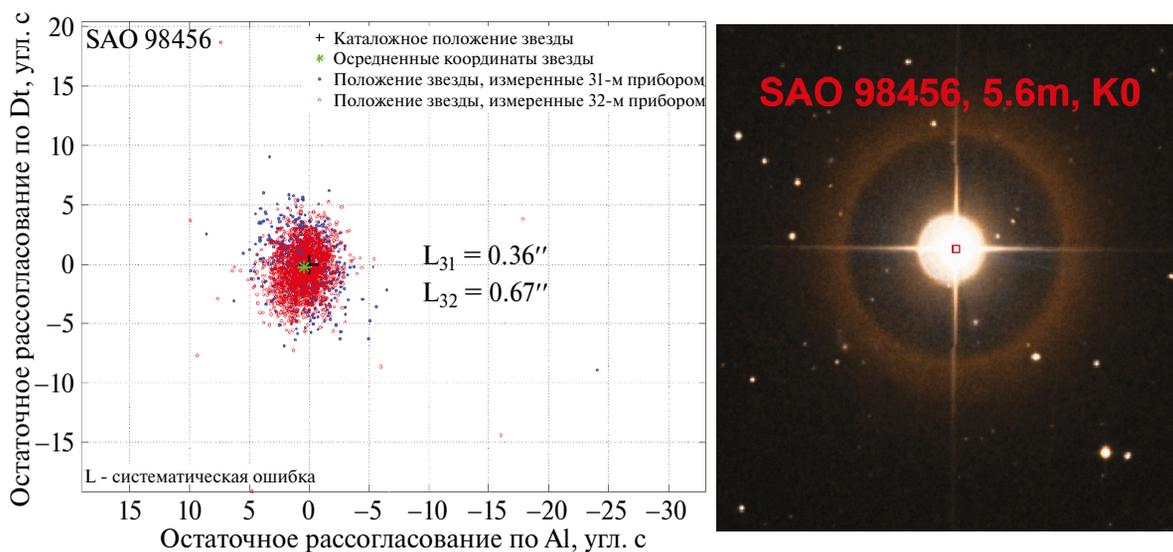


Рис. 6. Фрагмент карты небесной сферы с нанесенными на нее 2500 измерениями координат звезды SAO 98456, сделанными приборами № 31 и № 32. Справа снимок звезды и ближайшей ее окрестности из Паломарского обзора¹.

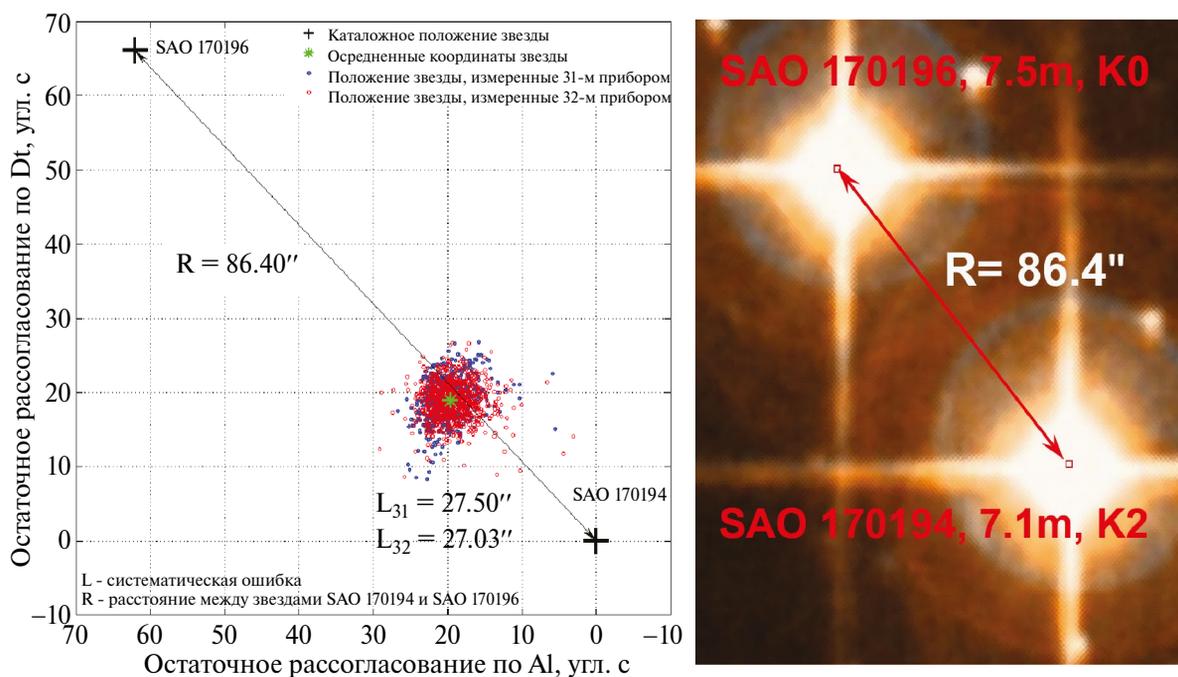


Рис. 7. Фрагмент карты небесной сферы с нанесенными на нее 1500 измерениями координат пары близко расположенных звезд SAO 170196 и SAO 170194, измеренных приборами № 31 и № 32. Справа снимок этой же пары звезд из Паломарского обзора.

¹ До появления каталога Gaia окрестности каталожных звезд изучались по Паломарскому обзору неба (POSS 1949–1958, POSS-II 1980–1990), который был оцифрован в 1994 г. и выпущен в виде Цифрового обзора неба (DSS).

пары близко расположенных звезд SAO 170196 и SAO 170194. Расстояние между ними $86.4''$. Это значит, что при угловом разрешении приборов $55''/\text{пиксель}$ обе звезды всегда будут наблюдаться как один объект. Рисунок это подтверждает. Центры проекции облаков ошибки ~ 1500 измерений координат звезд обоими приборами совпадают с очень хорошей точностью около $0.5''$, как и в предыдущем случае. При этом оба прибора указывают координаты слившейся пары звезд на соединяющей их линии на расстоянии $27.5''$ от звезды SAO 170194. С учетом параметров собственного движения этих звезд и близости их спектральных классов эту пару можно считать устойчивой на достаточно большом отрезке времени. Ее можно включать в бортовые каталоги приборов, имеющих угловую разрешающую способность порядка $1'$, под одним номером и с поправкой координат на $27.5''$. Аналогичным образом можно поступать с подобными парами, расстояние между которыми меньше, чем в данном случае.

