Базовый каталог звёзд для датчиков ориентации космических аппаратов

Г. А. Аванесов, Н. И. Снеткова, Н. А. Строилов,
О. В. Филиппова, В. А. Шамис, Я. Д. Эльяшев, Б. А. Юматов

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

Постоянно растущие требования по повышению точности угловых измерений в звёздных датчиках ориентации заставили пересмотреть подходы к формированию бортовых каталогов звёзд. Возникла необходимость учёта особенностей ближайших окрестностей каталожных звёзд. Для этого на основе каталогов Hipparcos и Gaia было составлено около 11 000 микрокаталогов вокруг наиболее ярких звёзд небесной сферы. Каждый из них содержит в центре одну звезду с магнитудой до $7,8^m$ и все звёзды окружения до 13^m в радиусе $15'$. Микрокаталоги объединены в «базовый каталог звёзд», который в ближайшей перспективе будет использоваться для составления бортовых каталогов звёзд датчиков ориентации космических аппаратов семейства БОКЗ. Для работы с базовым каталогом разработано специальное математическое обеспечение, которое визуализирует его фрагменты и составляет списки звёзд с заданными параметрами. Расчётно-аналитическая часть программы содержит математические модели звёздных датчиков ориентации семейства БОКЗ, а также математический аппарат, позволяющий детально моделировать наиболее тонкие элементы бортовой обработки данных. В статье приводится краткое описание базового каталога, а также иллюстрируется работа с ним с помощью специально разработанных для этой цели программ.

Ключевые слова: звёздный датчик, астрометрия, каталог звёзд, систематическая ошибка, случайная ошибка, фоновое излучение, звёзды окружения, центроидный метод, коррекция каталога

Одобрена к печати: 04.10.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74

На протяжении нескольких десятилетий, начиная с середины 60-х гг. прошлого века, в качестве основы для проектирования бортовых каталогов звёзд датчиков ориентации космических аппаратов (КА) использовался астрономический каталог Смитсоновской астрофизической обсерватории (Smithsonian Astrophysical Observatory — SAO). Каталог SAO, опубликованный в 1966 г., содержит 258 997 звёзд до 9,5 звёздной величины. Это не первый в мире каталог звёзд, который охватывает всю небесную сферу, но именно в нём впервые с относительно высокой точностью были указаны параметры собственного движения звёзд, что замедлило процесс его старения.

Новая эпоха звёздных каталогов началась с запуска в 1989 г. астрометрического космического аппарата Hipparcos (The Hipparcos Space Astrometry Mission, <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>). Результатом этой миссии стал каталог Hipparcos, содержащий данные о 118 218 звёздах с точностью положений и параллакса на уровне $0,001''$. Впервые в истории астрономии координаты звёзд и их спектральные характеристики были измерены с помощью одного инструмента, причём находящегося за пределами земной атмосферы.

Следующим крупным шагом в развитии звёздных каталогов, несомненно, станет запущенный в декабре 2013 г. космический аппарат Gaia (Global Astrometric Interferometer for Astrophysics). Главная его задача — составление подробной карты звёзд нашей Галактики с точностью в 40 раз выше, чем это было возможно в миссии Hipparcos. Каталог, составленный по результатам миссии Gaia (Gaia Archive, <http://gea.esac.esa.int/archive/>), вероятно, станет основным инструментом для астрономов на многие годы. Свободный доступ к материалам этого проекта открыт уже с конца 2016 г.

Появление каталога Gaia позволило увидеть то, что большинство звёзд, угловые расстояния между которыми используются в качестве метрологической основы в датчиках ориентации

КА, в действительности находятся в окружении весьма большого числа менее ярких звёзд, вносящих свой вклад в результат измерения. Эффект присоединения соседних звёзд, возникающий из-за низкой угловой разрешающей способности датчиков ориентации и используемого в них центроидного метода измерения координат, был известен давно на основе исследования экспериментальных данных. Однако именно каталог Gaia показал масштабность этого явления и указал пути ликвидации возникающей при этом ошибки измерения: зная окружение каждой каталожной звезды, можно заранее выбрать оптимальный способ её локализации, определить величину систематической ошибки вычисления координат и внести соответствующую поправку в её координаты в бортовом каталоге.

