

Особенности измерения координат звёзд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями

Г. А. Аванесов, Р. В. Бессонов, П. С. Сметанин, О. В. Филиппова, Я. Д. Эльяшев

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

Широко распространённые в отечественной и зарубежной космической технике звёздные датчики ориентации используют малогабаритную оптику, параметры которой несравнимы с параметрами астрономических инструментов, с помощью которых составляются звёздные каталоги. Огромная разница в угловом разрешении тех и других приборов приводит к тому, что измеренные звёздными датчиками ориентации координаты звёзд зачастую отличаются от значений, указываемых в звёздных каталогах. Несоответствие измеренных и каталожных значений координат звёзд приводит к ошибкам вычисления параметров ориентации, заметность которых растёт по мере совершенствования звёздных датчиков.

В статье излагаются результаты экспериментального исследования ошибок в измерениях координат звёзд, вызванных различиями в угловом разрешении используемых для этой цели инструментов, а также неоднородностью звёздного фона в ближайшей окрестности каталожных звёзд.

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

Одобрена к печати: 02.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47

Введение

Несоответствие измеренных и каталожных значений координат некоторых звёзд отмечалось разработчиками звёздных датчиков ориентации КА начиная с 80-х гг. прошлого века, когда в ИКИ РАН были выполнены первые экспериментальные работы в этой области. Однако отсутствие достаточной статистики измерений, а также недостаток средств и методов обработки данных долгое время не позволяли сформировать надёжную доказательную базу для подтверждения наблюдаемого явления.

Развитие космической техники в новом веке привело к значительному росту требований к точности измерения параметров углового движения КА, сопровождающемуся тенденцией к снижению массы, габаритов и энергопотребления приборов. Тогда же значительно расширились возможности для проведения наземных и космических экспериментов. Один из таких экспериментов был проведён на борту КА «Ресурс-П» № 3 в период с сентября 2016 по январь 2017 г. (Ахметов и др., 2017). Полученные на его основе результаты позволяют уверенно говорить о необходимости адаптации астрономических звёздных каталогов к условиям их применения в звёздных датчиках ориентации.

Краткое описание эксперимента

Целью поставленного на борту КА «Ресурс-П» № 3 эксперимента было детальное исследование работы звёздных датчиков ориентации БОКЗ-М60, разработанных и изготовленных в ИКИ РАН. Для этого с борта КА на наземный пункт приёма передавалась «сырая» информация, получаемая четырьмя приборами БОКЗ-М60 в процессе выполнения ими своей целевой функции: измерения углового положения КА в инерциальном пространстве (Аванесов и др., 2015).

Всего за время проведения эксперимента от четырёх приборов БОКЗ-М60 было получено $\sim 52 \cdot 10^6$ телеметрических кадров, в каждом из которых содержатся результаты наблюдения в среднем 10 звёзд. Общая площадь наблюдения охватила на небесной сфере пояс в направлении прямого восхождения, ограниченный по склонению углами $\pm 45^\circ$, включивший в себя 6000 из 8713 содержащихся в каталогах приборов БОКЗ-М60 звёзд.

В каждом телеметрическом кадре содержатся:

- измеренные прибором координаты звёзд на ПЗС-матрице;
- интегральная яркость звёзд, измеренная в единицах младшего разряда (ЕМР) АЦП;
- площади звёзд, измеренные в числе пикселей матрицы;
- дата и точное время выполнения каждого измерения;
- значения проекций вектора центра масс и линейной скорости аппарата на оси гринвичской системы координат, которые используются для последующего расчёта проекции линейной угловой скорости на оси инерциальной системы координат (ИСК);
- штатная информация об ориентации, формируемая приборами БОКЗ-М60. Она используется для сравнения результатов наземной обработки со штатной работой приборов на борту КА.

Дата и точное время наблюдения используются для учёта собственного движения звёзд, эффекта годичной аберрации, а также явлений прецессии и нутации. Проекция вектора линейной скорости на оси ИСК позволяют учесть эффект спутниковой аберрации.

Методика исследований

В процессе решения задачи определения параметров ориентации звёздный датчик производит съёмку участка небесной сферы и измеряет координаты звёзд в системе координат используемого в нём матричного приёмника излучения. После этого через систему преобразований координаты звёзд на матрице сопоставляются с бортовым звёздным каталогом, на основе чего производится их распознавание, уточнение их координат на небесной сфере и расчёт параметров ориентации внутренней системы координат (ВСК) прибора, которая затем пересчитывается в приборную систему координат.