Приведенные примеры демонстрируют хорошие измерительные свойства приборов БОКЗ-М60 и позволяют верить получаемым с их помощью результатам.

Еще более интересными оказались результаты измерения координат звезды SAO 57475. Судя по рис. 8, звезда попеременно занимала два положения: одно практически точно совпадает с каталожным значением, а другое отстоит от него на $26.47''$. На нее оказывает влияние звезда SAO 57469, находящаяся на расстоянии $306''$. Причем один прибор всегда видел звезду в смещенном состоянии, а другой сформировал два облака

ошибок: одно – смещенное и почти полностью совпадающее с показаниями первого прибора, а второе – вокруг каталожных координат звезды.

Появление второго облака ошибок объясняется тем, что изображения звезд слипались в один объект на некоторых кадрах, а на других они разделялись и определялись как разные объекты.

На рис. 9 показано влияние этого соседства в увеличенном масштабе.

Во всех приведенных примерах координаты центра звезды на ПЗС-матрице измерялись центроидным методом. Большое достоинство этого метода заключается в том, что он позволяет с высокой точностью измерить координаты центра яркости любой фигуры на матрице с внутрипиксельной точностью. Вместе с тем звезда должна представлять собой бесконечно удаленный точечный объект, свет от которого, пройдя через оптическую систему, должен отображать на матрице ее собственную передаточную функцию, представляющую собой симметричную фигуру – гауссоиду. Однако прибор с угловым разрешением в десятки угловых секунд практически всегда имеет дело с целой группой звезд, среди которых одна звезда, обычно самая яркая, представлена в бортовом каталоге, а другие нет. Но это не мешает им испускать фотоны, а матрице их суммировать.

Экспериментальные данные наглядно показывают, что вклад звезд окружения в отображение каталожной звезды на матрице искажает ее фигуру. Она перестает быть симметричной, что и фиксирует центроидный метод в форме смещения измеренных координат звезд от их каталожного значения. При этом величина ошибки для

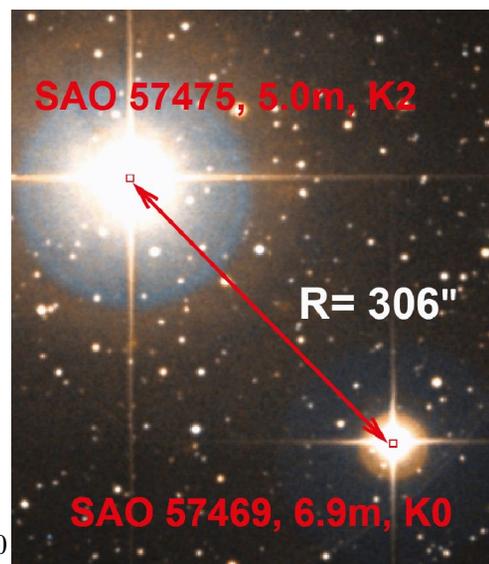
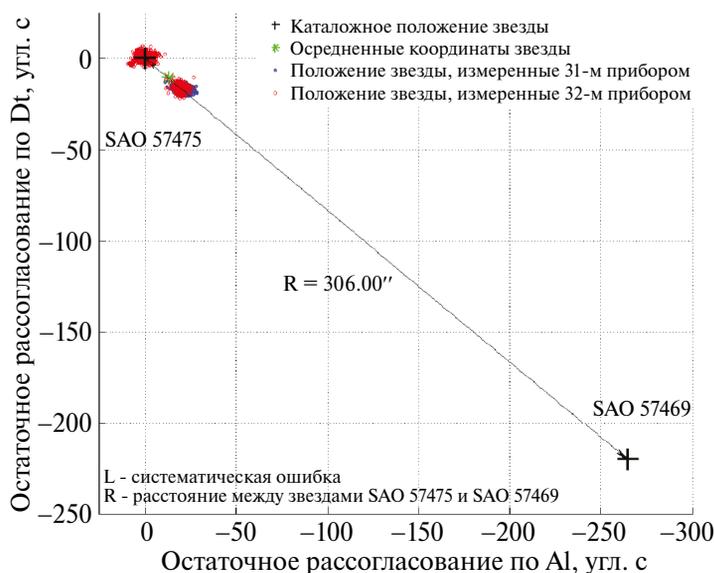


Рис. 8. Влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475. Справа снимок обеих звезд из Паломарского обзора.

