Адаптация звёздных каталогов к условиям их применения в звёздных датчиках ориентации

Г.А. Аванесов, Н.А. Строилов, О.В. Филиппова, В.А. Шамис, Я.Д. Эльяшев

Институт космических исследований РАН, Москва 117997, Россия E-mail: philippova.ov@gmail.com

Звёздные датчики ориентации, используемые в составе систем управления многих отечественных и зарубежных КА, постоянно наблюдают небесную сферу, измеряя координаты звёзд, входящих в их бортовые каталоги. По мере развития приборов растёт точность измерения координат звёзд и всё более заметной становится разница между получаемыми результатами и каталожными значениями координат значительного числа звёзд. Она возникает изза очень больших различий в угловой разрешающей способности астрономических инструментов, используемых для составления каталогов, и звёздных датчиков ориентации. В связи с этим становится необходимым приведение бортовых звёздных каталогов в соответствие с наблюдательными возможностями приборов. Решить эту задачу можно, используя статистику прямых измерений величин необходимых поправок для координат звёзд бортового каталога. Ещё совсем недавно это был фактически единственный способ решения задачи. Но есть и другой путь: вычислить поправки, располагая всенебесным астрономическим звёздным каталогом до 13^т и используя методы математического моделирования звёздного датчика ориентации. Этот путь стал возможен благодаря Европейскому астрометрическому проекту Gaia. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки, рассматриваемые в данной статье.

Ключевые слова: звёздный датчик, астрометрия, каталог звёзд, звёзды окружения, коррекция каталога, статистический метод, метод математического проектирования

Одобрена к печати: 02.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-69-81

Введение

Бортовой каталог звёзд в датчике ориентации представляет собой его метрологическую основу. Несоответствие бортового каталога наблюдательным возможностям прибора ведёт к появлению различных ошибок измерения, многие из которых имеют скрытый характер. Такие ошибки обнаруживаются только в тех случаях, когда на борту КА или в наземных системах имеются более точные средства независимого контроля параметров углового движения. Физическим причинам несоответствия бортовых каталогов приборов оценкам величин возникающих ошибок измерения и возможным способам их устранения посвящены работы (Аванесов и др., 2018а–в).

В данной статье рассматриваются два основных подхода к решению задачи согласования бортовых каталогов с наблюдательными возможностями различных типов звёздных датчиков ориентации. Один из них основывается на статистической обработке данных прямых измерений, выполняемых звёздными датчиками ориентации в полёте. Назовём этот метод статистическим. Второй предполагает более общий подход. В его основе лежит новейший современный каталог звёзд, работа над которым сейчас идёт в Европейском космическом агентстве в рамках проекта Gaia, и предельно точная математическая модель звёздного датчика ориентации. Этот метод назовём методом математического проектирования.

Оба подхода рассматриваются в работе как взаимно дополняющие друг друга, имеющие свои преимущества и недостатки, многие из которых пока ещё далеко не очевидны.

Статистический метод анализа данных и коррекции бортовых каталогов звёздных датчиков ориентации

Накопленный за последние два года опыт разработки и применения статистического метода (Аванесов и др., 2018а—в; Ахметов и др., 2017) к анализу первичных данных, получаемых с помощью звёздных датчиков ориентации, а также выполненные эксперименты по коррекции фрагментов бортовых каталогов позволяют достаточно уверенно говорить о его достоинствах, перспективах использования и недостатках.

На *рис. 1* показана схема, в рамках которой в настоящее время реализуется статистический метод коррекции бортового каталога. «Сырая» информация от бортовых звёздных датчиков в виде измеренных ими координат звёзд на фотоприёмной матрице и сопутствующей информации подвергается обработке бортовым алгоритмом.

Промежуточные результаты вычислений остаточных рассогласований dAl и dDt, получаемые на этапе уравнивания измеренных и каталожных координат звёзд методом наименьших квадратов, накапливаются и подвергаются статистическому анализу. Дальнейшая систематизация данных организуется в виде наборов измерений координат каждой каталожной звезды. Количество измерений координат каждой звезды может быть весьма велико: порядка десятков тысяч. По ним можно судить о величине случайной S и систематической L ошибок измерения. Вычисленные координаты звезды образуют на фрагменте карты небесной сферы некоторое облако, центр которого либо совпадает, либо отстоит на величину L от каталожного значения, как это показано на *рис. 2* (см. с. 71). Осреднённые значения случайных ошибок измерения dAl_{cp} и dDt_{cp} указывают на величину систематической ошибки измерения и вносятся в бортовой каталог в качестве поправок. Далее проводится проверка внесённых исправлений. Для этого из базы данных снова берутся «сырые» измерения. По ним заново проводятся измерения координат звёзд с использованием откорректированного каталога. Процедура повторяется несколько раз. Если при очередном анализе статистики выясняется, что величина систематических ошибок измерения координат звёзд уменьшилась до заданной величины, считается, что задача коррекции каталога выполнена (Аванесов и др., 2018б, в).