Таким образом, для того чтобы решить задачу устранения ошибок измерения координат звезды, вызванных близким соседством других звёзд, необходимо подробное описание ближайших окрестностей каждой из них. Это значит, что для каждой каталожной звезды необходимо создать свой микрокаталог. Совокупность микрокаталогов для всех звёзд, имеющих перспективу включения в бортовые каталоги различных звёздных приборов, образует «базовый каталог звёзд для датчиков ориентации КА» (Аванесов и др., 2018а–г).

Рассмотрим основные принципы, заложенные авторами этой статьи в формирование базового каталога в первоначальной редакции (далее — БК-0). Присвоение нулевого уровня редакции базового каталога в данном случае означает, что он предназначен для исследовательских целей, в первую очередь — для изучения возможности повышения точности измерения ориентации в звёздных датчиках путём совершенствования бортового каталога.

Рис. 1. Принципы формирования базового каталога БК-0

Использованные в процессе формирования БК-0 принципы иллюстрируются рис. 1. Включённые в БК-0 звёзды условно разделены на основную группу и группу звёзд окружения. В основную группу вошло 10857 звёзд из каталога Hipparcos. Большинство из них использовалось в разное время и в разных сочетаниях в звёздных каталогах приборов Института космических исследований РАН (ИКИ РАН) начиная с 1967 г. В основной группе выделена подгруппа из 480 наиболее ярких звёзд, 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 звёзды каталога. Остальные 10 377 звёзд из Hipparcos идентифицированы в каталоге Gaia. Каждая из них помещена в центр микрокаталога вместе с её окружением, включающим все звёзды из каталога Gaia до 13^m в радиусе $15'$. Общее число звёзд окружения составило 364 406. Адресная система БК-0 использует номера звёзд каталога Hipparcos. По нему из памяти компьютера вызывается микрокаталог звезды.

Радиус микрокаталогов $15'$ выбран с учётом возможного влияния звёзд окружения на результат измерения координат центральной звезды исходя из наиболее низкого углового разрешения, используемого в приборах семейства БОКЗ (Блок определения координат звёзд). Один из них, БОКЗ-МФ, имеет угловое разрешение около 2 угл. мин/пиксель. Кроме того, выбранный радиус учитывает применяемый в приборах центроидный метод измерения координат звёзд, а также установленный для приборов диапазон допустимых для них угловых скоростей.

Выбранная для базового каталога предельная звёздная величина звёзд 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 звёздами окружения до 15^m .

В БК-0 для звёзд основной группы спектральные характеристики, координаты, звёздные величины и параметры собственного движения заимствованы из каталога Hipparcos. Звёздам окружения временно присваиваются спектральные характеристики центральной звезды микрокаталога. Астрометрические параметры и звёздные величины звёзд окружения заимствованы из каталога Gaia. Все звёзды приведены на эпоху J2000.

Каталог БК-0 и его последующие версии допускают расширение как по числу звёзд основной группы, так и по звёздам окружения с указанием их индивидуальных спектральных классов.

Для работы с БК-0 созданы и находятся в стадии отработки две специальные программы, которые предназначены для выполнения совокупности технологических операций по формированию бортовых каталогов звёзд датчиков ориентации, оптимизированных в соответствии с наблюдательными возможностями каждой конкретной группы приборов и специфическими особенностями ближайших окрестностей каждой каталожной звезды. Одна из программ — Catalogue Guide — предназначена для визуализации микрокаталогов и состоящих из них виртуальных кадров, имитирующих наблюдение небесной сферы звёздным датчиком ориентации с выбранным оператором полем зрения. Кроме того, в задачу Catalogue Guide входит выборка из БК-0 микрокаталогов с заданными параметрами и формирование из них упорядоченных определённым способом списков звёзд. Составленные в Catalogue Guide списки передаются в программу Star Manager.

Вторая программа — Star Manager — носит расчётно-аналитический характер. Там каждый микрокаталог анализируется, подбираются оптимальные условия для его обработки, которые затем заносятся в составляемый программой протокол. В нём уточняются небесные координаты звезды основной группы и условия её локализации. Для этого в программе собраны фотометрические и астрометрические модели звёздных датчиков ориентации семейства БОКЗ, характерные для приборов модели шумов и помех, а также математический аппарат проецирования содержащихся в БК-0 звёзд на матрицу прибора и обратно на небесную сферу. Кроме того, программа может применять различные способы локализации звёзд на матрице, вычислять их координаты и величины случайных и систематических ошибок измерения.

