

## Моделирование влияния шумовых факторов на точность измерения координат звёзд

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

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

Широко применяемые в современной космической технике звёздные датчики ориентации содержат в составе каталоги наиболее ярких звёзд небесной сферы. Для обеспечения необходимого числа звёзд в поле зрения прибора по всей небесной сфере приходится использовать звёзды в диапазоне 4–5 звёздной величины. Процесс измерения координат начинается в приборах с получения чёрно-белых изображений звёзд в достаточно широком диапазоне видимой и ближней инфракрасной области спектра электромагнитного излучения. Затем выполняется локализация изображений звёзд на фоне шумов различной физической природы. Процесс измерения завершается вычислением положения энергетического центра яркости локализованной группы пикселей в системе координат матрицы фотоприёмного устройства прибора. При этом большой диапазон интегральной яркости звёзд, используемый в приборах, неизбежно ведёт к значительным различиям в точности измерения их координат. Моделировать и оптимизировать условия измерения координат звёзд различной яркости и спектрального класса, а также прогнозировать точность получаемого результата в условиях воздействия шумов позволяет расчётно-аналитическая программа Star Manager. В статье приводятся полученные с её помощью результаты, рассчитанные для двух вариантов исполнения приборов при разных уровнях шумового воздействия.

**Ключевые слова:** звёздный датчик, астрометрия, каталог звёзд, фотонный шум, приборный шум, случайная ошибка, фоновое излучение, звёзды окружения, центроидный метод, коррекция каталога

Одобрена к печати: 14.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-61-69

В современных звёздных датчиках ориентации изображения звёзд небесной сферы с помощью объектива проецируются на матричное фотоприёмное устройство (МФПУ), в качестве которого используются ПЗС-матрицы (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device) или КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник, *англ.* CMOS — complementary metal-oxide-semiconductor). МФПУ производит оцифровку изображения, т. е. выполняет его амплитудную и пространственную дискретизацию. В современных приборах шум амплитудной дискретизации может быть пренебрежимо мал. В то же время шум пространственной дискретизации при малом числе локализованных в звезде пикселей может становиться одной из составляющих приборного шума (Jia et al., 2010). Шум, вызванный пространственной дискретизацией в моделирующей программе Star Manager, считается неизменным во времени и присущим данному типу прибора и его настройкам. Другая составляющая приборного шума изменяется во времени. Она объединяет в себе собственные шумы МФПУ, а также все остальные виды шумов, имеющих в основном тепловую природу, присущую электронным приборам всех типов.

Помимо приборного шума, большое влияние на точность измерений оказывает фотонный шум двух видов. Первый вид является неотъемлемой составляющей излучения наблюдаемой в данный момент звезды. Второй источник фотонного шума — это посторонние, или паразитные, засветки МФПУ, которые возникают в ходе эксплуатации звёздных приборов в результате воздействия факелов двигательных установок, переотражений солнечного, лунного или земного излучения от элементов конструкции космического аппарата (КА), а также при критических углах наблюдения звёзд по отношению к Солнцу.

Все формируемые программой Star Manager составляющие шумов могут накладываться на изображения звёзд одновременно в заданной пропорции или по отдельности, что позволяет лучше оценить влияние каждой из них на результат измерения.

Рассмотрим влияние шумовых факторов на точность измерения координат на примере трёх звёзд, используемых в каталогах датчиков ориентации БОКЗ-М60 (блок определения координат звёзд): НР16611, НР59895 и НР68348. Все перечисленные звёзды не имеют в радиусе 5' соседей с магнитудой менее 13m, т.е. у них отсутствуют причины для возникновения дополнительных ошибок измерения. Число таких звёзд относительно мало. В базовом звёздном каталоге БК-0 их всего около 1100 (Аванесов и др., 2019а). Основные характеристики этих звёзд приведены в *табл. 1*.

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых звёзд

	Звёздная величина*	Спектральный класс	Интегральная яркость (ЕМР)**	
			Для ПЗС	Для КМОП
НР16611	4,22	B9	13386	9524
НР59895	6,05	A2	2462	1741
НР68348	7,39	F8	747	515

\* Звёздная величина указана с поправкой на спектральную характеристику прибора.

\*\* Значения интегральной яркости указаны для двух типов матриц: ПЗС и КМОП при времени накопления 400 и 200 мс соответственно (ЕМР — единицы младшего разряда).