К числу достоинств метода можно отнести относительную простоту его реализации, достаточно высокую эффективность и перспективу бортового применения.

Выполненный на борту КА «Ресурс-П» № 3 в 2016—2017 гг. эксперимент по исследованию работы звёздных датчиков ориентации БОКЗ-М60 показал, что применение более сложных, чем используются на борту, алгоритмов и программ обработки может повысить точность измерения параметров ориентации КА в 2–3 раза без изменения конструкторских и схемотехнических решений в бортовых приборах. Для этого была организована передача «сырых» данных, формируемых бортовыми приборами, на наземные пункты приёма и налажена их обработка в близком к реальному масштабу времени (Аванесов и др., 2018а; Ахметов и др., 2017).







Рис. 2. Иллюстрация применения статистического метода к анализу ошибок измерения координат звёзд

Во время проведения эксперимента наземными средствами выполнялась виртуальная калибровка бортовых датчиков ориентации, установленных на борту КА «Ресурс-П» № 3, по звёздам. Сами каталоги не корректировались, но из них исключались звёзды, имеющие аномально большие систематические ошибки измерения. Этих действий было достаточно для значительного повышения точности измерения параметров углового движения КА, что подтверждалось независимым методом через оценку точности геопривязки снимков земной поверхности, полученных полезной нагрузкой аппарата.

Статистический метод анализа данных, получаемых звёздными датчиками ориентации, в это время ещё только начинал формироваться. Вскоре он позволил выявить причины появления систематических ошибок в измерениях координат звёзд и указал на целый ряд недостатков в технических и методических решениях, используемых при настройке звёздных датчиков ориентации.

Исследования показали, что причиной небольших систематических ошибок величиной в несколько угловых секунд, как правило, оказывается одна или несколько звёзд 10-12 звёздной величины, которые расположены на очень маленьком, порядка десятков угловых секунд, расстоянии от каталожной звезды. Приборы, имеющие цену младшего разряда в 6-10 электрон, это прекрасно чувствуют. Большинство звёзд бортового каталога имеют такое соседство. Зная о нём, достаточно внести небольшую поправку в координаты таких звёзд.

Причиной появления больших систематических ошибок до 30 угл. с во всех исследованных случаях стало присутствие в радиусе 4—10 пикселей от центра яркости каталожной звезды другой достаточно яркой соседки. Поскольку в бортовой каталог включаются наиболее яркие звёзды данного участка, соседняя звезда обычно оказывается на две — три звёздные величины слабее каталожной.

Напомним, что прибор БОКЗ-М60 имеет угловое разрешение 55 угл. с/пиксель. Для вычисления координат звезды на матрице с внутрипиксельной точностью используется центроидный метод. Это значит, что в процесс измерения вовлечена достаточно большая, до нескольких десятков, компактно расположенная группа пикселей, покрывающая на небесной сфере весьма значительную площадь.

Наличие систематических ошибок в измерениях координат звёзд приводит к появлению систематических ошибок в вычисляемых по ним параметрах ориентации КА. При этом совокупные ошибки одной группы звёзд не совпадают с совокупными ошибками других групп. Таким образом, формируется блуждающая систематическая ошибка измерения параме-

тров ориентации КА, величина и направление которой зависят от систематических ошибок в измерениях координат используемой в каждый данный момент группы звёзд (Аванесов и др., 2018в).

Для прибора БОКЗ-М60 величина блуждающей систематической ошибки может доходить до ±3 угл. с. Обнаруживается такая ошибка только при наличии на борту других, более точных средств измерения параметров ориентации КА либо путём постобработки, когда доступна вся совокупность измерений за достаточно большой отрезок времени.

Значительно уменьшить, а вероятно, и полностью исключить систематические ошибки в измерениях координат звёзд можно, введя соответствующие поправки в координаты звёзд бортового каталога. Именно такой путь указывает статистический метод анализа первичных данных. Однако выполнять эти действия имеет смысл после того, как исчерпаны все остальные возможности. Здесь в первую очередь речь идёт о возможности повышения точности локализации звезды путём более точного выбора порога отсечки. Поскольку, как уже было показано в статьях (Аванесов и др., 2018а, б), наибольшие возмущения создают соседние с каталожными звёзды до $9-9,5^{m}$, их влияние можно учесть ещё на этапе составления бортового каталога с использованием методов математического моделирования. Для этого достаточно каталога звёзд Ніррагсоs.