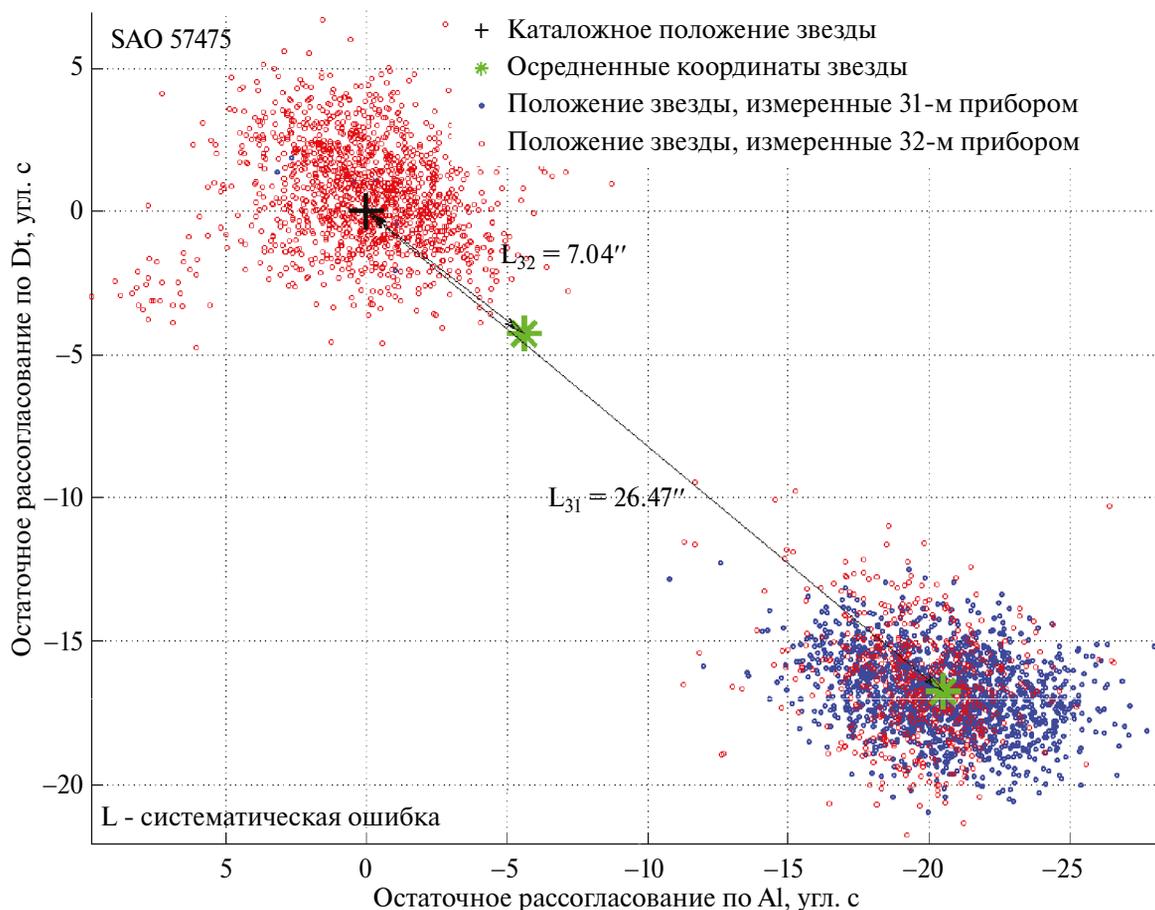


Рис. 9. Увеличенный фрагмент карты неба, демонстрирующий влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475.

каждой звезды индивидуальна и неизменна на достаточно большом отрезке времени.

Эксперимент показал, что статистическая обработка материалов регулярной съемки звезд позволяет выявить и объяснить причины возникновения различных видов ошибок измерений в звездных датчиках ориентации. Более того, на основании подобных работ можно скорректировать бортовой каталог для данного типа прибора (Аванесов и др., 2018г; 2021а; 2018в). Но как раз в это время стал доступным первый релиз каталога Gaia (Gaia Collaboration, 2016). Знакомство с ним показало, что на его основе может быть создан базовый для большинства звездных приборов каталог звезд (Аванесов и др., 2018д).

БАЗОВЫЙ КАТАЛОГ ЗВЕЗД ДЛЯ ДАТЧИКОВ ОРИЕНТАЦИИ КА

На протяжении нескольких десятилетий, начиная с середины 1960-х годов, в качестве основы для проектирования бортовых каталогов звезд датчиков ориентации КА использовался астрономический каталог SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory). Опубликованный в 1966 г. ка-

талог SAO содержит 258997 звезд до 9.5m. В нем впервые с относительно высокой точностью были указаны параметры собственного движения звезд, что замедлило процесс его старения.

Новая эпоха звездных каталогов началась с запуска в 1989 г. астрометрического КА Hipparcos (High Precision Parallax Collecting Satellite). Результатом этой миссии стал каталог Hipparcos, содержащий данные о 118218 звездах с точностью положений и параллакса на уровне 0.001". Впервые в истории астрономии координаты звезд и их спектральные характеристики были измерены с помощью одного инструмента, причем находящегося за пределами земной атмосферы.

Следующим крупным шагом в развитии звездных каталогов, несомненно, станет запущенный в декабре 2013 г. КА Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). Главная его задача — составление подробной карты звезд нашей Галактики с точностью в 40 раз выше, чем это было возможно в миссии КА Hipparcos. Каталог, составленный по результатам миссии КА Gaia, стал доступен уже с конца 2016 г. На момент выхода статьи уже выпущена третья версия каталога Gaia, однако уже во втором издании содержалась

практически вся информация, необходимая для составления базового каталога.

Появление каталога Gaia позволило увидеть то, что большинство звезд, угловые расстояния между которыми используются в качестве метрологической основы в датчиках ориентации КА, в действительности находятся в окружении весьма большого числа менее ярких звезд. Возникающий из-за влияния такого соседства (низкая угловая разрешающая способность датчиков ориентации и используемый в них центроидный метод измерения) эффект смещения координат звезд был известен давно, на основе специально проводимых астрономических наблюдений. Однако именно каталог Gaia показал масштабность этого явления и дал возможность оценки его влияния на результат измерений. Краткие сведения о звездных каталогах всего неба, использовавшихся в настоящей работе, приведены в табл. 1.

На основании каталогов Hipparcos и Gaia DR2 в ИКИ РАН был создан “Базовый каталог звезд для датчиков ориентации КА”, версия “0” далее БК-0 (Аванесов и др., 2019а).

Включенные в БК-0 звезды условно разделены на основную группу и группу звезд окружения. В основную группу вошло 10857 звезд из каталога Hipparcos. Большинство из них использовалось в разное время и в разных сочетаниях в звездных каталогах приборов ИКИ РАН начиная с 1967 г. В основной группе выделена подгруппа из 480 наиболее ярких звезд, использование которых в каталогах широкопольных датчиков ориентации всегда проблематично. Значительная часть из них вообще не используется в бортовых каталогах, но в базовом каталоге они необходимы, чтобы учесть их влияние через передаточную

функцию оптической системы прибора на близко расположенные звезды каталога. Остальные 10377 звезд из каталога Hipparcos идентифицированы в каталоге Gaia. Каждая из них помещена в центр микрокаталога вместе с ее окружением, включающим все звезды из каталога Gaia до $13m$ в радиусе $15'$. Общее число звезд окружения составило 364406. Адресная система БК-0 использует номера звезд каталога Hipparcos. По нему из памяти компьютера вызывается микрокаталог звезды.

Радиус микрокаталогов $15'$ выбран с учетом возможного влияния звезд окружения на результат измерения координат центральной звезды из-за наиболее низкого углового разрешения, используемого в приборах семейства БОКЗ. Один из них, БОКЗ-МФ, имеет угловое разрешение около $2'/\text{пиксель}$. Кроме того, выбранный радиус учитывает применяемый в приборах центроидный метод измерения координат звезд, а также установленный для приборов диапазон допустимых для них угловых скоростей.

Выбранная для базового каталога предельная звездная величина звезд окружения учитывает существующую сегодня реальную чувствительность приборов. Вместе с тем уже сейчас видно, что быстрый рост чувствительности приборов в самой ближайшей перспективе потребует дополнить микрокаталоги звездами окружения до $15m$.