Интегральная яркость приведённых в *табл. 1* звёзд рассчитана с учётом спектральных характеристик прибора БОКЗ-М60 (Аванесов и др., 2019б). Каждая из них по своей яркости может считаться типичной представительницей группы: максимально ярких, средних и наименее ярких звёзд бортового каталога. В программе Star Manager звезда моделируется гауссовым распределением яркости, полуширина которого определяется ФРТ (функция рассеяния точки) объектива, размерами пикселей матрицы, а также фокусировкой прибора, которая задаётся в программе параметром  $\sigma$ .

В приборе БОКЗ-60 в качестве МФПУ в настоящее время используется ПЗС-матрица с пикселями размером 16×16 мкм и большой зарядовой вместимостью до 180 000 электрон. При этом среднеквадратическое отклонение (СКО) собственных шумов МФПУ не превышает 25–30 электрон. Однако использовать полностью зарядовую вместимость ПЗС-матрицы в звёздных датчиках обычно не удаётся. Для заданного диапазона интегральной яркости звёзд ищется компромисс, при котором наименее яркие звёзды наблюдаются с допустимой величиной случайной погрешности измерений, а наиболее яркие не уходят за пределы шкалы. В разных условиях применения в приборах БОКЗ-М60 компромисс достигался при использовании от 20 до 40 % от полной зарядовой вместимости матрицы.

Поскольку приборы БОКЗ-М60 и его прототипы эксплуатируются на борту многих отечественных КА уже более 20 лет, хорошо известны некоторые стандартные условия их работы на низких околоземных и геостационарных орбитах. На Международной космической станции (МКС) приборы БОКЗ функционируют без явных признаков деградации с июля 2000 г., а на КА «Ямал-202» — с 2003 г. На обоих аппаратах для звёздных приборов создан и поддерживается на протяжении многих лет вполне комфортный тепловой режим  $+10 \pm 15$  °С. При этом температура на ПЗС-матрицах приборов стабилизируется встроенной системой терморегулирования на уровне  $-20 \pm 1$  °С. Соответственно, основным источником приборных шумов в этих условиях становится МФПУ.

На смену ПЗС-матрицам постепенно приходят КМОП-матрицы, имеющие значительно меньшие размеры пикселей и меньшую зарядовую вместимость. Типичные параметры такого МФПУ: формат матрицы — 2048×2048 пикселей размером 5,5×5,5 мкм, зарядовая вместимость — 12 000 электрон при СКО собственных шумов в нормальных климатических условиях около 10 электрон.

В базе данных программы Star Manager содержатся технические характеристики нескольких разновидностей звёздных датчиков ориентации и используемых в них ключевых элементов, таких как оптические системы, ПЗС- и КМОП-матрицы. Это позволяет искать и находить оптимальные комбинации элементов для достижения максимально высокой точности измерения координат звёзд.

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:

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

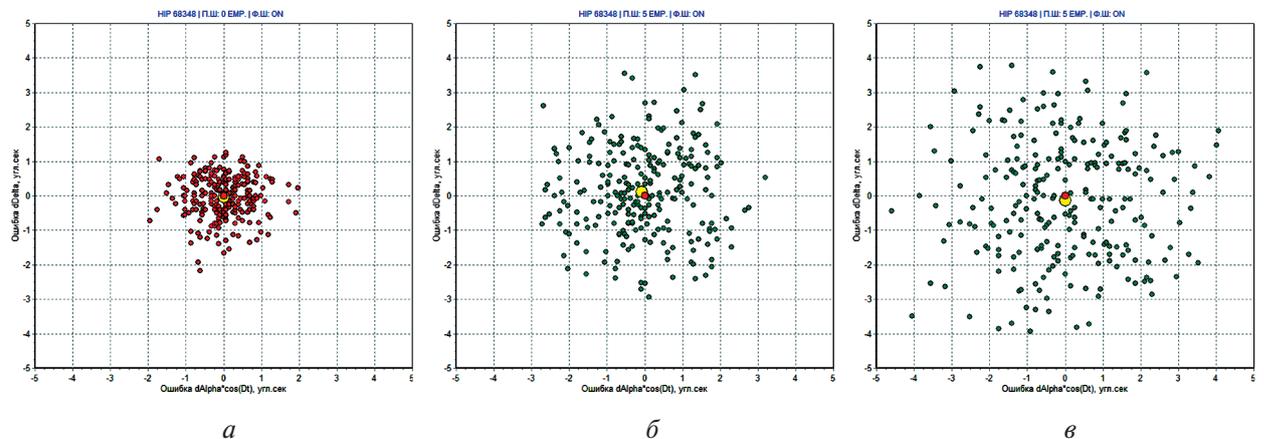
где  $N_{\text{фт}}$  — СКО фотонного шума в каждом пикселе матрицы;  $n_{\text{фэ}}$  — число фотоэлектронов в пикселе матрицы.

