

## Астрометрическая модель звёздного датчика ориентации космического аппарата

Г. А. Аванесов, Е. В. Белинская, Н. Н. Брысин,  
О. В. Филиппова, В. А. Шамис, Я. Д. Эльяшев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*  
*E-mail: eluashev-jak@yandex.ru*

Астрометрическая модель звёздного датчика разработана и используется для исследования и прогнозирования результатов работы аппаратных и программно-математических элементов приборов в процессе решения задачи измерения направления на отдельно взятую звезду небесной сферы. В состав астрометрической модели включены: базовый каталог звёзд, фотометрическая модель прибора, программы локализации звёзд на фотоприёмной матрице, а также аппарат статистического анализа и обобщения результатов измерения их координат. Модель позволяет априори оценить величины ожидаемых случайных и систематических ошибок измерения направления на звёзды различной яркости и спектральных классов с учётом особенностей их окружения и параметров конкретных приборов, в том числе в условиях воздействия шумов различной физической природы. Априорное знание реакции прибора на появление в его поле зрения звёзд в разном окружении при различных уровнях шумов и внешних засветках позволяет оптимизировать бортовые звёздные каталоги, программы локализации звёзд на фотоприёмной матрице, а также решить задачу снижения уровня случайных и систематических ошибок измерения, связанных с бортовым каталогом. Астрометрическая модель звёздного датчика ориентации реализована в компьютерной программе Star Manager.

**Ключевые слова:** звёздный датчик, астрометрия, каталог звёзд, функция рассеяния точки, систематическая ошибка, случайная ошибка, интегральная яркость звезды, центроидный метод, фотонный шум, приборный шум

Одобрена к печати: 16.01.2020  
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98

### Введение

Более чем четвертьвековой опыт разработки, исследований, испытаний и эксплуатации нескольких поколений звёздных датчиков ориентации на борту многих отечественных изделий космической техники позволил не только значительно усовершенствовать приборы этого типа, но и выявить ряд направлений их дальнейшего развития. Одно из таких направлений, предполагающее оптимизацию бортовых звёздных каталогов и процедур локализации звёзд на фотоприёмной матрице, рассматривается в данной статье. Для решения этой задачи авторами была создана астрометрическая модель прибора звёздной ориентации, позволяющая весьма точно воспроизвести всю совокупность процедур, связанных с преобразованием светового потока от звезды в электрические сигналы от отдельных пикселей матричного приёмника излучения и их селекции на фоне шумов различной природы. Для этого в состав модели включён базовый каталог, содержащий около 375 000 звёзд, фотометрическая модель прибора, генераторы, имитирующие фотонный и приборные шумы, математический аппарат проецирования изображения звезды на фотоприёмную матрицу и его обработки. В целом астрометрическая модель позволяет анализировать особенности фоновой обстановки вокруг включаемых в бортовой каталог прибора звёзд, исследовать разные методы их локализации на фоне шумов различной природы и формировать прогноз ожидаемых величин систематических и случайных ошибок измерения направлений на них.

Астрометрическая модель звёздного датчика ориентации создана с целью детального исследования реакции прибора на появление в его поле зрения звёзд с различной интегральной яркостью и в различном окружении при наличии шумов и помех разной физической природы. Ключевая задача модели заключается в оптимизации условий и параметров локализации

изображений звёзд на фотоприёмной матрице прибора. Именно этот этап бортовой обработки данных определяет точность измерения направления на каждую конкретную звезду. В нём сосредоточен комплекс проблем и противоречий, связанных с используемой в приборе оптикой и матричным приёмником излучения, пространственной и амплитудной дискретизацией изображения, собственными шумами матрицы, а также фотонным шумом и помехами, в том числе от ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП).

Структура астрометрической модели (АММ) звёздного датчика ориентации показана на рис. 1. Источником информации для её работы служит базовый каталог звёзд в редакции «0» (далее — БК-0) (Аванесов и др., 2019а). Каталог содержит 10 377 звёзд основной группы, взятых из каталога Hipparcos и идентифицированных 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 угл. мин. Общее число звёзд окружения составило 364 406. По внешнему запросу, содержащему номер звезды по каталогу Hipparcos, БК-0 может выдать во внешний мир любой имеющийся в нём микрокаталог. В данном случае в роли потребителя информации выступает математическая модель прибора звёздной ориентации, которая представляет собой крупный программный блок АММ.