В БК-0 основные характеристики для большинства звезд, как основной группы, так и звезд окружения (такие как координаты, спектральные классы, звездные величины и параметры собственного движения), заимствованы из каталога Gaia. В связи с тем, что каталог Gaia не полон со стороны ярких звезд и информация о спектраль-

Таблица 1. Основные звездные каталоги всего неба

Данные	SAO	Hipparcos	Gaia DR1	Gaia DR2
Дата издания	Бумажное издание – 1966 г. Машинная версия – 1979 г.	02.1997	14.09.2016	25.04.2018
Предельная звездная величина, m	9.5	9.5	20	21
Число звезд	258997	118218	1142679769	1692919135
Точность измерения положения звезд, mas ($0.150''$)	150	1	0.3	0.04
Точность измерения собственного движения звезд, угл. мс в год	20	0.9	1	0.06
Информация о цвете звезд	Спектральный класс	B–V, Спектральный класс	Данные из HIP	Цветоразность, эффективная температура

ных классах дана не для всех звезд, отсутствующие для звезд основной группы характеристики заимствуются из каталога *Hipparcos*, а при отсутствии информации о спектральном классе для звезд окружения, их спектральный класс принимается идентичным спектральному классу основной звезды.

Все звезды приведены на эпоху J2000. Нумерация звезд основной группы идет в соответствии с каталогом *Hipparcos*. Принципы формирования БК-0 иллюстрирует рис. 10.

Интересным оказалось распределение звезд окружения в ближайших окрестностях звезд основной группы, приведенное в табл. 2. Так, например, из первой строки таблицы следует, что в радиусе 1' у 7887 звезд основной группы вообще отсутствуют звезды окружения магнитудой менее 13 m . С увеличением радиуса число не имеющих соседей звезд быстро уменьшается. В радиусе 15' лишь две звезды основной группы не имеют соседей.

В последующих строках таблицы показано число звезд основной группы, имеющих в окружении одну, две и более звезд. В зависимости от радиуса их число сначала растет, достигает какого-то максимума, а затем уменьшается.

В полном виде таблица содержит более 400 строк. Из нее следует, что 4985 звезд основ-

ной группы имеют от двух до 21 звезды окружения в радиусе 15'. Еще 4785 звезд имеют в радиусе 15' от 21 до 99 звезд окружения. А еще 605 звезд основной группы на той же площади имеют в своем окружении от 100 до 426 звезд.

Однако наибольший практический интерес представляют первые 10 строк табл. 2.

В зависимости от угловой разрешающей способности, функции рассеяния точки (ФРТ) и способности прибора поддерживать постоянную фокусировку, разработчику его бортового каталога предстоит выбрать один из столбцов табл. 2.

Тонировкой в табл. 2 показана условная граница, ниже которой приведенные в ней данные перестают быть интересными для пользователя. Например, в радиусе 1' у 7887 звезд основной группы вообще отсутствуют звезды окружения. В этом же столбце еще 2080 и 340 звезд основной группы имеют соответственно по 1 и по 2 звезды окружения. Это значит, что если изображение звезды некоторого гипотетического прибора не превышает 1', то все эти звезды основной группы оказываются идеальными кандидатами для включения в бортовой каталог. С увеличением радиуса окрестности число звезд основной группы не имеющих в ней соседей быстро падает. При этом граница, в которой имеет смысл вести отбор звезд, опускается вниз.

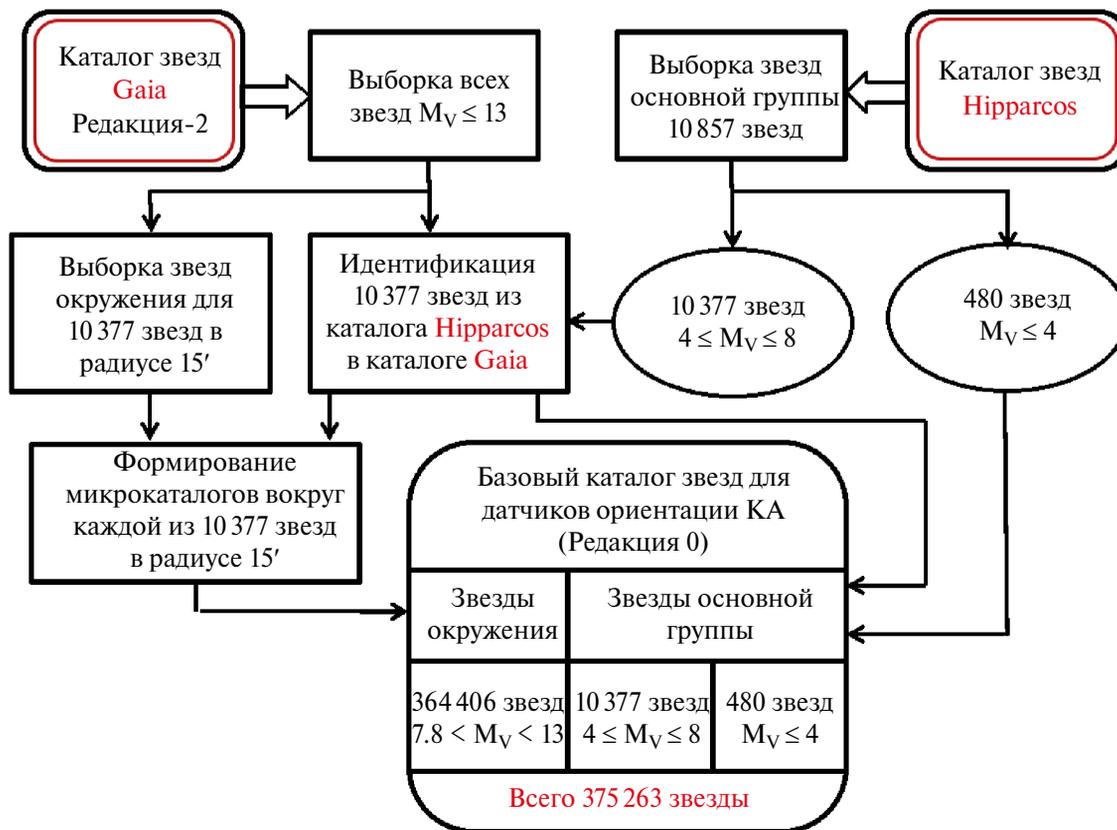


Рис. 10. Иллюстрация принципов формирования “Базового каталога звезд для датчиков ориентации КА”.