В моделирующей программе уровень засветки выбирается независимо от процесса формирования изображений звёзд. На определённом этапе сигналы от звезды и от фона суммируются. При этом фотонный шум всегда соответствует суммарному сигналу в пикселе (Аванесов и др., 2020).

Уровень приборного шума в основном определяется МФПУ. Под действием источников ионизирующего излучения космического пространства со временем он может возрастать в известных разработчику прибора пределах.

В программе Star Manager уровень всех видов шумов задаётся оператором вручную через пользовательский интерфейс в виде СКО шума, измеряемого в ЕМР. В случае стандартных условий эксплуатации СКО шума МФПУ с некоторым запасом принимается равным 5 ЕМР, уровень паразитной засветки оптики прибора — равным 100 ЕМР. Уровень фотонного шума звёзд и фона вычисляется автоматически.

На *рис. 1* в качестве примера показаны результаты моделирования воздействия шумов на точность измерения координат звезды HIP 68348 в стандартных условиях эксплуатации.



*Рис. 1.* Звезда HIP 68348: *а* — с фотонным шумом звезды; *б* — с наложенным приборным шумом с СКО в 5 ЕМР; *в* — с введением фоновой засветки в 100 ЕМР

На *рис. 1а* хорошо виден результат воздействия собственного фотонного шума звезды на точность измерения её координат. Флуктуации фотонного шума при многократном (100 или более раз) проецировании изображения звезды в одну и ту же точку на матрице формируют облако ошибок радиусом  $2''$  с центром в точке начала координат графика.

Наложение 5 ЕМР приборного шума, показанное на *рис. 1б*, приводит к увеличению радиуса облака ошибок измерения до  $4''$ . Введение фоновой засветки в 100 ЕМР, что эквивалентно примерно 4 ЕМР приборного шума, приводит к результату, показанному на *рис. 1в*. Здесь радиус облака ошибок измерения уже превышает  $5''$ . При этом аналогичные шумовые воздействия на более яркую звезду HIP 16611 приводят к появлению случайной ошибки измерения, не превышающей  $\pm 1''$ , что видно из *рис. 2* (см. с. 64).

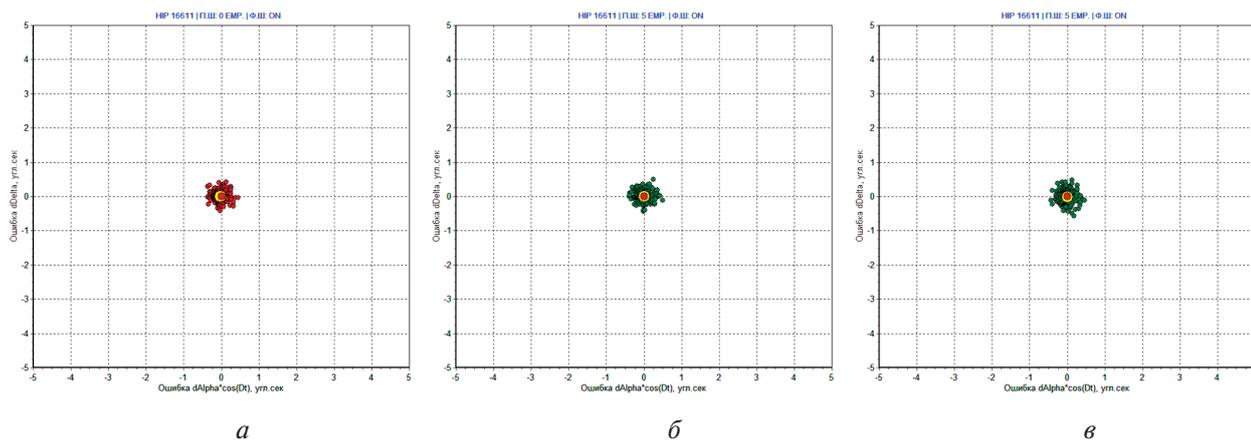


Рис. 2. Звезда HIP 16611: *a* — с фотонным шумом звезды; *б* — с наложенным приборным шумом с СКО в 5 ЕМР; *в* — с введением фоновой засветки в 100 ЕМР