Поскольку бортовой звёздный каталог является результатом кропотливой обработки высокоточных астрономических измерений, которые на порядки превышают точность звёздного датчика, разумно предполагать, что результатам выполняемых им измерений координат звёзд должна быть присуща случайная погрешность. Если же в измерениях координат отдельных звёзд обнаруживается систематическая ошибка, то следует искать причину её появления.

Задача этой статьи заключается в том, чтобы на экспериментальных данных показать, что координаты достаточно большого числа звёзд действительно вычисляются со значительными по величине систематическими ошибками и указать причины их возникновения.

Отделить систематические ошибки измерения координат звёзд от случайных удаётся лишь при использовании достаточно большой статистики измерений.

Избранная авторами статьи методика исследований состоит в следующем:

- из архивов выбираются результаты измерений координат звёзд, полученные на матрицах конкретных приборов в виде списков локализованных в каждом кадре звёзд;
- каждый прибор подвергается виртуальной калибровке двумерными полиномами 5-й степени;
- для отобранных кадров повторяется используемая на борту процедура распознавания звёзд и измерения их небесных координат с использованием бортового звёздного каталога;
- результаты многократных измерений небесных координат звёзд систематизируются, сводятся в таблицы и наносятся на карту вместе с другими звёздами, входящими в их окружение;

- оценивается возможное влияние звёзд окружения на координаты каталожных звёзд с учётом ряда параметров используемого для измерений звёздного датчика.

В результате выполнения перечисленных процедур заполняется база данных по звёздам в следующем объёме: номер звезды по каталогу, её координаты на небесной сфере, номер прибора, номер кадра, на котором она распознана, интегральная яркость звезды, количество занимаемых ею пикселей, а также величины остаточных рассогласований координат взвешенного центра звезды по прямому восхождению и склонению.

Обработка всех материалов этого эксперимента займёт ещё достаточно много времени, но некоторые промежуточные результаты уже весьма интересны.

Предварительные результаты эксперимента

На момент написания этой статьи предварительной обработке подвергнуты данные, охватывающие работу двух приборов № 31 и № 32 за 10 суток с 24.09.2016 по 04.10.2016, что составляет примерно 7,3 % от общего времени проведения эксперимента. По двум приборам были многократно измерены координаты 1184 звёзд, что составляет 13,5 % от общего числа звёзд бортового каталога и 19,7 % от числа звёзд, наблюдение которых возможно в данном эксперименте. Всего обработано $\sim 10^6$ кадров измерений, выполненных двумя приборами на 176 витках полёта. В каждом кадре приборы фиксировали положение 10–12 звёзд. При этом координаты каждой из 1184 распознанных на этом витке звёзд фиксировались прибором в среднем около 2000 раз.

В соответствии с изложенной выше методикой после выполнения виртуальной калибровки приборов была повторена процедура распознавания звёзд и измерения их небесных координат с использованием бортового звёздного каталога.

Обработанные материалы съёмки небесной сферы позволили достаточно точно вычленивать и охарактеризовать различные виды ошибок измерения координат звёзд. В дальнейшем статистика наблюдений будет существенно больше. Как это отразится на результатах анализа измерений, покажет время.

Прежде всего, оказалось, что в обработанном массиве данных число звёзд, осреднённые небесные координаты которых совпадают с каталожными значениями с точностью до 1 угл. с, не превышает 5,2 %. Отнесём их к группе № 1. Невелико и число звёзд группы № 3, координаты которых значительно, на величину от 3 до 30 угл. с, отличаются от каталожных значений. Их оказалось 5,7 %. Отличие измеренных координат остальных 89,1 % звёзд от их каталожных значений лежит в пределах от 1 до 3 угл. с. Отнесём их к группе № 2.

Рассмотрим ряд примеров звёзд из групп 1 и 3, иллюстрирующих приведённые данные.

На *рис. 1* (см. с. 42) показан фрагмент карты участка небесной сферы с нанесёнными 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. Осреднённые координаты центра звезды по обоим приборам показаны зелёной точкой. Для каждого отдельного прибора измеренный центр отстоит от каталожного значения на 0,36 и 0,67 угл. с по приборам № 31 и № 32 соответственно. Данная звезда, естественно, относится к группе 1. Для приборов с угловым разрешением 55 угл. с/пиксель это очень неплохой результат. Приведённый справа снимок той же звезды, взятый из Паломарского обзора (The Palomar Digital Sky Survey (DPOSS, <http://www.astro.caltech.edu/~george/dposs/>); VizieR, CDS (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>)), показывает отсутствие её 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 положением звезды. Все показанные на *рис. 1* угловые расстояния измерены по правилам сферической геометрии.