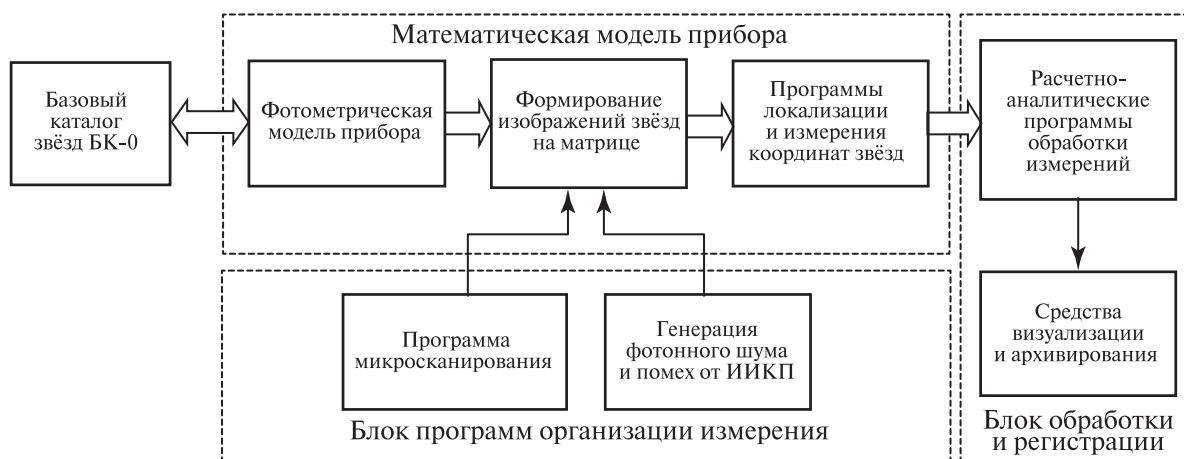


Рис. 1. Структура астрометрической модели звёздного датчика ориентации

Математическая модель звёздного датчика ориентации представлена в АММ блоком из трёх программных модулей: фотометрической модели прибора (Аванесов и др., 2019б), модуля формирования изображений звёзд на фотоприёмной матрице и модуля, содержащего набор программ их локализации и измерения координат центра.

Работа математической модели звёздного датчика поддерживается блоком программ организации измерений. Этот блок выполняет ряд вспомогательных функций, воспроизводящих некоторые условия функционирования приборов. Он состоит из двух модулей: программы микросканирования, имитирующей попадание центра звезды в разные участки пикселя матрицы, и модуля генерации фотонного шума и помех, возникающих на формируемом матрицей изображении под воздействием ионизирующего излучения космического пространства (ИИКП).

Третий блок АММ содержит набор расчётно-аналитических программ обработки измерений, а также средства их визуализации и архивирования.

Рассмотрим подробнее работу и взаимодействие блоков и модулей АММ.

На вход математической модели прибора из базового каталога поступает один из микрокаталогов, охватывающий участок небесной сферы размером  $30 \times 30$  угл. мин, в центре которого расположена одна из звёзд основной группы. В её окружении может находиться от нескольких десятков до нескольких сотен менее ярких звёзд. В рамках решаемой АММ задачи из всего объёма содержащихся в микрокаталоге данных используются координаты всех звёзд  $Al$ ,  $Dl$ , их звёздная величина  $m$  и показатель цветности  $B - V$ .

В фотометрической модели (Аванесов и др., 2019б) звёздная величина  $m$  и показатель цветности  $B - V$  всех звёзд микрокаталога пересчитываются в интегральную яркость  $B_r$  с учётом спектральных характеристик используемой в приборе оптики и матричного приёмника излучения. В модуле формирования изображений звёзд на матрице значения интегральной яркости каждой звезды в соответствии с присущей прибору функцией рассеяния точки (ФРТ) преобразуются в распределение яркости, в качестве которого используется двумерное распределение Гаусса:

$$F(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\}, \quad (1)$$

где  $\mu_x, \mu_y$  — координаты центра распределения;  $\sigma_x, \sigma_y$  — полуширина распределения (средне-квадратическое отклонение — СКО) вдоль координат  $x$  и  $y$ .

Параметры распределения адаптируются к ФРТ прибора подбором полуширины вдоль осей  $X$  и  $Y$  матрицы.

После вычисления формы звезды на матрице необходимо провести пространственную и амплитудную дискретизацию полученного изображения. Связано это с тем, что матрица геометрически не непрерывна, она состоит из отдельных пикселей квадратной формы со стороной  $d$ . В каждом из них под воздействием фотонов создаётся измеряемый в электронах заряд. Электронная схема оцифровывает заряд с определённой дискретностью, определяемой ценой единицы младшего разряда (ЕМР), выраженной в числе электронов.