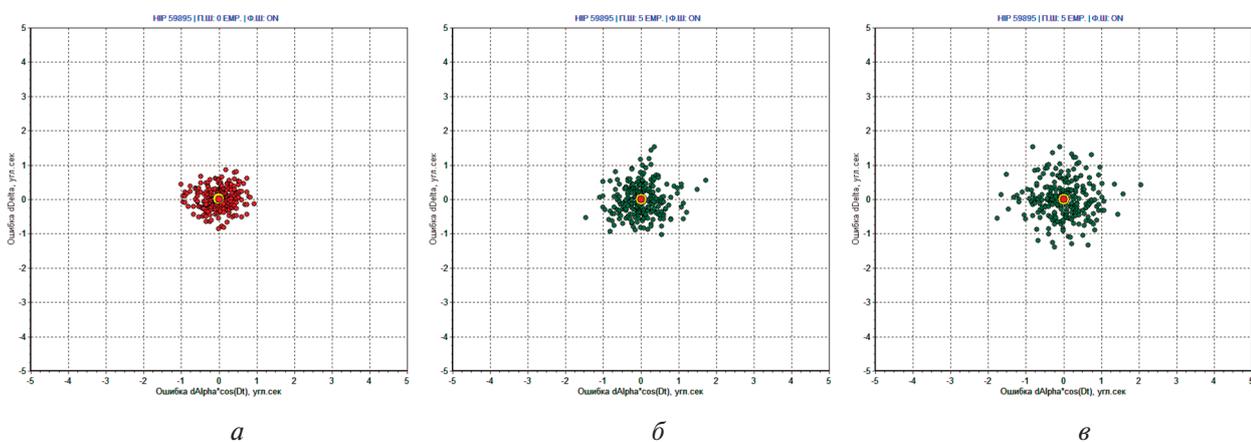


Рис. 3. Звезда HIP 59895: *a* — с фотонным шумом звезды; *б* — с наложенным приборным шумом с СКО в 5 ЕМР; *в* — с введением фоновой засветки в 100 ЕМР

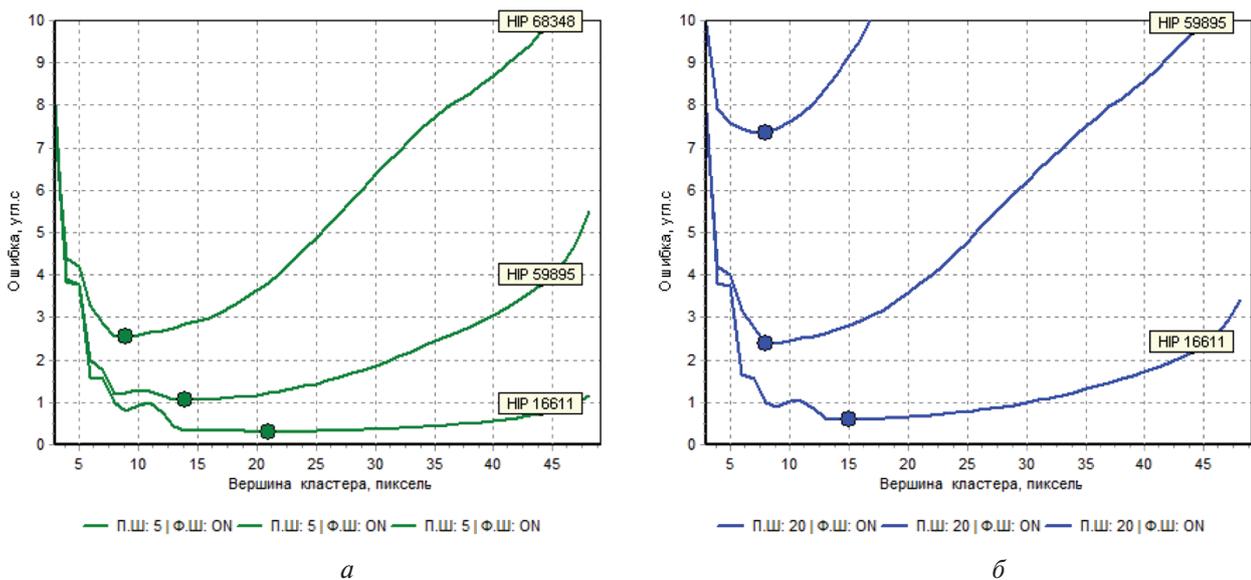


Рис. 4. Оптимальные условия локализации звёзд HIP 16611, HIP 59895 и HIP 68348 на ПЗС-матрице прибора БОКЗ-М60: *a* — при стандартных условиях эксплуатации; *б* — при СКО приборного шума 20 ЕМР

Не слишком большие потери несёт и звезда HIP59895, представляющая по своей интегральной яркости большинство в бортовом каталоге прибора БОКЗ-М60. На *рис. 3* (см. с. 64) видно, что пиковое значение случайной ошибки измерения у неё не превышает  $\pm 2''$ .