Все последующие примеры относятся к звёздам группы № 3.

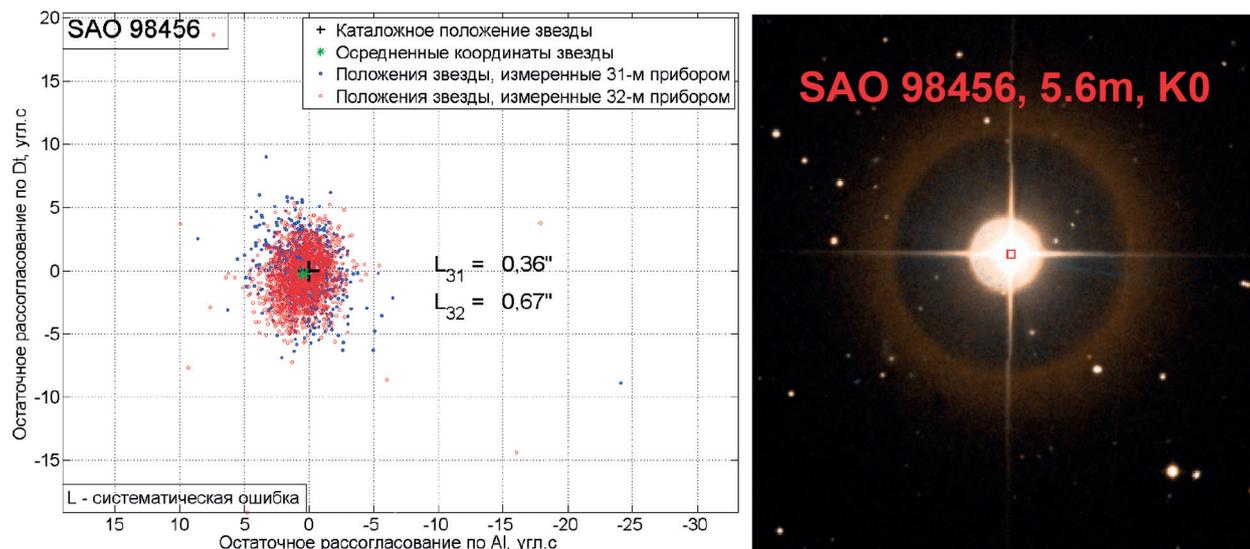


Рис. 1. Фрагмент карты небесной сферы с нанесёнными на неё 2500 измерениями координат звезды SAO 98456, сделанными приборами № 31 и № 32. Справа — снимок звезды и ближайшей её окрестности из Паломарского обзора