Для того чтобы определить яркость в конкретном пикселе распределения, необходимо проинтегрировать ФРТ (1) внутри координат каждого пикселя, умножив результат на интегральную яркость звезды  $I_0$ :

$$I_{i,j} = I_0 \int_{id}^{(i+1)d} \int_{jd}^{(j+1)d} F(x, y) dx dy.$$

В модуле формирования изображений звёзд на матрице производится проецирование всех звёзд микрокаталога из небесной системы координат в систему координат матричного приёмника излучения, куда ложатся рассчитанные в фотометрической модели распределения яркости. При этом звезда, находящаяся в центре микрокаталога, проецируется через оптическую систему прибора в центр центрального пикселя матрицы. Тогда матрица ориентации определяется следующим образом:

$$ORI = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где:

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\cos A \cdot \sin \alpha_0 - \sin A \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin \delta_0; & a_{12} &= \cos A \cdot \cos \alpha_0 - \sin A \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \delta_0; & a_{13} &= \sin A \cdot \cos \delta_0; \\ a_{21} &= \sin A \cdot \sin \alpha_0 - \cos A \cdot \cos \alpha_0 \cdot \sin \delta_0; & a_{22} &= -\sin A \cdot \cos \alpha_0 - \cos A \cdot \sin \alpha_0 \cdot \sin \delta_0; & a_{23} &= \cos A \cdot \cos \delta_0; \\ a_{31} &= \cos \delta_0 \cdot \cos \alpha_0 & a_{32} &= \cos \delta_0 \cdot \sin \alpha_0; & a_{33} &= \sin \delta_0. \end{aligned}$$

Для каждой интересующей звезды с координатами на небе  $\alpha, \delta$  можно вычислить направляющие косинусы  $L_3, M_3$  и  $N_3$ :

$$L_3 = \cos \delta \cdot \cos \alpha; \quad M_3 = \cos \delta \cdot \sin \alpha; \quad N_3 = \sin \delta. \quad (3)$$

По полученной матрице ориентации (2), направляющим косинусам (3) и фокусному расстоянию объектива можно рассчитать координату на матрице в миллиметрах, куда звезда попадёт при проецировании:

$$x_i^{\text{выч}} = -f \frac{a_{11}L_i + a_{12}M_i + a_{13}N_i}{a_{31}L_i + a_{32}M_i + a_{33}N_i}, \quad y_i^{\text{выч}} = -f \frac{a_{21}L_i + a_{22}M_i + a_{23}N_i}{a_{31}L_i + a_{32}M_i + a_{33}N_i}.$$

Разделив полученные координаты на размер пикселя в миллиметрах и добавив половину размера матрицы в пикселях, получаем координату проецирования звезды на матрицу в пикселях.

На рис. 2 показан пример проецирования микрокаталога звезды HIP 59895 и формирования по его данным изображений звёзд на матрице прибора. По данным БК-0, в радиусе 5 угл. мин (обозначен окружностью) у звезды HIP 59895 нет соседей ярче  $13^m$ .

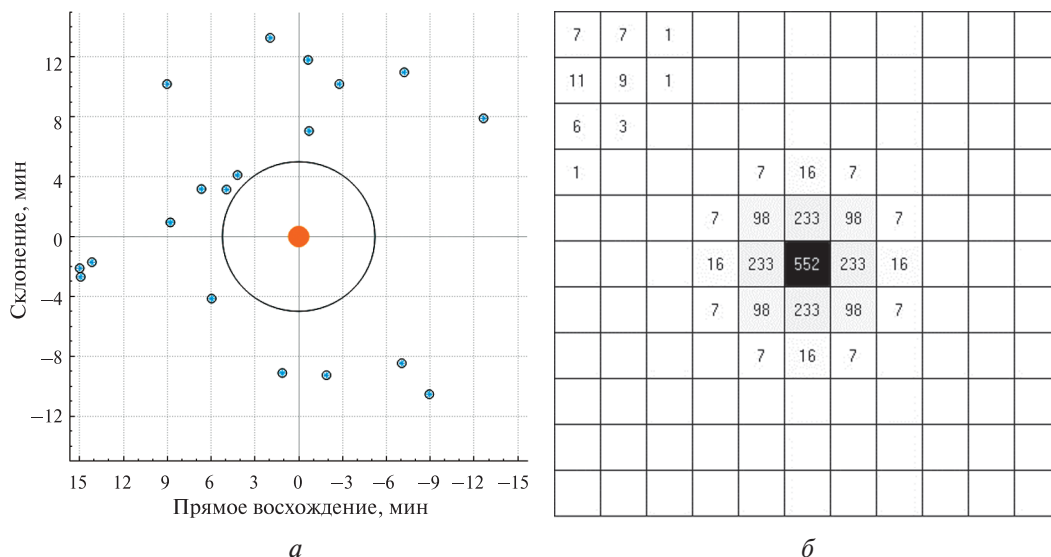


Рис. 2. Микрокаталог звезды HIP 59895 в небесной системе координат (а); отображение центральной части микрокаталога звезды HIP 59895 дискретной структурой матрицы (б)

Из рис. 2 видно, что звезда HIP 59895 отобразилась на матрице идеально симметричной фигурой распределения Гаусса, чего и следовало ожидать.