В приведённых выше примерах не учитывалось влияние на результат измерений эффекта пространственной дискретизации изображений звёзд. Представление об этом даёт *рис. 4* (см. с. 64), полученный также с помощью программы Star Manager. Одновременно на *рис. 4* точкой на графиках отображается решение задачи выбора оптимальных условий локализации звёзд. По оси  $X$  на графиках отложено число локализованных пикселей, образующих вершинную кластера.

Решая задачу оптимизации условий локализации звёзд, программа Star Manager использует фотометрическую и астрометрическую модели звёздного датчика (Аванесов и др., 2019б, 2020) и аппарат внутривидеопиксельного микросканирования. Каждая из представленных на *рис. 4* (см. с. 64) звёзд последовательно проецируется на разные точки пикселя. В каждой из них по набору из 100 измерений вычисляется разница между координатами расчётного и измеренного положения звезды. Оптимальной считается та точка, в которой случайная ошибка измерения координат звезды окажется минимальной. Число локализованных пикселей регулируется путём выбора величины порога отсечки (Старосотников, Фёдорцев, 2016).

На графиках, показанных на *рис. 4*, явно выделяются две зоны слева и справа от точки, обозначающей минимальное значение случайной ошибки измерения. Слева на ошибку измерения максимальное влияние оказывает пространственная дискретизация изображения звезды. С ростом числа локализованных пикселей ошибка, вызванная пространственной дискретизацией измерений, уменьшается. Справа с ростом числа локализованных периферийных пикселей начинает сказываться их более высокая, чем в центре, зашумлённость. При этом ошибка измерений снова начинает расти.

Фактически программа Star Manager устанавливает связь между значением отношения сигнал/шум в сигнале от звезды и величиной случайной ошибки, указывая при этом оптимальные условия для выполнения измерения.

На *рис. 4а* показаны графики зависимости величины случайной ошибки в измерении координат звезды от числа локализованных в ней пикселей. Из графиков видно, что при стандартных условиях эксплуатации наилучшие результаты достигаются у наиболее яркой звезды HIP 16611. Наихудший результат измерений демонстрирует звезда HIP 68348. Значения интегральной яркости этих звёзд отличаются примерно в 18 раз, что приводит при стандартной шумовой обстановке к разнице в величине случайной ошибки измерения в 8 раз.

На *рис. 4б* показаны результаты моделирования ситуации, когда приборный шум возрастает до 20 ЕМР. При этом у двух наиболее ярких звёзд HIP 68348 и HIP 59895 точность измерения падает примерно в 2–2,5 раза, а у наименее яркой звезды она уменьшается почти в 3,5 раза, о чём можно судить по *табл. 2*.

*Таблица 2.* Ожидаемые значения ошибок измерения координат звёзд прибором БОКЗ-М60 на основе ПЗС-матрицы при рекомендованных условиях

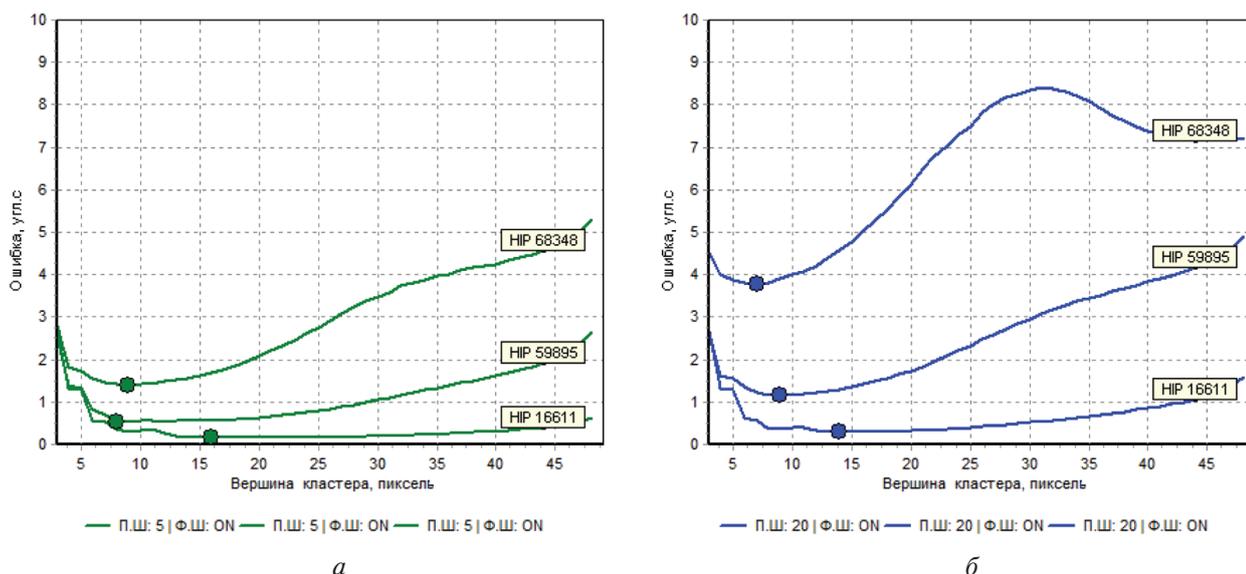
HIP №	dAl	dDl	sAl	sDlt	Int	PixRec	Noise*	PrefInd
16611	0	-0,01	0,23	0,22	13086	21	5	0,31
59895	0	-0,02	0,78	0,73	2205	14	5	1,05
68348	0	0,03	1,81	1,80	538	9	5	2,55
16611	0,01	0	0,45	0,41	12329	15	20	0,59
59895	-0,05	-0,01	1,75	1,67	1647	8	20	2,37
68348	0,03	-0,12	2,39	5,02	389	8	20	7,35