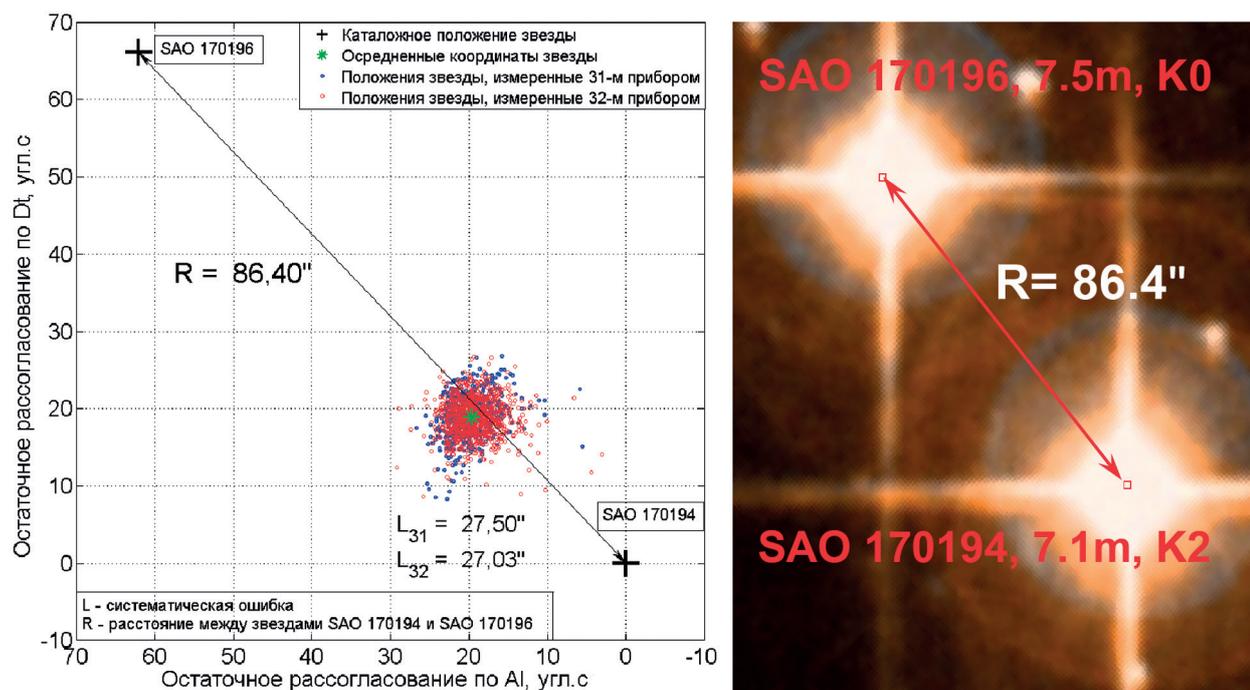


Рис. 2. Слева — фрагмент карты небесной сферы с нанесёнными на неё 1500 измерениями координат пары близко расположенных звёзд SAO 170196 и SAO 170194, сделанными приборами № 31 и № 32. Справа — снимок этой пары звёзд из Паломарского обзора

На рис. 2, построенном по тем же принципам, показан случай наблюдения двумя приборами пары близко расположенных звёзд SAO 170196 и SAO 170194. Расстояние между ними — 86,4 угл.с. Это значит, что при угловом разрешении приборов 55 угл.с/пиксель обе звезды всегда будут наблюдаться как один объект. Рисунок это подтверждает. Центры проекции облаков ошибки ~1500 измерений координат звёзд обоими приборами совпадают с очень хорошей точностью около 0,5 угл.с, как и в предыдущем случае. При этом оба прибора указывают координаты слившейся пары звёзд на соединяющей их линии на расстоянии 27,5 угл.с от звезды SAO 170194. С учётом параметров собственного движения этих звёзд

и близости их спектральных классов эту пару можно считать устойчивой на достаточно большом отрезке времени. Её можно включать в бортовые каталоги приборов, имеющих угловую разрешающую способность порядка 1 угл. мин, под одним номером и с поправкой координат на 27,5 угл. с. Аналогичным образом можно поступать с подобными парами, расстояние между которыми меньше, чем в данном случае.

Приведённые примеры демонстрируют хорошие измерительные свойства приборов БОКЗ-М60 и позволяют верить получаемым с их помощью результатам, что оказывается не лишним при взгляде на *рис. 3*. Как и в предыдущем случае, множественные точки на карте показывают положения звезды SAO 197258, рассчитанные на основании экспериментальных данных по большой серии кадров, полученных в процессе движения КА с орбитальной угловой скоростью. Можно было бы ожидать, что выполненные одним прибором многократные измерения координат одной и той же звезды создадут на карте некоторое распределение, отражающее присущую прибору случайную погрешность измерения, расположенную вокруг её каталожного значения. Однако этого не произошло. Центр облака ошибок измерений расположился в точке, обозначенной звёздочкой, на расстоянии $L = 12,23''$ от каталожного значения координат звезды, обозначенного крестом (см. *рис. 3, слева*).

Это уже требует объяснения, и оно находится. Снимок звезды SAO 197258 и её окружения, заимствованный из Паломарского обзора (см. *рис. 3, справа*), показывает, что справа от неё на расстоянии в 265 угл. с наблюдается звезда SAO 197253. Часть излучаемых ею фотонов попадает в пиксели, засвеченные фотонами более яркой звезды SAO 197258, и смещает положение её центра. Возможно, свой вклад в смещение центра звезды от её каталожного значения вносит и множество других более мелких источников излучения, наблюдаемых в её окружении.

Ещё более интересными оказались результаты измерения координат звезды SAO 57475. Судя по *рис. 4* (см. с. 44), звезда попеременно занимала два положения: одно практически точно совпадает с каталожным значением, а другое отстоит от него на 26,47 угл. с. На неё оказывает влияние звезда SAO 57469, находящаяся на расстоянии 306 угл. с. Оба прибора демонстрируют практически одинаковое поведение: формируют по два облака ошибок. На *рис. 5* (см. с. 44) показано влияние этого соседства в увеличенном масштабе.

Во всех приведённых примерах координаты центра звёзд 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.