На рис. 3 показана построенная по данным микрокаталога звезды HIP 57587 карта звёзд в небесной системе координат и изображение её центральной части после проецирования на матрицу. Эта звезда, в отличие от предыдущей, имеет пять соседей в радиусе 5 угл. мин, что сильно меняет дело.

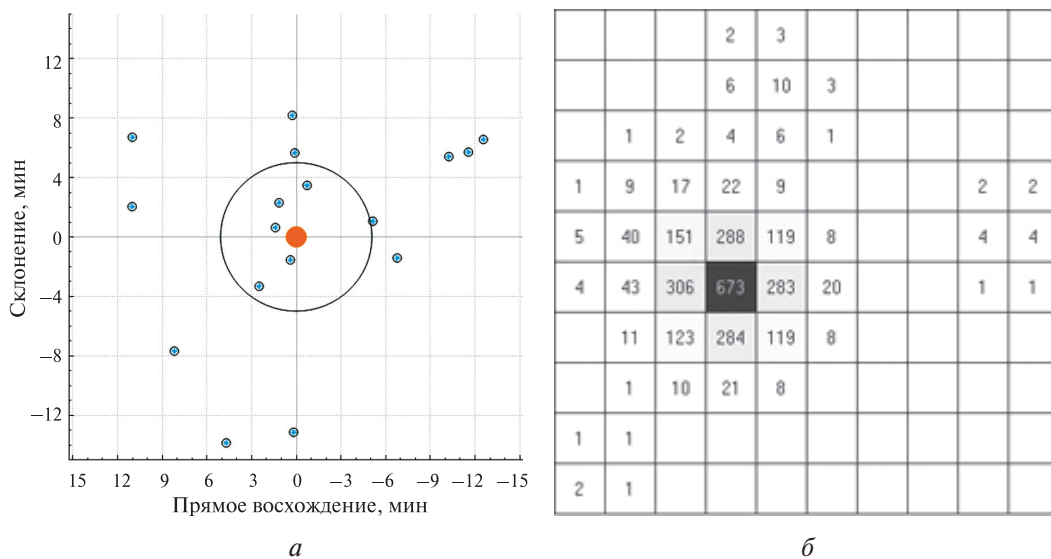


Рис. 3. Микрокаталог звезды HIP 57587 в небесной системе координат (а); отображение центральной части микрокаталога дискретной структурой матрицы (б)

Каждая из показанных на *рис. 3а* звёзд отображена на *рис. 3б* 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 звёзд. При этом распределение яркости от звезды HIP 57587 утратило симметрию. В данном случае это означает, что в измерениях её координат в любом случае будет содержаться систематическая ошибка.

В реальности идеальная форма распределения яркости в отображении звезды на матрице нарушается по следующим основным причинам\*:

- 1) наложение на распределение яркости звезды распределений яркости близко находящихся звёзд-соседей;
- 2) конечное число отсчётов при пространственной (попиксельной) дискретизации изображения звезды;
- 3) фотонные и приборные шумы;
- 4) помехи, возникающие в основном в результате воздействия ИИКП.

Причина, указанная в списке первой, создана самой природой. Она ведёт к появлению систематических ошибок в измерениях направления на звезду. В каждом конкретном случае её можно оценить количественно и, зная параметры собственного движения звёзд микрокаталога, дать прогноз её изменения в будущем. Влияние звёзд-соседей на распределение яркости центральной звезды микрокаталога учитывается в процессе формирования их изображений на матрице по данным фотометрической модели и с учётом фотограмметрических законов проецирования небесной системы координат в фокальную плоскость оптической системы прибора.

Все остальные причины приводят к появлению случайных ошибок измерения направления на звезду. На их величины можно влиять изменением тех или иных параметров приборов. Для их моделирования в астрометрической модели звёздного датчика ориентации используются два программных модуля: программа микросканирования, моделирующая попадание центра проекции центральной звезды микрокаталога в разные участки пикселя матрицы, и программа генерации фотонного шума и имитации помех от ИИКП.

Программа микросканирования дискретно, с шагом 0,25 или 0,1 от размера пикселя смещает в его пределах центр проекции микрокаталога. Кроме того, программа имитирует азимутальное вращение прибора по отношению к центру проекции с шагом 5 или 10°.

