

## Фотометрическая модель звёздного датчика ориентации

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

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

Фотометрическая модель звёздного датчика ориентации является важной составной частью математической модели прибора в целом. Именно она позволяет математически корректно перейти от приводимых в астрономических каталогах звёздных величин и спектральных характеристик звёзд к реально воспринимаемым приборами величинам их интегральной яркости. Сделать это необходимо, поскольку современные звёздные датчики ориентации измеряют координаты звёзд небесной сферы, получая их черно-белые изображения в достаточно широком диапазоне видимой и ближней ИК-области спектра электромагнитного излучения. При этом спектральная характеристика прибора определяется используемой в нём оптикой и матричным приёмником излучения. Измеренная прибором интегральная яркость звезды зависит от его спектральной характеристики, а также от звёздной величины и спектрального класса наблюдаемого объекта. Априорное знание отклика прибора на появление в его поле зрения звёзд разной яркости и разных спектральных классов необходимо как для составления звёздных каталогов, так и для получения численных оценок точности измерения их координат, в том числе при разных уровнях шумов. Достоверность приводимой ниже фотометрической модели звёздного датчика ориентации подтверждается экспериментальными данными, полученными аналогичными приборами в ходе космического полёта.

**Ключевые слова:** звёздный датчик, фотометрия, каталог звёзд, функция рассеяния точки, показатель цвета, спектральное пропускание, интегральная яркость звезды, метод математического проектирования

Одобрена к печати: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84

### Введение

В период с октября 2016 г. по февраль 2017 г. на борту космического аппарата (КА) «Ресурс-П» № 3 проводилось комплексное исследование работы звёздных датчиков ориентации. Для этого «сырые» данные от четырёх установленных на аппарате приборов БОКЗ-М60 передавались по телеметрическим каналам связи на наземные пункты приёма. За время эксперимента было накоплено около 52 млн телеметрических кадров, охвативших примерно 60 % площади небесной сферы и около 6000 звёзд бортового каталога. Полученные материалы были обработаны и использованы для решения различных задач развития приборов этого класса (Аванесов и др., 2018а–г). Одна из них, связанная с уточнением фотометрической модели звёздных датчиков ориентации, рассматривается в настоящей статье.

Фотометрическая модель прибора играет важную роль в разработке бортовых звёздных каталогов, участвует в прогнозировании ожидаемой точности измерения направлений на звёзды, а также часто используется для ранжирования звёзд по интегральной яркости во многих алгоритмах обработки данных.

Определённые с помощью фотометрической модели расчётные значения интегральной яркости звёзд сравниваются с аналогичными данными, полученными экспериментальным путём. Таким образом подтверждается достоверность модели.

### Фотометрическая модель звёздного датчика

Рассматриваемая ниже фотометрическая модель является частью математической модели звёздного датчика ориентации. Она базируется на звёздном каталоге Hipparcos (The Hipparcos Space Astrometry Mission, <https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos>; Perryman, 1997) и параметрах оптики, используемой в приборе звёздной ориентации, в том числе матричного приёмника

излучения. Модель предназначена для расчётов интегральных яркостей звёзд, входящих в состав бортового каталога. При составлении модели был принят ряд допущений:

- интегральная яркость звезды рассчитывается без учёта собственных шумов прибора;
- звезда проецируется на матрицу строго параллельно оптической оси прибора в центр матричного приёмника излучения;
- вся поступившая от звезды энергия принимается одним пикселем матрицы с неограниченной зарядовой вместимостью.

Все перечисленные допущения приняты в интересах получения однозначного результата, который в дальнейших разделах общей модели прибора используется для оценки влияния на результат измерения шумов прибора, вариаций функции рассеяния точки, пиксельной структуры матричного приёмника излучения и других особенностей приборов звёздной ориентации.

Уточнение фотометрической модели в рамках данного подхода производится путём подбора масштабного коэффициента, в качестве которого взята цена единицы младшего разряда используемого в приборе аналого-цифрового преобразователя ( $K_{АЦП}$ ), измеренная в числе электронов.