\* Указано значение приборного шума. Ошибки вычислены с учётом фотонного шума звезды и фона в 100 ЕМР.

В *табл. 2* использованы обозначения, введённые в работе (Аванесов и др., 2019а):

- HIP № — номер звезды по каталогу Hipparcos;
- dAI и dDI — величины систематических ошибок измерений координат звезды, угл. с;
- sAI и sDI — величины случайных ошибок измерений координат звезды, угл. с;
- Int — интегральная яркость звезды в ЕМР после её локализации;
- PixRec — рекомендуемое число локализуемых пикселей;
- Noise — учитываемый в расчёте приборный шум. В данном примере он дополнен фотонным шумом звезды и фона в 100 ЕМР;
- PrefInd — индекс предпочтения, интегральный показатель, характеризующий ожидаемое значение СКО случайной ошибки измерения координат звезды, угл. с.

Как уже упоминалось ранее, на смену используемой в приборе БОКЗ-М60 ПЗС-матрице со временем может прийти более современная КМОП-матрица с более высокой чувствительностью и значительно меньшим размером пикселя. Воспользуемся программой Star Manager и промоделируем эффект от использования такой матрицы в приборе БОКЗ-М60 на примере звёзд, приведённых в *табл. 1*. При этом поле зрения прибора возрастёт с  $8 \times 8^\circ$  при ПЗС-матрице до  $11 \times 11^\circ$  при использовании КМОП-матрицы. Результаты моделирования показаны на *рис. 5*.



*Рис. 5.* Оптимальные условия локализации звёзд HIP 16611, HIP 59895 и HIP 68348 на КМОП-матрице прибора БОКЗ-М60: *а* — при стандартных условиях эксплуатации; *б* — при СКО приборного шума 20 ЕМР

Графики на *рис. 5* выполнены в том же масштабе, что и на *рис. 4*. Нетрудно заметить, что установка КМОП-матрицы в прибор БОКЗ-М60 обещает значительное повышение точности измерения координат звёзд по отношению к существующему варианту. Результат вполне ожидаемый. Сказывается более низкий уровень шумов КМОП-матрицы и значительно меньшие размеры пикселей. К этому можно добавить, что показанные на *рис. 5* результаты получены при времени накопления полезного сигнала в два раза меньшем, чем в оригинальной версии прибора БОКЗ-М60.

*Таблица 3* позволяет более точно оценить эффект от использования КМОП-матрицы в приборе БОКЗ-М60.

Сравнение *табл. 2* и *3* показывает, что в случае использования в приборе БОКЗ-М60 КМОП-матрицы точность измерения направления на звёзды возрастёт в два раза. Прибор БОКЗ-М60 в существующем виде на практике обеспечивает СКО случайной ошибки изме-

рения параметров ориентации при движении КА с угловой скоростью 4 угл. мин/с на уровне 1,5". Переход на КМОП-матрицу позволил бы значительно повысить класс точности прибора.

Таблица 3. Ожидаемые значения ошибок измерения координат звёзд прибором БОКЗ-М60 на основе КМОП-матрицы при рекомендованных условиях

HIP №	dAl	dDl	sAl	sDlt	Int	PixRec	Noise*	PrefInd
16611	0	0	0,12	0,11	8976	16	5	0,15
59895	0,02	-0,01	0,39	0,37	1180	8	5	0,53
68348	0,02	-0,02	1,02	0,97	346	8	5	1,40
16611	0,02	0,02	0,22	0,20	8584	14	20	0,28
59895	-0,02	-0,02	0,86	0,80	1205	9	20	1,15
68348	-0,14	-0,05	2,71	2,66	231	7	20	3,79

\* Указано значение приборного шума. Ошибки вычислены с учётом фотонного шума звезды и фона в 100 ЕМР.