Программа генерации фотонного шума и помех от ИИКП формирует следующие продукты:

- фотонный шум звёзд и фоновой засветки;
- приборный шум;
- помехи от ИИКП;
- имитацию повреждения ИИКП отдельных пикселей матрицы.

### Фотонный шум звёзд и фоновой засветки

Фотонные шумы звёзд и фона имеют общую природу и формируются одинаково, подчиняясь закону Пуассона, в соответствии с которым фотонный шум принимается равным корню квадратному из числа фотоэлектронов:

$$N_{\text{фт}} = \sqrt{n_{\text{фэ}}},$$

где  $N_{\text{фт}}$  — СКО фотонного шума в каждом пикселе матрицы;  $n_{\text{фэ}}$  — число фотоэлектронов в пикселе матрицы.

\* В качестве допущения при построении астрометрической модели принято, что микрокаталоги проецируются в центр матрицы строго параллельно оптической оси прибора. В связи с этим аберрации в оптике не включены в число причин, ведущих к нарушению симметрии распределения яркости звёзд.

В моделирующей программе уровень засветки выбирается независимо от процесса формирования изображений звёзд. На определённом этапе сигналы от звезды и фона суммируются. При этом фотонный шум всегда соответствует суммарному сигналу в пикселе.

### Приборный шум

При составлении программы принято, что под приборным шумом понимается собственный шум матричного приёмника излучения, включая его возрастание в результате старения под воздействием ИИКП. Одной из составляющих приборного шума считаются и «битые» пиксели, возникающие на матричном приёмнике излучения в результате структурных повреждений, вызванных высокоэнергичными частицами. В программе заложены две возможности управления величиной приборного шума:

- установка величины приборного шума оператором в виде СКО шума в ЕМР;
- введение в формируемое на матрице изображение набора фиксированных по расположению карт «битых» пикселей, составляющих определённый процент от общего числа пикселей.

### Помехи от ИИКП

В подавляющем большинстве случаев попадание высокоэнергичных частиц в фотоприёмную матрицу не приводит к её повреждению, а вызывает помеху, способную исказить распределение яркости в изображении звезды. Степень искажения зависит от энергии частицы и от угла входа в кремниевую пластину матрицы. Для генерации помех от ИИКП и для имитации вызываемых ими повреждений в модели используются экспериментальные данные, полученные в ходе полёта приборов звёздной ориентации на различных отечественных космических аппаратах (КА), а также результаты их наземных испытаний (Аванесов и др., 2003). Полученные с борта данные представляют собой цифровые изображения поля матрицы, подвергшейся бомбардировке протонами космического пространства. Матрица закрыта светозащитной крышкой. При этом она не видит звёзд, но прекрасно регистрирует протонные события. По ним можно судить о числе вносимых частиц, оставленной ими энергии и направлении входа в матрицу. Пример такого изображения приведён на *рис. 4*.



*a*

14	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	14	0	0	0	0	0	0	0	0
0	15	17	0	0	0	0	0	0	0
0	0	15	19	21	0	0	0	0	0
0	0	0	0	20	29	22	0	0	0
0	0	0	0	0	0	26	44	15	0
0	0	0	0	0	0	0	0	40	49

*б*

*Рис. 4.* Фрагмент изображения, сформированного потоком высокоэнергичных протонов на матрице ПЗС на борту КА (*a*); всего на снимке локализован 231 объект; суммарный накопленный в пикселях заряд составил  $2,8 \cdot 10^6$  е. Пример цифрового отображения следа от одной из частиц, выраженный в пикселях матрицы и в числе ЕМР в каждом из них (*б*)

Программа генерации помех от ИИКП достаточно точно воспроизводит реальное воздействие высокоэнергичных протонов на матрицу в части соотношения точечных и трековых событий и вносимых ими зарядов. Плотность потока может устанавливаться оператором в зависимости от типа моделируемой орбиты полёта КА.

Все перечисленные выше виды шумов и помех могут вноситься в изображения звёзд по отдельности или в определённых сочетаниях. Всё это в комбинации с микросканированием, моделирующим попадание центра проекции в разные части пикселя, создаёт вполне адекватную модель реального процесса формирования цифровых изображений звёзд матрицей прибора.