Влияние менее ярких звёзд 9,5–13^т, световой поток от которых накладывается на пиксели локализованной каталожной звезды, также можно учесть, располагая соответствующим звёздным каталогом и используя методы математического моделирования.

В результате таких действий в бортовой каталог войдут рекомендуемые величины порога отсечки, обусловленные астрономическими факторами. Вот здесь и обнаруживается серьёзный недостаток в организации эксперимента по исследованию работы приборов БОКЗ-М60 на борту КА «Ресурс-П» № 3. На Землю передавались измеренные приборами координаты звёзд на фотоприёмных матрицах. Это значит, что локализация звёзд была выполнена на борту с использованием вычисленных приборами порогов отсечки, не способных учесть влияние соседних звёзд. В будущих проектах следует учесть допущенную ошибку и перейти к передаче ещё более «сырой» информации — значений яркости пикселей в окнах, где производится ло-кализация звёзд.

Анализ большого числа измерений показывает, что статистические данные по каждой звезде «размываются» по различным причинам как приборного происхождения, так и в результате воздействия внешних факторов. Наиболее характерные причины приборного происхождения связаны с неоднородностью чувствительности прибора по полю зрения и конечной точностью геометрической калибровки. Свой вклад в «размывание» статистики вносят и вычисления порога отсечки. Даже незначительные его флуктуации приводят к изменению числа пикселей, используемых для вычисления положения центра звезды на матрице. Внешние факторы носят эксплуатационный характер. Небольшие изменения угловой скорости движения КА и положения приборов по отношению к Солнцу ведут к изменениям в результатах измерения координат звёзд.

Возникает естественный вопрос, что можно считать достоверной статистикой. В статье нет на него ответа. Можно лишь отметить, что статистические данные об ошибках в измерениях координат звёзд за разные сутки не совпадают. Вполне возможно, что это результат комбинированного воздействия внутренних и внешних факторов. Появляются и решения, позволяющие повысить достоверность статистики. Например, использовать для накопления статистических данных о координатах звёзд только центральную часть поля зрения прибора, что может избавить статистику от искажений, связанных с неоднородностью чувствительности прибора по полю зрения, и от погрешностей его геометрической калибровки. При этом время, необходимое для накопления статистически достоверного объёма данных по каждой звезде, многократно возрастёт.

Относительная простота реализации статистического метода даёт основание предполагать, что в наземном варианте исполнения он получит дальнейшее развитие. Однако очень привлекательно выглядит бортовая версия метода, в котором коррекция каталога могла бы быть совмещена с задачей периодической калибровки звёздных датчиков ориентации. Малогабаритное вычислительное устройство способно совместить в себе обе эти функции и выполнять их параллельно сразу для нескольких бортовых приборов. Особенно перспективным такое решение представляется для долговременных миссий, когда одной из причин снижения точности измерений становится старение приборов.

В пользу бортового использования статистического метода говорят и его недостатки. Метод не универсален. Уточнённый на статистической основе бортовой каталог звёзд может использоваться только в среде идентичных по основным техническим характеристикам и настройкам приборов. Для приборов с другим угловым разрешением потребуется снова получать «сырые» данные с борта КА, набирать статистику и по накопленным данным измерять величины поправок в бортовой каталог. Кстати, геометрическая калибровка звёздных приборов тоже носит индивидуальный характер.

Можно и далее перечислять недостатки статистического метода, однако практика показала высокую эффективность его использования, во всяком случае в наземном варианте, в целях повышения точности геопривязки материалов космической съёмки.

Метод математического проектирования бортовых каталогов звёздных датчиков ориентации

Метод математического проектирования (ММП) бортовых звёздных каталогов предполагает, что реальная небесная сфера в компьютерной программе замещается самым полным на сегодняшний день астрономическим звёздным каталогом, а вместо звёздного датчика ориентации используется его математическая модель. Их взаимодействие устанавливается с помощью специальной программы, которая обеспечивает выборку группы звёзд из каталога, моделирует прохождение светового потока от них через оптическую систему звёздного датчика, реакцию на него матричного фотоприёмного устройства и воспроизводит особенности используемого в приборе процесса измерения координат. В результате работы программы должен быть получен список звёзд бортового каталога, в координаты которых внесены поправки, вычисленные с учётом особенностей ближайших окрестностей каждой из них и наблюдательных возможностей используемого прибора.