Таблица 2. Количество звезд окружения в ближайших окрестностях звезд основной группы

Кол-во звезд окружения	Радиус окрестности звезд основной группы														
	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'	9'	10'	11'	12'	13'	14'	15'
0	7887	5452	3432	2033	1144	610	333	151	79	37	17	7	4	2	2
1	2080	3026	2982	2516	1820	1274	790	490	255	146	75	40	18	7	5
2	340	1172	1795	1927	1845	1531	1194	822	538	287	158	79	40	18	11
3	55	420	886	1228	1421	1382	1196	1018	746	535	333	188	104	57	29
4	9	156	503	805	919	1064	1115	1003	865	668	465	297	185	115	55
5	1	81	286	516	724	845	902	918	855	742	603	449	271	164	94
6	1	32	193	347	499	625	674	730	799	715	651	523	394	244	176
7	0	14	122	251	401	458	557	627	636	700	643	596	480	330	212
8	0	7	54	220	276	390	466	524	590	598	599	540	496	428	294
9	0	5	40	118	272	298	401	429	466	551	537	509	506	448	383
10	2	2	23	110	189	270	294	365	399	433	531	512	427	431	351

Примечание: тонировкой показана условная граница, ниже которой, как правило, нет смысла вести отбор звезд для бортового каталога.

Для работы с БК-0 разработаны и находятся в стадии отработки две специальные программы. Обе программы созданы для выполнения совокупности технологических операций по формированию бортовых каталогов звезд датчиков ориентации, оптимизированных в соответствии с наблюдательными возможностями каждой конкретной группы приборов и специфическими особенностями ближайших окрестностей каждой каталожной звезды.

Одна из этих программ – Catalogue Guide – предназначена для визуализации микрокаталогов и состоящих из них виртуальных кадров, имитирующих наблюдение небесной сферы звездным датчиком ориентации с выбранным оператором полем зрения. Кроме того, в задачу программы Catalogue Guide входит выборка из БК-0 микрокаталогов с заданными параметрами и формирование из них упорядоченных определенным образом списков звезд.

Вторая программа – Star Manager – носит расчетно-аналитический характер. Там каждый микрокаталог анализируется, подбираются оптимальные условия для его обработки, которые затем заносятся в составляемый программой протокол. В нем уточняются небесные координаты звезды основной группы и условия ее локализации. Для этого в программе собраны

фотометрические (Аванесов и др., 2019б) и астрометрические (Аванесов и др., 2020) модели звездных датчиков ориентации семейства БОКЗ, характерные для них модели шумов и помех (Аванесов и др., 2021б), а также математический аппарат проецирования содержащихся в БК-0 звезд на матрицу прибора и обратно на небесную сферу (Аванесов и др., 2021в). Кроме того, программа имеет возможность применять различные способы локализации звезд на матрице, вычислять их координаты и величины случайных и систематических ошибок измерения.

Примеры визуализации микрокаталогов в программах Catalogue Guide и Star Manager приведены на рис. 11 и 12. На рис. 11 показан пример проецирования микрокаталога звезды HIP 59895 и формирования по его данным изображений звезд на матрице прибора. По данным БК-0, в радиусе 5' (обозначен окружностью) у звезды HIP 59895 нет соседей ярче 13^m.

На рис. 11 видно, что звезда HIP 59895 отобразилась на матрице идеально симметричной фигурой распределения Гаусса, чего и следовало ожидать.

На рис. 12 показана построенная по данным микрокаталога звезды HIP 57587 карта звезд в небесной системе координат и изображение ее центральной части после проецирования на матрицу.

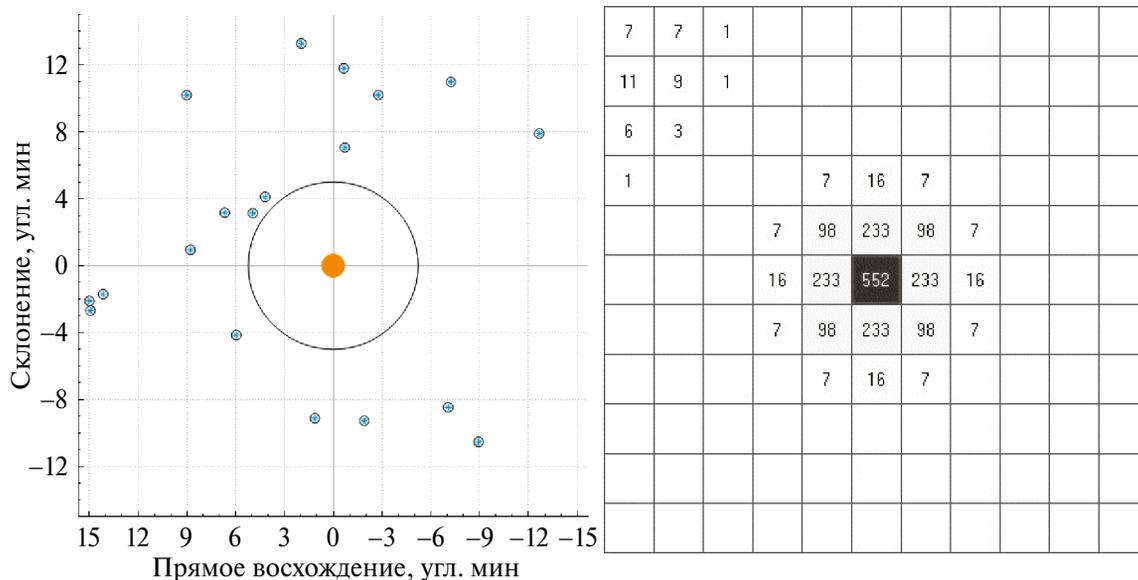


Рис. 11. Пример визуализации и проецирования микрокаталога: (а) – микрокаталог звезды HIP 59895 в небесной системе координат, программа Catalogue Guide; (б) – отображение центральной части микрокаталога звезды HIP 59895 дискретной структурной матрицы, программа Star Manager.