Сформированное изображение звёзд микрокаталога подвергается обработке с целью локализации находящейся в его центре звезды. Все существующие для этого варианты программ локализации предназначены для решения одной задачи: выделения на фоне шумов и помех компактной группы принадлежащих звезде пикселей. Программы локализации отличаются друг от друга способами оценки принадлежности того или иного пикселя к группе пикселей, образующих рисунок звезды. В них различаются два основных подхода. В подавляющем большинстве программы локализации строятся на основе измерения уровня средней составляющей сигнала и шума в окрестностях звезды. На этой основе формируется порог отсечки. Всё, что выше порога, считается звездой. Однако существует и другой тип программ, в которых за основу принимаются яркостные параметры самих звёзд. Оба типа имеют свои преимущества и недостатки. Моделирующая программа не решает задач бортовой обработки данных. Её задача заключается в том, чтобы выявить условия, при которых будет получен оптимальный или близкий к оптимальному результат селекции звёзд на фоне шума.

Далее по локализованной группе пикселей выполняется расчёт положения центра звезды в системе координат матрицы. Расчёт выполняется центроидным методом:

$$x_{\text{изм}} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i x_i}{\sum_{i=1}^N I_i}, \quad y_{\text{изм}} = \frac{\sum_{i=1}^N I_i y_i}{\sum_{i=1}^N I_i},$$

где  $N$  — число пикселей в локализованной звезде;  $I_i$  — яркость в  $i$ -м пикселе звезды;  $x_i, y_i$  — координаты  $i$ -го пикселя на матрице. Соответственно, ошибкой единичного измерения считается разница между измеренной координатой звезды и координатой её проекции:

$$dx = x_{\text{изм}} - x_{\text{проекция}}, \quad dy = y_{\text{изм}} - y_{\text{проекция}}.$$

Используемая в АММ расчётно-аналитическая программа может выполнять единичные измерения величины ошибок определения координат звезды по заданным исходным данным либо производить серию измерений, в ходе которых идёт их перебор. Под исходными данными при работе в обоих режимах понимается следующее:

- координаты проецирования звезды на матрицу во внутрипиксельной системе координат;
- разворот небесной системы координат относительно системы координат матрицы  $A_z$ ;
- разрешённое число локализованных пикселей, начиная с самого яркого;
- уровень шумов и помех.

Полученные при этом результаты содержат ошибку измерения координат звезды на матрице во внутрипиксельной системе координат  $dx, dy$ , которые затем пересчитываются в небесную систему координат  $dA, dD$ .

При выполнении серии измерений синхронно задействуются все программно-математические ресурсы АММ. Оператором задаётся от одного до четырёх уровней шумов. Затем для каждого из них производится последовательный перебор внутрипиксельных координат центра проекции звезды, числа разрешённых для локализации пикселей и азимутов.

Статистическая обработка серий единичных измерений позволяет выделить систематические ошибки измерений на фоне случайных. Для этого вычисляются средние значения ошибок  $\overline{dx}$ ,  $\overline{dy}$  и статистический разброс измерений  $S_x$  и  $S_y$ , равный СКО  $dx$  и  $dy$ .

Параметры  $\overline{dx}$ ,  $\overline{dy}$ , а также вычисленные значения СКО случайной ошибки измерения  $S_x$  и  $S_y$  хорошо описывают точность измерения в системе координат матрицы, но не дают прямого представления о полученном результате в угловой мере в небесной системе координат. В связи с этим полученные в линейной мере ошибки  $dx$ ,  $dy$  пересчитываются в небесную систему координат  $dAl$ ,  $dDt$ , по которым вновь рассчитываются средние значения ошибок  $\overline{dAl}$ ,  $\overline{dDt}$  и СКО  $S_{Al}$ ,  $S_{Dt}$ .

В ряде случаев, в первую очередь для компактного отображения результатов, важно иметь интегральные оценки систематической ошибки измерения, представленной в виде углового расстояния между расчётным и измеренным положением звезды. То же касается и случайной ошибки измерения. В связи с этим результат работы АММ в части расчёта прогнозируемых величин систематической ( $L$ ) и случайной ( $S$ ) ошибок измерения может представляться в виде:

$$L = a \cos \left\{ \sin(Dt) \cdot \sin(Dt + \overline{dDt}) + \cos(Dt) \cdot \cos(Dt + \overline{dDt}) \cdot \cos(\overline{dAl}) \right\},$$

$$S = a \cos \left\{ \sin(Dt + \overline{dDt}) \cdot \sin(Dt + \overline{dDt} + S_{Dt}) + \cos(Dt + \overline{dDt}) \cdot \cos(Dt + \overline{dDt} + S_{Dt}) \cdot \cos(S_{Al}) \right\}.$$

Математический аппарат проецирования звёзд из системы координат матрицы на небесную сферу здесь не приводится, поскольку он представляется обратными формулами прямого проецирования, которые были приведены выше.