Программа Star Manager может работать в ручном и автоматическом режимах. В ручном режиме она 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. При этом программа может пропустить через себя списки звёзд любой длины или весь базовый каталог, сформировать протокол, отражая в нём внесённые в координаты звёзд поправки, величины ожидаемых ошибок измерения координат звёзд, а также условия локализации, при которых эти результаты могут быть получены.

Обработанные в программе Star Manager списки в виде протоколов возвращаются в программу Catalogue Guide, объединяются с протоколами, сделанными на основании других списков звёзд. Собранные таким образом материалы становятся основой для составления бортового каталога звёзд определённого типа прибора.

Схема взаимодействия и функционалы обеих программ показаны на *рис. 2*.

Рис. 2. Схема взаимодействия и функционалы программ Catalogue Guide и Star Manager

По оценке программы Catalogue Guide в сегодняшнем виде звёзды основной группы каталога БК-0 представлены спектральными классами, приведёнными в *табл. 1*.

Таблица 1. Распределение звёзд основной группы в БК-0 по спектральным классам

Спектральный класс	Количество звёзд в базовом каталоге*	Количество звёзд в каталоге Hipparcos ($M_V \leq 8$)
K	3126	12 555
A	2320	8313
F	1635	7310
B	1628	5342
G	1379	5832
M	689	1785
	10 777	41 137

* Ещё 80 звёзд БК-0 относятся к другим спектральным классам.

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

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

Количество звёзд окружения	Радиус окрестности звёзд основной группы, угл. мин														
	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

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

В полном виде таблица содержит более 400 строк. Из неё следует, что 4985 звёзд основной группы имеют от 2 до 21 звёзд окружения в радиусе $15'$. Ещё 4785 звёзд имеют в радиусе $15'$ от 21 до 99 звёзд окружения. А ещё 605 звёзд основной группы на той же площади имеют в своём окружении от 100 до 426 звёзд.

В зависимости от угловой разрешающей способности звёздного датчика разработчику его бортового каталога предстоит выбрать один из столбцов таблицы. Например, для большинства приборов семейства БОКЗ наиболее подходит столбец «5'». Функция рассеяния точки у этих приборов представляет собой близкое к гауссоиду распределение с полушириной от $1,2$ до $2,5'$. Локализация звезды такого размера на матрице при отсутствии соседей не представляет проблемы. Более того, не должно возникнуть затруднений и при её локализации в движении. В любую сторону до ближайшего соседа имеется запас в $2,5'$. Таким образом, верхняя точка столбца «5'» обещает дать разработчику бортового каталога более 1000 звёзд, свободных от соседей в избранном радиусе окрестности, что уже неплохо. Остальные звёзды бортового каталога придётся набирать в том же столбце в последующих строках.

В то же время столбцы «1'», «2'» и «3'» наименее пригодны для приборов семейства БОКЗ. Близко расположенные соседи из первых двух столбцов будут придавать распределению яркости звезды на матрице асимметрию, что ведёт к появлению систематической ошибки измерения её координат. Соседи, отстоящие от звезды основной группы на $3'$, могут давать ещё более плохой и непредсказуемый эффект. В зависимости от малых флуктуаций порога отсечки или от азимута наблюдения соседи могут попеременно присоединяться или отсоединяться от звезды основной группы, внося значительные случайные ошибки в измерения её координат.

Наличие соседей в самой ближайшей окрестности звёзд основной группы — не редкость. В каталоге БК-0 3026 звёзд в радиусе $2'$ имеет по одной соседке, 1172 звезды — по две. Но и здесь есть свои рекордсмены: у 12 звёзд в радиусе $2'$ находится от 10 до 31 соседки.

Нежелательные для использования в каком-то конкретном типе приборов звёзды могут заранее исключаться из бортового каталога на этапе его составления. Для этого достаточно составить их список, задав в программе Catalogue Guide соответствующие параметры.