На рис. 6 приведены графики зависимости величины случайной ошибки измерения координат звёзд на ПЗС- и КМОП-матрицах прибора БОКЗ-М60 от их интегральной яркости и уровня приборных шумов.

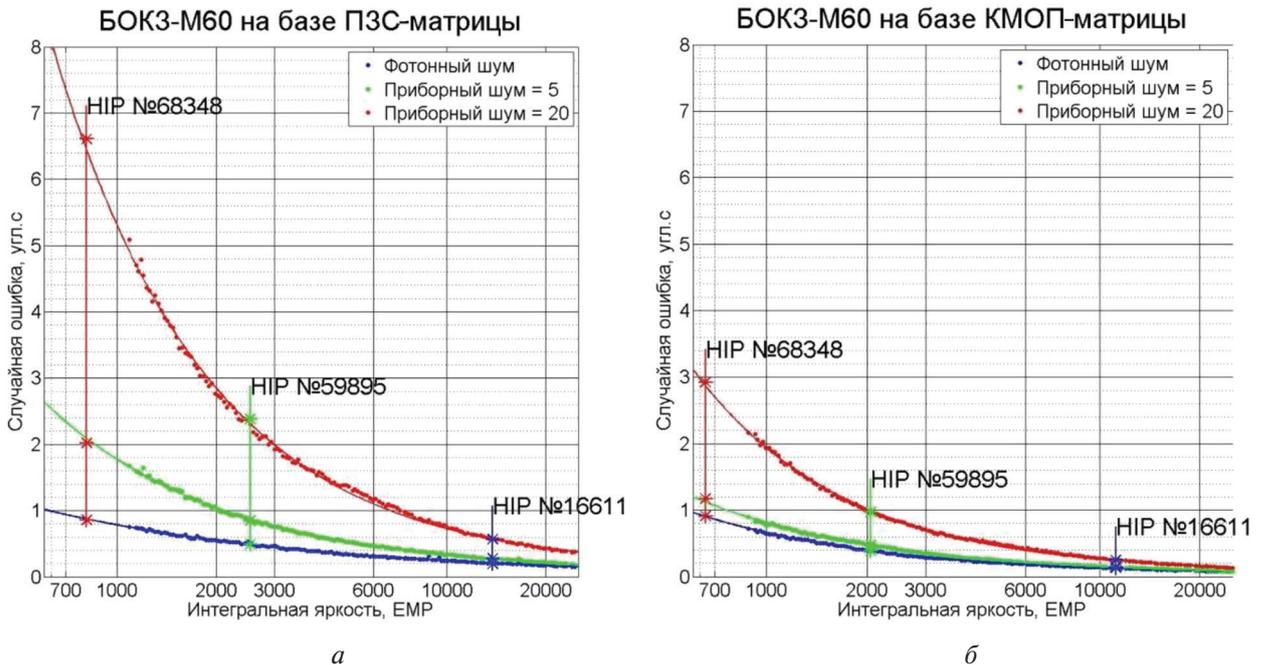


Рис. 6. Зависимость величины случайной ошибки измерения координат звёзд в варианте на ПЗС-матрице (а) и КМОП-матрице (б) прибора БОКЗ-М60 от их интегральной яркости и уровня приборного шума

Для построения графиков из базового каталога БК-0 было отобрано около 200 звёзд, величины интегральной яркости которых образуют возрастающий ряд в пределах чувствительности прибора. Значения СКО ошибок измерения рассчитаны в программе Star Manager. Нижняя кривая графика построена для случая полного отсутствия приборных шумов. Она показывает «предел возможного», который определяется фотонным шумом звёзд. Средняя

кривая соответствует условиям начального периода эксплуатации прибора в космосе. Верхняя кривая даёт численное представление о величине случайной ошибки измерения в случае значительного возрастания приборного шума до 20 ЕМР.

Приведённые на *рис. 6* графики показывают, что избежать значительной разницы в величинах случайных ошибок измерения координат звёзд на матрице можно, ограничив диапазон интегральной яркости используемых в бортовом каталоге звёзд. Для приборов с относительно малым ( $8 \times 8^\circ$ ) полем зрения, как у БОКЗ-М60 на ПЗС-матрице, это можно сделать только исключением самых ярких звёзд и увеличением времени накопления полезного сигнала. Использование в этом же приборе КМОП-матрицы увеличивает площадь его поля зрения почти в два раза — до  $11 \times 11^\circ$ . При этом необходимое для работы прибора число звёзд в бортовом каталоге может быть значительно сокращено. В свою очередь, это даёт возможность почти в два раза уменьшить диапазон интегральной яркости звёзд за счёт наименее ярких из них.