Цена единицы младшего разряда фотоприёмного устройства зависит от множества факторов, включая как характеристики электрической схемы прибора, так и особенности наблюдаемого объекта. Расчёт этого параметра на основе исключительно радиоэлектронных характеристик прибора можно произвести сравнительно просто и быстро. При этом он позволяет оценить величины пригодных для работы полезных сигналов и, следовательно, рабочий диапазон звёзд по звёздной величине.

В свою очередь, предлагаемый подход позволяет точнее рассчитать интегральную яркость звезды с учётом спектральных характеристик оптической системы и спектральных классов самих звёзд. При наличии дополнительной информации о функции рассеяния точки (ФРТ) объектива и параметрах фокусировки системы можно смоделировать изображение звезды максимально близко к видению прибора. То есть получить распределение сигнала звезды на матрице, оценить вклад разного рода ошибок в определение координат центра звезды и провести коррекцию их координат с учётом специфики конкретного прибора в случае необходимости.

Исходные данные и алгоритм расчёта интегральной яркости звёзд показаны на *рис. 1*.

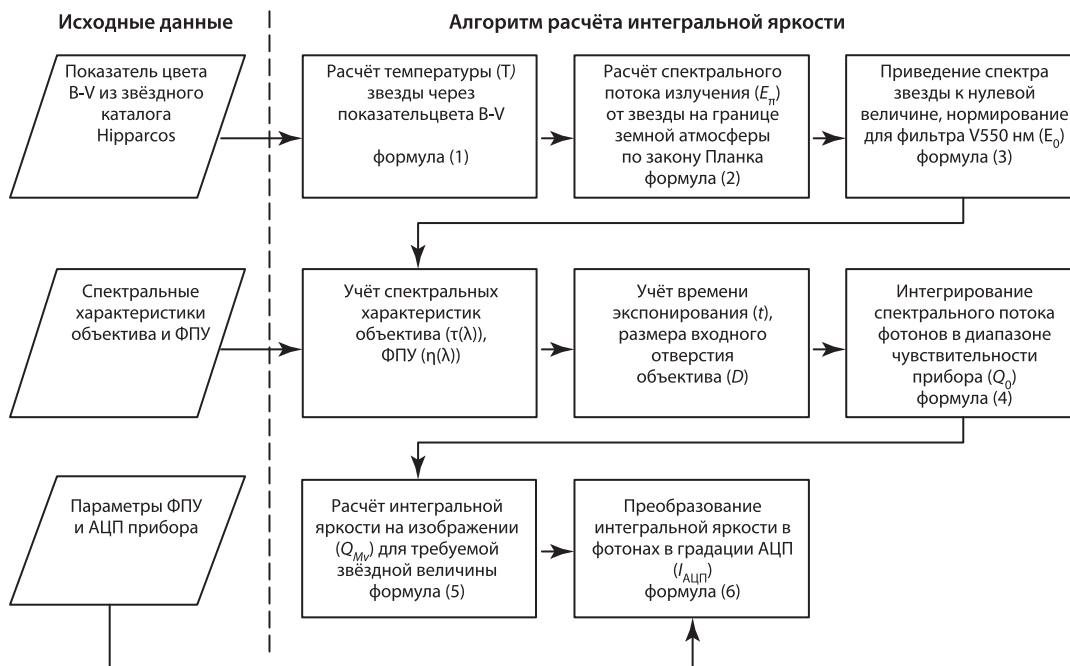


Рис. 1. Исходные данные и алгоритм расчёта интегральной яркости звёзд

Авторами применяется простая модель излучения звезды: излучение абсолютно чёрного тела с температурой, равной температуре её фотосферы, которую можно оценить по закону смещения Вина. Эффективная температура звезды определяется по формуле (Ballesteros, 2012):

$$T = 4600 \left( \frac{1}{0,92(B-V)+1,7} + \frac{1}{0,92(B-V)+0,62} \right), \quad (1)$$

где  $T$  — температура звезды;  $B-V$  — показатель цвета звезды (из каталога Hipparcos).