В качестве примера на *рис. 3а* показан микрокаталог звезды HIP 57587, а на *рис. 3б* — компьютерная реконструкция участка небесной сферы размером $8 \times 8^\circ$, составленная из микрокаталогов БК-0, в центре которого она находится. Как видно, на этой площадке нет ни одной звезды, не имеющей звёзд окружения.

*Рис. 3. Изображения из Catalogue Guide:
а — микрокаталог звезды HIP 57587; б — кадр $8 \times 8^\circ$ с ней в центре*

В программу Star Manager на данный момент включены модели приборов БОКЗ-М60, БОКЗ-М60/1000, мБОКЗ-2 и БОКЗ-МР, а также нескольких экспериментальных образцов.

Математическая модель прибора задаётся в программе Star Manager относительно небольшим набором параметров (пример для БОКЗ-М60 см. ниже). За последние десять лет около 50 приборов такого типа уже было использовано в системах управления отечественных КА, и их эксплуатация продолжается. По ним собрана обширная статистика, позволяющая сделать вполне достоверной математическую модель. Кроме того, от приборов этого типа получен большой объём измерений, с помощью которых можно верифицировать вновь разрабатываемые программы расчётно-аналитической направленности, такие как Star Manager.

Набор параметров, по которым задаётся математическая модель прибора БОКЗ-М60 в программе Star Manager

Фокусное расстояние объектива	60 мм
Диаметр входного зрачка	28 мм
Параметр функции Гаусса	0,5–1,0 пиксель
Спектральное пропускание оптической системы.	задаётся таблично по результатам измерения
Квантовая эффективность матрицы	задаётся таблично по паспорту производителя
Размер пикселя матрицы.	0,016 мм
Цена младшего разряда АЦП	6 е
Разрядность АЦП	12
Уровень темнового сигнала, ЕМР	задаётся вручную
СКО приборного шума, ЕМР	задаётся вручную
Фотонный шум	вкл./выкл.

В качестве допущения в программе Star Manager принято, что математическая модель прибора всегда работает только с одним микрокаталогом, диаметр которого не превышает 30', проецируемым параллельно оптической оси объектива в центр матричного приёмника излучения. При этом считается, что в выбранном угле поля зрения в системе «объектив — матрица» отсутствуют какие-либо геометрические искажения.

Оператор может вызвать любой микрокаталог из БК-0, указав для этого номер звезды по каталогу Hipparcos. Программа в ответ предъявит оператору состав вызванного микрокаталога в табличном виде и визуализирует его центральную часть растром размером 16×16 пикселей, вписав в каждый из них значение его яркости. При этом указанным в каталоге координатам звезды соответствует центр подкрашенного пикселя (рис. 4).

Рис. 4. Пример визуализации центральной части микрокаталога звезды HIP 57587 в программе Star Manager: а — отображены все находящиеся в пределах площадки звёзды; б — оператором введён порог отсечки в 10 EMP; в — локализация звезды завершена

На рис. 4а показан уменьшенный растр размером 10×10 пикселей. На нём видна центральная часть цифровой модели микрокаталога звезды HIP 57587 и её ближайшая окрестность. Центральная звезда и её соседи отображены на рисунке геометрически правильно, в соответствии со звёздным каталогом Gaia. То же самое и по яркости: она отображается на экране числами в единицах младшего разряда (ЕМР) в соответствии с излучательной способностью звёзд и фотометрической моделью прибора. Оператор может по своему усмотрению ввести порог отсечки и увидеть соответствующие его действиям изменения границ и значений яркости, отображаемых на экране объектов (см. рис. 4б).

Из рис. 4, на котором отображена та же звезда, что и на рис. 3а (HIP 57587), следует, что в радиусе 5' от неё находится ещё пять источников излучения, а шестой расположен непосредственно на нанесённой на рис. 3а линии окружности. Введение порога отсечки в 10 EMP, показанное на рис. 4б, отрезает звёздный фон и делает более чёткими границы звезды, но не приводит её фигуру к симметрии. Обратная проекция измеренных координат центра звезды через объектив прибора на небесную сферу с помощью программы Star Manager указывает на ошибки данного единичного измерения координат звезды по осям склонения и прямого восхождения в 4,1 и 1,8" соответственно. Программа рекомендует дальнейшее уменьшение числа локализованных пикселей.