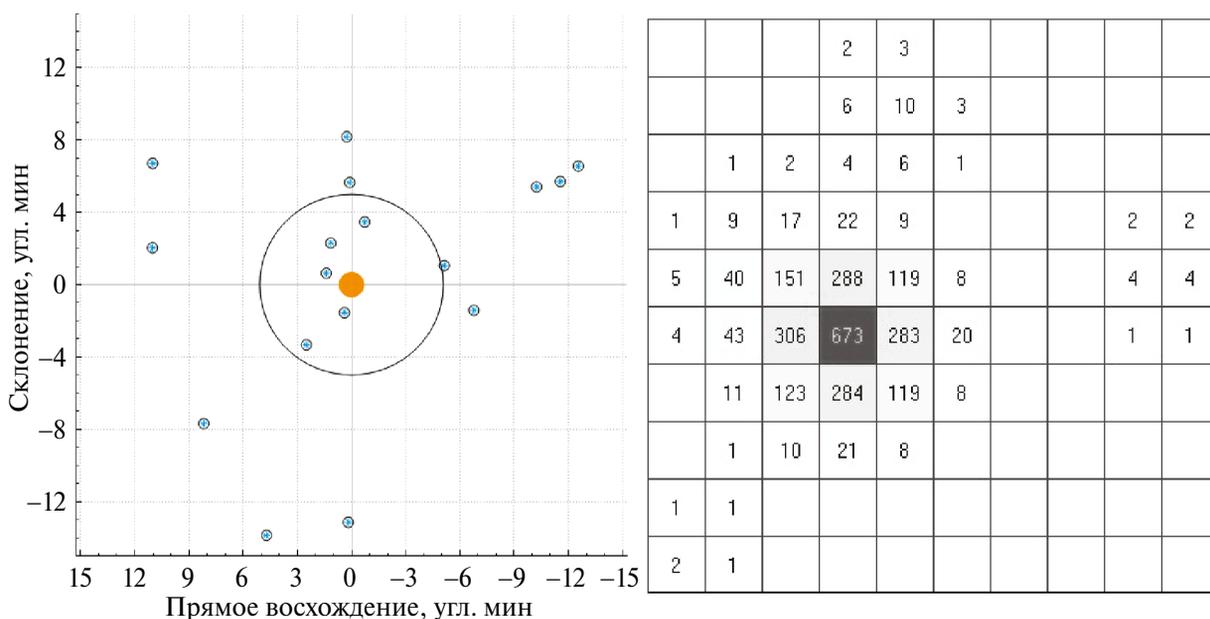


Рис. 12. Пример визуализации и проецирования микрокаталога: (а) – микрокаталог звезды HIP 57587 в небесной системе координат, программа Catalogue Guide; (б) – отображение центральной части микрокаталога дискретной структурной матрицы, программа Star Manager.

Эта звезда, в отличие от предыдущей, имеет пять соседей в радиусе 5', что сильно меняет дело.

Каждая из показанных на рис. 12а звезд отображена на рис. 12б гауссовым распределением яркости с полушириной $\sigma_x = \sigma_y = 0.7$. При этом хорошо видно, что наиболее яркая звезда микрокаталога HIP 57587 дала самое большое распределение яркости, на которое наложились распределения яркости от других звезд. При этом распределение яркости от звезды HIP 57587 утра-

тило симметрию. В данном случае это означает, что в измерениях ее координат в любом случае будет содержаться систематическая ошибка.

В качестве еще одного примера работы программы Catalogue Guide на рис. 13 показана компьютерная реконструкция кадра съемки участка небесной сферы размером $8^\circ \times 8^\circ$, составленная из микрокаталогов БК-0. В центре реконструкции находится показанный на рис. 12а микрокаталог звезды HIP 57587.

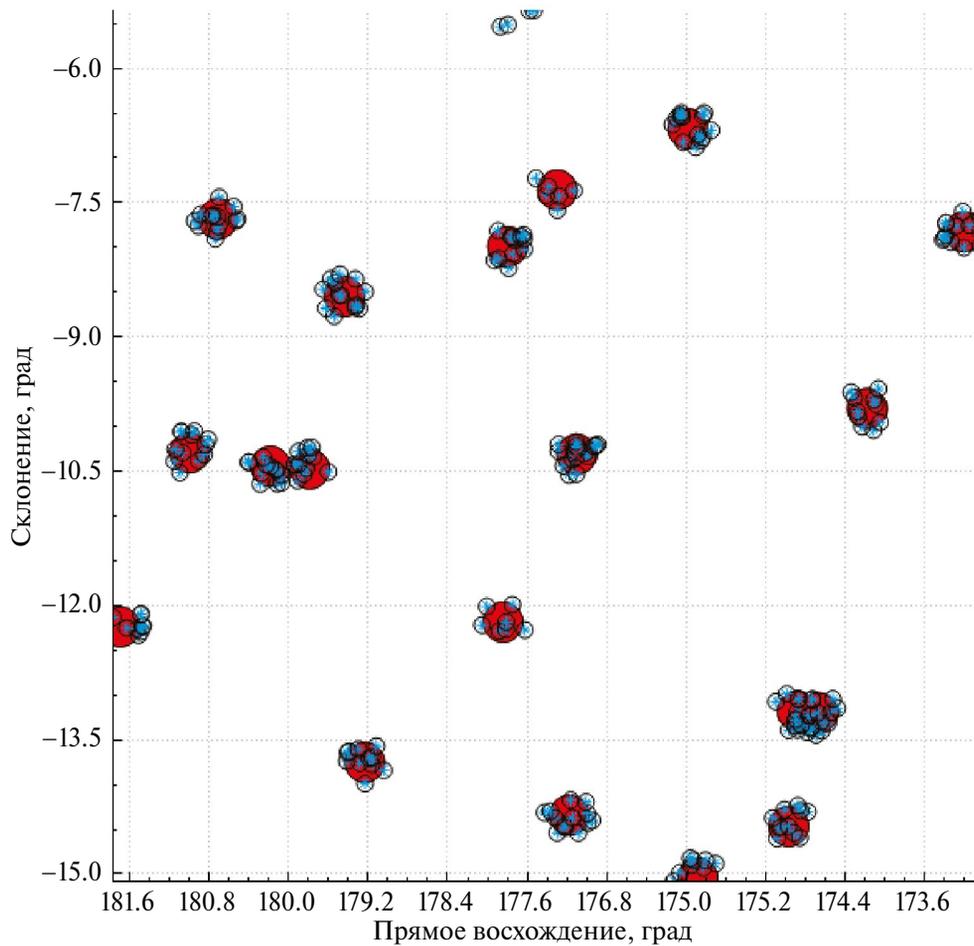


Рис. 13. Компьютерная реконструкция участка небесной сферы размером $8^\circ \times 8^\circ$. В центре участка микрокаталог звезды HIP 57587. Красным кружком обозначена основная звезда микрокаталога, кружками с синим центром — звезды окружения.