Расчёт спектрального потока излучения звезды на границе земной атмосферы осуществляется по формуле Планка для абсолютного чёрного тела:

$$E_{\pi}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}, \quad (2)$$

где  $E_{\pi}(\lambda, T)$  — поток излучения абсолютно чёрного тела;  $h$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана;  $c$  — скорость света в вакууме;  $\lambda$  — длина волны.

Далее по формуле (3) спектр звезды приводится к нулевой величине и нормируется на длину волны 550 нм (Аллен, 1977), вычисляется поток излучения звезды нулевой звёздной величины:

$$E_0(\lambda, T) = \frac{E_{\pi}(\lambda, T)}{E_{\pi}(5500, T)} 10^{-8,44} \frac{\lambda}{hc}, \quad (3)$$

где  $E_0(\lambda, T)$  — поток фотонов от звезды нулевой звёздной величины.

Учёт спектральных характеристик оптической системы прибора, диаметра входного зрачка объектива и интегрирование спектрального потока излучения звезды в диапазоне чувствительности прибора производится по формуле:

$$Q_0 = \frac{\pi}{4} D^2 t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \eta(\lambda) E_0(\lambda, T) d\lambda, \quad (4)$$

где  $Q_0$  — интегральный поток фотонов от звезды нулевой звёздной величины;  $D$  — диаметр входного отверстия объектива;  $t$  — время экспонирования;  $\tau(\lambda)$  — коэффициент пропускания объектива;  $\eta(\lambda)$  — спектральное пропускание фотоприёмного устройства (ФПУ) (из квантовой эффективности);  $\lambda_1, \lambda_2$  — границы рабочего спектрального диапазона прибора.

По формуле (5) рассчитывается интегральный поток фотонов ( $Q_{Mv}$ ) от звезды величины  $Mv$ :

$$Q_{Mv} = \frac{Q_0}{2,512^{Mv}}, \quad (5)$$

где  $Q_{Mv}$  — интегральный поток фотонов от звезды звёздной величины  $Mv$ .

Завершается расчёт преобразованием интегрального потока от звезды в число градаций аналого-цифрового преобразователя прибора:

$$I_{\text{АЦП}} = \frac{Q_{Mv}}{K_{\text{АЦП}}}, \quad (6)$$

где  $I_{\text{АЦП}}$  — интегральная яркость изображения звезды в единицах младшего разряда АЦП на ФПУ прибора.

Результаты вычисления интегрального потока фотонов ( $E_0(\lambda, T)$ ) от звезды нулевой величины в зависимости от показателя цвета показаны на *рис. 2* (см. с. 78).

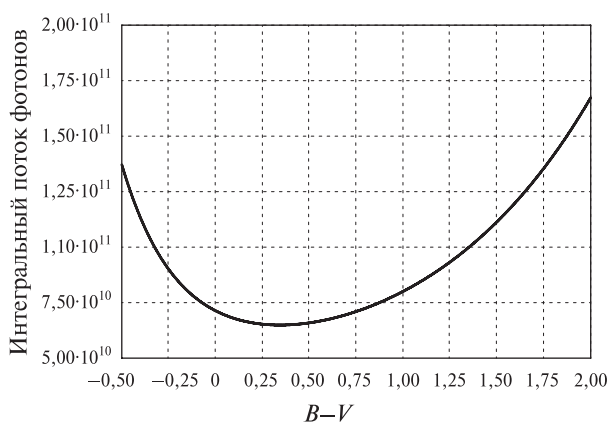


Рис. 2. Зависимость интегрального потока фотонов ( $E_0(\lambda, T)$ ) от показателя цвета для звёзд нулевой звёздной величины на границе земной атмосферы в интервале длин волн от 200 до 1100 нм

Спектры реальных звёзд и спектры, рассчитанные по вышеописанной модели, показаны на рис. 3 и 4. Кривые приведены для звёзд различных спектральных классов (Pickles, 1998). Значения показателя цвета  $B-V$  соответствуют табл. 1. Из рисунков видно, что спектры звёзд соответствуют модели излучения абсолютно чёрного тела.

Моделирование не учитывает специфические индивидуальные особенности излучения звёзд, такие как линии поглощения или эмиссии. Ниже будет показано, что на итоговую интегральную яркость звёзд на ФПУ это оказывает незначительное влияние.