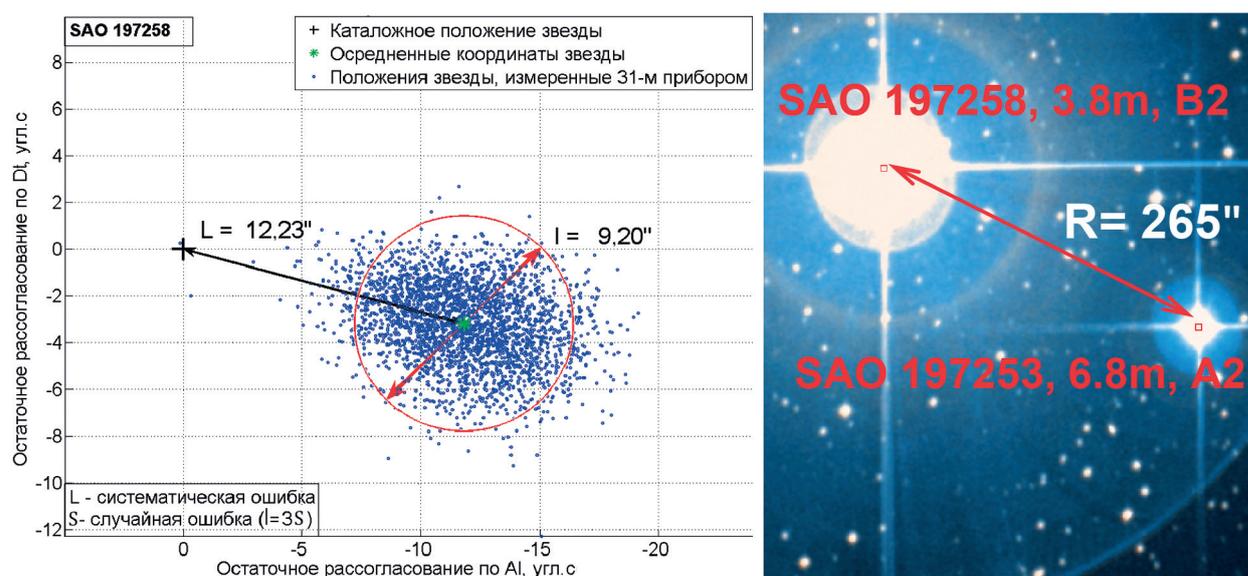


Рис. 3. Слева — распределение случайной составляющей погрешности измерения координат звезды SAO 197258. *Справа* — снимок звезды и её окрестности из Паломарского обзора

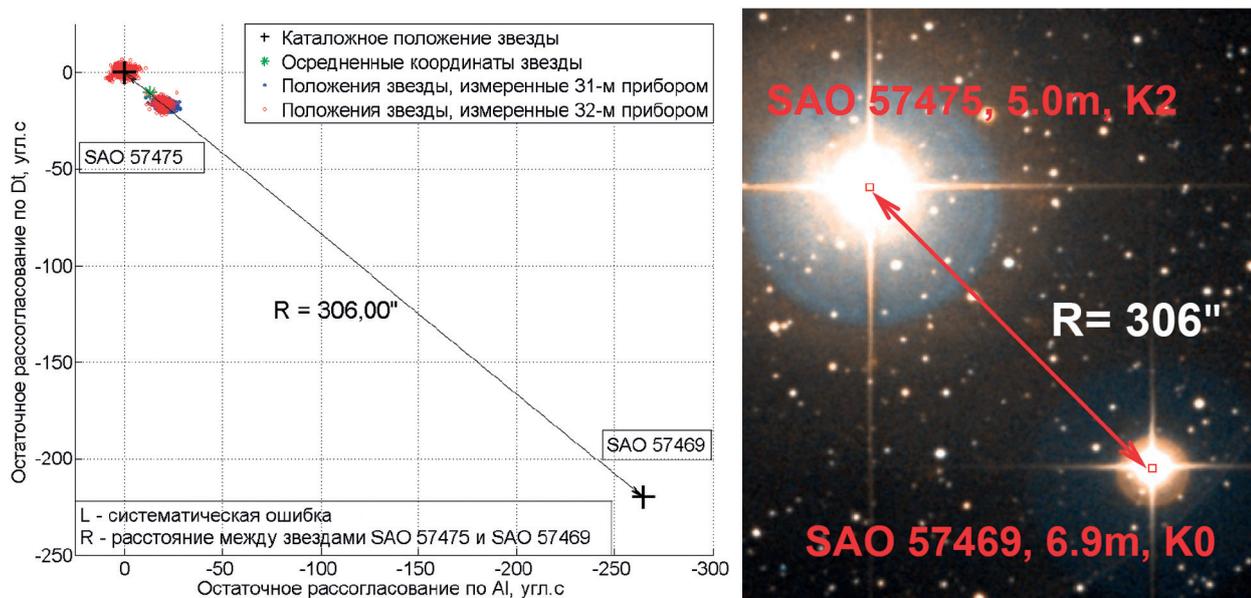


Рис. 4. Влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475. Справа — снимок обеих звёзд из Паломарского обзора