На рис. 4в показано распределение яркости звезды HIP 57587 после завершения процедуры локализации. Числа, характеризующие электрический отклик пикселей матрицы на воздействие идущих от звезды фотонов, указывают на то, что асимметричный характер распределения яркости сохранился. Симметрия остаётся нарушенной вкладом фотонов от одной из соседних звёзд. Повторная обратная проекция измеренных координат центра звезды через объектив прибора на небесную сферу с помощью программы Star Manager показывает, что ошибки данного единичного измерения координат звезды по осям склонения и прямого

восхождения уменьшились до величин 1,7 и 0,9" соответственно. Выполненная затем серия измерений координат этой звезды при разных азимутах подтверждает сохранение асимметрии в её распределении яркости. Это свидетельствует о систематическом характере ошибки измерения. Для звёзд, устойчиво демонстрирующих систематический характер ошибки измерения, вносятся поправки в их небесные координаты в бортовом каталоге.

Локализация звезды — самый тонкий этап в обработке данных в звёздном датчике ориентации. Локализовать звезду — это значит отобрать для дальнейшей обработки компактную группу пикселей, ей принадлежащую. От точности локализации звезды зависит точность измерения её координат на матрице. Всё дальнейшее — сугубо математические процедуры, которые при современной технике могут производиться практически с любой требуемой точностью.

Локализация звёзд в программе Star Manager реализована в нескольких вариантах алгоритма на фоне раздельного и совместного воздействия шумов разной природы и интенсивности:

- структурного шума или методической ошибки, возникающей в приборе в результате попиксельной дискретизации изображения звезды;
- фотонного шума, величина которого определяется яркостью наблюдаемых звёзд;
- приборного шума, связанного с техническими характеристиками прибора, изменяющимися за время эксплуатации прибора в космосе;
- точечных помех в виде одиночных пикселей с неизменными во времени значениями яркости, возникающими на матрице в результате длительного воздействия на неё протонов космического пространства.

Приборный шум задаётся в программе как СКО значений яркости пикселей матрицы в пределах от 1 до 30 ЕМР. Эти величины взяты из опыта эксплуатации. Прибор БОКЗ-М60 после сборки и настройки имеет СКО приборного шума на уровне 2–3 ЕМР. В дальнейшем уровень приборного шума под воздействием условий эксплуатации может измениться в сторону повышения. Величина изменений зависит от типа орбиты. Например, приборы БОКЗ, установленные на Международной космической станции (МКС) почти 20 лет назад, деградировали незначительно. СКО шума этих приборов на сегодня возросло не более чем в 2–3 раза. В то же время при полёте по более высоким орбитам в результате бомбардировки высокоэнергичными протонами на фотоприёмном устройстве звёздных приборов возникают структурные повреждения, приводящие к росту СКО шума до 10 и даже 20 ЕМР. Предельным для функционирования приборов на данном этапе считается величина в 30 ЕМР. Приборы сохраняют работоспособность при более высоких значениях СКО шума, но точность измерений при этом падает ниже установленных норм.

Звёзды, не имеющие близких соседей, должны отображаться на матрице прибора как идеально симметричные фигуры. Так оно и есть на самом деле. Однако в восприятии прибора это сохраняется только до тех пор, пока центр звезды идеально совпадает с центром пикселя. Стоит сдвинуть изображение звезды на доли пикселя, как возникает перераспределение яркости между соседними пикселями. Строгая осевая симметрия нарушается, и возникает ошибка, вызванная пространственной попиксельной дискретизацией. Число пикселей, образующих распределение яркости звезды, как правило, невелико: обычно оно лежит в пределах от 8–10 до 30–40. Центр звезды с равной вероятностью может попадать в любое место пикселя. Перераспределение потока излучения от звезды, собранного на матрице объективом между конечным числом пикселей, порождает методическую ошибку измерения, которую моделирует программа Star Manager, используя микросканирование. В автоматическом режиме программа строит модель межпиксельного распределения яркости наблюдаемой звезды, выполняя при этом 576 измерений: 16 положений центра звезды в пределах одного пикселя при 36 значениях азимута.