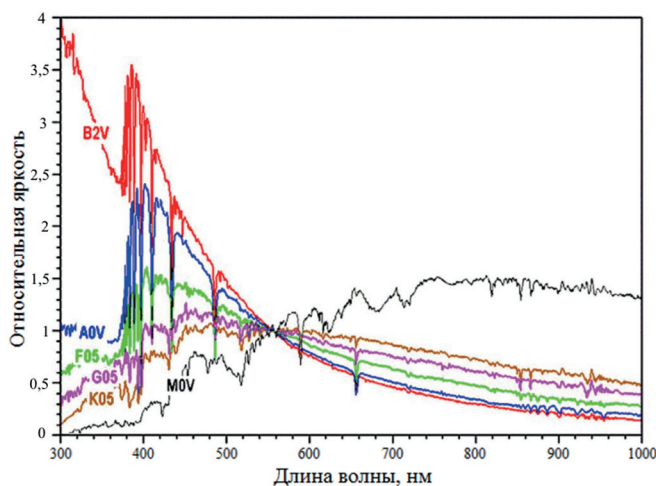


Рис. 3. Реальные относительные спектральные характеристики звёзд различных спектральных классов

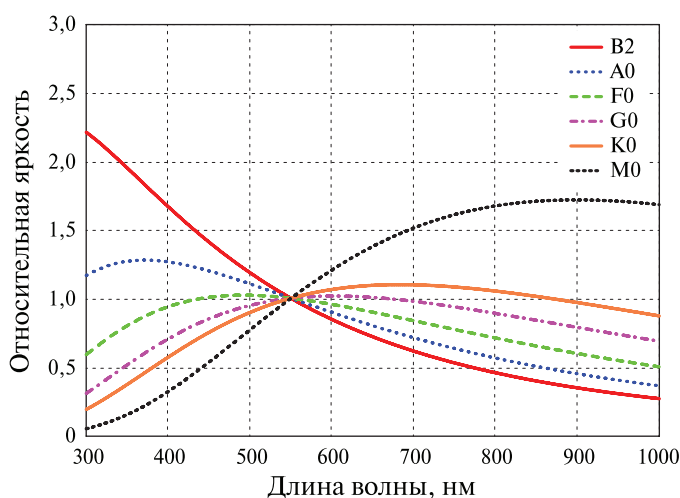
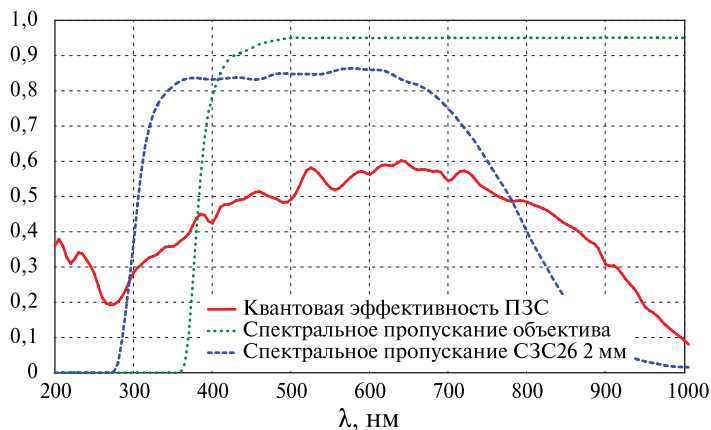


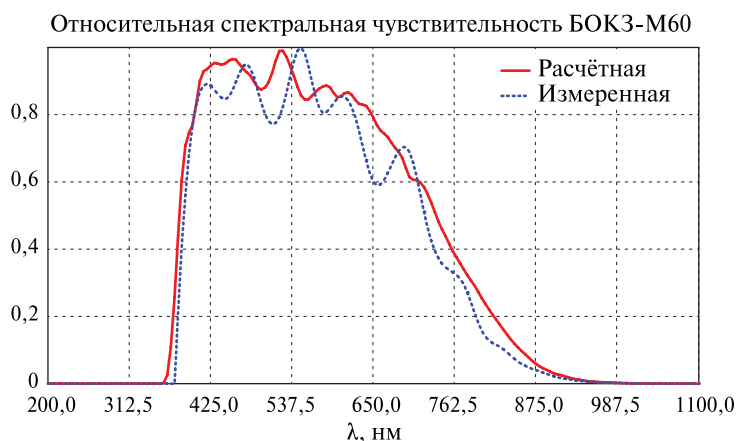
Рис. 4. Расчётные относительные спектральные характеристики звёзд различных спектральных классов