Заканчивая рассмотрение вопросов моделирования влияния шумов на точность измерения координат звёзд, отметим следующее. Ресурсы программы Star Manager позволяют моделировать условия наблюдения всех звёзд базового каталога БК-0 при воздействии шумов различной природы в широком диапазоне значений, определяя при этом оптимальные условия для их локализации и прогнозируя величины случайных ошибок измерения. Результаты работы программы протоколируются и могут представляться как в табличной, так и в графической форме. Помимо моделирования условий наблюдения, программа позволяет оптимизировать параметры вновь разрабатываемых приборов в части, касающейся оптически связанной пары «объектив — МФПУ».

## Литература

1. Аванесов Г.А., Снеткова Н.И., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д., Юматов Б.А. (2019а) Базовый каталог звезд для датчиков ориентации космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 65–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74.
2. Аванесов Г.А., Строилов Н.А., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. (2019б) Фотометрическая модель звездного 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.
3. Аванесов Г.А., Белинская Е.В., Брысин Н.Н., Филиппова О.В., Шамис В.А., Эльяшев Я.Д. Астрометрическая модель звездного датчика ориентации космического аппарата // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 89–98. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98.
4. Старосотников Н.О., Фёдоров Р.В. Метод снижения влияния шумов фонового сигнала координат при определении координат энергетического центра тяжести изображения в ОЭП // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2016. Т. 9. С 133–135.
5. Jia H., Yang J., Li X., Yang J., Yang M., Liu Y., Hao Y. Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star track // Science China Technological Sciences. 2010. V. 53. P. 3145–3152. URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11431-010-4129-7.pdf>.

## Modeling the influence of noise factors on the accuracy of measuring the coordinates of stars

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

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*

*E-mail: eluashev-jak@yandex.ru*

Star orientation sensors widely used in modern space technology contain catalogs of the brightest stars in the celestial sphere. To ensure the required number of stars in the field of view of the instrument throughout the entire celestial sphere, it is necessary to use stars in the range of 4–5 magnitudes. The process of measuring coordinates begins in devices with obtaining black and white images of stars in a fairly wide range of the visible and near-IR regions of the electromagnetic radiation spectrum. Then, the images of stars are localized against the background of noises of various physical nature. The measurement process is completed by calculating the position of the energy center of the brightness of the localized group of pixels in the coordinate system of the matrix of the photodetector of the device. At the same time, a large range of integral brightness used in the instruments of stars inevitably leads to significant differences in the accuracy of measuring their coordinates. Simulation and optimization of the conditions for measuring the coordinates of stars of different brightness and spectral class, as well as predicting the accuracy of the result under the influence of noise, allows the calculation and analytical program Star Manager. The paper presents the results obtained with its help, calculated for two versions of devices at different levels of noise exposure.

**Keywords:** star tracker, astrometry, star catalog, photon noise, instrument noise, random error, background radiation, neighborhood of catalogue stars, centroidal method, catalogue correction

Accepted: 14.12.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-61-69

### References

1. 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 kosmicheskogo apparata (Basic catalogue of stars for spacecraft orientation sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 65–74, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-65-74.
2. Avanesov G. A., Stroilov N. A., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D. (2019b), Fotometricheskaya model' zvezdnogo datchika orientatsii (Photometric model of star tracker orientation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 75–84, DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84.
3. Avanesov G. A., Belinskaya E. V., Brysin N. N., Filippova O. V., Shamis V. A., Elyashev Ya. D., Astrometricheskaya model' zvezdnogo datchika orientatsii kosmicheskogo apparata (Astrometric model of a stellar spacecraft orientation sensor), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 89–98, DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-89-98.
4. Starosotnikov N. O., Fedortsev R. V., Metod snizheniya vliyaniya шумов fonovogo signala koordinat pri opredelenii koordinat energeticheskogo tsentra tyazhesti izobrazheniya v OEP (Method of reducing the influence of noise of the background signal of coordinates in determining the coordinates of the energy center of gravity of the image in the OES), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2016, Vol. 9, pp. 133–135.
5. Jia H., Yang J., Li X., Yang J., Yang M., Liu Y., Hao Y., Systematic error analysis and compensation for high accuracy star centroid estimation of star track, *Science China Technological Sciences*, 2010, Vol. 53, pp. 3145–3152, available at: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11431-010-4129-7.pdf>.