На *рис. 3* показана схема, в рамках которой предполагается реализация метода математического проектирования звёздных каталогов для датчиков ориентации.



Рис. 3. Метод математического проектирования бортовых каталогов

Предполагается, что ММП будет использоваться для оптимизации бортовых каталогов звёздных датчиков ориентации различных типов. Приборы, а соответственно, и их модели, могут отличаться друг от друга размером поля зрения, угловым разрешением, спектральными характеристиками и другими параметрами, которые определяют оптимальный для каждого из них состав звёзд бортового каталога.

Чтобы облегчить отбор звёзд для практической реализации ММП планируется создать специальный каталог, который условно назовём «базовым». Основу базового каталога составят ~11 000 звёзд, отобранные ИКИ РАН по каталогам SAO и Hipparcos и используемые в звёздных датчиках ориентации семейства БОКЗ уже на протяжении почти 30 лет.

В составе основной группы специально выделено 480 самых ярких звёзд. Значительная часть из них вообще не используются в бортовых каталогах, но в базовом каталоге они необходимы, чтобы учесть их влияние через передаточную функцию оптической системы прибора на близко расположенные звёзды каталога (Аванесов и др., 2018а). С этой же целью в состав базового каталога вводится ещё около 500 000 звёзд до 13^m, находящихся в ближайшем окружении каталожных звёзд в радиусе до 15 угл. мин. Указанный радиус учёта влияния соседних звёзд выбран, исходя из наиболее низкого углового разрешения, используемого в приборах семейства БОКЗ (БОКЗ-МФ имеет угловое разрешение около 2 угл. мин/пиксель), а также с учётом применяемого в них центроидного метода измерения координат звёзд. Выбранная для базового каталога предельная звёздная величина учитывает существующую сегодня реальную чувствительность приборов и перспективу её роста в ближайшем будущем.

В качестве исходных данных для составления базового каталога планируется использовать новейший звёздный каталог, разрабатываемый Европейским космическим агентством в рамках проекта Gaia (Gaia Archive — ESA, http://gea.esac.esa.int/archive/). Доступ к первой редакции этого каталога был открыт уже в 2016 г. К сожалению, тогда в каталоге ещё отсутствовали звёзды ярче 7^m, которые чаще всего используются в звёздных датчиках ориентации. Их недостаток на том этапе работы компенсировался с помощью каталога Ніррагсоs. Кроме того, в первой редакции каталога Gaia отсутствовали спектральные характеристики звёзд.

В апреле 2018 г. вышла вторая редакция каталога Gaia. Он пополнился недостающими данными, что превращает составление базового каталога в рутинную операцию.

Наиболее сложной частью решения задачи практической реализации ММП является разработка высокоточной математической модели звёздного датчика ориентации. Модель должна соответствовать прибору в такой же степени, как всенебесный каталог звёзд Gaia соответствует реальной небесной сфере, во всяком случае в той его части, которая касается излучательных способностей звёзд, их положения на небесной сфере и данных о параметрах собственного движения. На сегодня наиболее реальный путь сертификации математической модели прибора заключается в использовании для этой цели статистического метода анализа данных.

На данный момент программа отбора и коррекции положения звёзд работает в тестовом режиме. Макет базового каталога содержит пока около 300 звёзд основной группы и несколько тысяч звёзд окружения. Идёт отладка математической модели прибора путём сравнения получаемых с её помощью результатов с экспериментальными данными, полученными как во время космического эксперимента, так и путём съёмки звёзд при специально организованных наземных наблюдениях.

Рассмотрим первые результаты практического применения ММП на примере материалов, полученных при съёмке участка небесной сферы с земной поверхности. Съёмка была организована специально для оценки возможности построения достаточно точной математической модели прибора.

В этом эксперименте предпочтение было отдано наземной съёмке из-за того, что получаемые при этом материалы содержат полный объём первичной информации. «Сырая» информация в описанном в работе (Аванесов и др., 2018а) космическом эксперименте содержала вычисленные бортовым прибором координаты звёзд на фотоприёмной матрице. Это, как показала практика, сильно обедняет возможности анализа первичных данных. Наземная съёмка выполнялась с помощью прибора БОКЗ-М60, установленного на поворотную платформу. Особенность этого прибора заключается в том, что в режиме начальной ориентации он использует 8-разрядное кодирование данных. При переходе в режим слежения включается 12-разрядное кодирование. По условиям эксперимента прибор не переходил в режим слежения. Таким образом, все полученные в процессе съёмки кадры — 8-разрядные, цена младшего разряда равна ~100 электрон. В таком режиме прибор практически теряет чувствительность к присоединению к каталожным звёздам слабых источников света, но сохраняет восприимчивость к близкому соседству звёзд, отличающихся на 2–3 звёздные величины.