Процедура микросканирования повторяется для каждой звезды многократно при разном числе локализованных пикселей и при различном шумовом воздействии. В каждом измерении вычисляется величина ошибки. Для группы из 576 измерений вычисляются два

параметра: СКО случайной составляющей ошибки по осям прямого восхождения и склонения и средние значения ошибок измерения по этим осям, которые считаются систематической ошибкой измерения. При этом ищется оптимальное число локализованных пикселей. Критерием оптимальности считается минимальное значение случайной составляющей ошибки. Значение систематической ошибки для признанного оптимальным числа локализованных пикселей вводится в качестве корректирующего параметра в бортовой каталог. Таким образом, в выполняемых прибором измерениях координат звезды минимизируются величины случайных составляющих ошибки измерения и полностью исключаются систематические ошибки, связанные с астрономическими факторами.

В результате работы программы Star Manager информация каждой из 10 857 звёзд основной группы базового каталога, используемая при составлении бортового каталога прибора, дополняется. А именно:

- вводится интегральная яркость каждой звезды, рассчитанная по фотометрической модели используемого прибора;
- с учётом передаточной функции прибора и его углового разрешения уточняются небесные координаты звёзд, имеющих близкое соседство со звёздами окружения, чем устраняются систематические ошибки измерения;
- указывается оптимальное число локализуемых в звезде пикселей, при котором обеспечивается минимальное значение случайной и отсутствие систематической ошибок измерения;
- вводится индекс предпочтения, или коэффициент веса, который должен учитываться в процессе бортовой обработки при уравнивании измеренных и каталожных значений координат звёзд методом наименьших квадратов.

В заключение можно отметить, что первые эксперименты по составлению бортовых каталогов в соответствии с изложенной в статье логикой и их внедрению в опытные образцы звёздных 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 звёздных датчиках ориентации требует постоянной поддержки базового каталога.

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018а) Особенности измерения координат звезд 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., Куркина А.Н., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018б) Эксперимент по коррекции фрагмента бортового каталога прибора БОКЗ-М60 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 60–68.
3. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. (2018в) 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.
4. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. (2018г) Адаптация звездных каталогов к условиям их применения в звездных датчиках ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Том 15. № 6. С. 69–81.

Basic catalogue of stars for spacecraft orientation sensors

G. A. Avanesov, N. I. Snetkova, N. A. Stroilov, O. V. Filippova,
V. A. Shamis, Ya. D. Elyashev, B. A. Yumatov

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

Constantly increasing requirements for improving the accuracy of angular measurements in stellar orientation sensors forced to reconsider the approaches to the formation of their on-board catalogues of stars. It became necessary to take into account the peculiarities of the nearest vicinity of catalogue stars. For this, on the basis of the Hipparcos and Gaia star catalogues, about 11,000 micro-catalogues were compiled around the brightest stars in the celestial sphere. Each of them contains in the center one star with a magnitude of up to 7.8^m and all surrounding stars up to 13^m within a radius of $15'$. The micro-catalogues are associated in the “basic catalogue of stars”, which in the near future will be used to compile the on-board catalogues of the stars of the orientation sensors of the spacecraft of the BOKZ family. To work with the base catalogue, special mathematical software was developed to visualize its fragments and compile lists of stars with given parameters. The computational and analytical part of the program contains mathematical models of the star orientation sensors of the BOKZ family, as well as a mathematical apparatus that allows to model in detail the most subtle elements of data processing on board. The article provides a brief description of the onboard catalogue, and also illustrates how to work with it using specially designed programs for this purpose.

Keywords: star tracker, astrometry, stars catalogue, systematic error, random error, background radiation, neighborhood of catalogue stars, centroidal method, catalogue correction

Accepted: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74

References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Smetanin P. S., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018a), Osobennosti izmereniya koordinat zvezd optiko-elektronnyimi 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.
2. Avanesov G. A., Kurkina A. N., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018b), 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.
3. Avanesov G. A., Snetkova N. I., Filippova O. V., Elyashev Ya. D. (2018c), 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.
4. Avanesov G. A., Stroilov N. A., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D. (2018d), Adaptatsiya zvezdnykh katalogov k usloviyam ikh primeneniya v zvezdnykh datchikakh orientatsii (Adaptation of star catalogues for their application in star trackers), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 6, pp. 69–81.