На *рис. 5* показаны спектральные характеристики объектива и фильтра СЗС26 из паспортов по стёклам и рассчитанные в модели с учётом толщины линз объектива, а также квантовая эффективность матрицы, используемые в приборах серии БОКЗ-М60. На четырёх образцах этой серии приборов ставился эксперимент по исследованию работы звёздных датчиков ориентации в реальных условиях эксплуатации.



*Рис. 5.* Спектральные характеристики составных модулей оптической системы прибора БОКЗ-М60: объектива, СЗС26 — оптического светофильтра и ПЗС-матрицы

На *рис. 6* приведена обобщённая спектральная характеристика всей оптической системы прибора БОКЗ-М60. Для сравнения здесь же показаны результаты экспериментального измерения коэффициента пропускания прибора этой серии на монохроматоре. Видно, что расчётная и экспериментальная кривые хорошо согласуются.



*Рис. 6.* Спектральные характеристики всей оптической системы прибора БОКЗ-М60 по результатам моделирования и эксперимента

Анализируя каталог Hipparcos (Ковалевский, 2004; Perryman, 1997) в части измерения показателя цвета звёзд, можно отметить следующее. Все значения показателя цвета  $B-V$  находятся в интервале от  $-0,40$  до  $5,46$ . Из 118 218 звёзд каталога 94 % имеют значение  $B-V$  от 0 до 2, что полностью удовлетворяет потребности приборов семейства БОКЗ. Для 1 % (1282 звезды) значение  $B-V$  не указано, в основном это звёзды более 7-й звёздной величины. Расчёт спектральных потоков таких звёзд невозможен. В каталоге приведена погрешность измерений  $B-V$  для каждой звезды от 0 ( $<0,001$ ) до 0,6. Большинство звёзд (97 %) имеют погрешность измерения  $B-V$  не более 0,1.

С учётом погрешностей измерений  $B-V$  в каталоге Hipparcos для 96 % звёзд ошибка в расчётах интегральной яркости на ФПУ не превысит 10 %. Этого вполне достаточно для целей составления каталога звёзд датчика ориентации. Для 3 % звёзд разница будет более 50 % ввиду неточности модели и качества измерения показателя цвета. Яркость 1 % звёзд не может быть посчитана из-за отсутствия значений  $B-V$ . Последние два вида звёзд в каталогах датчиков ориентации не используются.

## Экспериментальные данные

Для сопоставимого сравнения фотометрической модели в соответствии с применяемыми при разработке допущениями из всего объёма экспериментальных данных с КА «Ресурс-П» № 3 взяты измерения координат звёзд в центральной части поля зрения диаметром  $4^\circ$ . Из отобранного таким образом материала исключались измерения, сделанные приборами при скорости углового движения КА, превышающей орбитальную. Минимальное число распознаваний одной звезды в выборке составляет 50 кадров с одного прибора. В среднем координаты каждой звезды выборки, соответственно и её интегральная яркость на изображении, были измерены 9500 раз. Число звёзд, удовлетворяющих установленным требованиям, оказалось равным 3356. Звёздные величины отобранных звёзд попали в пределы от 3,85 до  $6,99^m$ ,  $B-V$  — в интервал от  $-0,274$  до  $3,332$ , а средние интегральные яркости — от 680 до 28 314 градаций АЦП.