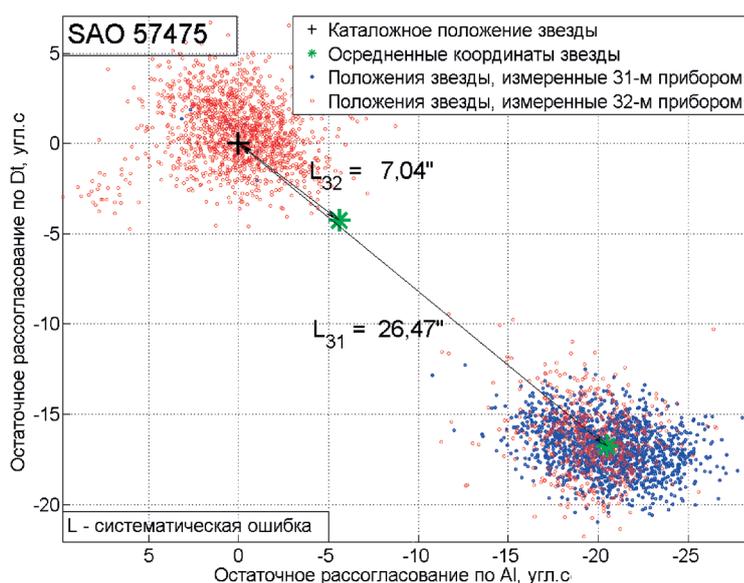


Рис. 5. Увеличенный фрагмент карты неба, демонстрирующий влияние звезды SAO 57469 на результаты измерений координат звезды SAO 57475

Вместе с тем звезда должна представлять собой бесконечно удалённый точечный объект, свет от которого, пройдя через оптическую систему, будет отображать на матрице её собственную передаточную функцию, представляющую собой в первом приближении симметричную фигуру — гауссоиду. Однако прибор с угловым разрешением в десятки угловых секунд практически всегда имеет дело с целым созвездием, из которого 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 звёзд окружения в отображение каталожной звезды на матрице искажает её фигуру. Она перестаёт быть симметричной, что и фиксирует центроидный метод в форме смещения измеренных координат звёзд от их каталожного значения. При этом величина ошибки для каждой звезды индивидуальна и неизменна на достаточно большом отрезке времени.