Всего в процессе съёмки было получено 119 кадров с интервалами между ними 8 с. Для имитации условий наблюдения звёзд при разных азимутальных углах после каждого кадра съёмки платформа поворачивалась на угол в 10°. В результате была отснята показанная на *рис. 4а* площадка диаметром 13°, на которой находятся 32 звезды, входящие в состав бортового каталога.

За счёт вращения платформы изображения звёзд образовали на фотоприёмной матрице концентрические окружности, показанные на *рис. 46*. Цвета исходящих из звёзд отрезков, обозначающих увеличенные в 200 раз величины остаточных рассогласований, соответствуют их спектральным классам.

Список каталожных звёзд площадки приведён в *табл. 1* (см. с. 76). Звёзды, отмеченные на *рис. 4а* красным цветом, попадали в поле зрения прибора всего по нескольку раз и в таблицу не включены. Остальные 27 звёзд в достаточной степени проявили свою индивидуальность, которая ниже будет проиллюстрирована примерами.

Из *табл. 1* видно, что из 27 звёзд 10 имеют систематическую ошибку измерения хуже 3 угл. с и лишь одна измерена с точностью лучше 1 угл. с.

Перечисленные в таблице звёзды вместе со звёздами окружения до 13^т включены в макет базового каталога, используемого для реализации ММП.

Звезда SAO 22191 в *табл. 1* занимает первую строку, т.е. имеет максимальное значение систематической ошибки на выбранной для исследования площадке. Именно по этой причине выберем её для оценки работы моделирующей прибор программы.



Рис. 4. Карта участка небесной сферы (*a*) и её отображение на фотоприёмной матрице в 119 кадрах съёмки (б)

N⁰	N_SAO	т	Sp	Br	Nel	Al,	Dt,	dAl_{cp} ,	dDt_{cp} ,	<i>L</i> ,	N	CKO_dAl,	CKO_dDt,	S,
п/п						град	град	угл.с	угл.с	угл. с		угл. с	угл. с	угл. с
1	22191	5,3	F5	332	12	20,28	58,32	-15,67	-4,94	9,60	119	5,34	2,62	3,83
2	21732	3,6	F8	972	11	12,53	57,90	8,69	-2,83	5,42	115	13,07	3,01	7,57
3	21775	6,2	A0	56	5	13,13	51,66	3,70	4,38	4,94	14	4,43	3,32	4,31
4	11482	2,8	B 0	1275	13	14,43	60,81	6,09	-3,94	4,94	14	28,38	13,31	19,21
5	22015	6,6	K0	85	6	17,01	57,02	-0,86	3,97	3,99	119	4,34	2,15	3,19
6	22520	6,2	B 9	46	4	25,85	58,71	-6,12	-2,27	3,90	5	6,92	3,12	4,76
7	22024	5,3	G5	274	9	17,34	55,00	6,14	-1,66	3,89	119	4,09	2,20	3,21
8	21489	4,9	B 8	264	7	8,17	54,61	3,06	3,19	3,65	14	3,99	9,66	9,94
9	21566	3,7	B 3	682	10	9,48	53,99	5,75	0,26	3,39	27	15,65	7,48	11,86
10	22578	6,2	A0	60	6	26,47	57,17	-4,45	1,84	3,03	11	4,20	3,29	4,00
11	22268	2,8	A5	1106	12	21,73	60,32	3,13	-2,41	2,87	15	5,67	5,81	6,45
12	22456	5,7	K0	175	7	24,80	58,06	4,72	0,24	2,51	34	5,87	1,97	3,67
13	22566	6,1	A2	58	5	26,35	57,62	-4,48	-0,21	2,41	12	6,46	3,12	4,66
14	22397	4,9	K0	357	8	23,76	59,32	-4,63	-0,06	2,36	22	9,91	2,71	5,74
15	21551	5,1	B 5	209	8	9,27	54,26	3,21	0,93	2,09	27	3,23	3,18	3,70
16	11484	5,5	B 9	116	6	14,45	60,45	-3,70	-0,77	1,98	23	6,99	3,81	5,14
17	21832	5,0	K0	383	9	14,00	59,06	-1,87	1,70	1,95	111	4,47	2,22	3,20
18	21855	4,8	K0	428	9	14,42	59,27	-1,13	1,79	1,88	107	4,76	2,44	3,45
19	22032	5,7	B 8	125	7	17,40	58,35	3,14	0,37	1,69	119	4,97	2,60	3,69
20	22070	4,5	A5	540	10	18,03	55,24	-1,37	1,37	1,58	119	3,45	2,23	2,97
21	22021	6,5	K0	108	7	17,04	53,59	-1,94	-0,92	1,47	119	4,38	2,81	3,83
22	21767	6,5	A5	47	4	12,98	51,60	0,23	1,26	1,27	8	2,78	2,72	3,22
23	21967	6,3	K2	130	7	16,26	52,59	-1,29	-0,96	1,24	118	4,31	2,37	3,54
24	21677	5,5	A0	175	8	11,56	55,31	0,56	1,08	1,13	108	4,99	2,52	3,80
25	22389	6,0	0	178	7	23,63	58,41	0,59	1,07	1,11	62	5,18	1,93	3,33
26	21814	6,2	A0	66	6	13,69	52,78	0,68	0,91	1,00	91	4,01	3,16	3,98
27	21609	2,5	K0	1695	16	10,36	56,63	1,27	0,29	0,76	81	10,77	5,47	8,06