В *табл. 1* приведено количество звёзд, по которым было произведено усреднение для пяти значений  $B-V$ . Для обработки выбраны звёзды с показателями цвета  $B-V$  в интервале значений  $\pm 0,1$  от указанного в таблице. На *рис. 2* видно, что максимальный разброс в значениях потока, а следовательно, и интегральных яркостей, будет при показателе цвета больше единицы и составит не более 4 % в градах АЦП.

Таблица 1. Распределение звёзд в эксперименте по показателю цвета

Показатель цвета $B-V \pm 0,1$	$-0,2$	$0,02$	$0,31$	$0,58$	$0,93$	$1,45$
Спектральный класс	B0	A0	F0	G0	K0	M0
Количество звёзд	136	587	318	250	495	304
Отсекаемая шумовая составляющая, градаций АЦП	35	36	31	29	30	15

Для средних значений  $B-V$  указаны условные спектральные классы. Эти значения приведены в статье, скорее, для удобства, поскольку границы спектральных классов звёзд, указанные в каталоге Hipparcos, и диапазоны  $B-V$  не только сильно размыты, но и пересекаются, как видно из *табл. 2*.

В нижней строке *табл. 1* указаны осреднённые значения отсекаемой шумовой составляющей полезного сигнала. Этот параметр обычно вычисляется в звёздных приборах на этапе локализации звезды на основе анализа приборного шума в ближайших её окрестностях. Зная интегральную яркость звезды по результатам моделирования и эксперимента, а также среднее число пикселей, которые занимает конкретная звезда, можно оценить среднюю величину, отсекаемую с шумовой составляющей. Бортовая телеметрия содержит занятое звездой число пикселей и значение её интегральной яркости после отсечения порога на каждом кадре. Уменьшение расчётного значения отсекаемой шумовой составляющей при увеличении  $B-V$  (от холодных звёзд к горячим) связано с тем, что объектив прибора хуже приспособлен для наблюдения красного диапазона длин волн. Это также приводит к тому, что звёзды спектрального класса M слабо поддаются геометрической калибровке по полю зрения прибора.

На основе многочисленных экспериментов и эмпирических данных было получено, что отсекаемая шумовая составляющая может изменяться в широких пределах от 20 до 60 градаций АЦП для этой серии приборов.

Таблица 2. Статистика распределения звёзд разных групп по показателю цвета в соответствии со справочной информацией и звёздным каталогом Hipparcos (B–V)

	Спектральный класс						
	B0	A0	F0	G0	K0	M0	M5
По справочной информации, I	–0,25	0,00	0,25	0,70	1,39	1,94	2,14
По справочной информации, V	–0,31	0,00	0,27	0,58	0,89	1,45	1,63
По каталогу Hipparcos, V	–0,26...0,38	–0,04...0,07	0,25...0,41	0,53...0,64	0,75...1,22	1,41...1,54	–
По каталогу Hipparcos, все*	–0,22...0,39	–0,05...0,19	0,22...0,41	0,53...0,94	0,91...1,39	1,48...1,76	1,25...1,65
Используется в расчётах	–0,2	0,02	0,31	0,58	0,93	1,45	не используется
Наибольшая разница интегральных яркостей изображений звёзд для диапазона B–V (Hipparcos, все), %	1	0	1	7	15	10	13

\* 90 % звёзд класса, исключая 10 % крайних по гистограмме B–V

В табл. 2 приведена статистика по диапазонам B–V и спектральным классам в сравнении со справочной информацией (Аллен, 1977) и данными в каталоге Hipparcos для разных типов звёзд до 7-й звёздной величины. Также показаны оценки ошибок итоговых интегральных яркостей звёзд на изображениях в указанных интервалах для всех звёзд каталога Hipparcos от выбранных значений B–V.

### Сопоставление расчётных и измеренных значений интегральной яркости звёзд

По выбранным опорным значениям показателя цвета было проведено сравнение расчётных и экспериментальных интегральных яркостей звёзд. В случае с экспериментальными данными значения получены по усреднённому значению для звёзд разных звёздных величин с добавлением вычисленных шумовых составляющих, указанных в табл. 1, и пересчитаны на звёздную величину 5<sup>m</sup>.