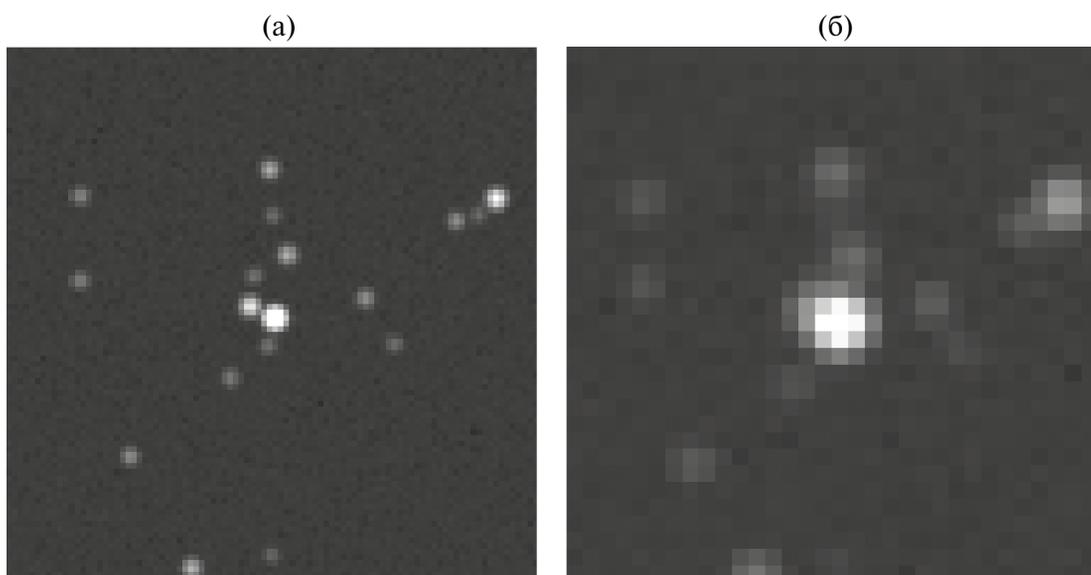


Рис. 14. Пример проецирования микрокаталога звезды HIP 57587 на матрицы приборов с разными размерами пикселей: (а) — с пикселем 5.5 мкм; (б) — с пикселем 16 мкм.

Для демонстрации работы программы Star Manager на рис. 14 показана проекция этого микрокаталога на матрицу двух приборов с разными размерами пикселей матричного приемника излучения.

Программа Star Manager может работать в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме программа позволяет детально анализировать ближайшие окрестности любой звезды основной группы, выбирать уровни отсечки и способы локализации, определять величину систематической и случайной ошибок измерения небесных координат звезды при заданных условиях, вносить поправки в бортовой каталог и убеждаться в их целесообразности. В автоматическом режиме программа позволяет повторять отработанные в ручном режиме действия оператора.

Обработанные в программе Star Manager списки в виде протоколов возвращаются в программу Catalog Guide, объединяются с протоколами, сделанными на основании других списков звезд. Собранные таким образом материалы становятся основой для составления бортового каталога звезд для определенного типа прибора. Функционалы обеих программ и возможности их взаимодействия иллюстрирует рис. 15.

Работа с программами Catalog Guide и Star Manager требует хорошего понимания принципов работы звездных датчиков ориентации и накопления определенных навыков. При наличии того и другого этот программный комплекс позволяет не только составлять звездные каталоги для приборов, но и выполнять разностороннее их моделирование на этапе разработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работы по наблюдению и съемке звезд в интересах решения навигационных задач в космосе начались в ИКИ РАН в 1960-е годы прошлого века. В 1980-е годы они переросли в разработки съемочных систем для наблюдения планет и малых тел Солнечной системы, а также, в создание нового типа звездных датчиков, способных определять ориентацию КА за доли секунды по снимкам произвольных участков небесной сферы. Именно такие приборы в последние десятилетия стали неотъемлемой составляющей систем управления современных КА. Их метрологической основой стали бортовые звездные каталоги, составляемые на основе фундаментальных каталогов: SAO, Gaia и Hipparcos.