Таблица 1. Основные характеристики звёзд исследуемого участка. Звёзды ранжированы по убыванию величины систематической ошибки *L*

П р и м е ч а н и е: N_SAO , m, Sp — номер, звёздная величина и спектральный класс звёзд по каталогу SAO; Al, Dt — координаты звезды по бортовому каталогу; Br — средняя интегральная яркость звезды (в градациях АЦП); Nel — среднее по всем измерениям количество пикселей в звезде; dAl_{cp} и dDt_{cp} — средние значения dAl и dDt за всю серию кадров; L — систематическая ошибка измерения координат звезды на небесной сфере в угловых секундах; N — количество кадров, на которых звезда была распознана; CKO_dAl , CKO_dDt — средне-квадратичные отклонения остаточных рассогласований по прямому восхождению и склонению звезды в угловых секундах; S — случайная ошибка измерения координат звезды в угловых секундах.

Звезда SAO 22191 и её окружение показаны на *рис. 5*, взятом из Паломарского обзора, таблица «соседей» составлена по первой редакции каталога Gaia. Большая величина систематической ошибки измерения её координат очевидным образом связана с окружением и неправильно выбираемым порогом отсечки.

Как показывает *рис. 5* (см. с. 77) и помещённая в нём таблица, в радиусе 15 угл. мин от звезды SAO 22191 находятся 124 звезды с магнитудой до 13^m. Из них в радиусе 3 угл. мин находятся 14 звёзд, одна из которых, под номером 8, имеет звёздную величину 6,8. С учётом относительно низкой чувствительности прибора только она способна внести существенный вклад в ошибку измерения. Вклад остальных 13 звёзд будет менее заметен.



Puc. 5. Звезда SAO 22191 и её окружение (оцифрованное изображение неба) по данным Паломарского обзора (DPOSS, http://www.astro.caltech.edu/~george/dposs/) и по данным первой редакции каталога Gaia (VizieR, CDS (http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR)

В соответствии с сегодняшним уровнем понимания принципов составления бортовых каталогов звёзд для датчиков ориентации звезда со столь близким соседством с другой достаточно яркой звездой не должна была бы использоваться в приборе с угловым разрешением 55 угл. с/пиксель. Они неизбежно сольются в один объект, центр которого будет достаточно сильно отличаться от координат звезды SAO 22191. Однако с точки зрения иллюстрации адекватности моделирующей прибор программы её наличие в каталоге можно считать удачей.

На *рис. 6* приведены два изображения звезды SAO 22191. Слева показан фрагмент кадра, снятый прибором БОКЗ-М60. Справа показано синтезированное моделирующей программой изображение той же звезды. На левом изображении виден фон, вызванный посторонней засветкой. Съёмка звёзд проводилась через подсвеченную городским освещением атмосферу. На правом снимке виден звёздный фон.

37	36	37	37	35	37	36	36	35	36									
37	35	35	37	38	38	36	36	35	37						1			
36	38	38	36	42	48	40	36	36	33	1	1			8	20	4		
39	39	37	37	42	58	42	35	36	35	2	2	1		9	23	5		
37	37	37	38	52	72	53	36	35	35					20	57	14		
37	36	37	39	77	242	80	40	36	36				1	64	185	45		
37	37	38	37	45	73	47	37	35	36	5	1			18	52	12		
48	39	35	37	38	39	37	37	35	35	18	5							
36	35	36	36	35	36	35	36	34	36	5	1							
36	35	38	36	36	37	35	35	36	35									
					~										6			

Рис. 6. Фрагмент кадра с изображением звезды SAO 22191: *а* — полученный при съёмке, *б* — полученный путём моделирования



Рис. 7. Графики зависимости величины ошибки измерения координат звезды SAO 22191 от порога отсечки при фиксированном азимуте

Вытянутая вверх форма модельной и оригинальной звезды отражает вполне достоверную картину слияния каталожной звезды с наиболее яркой звездой окружения. При азимуте 130° в выбранном для исследования кадре яркая звезда окружения должна находиться над каталожной звездой. Бортовая программа анализирует атмосферный фон, выбирает порог отсечки 42, локализует сдвоенный объект и вычисляет координаты его центра на матрице.