Для расчётных значений вычислена подходящая величина цены единицы младшего разряда, при которой наблюдается наилучшее соответствие интегральных яркостей реальных звёзд различных спектральных классов на кадрах с прибора и на смоделированных изображениях. Она оказалась равна  $6e^{-}$ . Это значение достаточно близко к величине, получаемой по электронно-техническим характеристикам прибора:  $7,5e^{-}$ .

Результаты сопоставления расчётных и измеренных значений интегральных яркостей звёзд представлены в табл. 3.

В табл. 4 показаны примеры восстановления полного значения интегральной яркости двух звёзд. Расчётные и измеренные интегральные яркости одних и тех же звёзд совпадают с точностью лучше 5 %, что более чем достаточно для составления бортовых каталогов звёзд датчиков ориентации.

На рис. 7 (см. с. 82) для примера приведены расчётные и полученные экспериментально зависимости интегральной яркости звёзд от их звёздной величины для звёзд с показателем цвета 0,93 (K0). На графике видно, что измеренные значения отклоняются от прямой линии.

Таблица 3. Экспериментальные (с учётом шумовой составляющей) и расчётные интегральные яркости звёзд

$M_V$	$B-V$					
	-0,2	0,02	0,31	0,58	0,93	1,45
4	16519/14084	16263/13464	16316/13582	16755/14016	17883/15071	20810/19183
5	6576/5607	6474/5360	6495/5407	6670/5580	7119/6000	8284/7637
6	2618/2448	2577/2134	2586/213	2655/2221	2834/2389	3298/3040
7	1042/889	1026/850	1029/857	1057/884	1128/951	1313/1210
8	415/354	408/338	410/341	421/352	449/379	523/482

Таблица 4. Пример восстановления интегральной яркости и сравнение с расчётом для двух звёзд разных спектральных классов

Номер звезды по каталогу Hipparcos	118209	61688
Звёздная величина $M_V$	4,88	6
Показатель цветности $B-V$	0,93 (K0)	0,31 (F0)
Количество измерений в эксперименте	10250	15540
Количество пикселей в звезде (среднее)	28,2	14,5
Измеренная интегральная яркость (средняя)	7224	2096
Расчётная интегральная яркость	7951	2586
Измеренная интегральная яркость с учётом порога	8035	2635
Порог по звезде (средний)	28	37

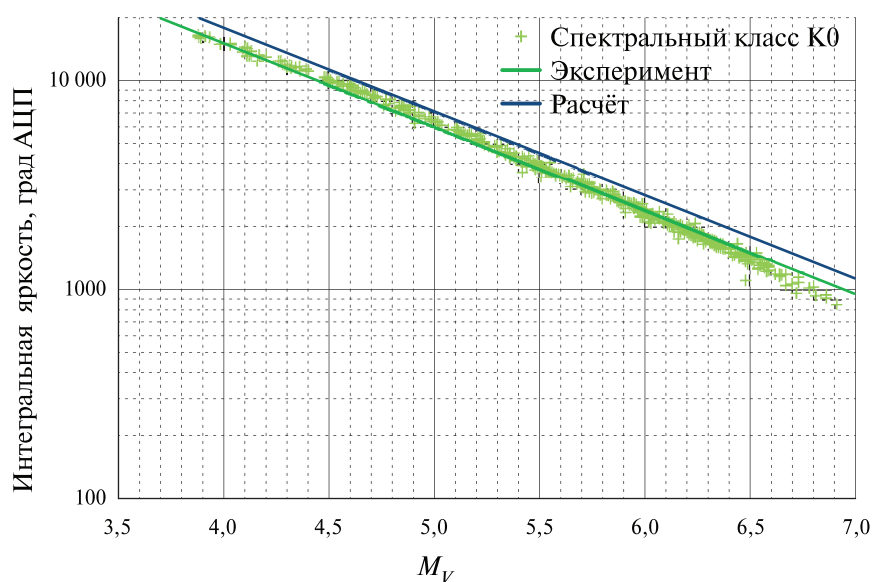


Рис. 7. Зависимость интегральной яркости звезды спектрального класса K0 от звездной величины согласно расчётным и экспериментальным данным