Расчётно-аналитический блок программ АММ содержит набор средств визуализации и архивирования результатов работы модели. Средства визуализации используются оператором в основном при подборе оптимальных режимов локализации отдельных звёзд. Рисунки 2 и 3 в данной статье сделаны средствами визуализации АММ. На рис. 5 показаны примеры графической визуализации результатов расчётов, выполненных по модели АММ. Приведены результаты поиска оптимальных режимов локализации тех же звёзд, что показаны на рис. 2 и 3.

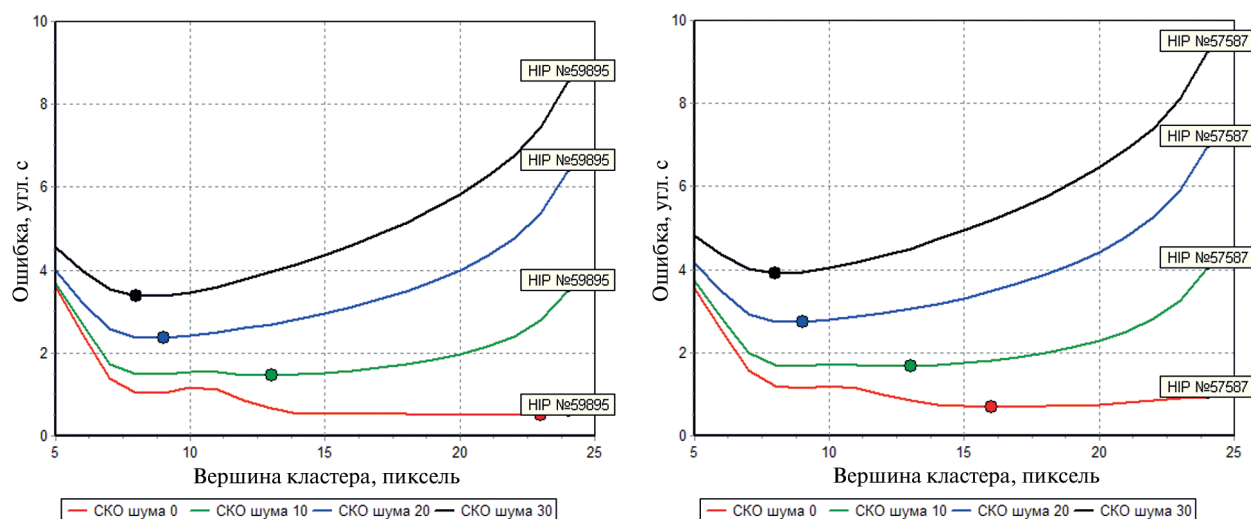


Рис. 5. Иллюстрация поиска оптимальных условий локализации звёзд HIP 59895 и HIP 57587 в условиях воздействия шумов разного уровня

Выбранные для примера звёзды отличаются друг от друга по интегральной яркости примерно на 20 %, что позволяет сравнивать их в одном масштабе графиков. Указанные на изображениях уровни относятся к уровням приборного шума. В построении всех графиков



участвует фотонный шум звёзд. Точки показывают условия оптимальной локализации звёзд для прибора БОКЗ-М60.

Нижние кривые на обоих графиках *рис. 5* отражают идеализированную ситуацию, когда в обрабатываемом сигнале присутствует только фотонный шум звезды. Видно, что при малом числе локализованных пикселей в звезде основной причиной ошибки измерения является ошибка дискретизации. Правее точки ограничивающим точность измерения фактором становится фотонный шум звезды. При этом для более яркой звезды HIP 59895 оптимальным выбирается число локализованных пикселей 23. Для менее яркой звезды HIP 57587 оптимальным считается число локализованных пикселей 16. Далее красная кривая слегка поднимается вверх, что указывает на преобладание фотонного шума звезды над полезным сигналом в периферийных пикселях.

Все расположенные выше кривые по смыслу повторяют нижние. По мере роста уровня приборного шума уменьшается оптимальное число целесообразно локализованных пикселей.

Приведённые на *рис. 5* графики хорошо отображают процесс поиска оптимального числа локализованных пикселей по критерию минимума случайной составляющей ошибки измерения. Но это далеко не всё. Значительная часть получаемых результатов лучше отображается в цифровом виде.

В *таблице* приведены примеры цифрового представления результатов работы АММ для визуального отображения и архивного хранения. Очень важная информация содержится в столбцах  $dAl$ ,  $dDt$  и  $S_{Al}$ ,  $S_{Dt}$ . В приведённых примерах видна разница между измерениями координат звёзд HIP 59895 и HIP 57587. Обе звезды имеют примерно одинаковые величины случайной составляющей ошибки измерения  $S_{Al}$ ,  $S_{Dt}$ , но при этом звезда HIP 57587 имеет ещё и систематическую ошибку измерения  $dAl$ ,  $dDt$  (выделено серым цветом). При этом видно, что величина систематической ошибки зависит от числа локализованных пикселей. Систематическая ошибка может быть частично или полностью устранена, если использовать измеренные величины  $dAl$ ,  $dDt$  в качестве поправок в бортовом каталоге, что также можно делать в АММ.