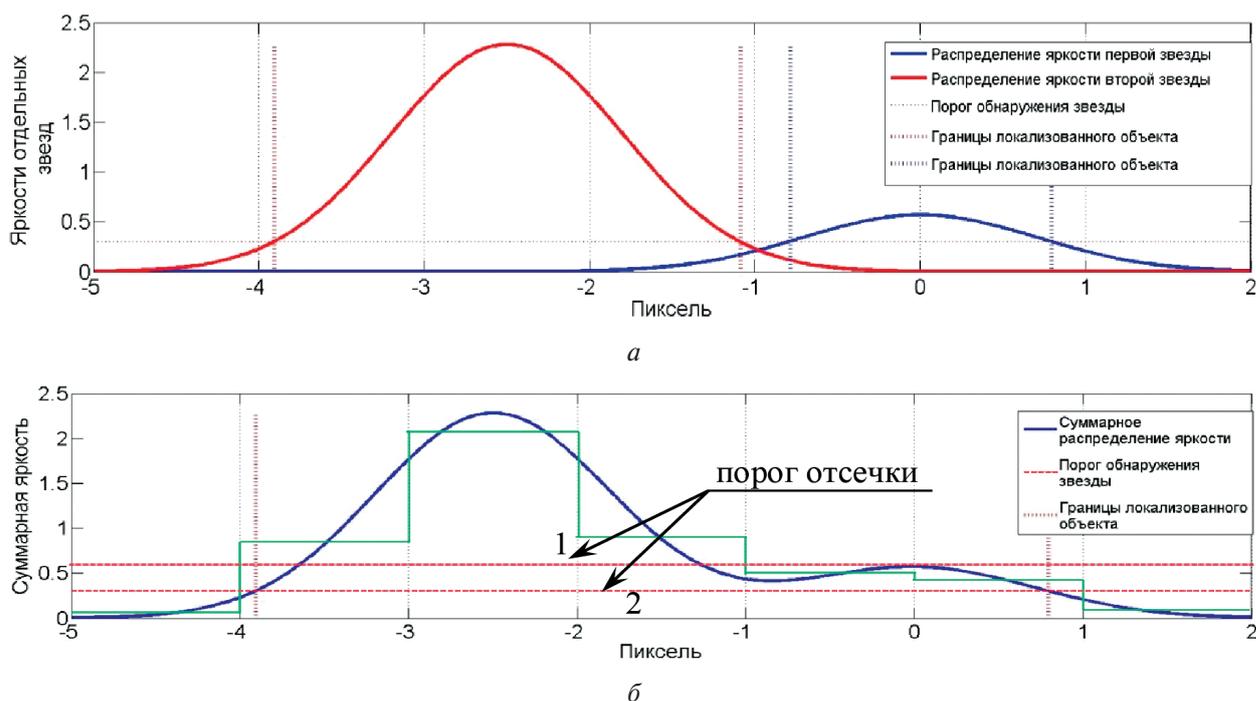


Рис. 6. Иллюстрация слияния двух наблюдаемых звёзд в один общий потенциальный рельеф на матрице ПЗС

Картину взаимовлияния звёзд иллюстрирует рис. 6. Две звезды на рис. 6а отстоят друг от друга на некоторое расстояние. Их функции рассеяния точки (ФРТ) пересекаются. Но пиксели матрицы воспринимают общий идущий от них поток фотонов. В области пересечения ФРТ-потоки суммируются. На матрице формируется потенциальный рельеф, показанный на рис. 6б, в результате чего обе звезды сливаются в один объект. При этом левый фронт первой звезды и правый фронт второй звезды (см. рис. 6а) деформируются.

Далее возможны две ситуации:

- порог отсечки пройдет по варианту 2;
- порог отсечки пройдет выше «синей» звезды, по варианту 1.

В первом случае ошибка будет больше, во втором — меньше. В обоих случаях центроидный метод «учтёт» деформацию правого фронта каталожной звезды.

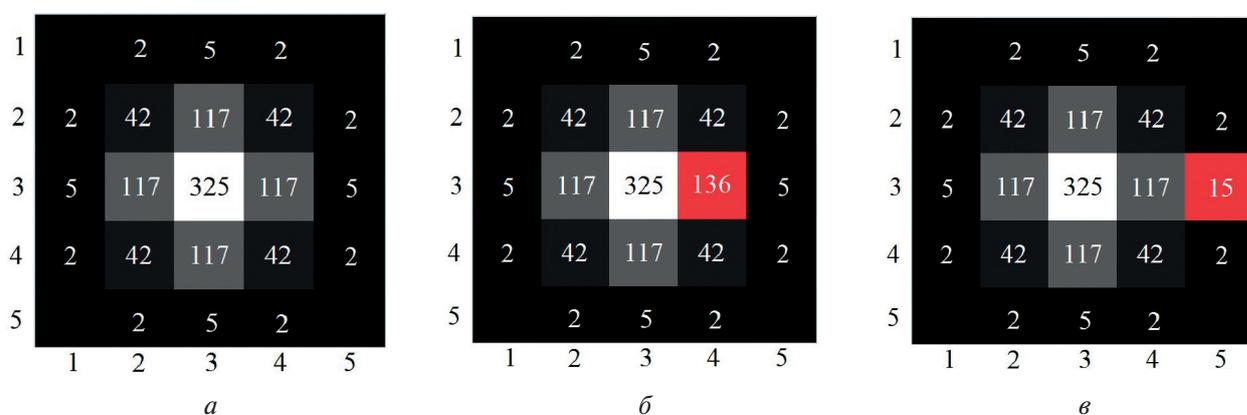


Рис. 7. Зависимость величины смещения центра звезды под влиянием дополнительного источника излучения: а — цифровая модель распределения яркости звезды 7^m , смещение центра — 0; б — симметрия модели звезды 7^m нарушена звездой $11,3^m$, смещение центра на 0,02 пикселя; в — симметрия модели звезды 7^m нарушена звездой $12,1^m$, смещение центра на 0,02 пикселя

Математическое моделирование позволяет получить количественное представление о необходимой величине воздействия, способного сместить координаты наблюдаемой звезды на некоторую величину. Результаты такого моделирования можно видеть на *рис. 7* (см. с. 45).