Моделирующая ММП программа, выполняя локализацию звезды, анализирует звёздный фон и строит график зависимости величины ошибки измерения от величины порога отсечки, показанный на *рис.* 7. Результаты расчёта координат звезды на фотоприёмной матрице и на небесной сфере для реального и модельного фрагментов кадра приведены в *табл.* 2. В данном случае для нас это «первое приближение».

Параметры	Первое при	иближение	Второе при	иближение	Третье приближение		
	По кадру съёмки	ММП	По кадру съёмки	ММП	По кадру съёмки	ММП	
Интегральная яркость, <i>Br</i> , град, АЦП	391	411	239	280	379	465	
Кол-во пикселей, Nel	12	11	5	7	13	12	
Порог отсечки, <i>Thr</i> , град, АЦП	42	9	61	25	41	5	
X, pix	173,43	0,43	173,41	0,41	157,14	0,14	
<i>Y</i> , pix	382,49	0,49	382,67	0,67	98,45	0,45	
Азимут, Аz, град	130,13	130,00	130,13	130,00	359,47	359,00	
<i>dX</i> , мкм	1,99	-0,09	0,39	-0,02	2,48	3,15	
<i>dY</i> , мкм	-2,52	-2,56	0,27	-0,21	1,71	2,62	
<i>dAl</i> , угл. с	-4,60	13,15	2,95	1,70	-16,72	20,77	
<i>dDt</i> , угл. с	-10,72	5,41	-0,45	0,05	-5,39	8,80	

Таблица 2. Результаты расчёта координат звезды SAO 22191 при разных значениях порогов отсечки и азимутах

В рамках «первого приближения» с помощью моделирующей программы подобран приближённый вариант порога для модельного кадра, в котором примерно совпадают координаты звезды на матрице, значения интегральной яркости и число пикселей. Порог отсечки в модельном кадре оказался равным 9. Полученные при этом ошибки измерения координат звезды *dAl* и *dDt* по реальному и модельному кадрам значительно отличаются друг от друга.

Значения порогов для «второго приближения» выбирались из следующих соображений. Порог для фрагмента реального кадра бортовая программа устанавливала, анализируя уровень окружающего звезду фона, происхождение которого может иметь аппаратную природу, либо, как в нашем случае, быть результатом внешней засветки. Среднее значение фона в данном случае равно 36.



Рис. 8. Зависимость величины ошибки измерения координат звезды SAO 22191 от азимута при пороге отсечки 25

В то же время моделирующая программа выделяет сигнал от звезды, анализируя звёздный фон. В соответствии с графиком, приведённым на *puc*. 7, его оптимальное значение равно 25. Разумно предположить, что оба порога в реальном приборе должны быть суммированы.

Из *табл. 2* видно, что полученные при таком пороге ошибки измерения координат звезды имеют приемлемый характер как для реального снимка, так и для модели.

Однако это ещё не конец пути. Посмотрим, какие значения примут ошибки измерения координат звезды при различных азимутальных углах. Моделирующая программа умеет строить график зависимости ошибки измерения координат звезды от азимутального угла при фиксированном пороге отсечки, показанный на *рис. 8*. При вращении по азимуту происходит перераспределение потока поступающих на пиксели матрицы фотонов, что влияет на величину ошибки измерения. Свой вклад в ошибку измерения вносит и асимметрия фигуры сдвоенной звезды.

Обработка реального изображения звезды SAO 22191, полученного при азимутальном угле около 359°, подтверждает правильность модельных расчётов, что видно из *табл. 2* в «третьем приближении».

В целом моделирующая прибор программа вполне адекватно передаёт особенности достаточно сложной звезды SAO 22191 и может использоваться далее для составления макета бортового каталога небольшого участка небесной сферы, что и планируется сделать в самое ближайшее время. Что же касается самой звезды SAO 22191, то её использование в бортовом каталоге прибора с угловым разрешением 55 угл. с/пиксель возможно при пороге отсечки, вычисленном с учётом влияния соседней звезды, но нежелательно.