Отклонение экспериментальных данных от линейной зависимости на логарифмической шкале объясняется в области ярких звёзд насыщением одного или нескольких пикселей фотоприёмной матрицы, а в области звёзд с небольшими значениями интегральной яркости — наличием порога отсечки. При этом чем больше интегральная яркость звезды, тем меньшую



её долю она теряет из-за порога отсечки, что видно из *табл. 4*. Звезда HIP 118209 теряет всего около 10 % интегральной яркости, тогда как менее яркая звезда HIP 61688 — более 20 %. Таким образом, при одинаковом уровне приборного шума и равных значениях порога отсечки предпочтительно выбирать для каталога наиболее яркие звёзды.

Хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных позволяет считать, что описанная в данной статье фотометрическая модель прибора звёздной ориентации достаточно точно воспроизводит происходящие в нём процессы преобразования светового потока от звёзд в цифровые сигналы и может использоваться в составе математической модели датчика ориентации.

## 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 звезд участка небесной сферы двумя датчиками звездной 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. Т. 15. № 6. С. 69–81.
5. Аллен К.У. Астрофизические величины / пер. с англ. под ред. Мартынова Д.Я. М.: Мир, 1977. 279 с.
6. Ковалевский Ж. Современная астрометрия / пер. с англ. под ред. Жарова В.Е. Фрязино: «Век 2», 2004. 480 с.
7. Цветков А.С. Руководство по практической работе с каталогом Hipparcos: учебно-метод. пособие. СПб, 2005. 105 с.
8. Ballesteros F.J. New insights into black bodies // Europhysics Letters. 2012. V. 97. No. 3.
9. Pickles A.J. A Stellar Spectral Flux Library: 1150–25000 Å // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1998. V. 110. Iss. 749. P. 863–878. URL: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998PASP..110..863P>.
10. The Hipparcos and Tycho Catalogues. Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission. ESA, 1997. 418 p.

## Photometric model of star tracker orientation

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

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

The photometric model of a stellar orientation sensor is an important component of the mathematical model of the device as a whole. Namely, it allows mathematically correct transition from the stellar magnitudes and spectral characteristics of stars given in astronomical catalogs to the values of their integral brightness actually perceived by the instruments. This is necessary because modern stellar orientation sensors measure the coordinates of stars in the celestial sphere, receiving their black-and-white images in a fairly wide range of the visible and near infrared spectral regions of electromagnetic radiation. In this case, the spectral characteristic of the device is determined by the optics used in it and the matrix radiation detector. The integrated brightness of a star measured by the instrument depends on its spectral characteristic, as well as on the magnitude and spectral class of the observed object. A priori knowledge of the response of the instrument to the appearance of stars of different brightness and

different spectral classes in its field of vision is necessary both for compiling stellar catalogs and for obtaining numerical estimates of the accuracy of measuring their coordinates, including at different noise levels. The reliability of the photometric model of the stellar orientation sensor given below is confirmed by experimental data obtained by similar instruments during space flight.

**Keywords:** star tracker, photometry, star catalog, point spread function, color index, spectral transmittance, integrated star brightness, method of mathematical design

Accepted: 04.10.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-75-84

## 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.
5. Allen C. W., *Astrofizicheskie velichiny* (Astrophysical quantities), Moscow: Mir, 1977, 279 p.
6. Kovalevsky J., *Sovremennaya astrometriya* (Modern astrometry), Fryazino: “Vek 2”, 2004, 480 p.
7. Tsvetkov A. S., *Rukovodstvo po prakticheskoi rabote s katalogom Hipparcos* (Hipparcos Directory Practical Guide), Saint Petersburg, 2005, 105 p.
8. Ballesteros F. J., New insights into black bodies, *Europhysics Letters*, 2012, Vol. 97, No. 3.
9. Pickles A. J., A Stellar Spectral Flux Library: 1150–25000 Å, In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 1998, Vol. 110, Issue 749, pp. 863–878, available at: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1998PASP..110..863P>.
10. *The Hipparcos and Tycho Catalogues. Astrometric and Photometric Star Catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission*, ESA, 1997, 418 p.