Примеры цифрового представления результатов работы АММ для визуального отображения и архивного хранения

HIP №	$dAl$	$dDt$	$S_{Al}$	$S_{Dt}$	$Int$	$Pix$	$PixRec$	$Noise$	$PrefInd$
59895	0,000000	0,000000	0,370000	0,350000	2428	21,3	23	0	0,49
	-0,010000	0,000000	1,060000	1,040000	2137	12,9	13	10	1,46
	0,000000	0,040000	1,770000	1,640000	1781	9,0	9	20	2,36
	0,000000	-0,050000	2,480000	2,390000	1612	7,9	8	30	3,37
57587	4,310000	1,840000	0,530000	0,440000	2067	15,8	16	0	0,68
	3,680000	1,560000	1,240000	1,150000	1879	12,9	13	10	1,68
	2,660000	1,110000	2,040000	1,850000	1526	8,9	9	20	2,73
	2,370000	1,000000	2,850000	2,710000	1379	7,9	8	30	3,90

Столбец  $PixRec$  содержит информацию о рекомендованном числе локализованных пикселей при различных значениях шума (столбец  $Noise$ ). Получившаяся при такой локализации интегральная яркость звезды указана в столбце  $Int$ . Последний столбец *таблицы* показывает относительную величину предпочтения ( $PrefInd$ ), численно равную величине случайной ошибки  $S$  при оптимальном числе локализованных пикселей. Это значение следует учитывать при определении ориентации с использованием данной звезды.

В целом, зная основные параметры приборов, с помощью формируемой АММ информации можно отбирать из базового каталога звезды для бортового каталога, корректировать его с учётом фоновой обстановки в ближайших окрестностях звёзд и с достаточно высокой точностью прогнозировать ожидаемые величины ошибок измерения.

## Литература

1. Аванесов Г.А., Акимов В.В., Воронков С.В. Исследование влияния заряженных частиц на функционирование астронавигационных приборов // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 79–83.
2. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльясhev Я.Д., Юматов В.А. (2019а) Базовый каталог звёзд для датчиков ориентации КА // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 65–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74.
3. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльясhev Я.Д. (2019б) Фотометрическая модель звёздного датчика ориентации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 75–84. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84.

## Astrometric model of a stellar spacecraft orientation sensor

G. A. Avanesov, E. V. Belinskaya, N. N. Brysin,  
O. V. Filippova, V. A. Shamis, Ya. D. Elyashev

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*  
*E-mail: eluashev-jak@yandex.ru*

The astrometric model of a stellar sensor is developed and used to study and predict the results of the operation of hardware and software and mathematical elements of devices in the process of solving the problem of measuring direction to a single star in the sky. The astrometric model includes: a basic catalog of stars, a photometric model of the instrument, programs for localizing stars on a photodetector array, as well as an apparatus for statistical analysis and generalization of the results of measurements of their coordinates. The model allows us to a priori estimate the expected random and systematic errors in measuring the direction of stars of different brightness and spectral classes, taking into account the features of their environment and the parameters of specific instruments, including under conditions of exposure to noise of various physical nature. A priori knowledge of the response of the instrument to the appearance of stars in different environments with different noise levels and external illumination allows us to optimize on-board star catalogs, star localization programs on a photodetector array, and also to solve the problem of reducing the level of random and systematic measurement errors associated with the on-board catalog. The astrometric model of the stellar orientation sensor is implemented in the Star Manager computer program.

**Keywords:** star tracker, astrometry, star catalog, point spread function, systematic error, random error, integrated star brightness, centroidal method, photon noise, instrument noise

Accepted: 16.01.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98

## References

1. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V., Issledovanie vliyaniya zaryazhennykh chastits na funktsionirovanie astronavigatsionnykh priborov (Investigation of the effect of charged particles on the functioning of astronomical instruments), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 79–83.
2. Avanesov G. A., Snetkova N. I., Stroilov N. A., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D., Yumatov B. A. (2019a), Bazovyi katalog zvezd dlya datchikov orientatsii KA (Basic catalogue of stars for spacecraft orientation sensors), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 65–74, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74.
3. Avanesov G. A., Stroilov N. A., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D. (2019b), Fotometricheskaya model' zvezdnogo datchika orientatsii (Photometric model of a star tracker orientation), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 75–84, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84.