Проверенная на других звёздах моделирующая программа даёт хорошее совпадение с экспериментальными данными. В системе координат матрицы точность совпадения оценивается примерно в 0,5 мкм. В системе небесных координат ошибка не превышает 1,5–2,5 угл.с, что для начала совсем неплохо.

Заключение

Как следует из данной статьи, оба рассматриваемых в ней метода приведения бортовых звёздных каталогов в соответствие с наблюдательными возможностями датчиков ориентации находятся в стадии разработки. Их различия заключаются в том, что в основе статистического метода лежат реальные измерения, получаемые звёздным датчиком ориентации в процессе наблюдения звёзд небесной сферы, а в методе математического проектирования и то, и другое замещается моделями. Модель небесной сферы на основе каталога Gaia не вызывает сомнений, в то время как возможность построения достаточно точной математической модели звёздного датчика ориентации, несмотря на обнадёживающие результаты, приведённые в данной статье, остаётся под вопросом. Необходимо провести большую работу по уточнению математической модели прибора и её верификации, которую разумно выполнять путём сравнения с результатами реальных измерений, т.е. с использованием статистического метода.

При этом надо понимать, что полномасштабное использование метода математического проектирования бортовых звёздных каталогов потребует значительных интеллектуальных затрат на создание достаточно сложных программ и технологий, обеспечивающих оптимизацию. Однако цель оптимизации — избавить приборы от систематических ошибок в измерениях координат звёзд, обусловленных астрономическими факторами, — оправдывает затраты. В качестве основного результата этой работы можно ожидать, что высокая точность измерения параметров ориентации будет достигаться с помощью нового поколения малогабаритных звёздных приборов, что принципиально важно для изделий космической техники.

Литература

- 1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018а) Особенности измерения координат звёзд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 39–47
- 2. *Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д.* (2018б) Исследование звёзд участка небесной сферы двумя датчиками звёздной ориентации БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. №6. С. 48–59.
- 3. *Аванесов Г.А., Куркина А.Н., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д.* (2018в) Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 60–68.
- 4. Ахметов Р. Н., Еремеев В. В., Кузнецов А. Е., Мятов Г. Н., Пошехонов В. И., Стратилатов Н. Р. Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исследование Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44–53.

Adaptation of star catalogues for their application in star trackers

G.A. Avanesov, N.A. Stroilov, O.V. Filippova, V.A. Shamis, Ya. D. Elyashev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia E-mail: philippova.ov@gmail.com

Star trackers used in the attitude control systems of many Russian and foreign spacecraft are constantly observing the celestial sphere, measuring the coordinates of the stars included in their onboard catalogues. With the development of instruments, the accuracy of measurement of stars' coordinates improves, and the difference between the obtained results and catalogue coordinate values of a significant number of stars becomes more and more noticeable. It arises from very large differences in the angular resolution of astronomical instruments used for cataloguing and star trackers. In this regard, it becomes necessary to bring the onboard star catalogues into conformity with the observational capabilities of the star trackers. This problem can be solved by using statistics of direct measurements of the required corrections for the stars' coordinates of the onboard catalog. Until quite recently, it was actually the only way to solve the problem. But there is another way — to calculate these corrections, having an all-sky astronomical star catalog up to the 13th star magnitude and using mathematical simulation techniques for the star tracker. This way has become possible thanks to the European astrometric project Gaia. Both methods have their advantages and disadvantages discussed in this article.

Keywords: star tracker, astrometry, stars catalogue, stars of neighborhood, catalogue correction, statistical method, method of mathematical design

Accepted: 02.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-69-81

References

- 1. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Smetanin P.S., Filippova O.V., Elyashev Ya.D., Osobennosti izmereniya koordinat zvezd optiko-elektronnymi priborami s razlichnymi uglovymi razresheniyami (Features of coordinate measuring by opto-electronic star trackers with different angular resolution), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 39–47.
- Avanesov G.A., Snetkova N.I., Filippova O.V., Elyashev Ya.D., Issledovanie zvezd uchastka nebesnoi sfery dvumya datchikami zvezdnoi orientatsii BOKZ-M60 (Studying the stars of the celestial sphere section by two BOKZ-M60 star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 48–59.
- Avanesov G.A., Kurkina A.N., Filippova O.V., Elyashev Ya.D., Experiment po korrektsii fragmenta bortovogo kataloga pribora BOKZ-M60 (An experiment for the correction of the onboard catalogue fragment of the BOKZ-M60 star tracker), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 60–68.
- 4. Akhmetov R. N., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti KA "Resurs-P" (High-precision geolocation of Earth surface images from the Resurs-P spacecraft), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53.