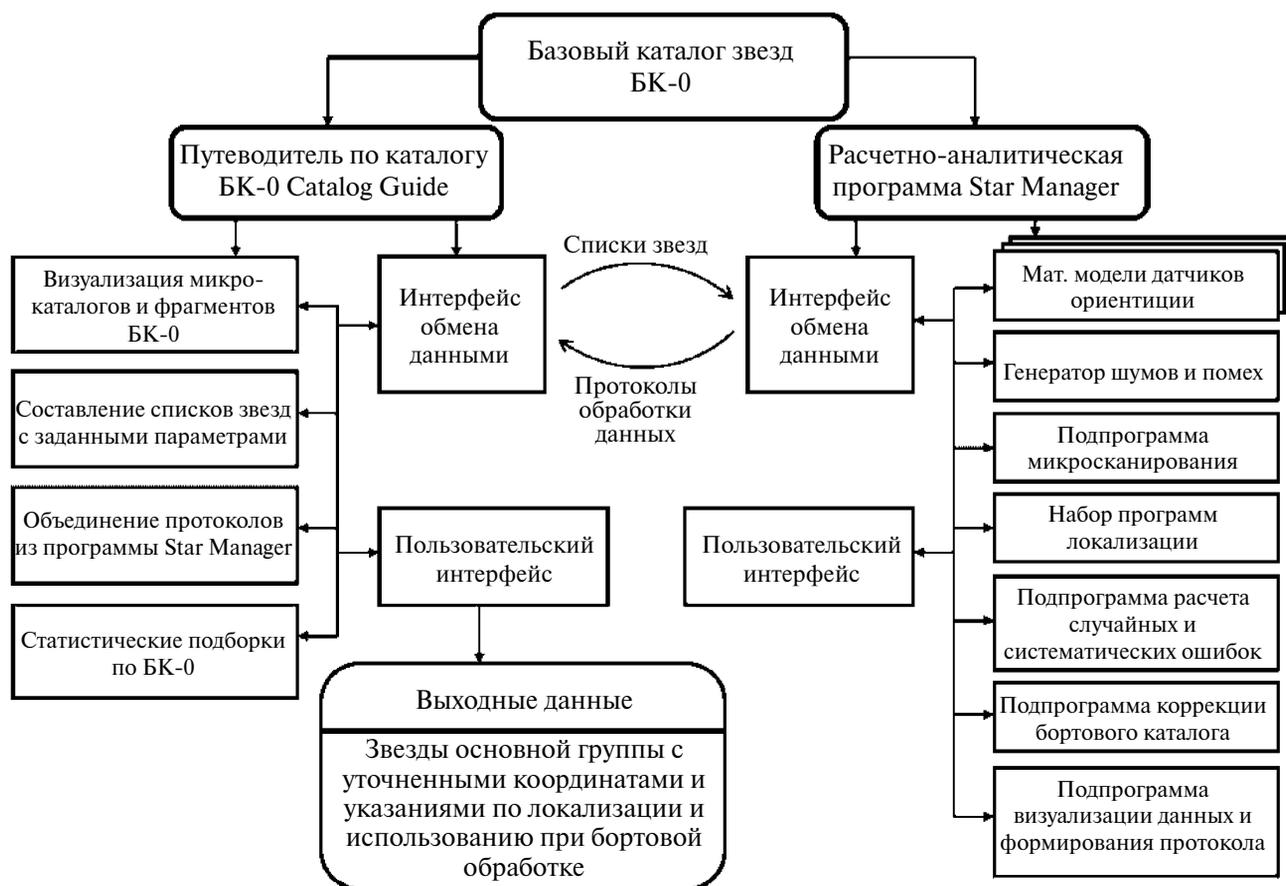


Рис. 15. Иллюстрация функционалов и возможностей взаимодействия программ Catalog Guide и Star Manager.

Работа над базовым звездным каталогом для датчиков ориентации, включая подготовку эксперимента на КА Ресурс-П № 3, его проведение и обработку данных, заняла около десяти лет. Много времени ушло на разработку ПМО для анализа и обработки экспериментальных данных. В это же время уточнялись и создавались заново математические модели звездных датчиков ориентации разных типов, модели их собственных шумов, а также шумов, обусловленных взаимодействием пикселей матричного приемника излучения с падающим на них потоком фотонов от звезд разной магнитуды и спектра излучения.

Затраты сил и времени на разработку и составления базового каталога вполне окупались возможностью полной или почти полной автоматизации процесса составления каталогов звезд для датчиков ориентации с учетом их ключевых параметров.

Следует отметить, что первые эксперименты по составлению бортовых каталогов в соответствии с изложенной в статье логикой и их внедрению в опытные образцы звездных датчиков ориентации дают позитивные результаты. Вместе с тем в связи с использованием базового каталога, состоящего из множества микрокаталогов, возникают и новые проблемы. Сохранение высокой точности измерений в звездных датчиках ориентации потребует постоянной поддержки базового каталога.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аванесов Г.А., Белинская Е.В., Брысин Н.Н., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д.* Астрометрическая модель звездного датчика ориентации космического аппарата // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 1. С. 89–98.
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98
- Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Куркина А.Н., Сметанин П.С.* Технология наземной обработки данных о координатах звезд в целях повышения точности геопривязки снимков Земли из космоса // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018а. Т. 15. № 6. С. 31–38.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-31-38
- Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д.* Особенности измерения координат звезд оптико-электронными приборами с различным угловым разрешением // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018б. Т. 15. № 6. С. 39–47.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47
- Аванесов Г.А., Василейская А.Н., Никитин А.В., Филиппова О.В., Юматов Б.А.* Исследование фотометрических характеристик изображений звезд в реальных условиях эксплуатации звездных датчиков // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021а. Т. 18. № 6. С. 116–126.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-116-126
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Алексакин Е.П.* Математическое обеспечение определения ориентации КА по изображениям звездного неба // *Оптико-электронные приборы в космических экспериментах*. М.: Наука, 1983. С. 124–157.
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И., Собчук В.Г., Форш А.А.* Алгоритмы определения ориентации космического аппарата по бортовым астроизмерениям // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2003. Т. 46. № 4. С. 31–37.
- Аванесов Г.А., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Снеткова Н.И., Собчук В.Г., Форш А.А.* Программное обеспечение определения астроориентации космических аппаратов с помощью звездного координатора (Астро) // *Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2000610308*. Рег. 2000.
- Аванесов Г.А., Куркина А.Н., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д.* Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018в. Т. 15. № 6. С. 60–68.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-60-68
- Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д., Юматов Б.А.* Базовый каталог звезд для датчиков ориентации КА // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019а. Т. 16. № 5. С. 65–74.
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74
- Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д.* Исследования звезд участка небесной сферы двумя датчиками ориентации БОКЗ-М60 // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018 г. Т. 15. № 6. С. 48–59.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-48-59
- Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д.* Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2018д. Т. 16. № 6. С. 69–81.
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-16-6-69-81
- Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д.* Фотометрическая модель звездного датчика ориентации // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2019б. Т. 16. № 5. С. 75–84.
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84
- Аванесов Г.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д.* Моделирование влияния шумовых факторов на точность измерения координат звезд // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021б. Т. 18. № 1. С. 61–69.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-61-69

- Аванесов Г.А., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д.* Моделирование изображений звездного неба в задачах наземной отработки датчиков ориентации // *Соврем. пробл. дистанц. зондир. Земли из космоса*. 2021в. Т. 18. № 2. С. 82–94.
DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94
- Зиман Я.Л., Томилова А.А.* Определение ориентации космических аппаратов по снимкам звезд // *Космич. исслед.* 1969. Т. 7. № 2. С. 291–298.
- Телевизионные исследования Фобоса / Ред.: Аванесов Г.А., Жуков Б.С., Зиман Я.Л. и др. М.: Наука, 1994. 168 с.
- Телевизионная съемка кометы Галлея / Ред. Сагдеев Р.З. М.: Наука, 1989. 295 с.
- Gaia Collaboration.* Gaia Data Release 1. Summary of the astrometric, photometric and survey properties // *Astron. and Astrophys.* 2016. V. 595. id. A2.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201629512>
- Gaia Collaboration.* Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties // *Astron. and Astrophys.* 2018. V. 616. id. A1.
<https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833051>
- Star Catalog: Positions and Proper Motions of 258,997 Stars for the Epoch and Equinox of 1950.0 // *Smithsonian Astrophys. Observatory Staff, Publ. Smithsonian Inst. Washington, D.C.* 1966. V. 4. № 4652. (репринт 1971)
- The Hipparcos and Tycho Catalogues // *ESA.* 1997. ESA SP-1200.
- The Palomar Digital Sky Survey; VizieR, CDS.
https://sites.astro.caltech.edu/~george/dposs/dposs_pop.html