На *рис. 7а* показано «идеальное» симметричное распределение яркости в изображении звезды с магнитудой 7^m с центром, совпадающим с серединой центрального пикселя. Если в соседний с центральным пиксель (см. *рис. 7б*) добавится энергия звезды $11,3^m$, расчётное положение центра сместится на $0,02$ пикселя (примерно 1 угл. с для прибора БОКЗ-М60). То же самое произойдёт, если во второй от центрального пиксель (см. *рис. 7в*) добавится энергия звезды $12,1^m$. Если же в соседний с центральным пиксель добавится энергия звезды $9,5^m$, смещение центра составит уже 10 угл. с.

Заметим, что в реальных условиях энергия звёзд фона может добавляться в произвольных соотношениях во все пиксели, участвующие в расчёте положения центра звезды. Таким образом, для правильного определения координат любой звезды, входящей в бортовой каталог звёздного датчика ориентации, надо учитывать характеристики фона, создаваемого звёздами до 12^m в ближайших её окрестностях.

Как уже упоминалось в начале статьи, ожидаемое общее число звёзд каталога БОКЗ-М60, статистические координаты которых отличаются от их каталожных значений на величину от 3 до 30 угл. с, составляет $5,7\%$, или около 500 . Но координаты основной массы каталожных звёзд отличаются от среднестатистических оценок на $1-3$ угл. с, что тоже немало.

Систематическая ошибка в измерениях координат звёзд проявляет себя незначительным вкладом в случайную ошибку, но главное — она становится основным источником систематической ошибки измерения параметров ориентации в ВСК. Основным и не поддающимся ни калибровке, ни прогнозированию. Она лишает звёздный датчик ориентации того преимущества, которое он имеет перед другими измерительными приборами: всегда измерять эталон, сравнивая его с хранящимся в его памяти высокоточным описанием эталона.

Описание эталона в виде бортового каталога, содержащего выборку из безупречных астрономических каталогов без учёта параметров прибора и условий наблюдения звёзд, теряет первоначальный смысл.

Систематическая ошибка в измерениях координат звёзд индивидуальна для каждой из них и для каждого типа датчика ориентации. Она должна быть тщательно измерена и учтена в бортовом звёздном каталоге.

Приведённые в статье данные многократно проверены на разных приборах, в том числе с существенно более высоким угловым разрешением. Результат везде один и тот же. Чем выше чувствительность прибора, тем более результаты его измерений оказываются зависимыми от фоновой обстановки вокруг каталожных звёзд.

На основании вышеизложенного можно сделать много различных выводов, однако ограничимся лишь одним: для выполнения высокоточных измерений параметров углового движения КА датчикам ориентации необходимы бортовые звёздные каталоги, учитывающие угловую разрешающую способность прибора и фоновую обстановку в ближайших окрестностях каждой каталожной звезды.

Литература

1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Форш А.А., Куделин М.И. Анализ современного состояния и перспектив развития приборов звёздной ориентации семейства БОКЗ // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 1. С. 3–13.
2. Ахметов Р.Н., Еремеев В.В., Кузнецов А.Е., Мятлов 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.

Features of coordinate measuring by opto-electronic star trackers with different angular resolution

G. A. Avanesov, R. V. Bessonov, P. S. Smetanin, O. V. Filippova, Ya. D. Elyashev

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

Star trackers widely used in Russian and foreign space technology, use small-sized optics, the parameters of which are incomparable with the parameters of astronomical instruments, with which star catalogues are compiled. The huge difference in the angular resolution of both devices leads to the fact that the stars' coordinates measured by the star trackers are often different from the values specified in the star catalogues. The discrepancy between the measured and catalogue values of the star coordinates leads to errors in the orientation parameters calculation, which increase with the improvement of the star trackers.

The article presents the results of experimental study of errors in the measurements of the stars' coordinates caused by differences in the angular resolution of the instruments used for this purpose, as well as the heterogeneity of the star background in the nearest neighborhood of catalog stars.

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

Accepted: 02.11.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-39-47

References

1. Avanesov G. A., Bessonov R. V., Forsh A. A., Kudelin M. I., Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya priborov zvezdnoi orientatsii semeistva BOKZ (Analysis of the current state and prospects of development of star trackers of the BOKZ family), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie*, 2015, Vol. 58, No. 1, pp. 3–13.
2. Akhmetov R. N., Ereemeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazheniy zemnoi poverkhnosti ot 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.