## Исследование звёзд участка небесной сферы двумя датчиками ориентации БОКЗ-М60

#### Г.А. Аванесов, Н.И. Снеткова, О.В. Филиппова, Я.Д. Эльяшев

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

На небольшом участке небесной сферы размером 14° по склонению и 21° по прямому восхождению двумя звёздными датчиками ориентации БОКЗ-М60 выполнены многократные измерения координат звёзд, входящих в его бортовой каталог. На основании полученных результатов оценены величины случайных и систематических ошибок измерения. Показано, что причины возникновения систематических ошибок неразрывно связаны с фоновым излучением в ближайшей окрестности каталожных звёзд. Дана численная оценка вклада систематических ошибок измерения координат звёзд в ошибку измерения координат главной точки. Систематические ошибки в измерениях координат звёзд, группы которых используются прибором в каждый данный момент времени, преобразуются в ошибку измерения координат главной точки, зависящую от комбинации звёзд в каждой из них. Исключить систематические ошибки измерения координат звёзд, а соответственно, и систематические ошибки в расчётах координат главной точки можно путём внесения в бортовой каталог приборов поправок, учитывающих их параметры и индивидуальные особенности окружения каждой каталожной звезды. Величины необходимых поправок можно измерить путём статистической обработки результатов многочисленных измерений координат каждой звезды либо вычислить, зная передаточную функцию прибора и используя астрономических каталог, достаточно подробно описывающий ближайшие окрестности каждой каталожной звезды.

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

Одобрена к печати: 02.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-48-59

#### Введение

Метрологической основой звёздных датчиков ориентации, несомненно, является бортовой звёздный каталог. Он составляется на основе определённым образом организованной выборки звёзд из больших астрономических каталогов. Несколько десятилетий для этой цели использовался звёздный каталог SAO (Smithsonian Astrophysical Observatory). Опубликованный в 1966 г., каталог SAO содержит 258 997 звёзд до 9,5 звёздной величины. Это не первый в мире каталог звёзд, который охватывает всю небесную сферу, но именно в нём впервые с относительно высокой точностью указаны параметры собственного движения звёзд, что замедляет процесс его старения.

Новая эпоха звёздных каталогов началась с запуска в 1989 г. астрометрического космического аппарата Hipparcos (The Hipparcos Space Astrometry Mission, https://www.cosmos. esa.int/web/hipparcos). Результатом этой миссии стал каталог Hipparcos, содержащий данные о 118 218 звёздах с точностью положений и параллаксов на уровне 0,001 угл. с, и каталог Тусho, содержащий свыше 1 млн звёзд с точностью измерения тех же параметров до 0,025 угл. с (Hirshfeld et al., 1991).

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

Достижение высокой точности измерения координат звёзд в миссиях Hipparcos и Gaia в значительной степени осуществляется за счёт использования специализированных астрономических инструментов, угловое разрешение которых в десятки и сотни раз превышает аналогичный параметр звёздных датчиков ориентации. Соответственно, в тысячи и десятки тысяч раз большую площадь накрывает на небесной сфере каждый пиксель звёздного датчика ориентации. Используемый в них центроидный метод измерения координат звезды на фотоприёмной матрице увеличивает эту площадь ещё в несколько раз. Всё это приводит к тому, что вовлечённая в измерение группа пикселей принимает фотоны не только от каталожной звезды, но и от её ближайших соседей (Аванесов и др., 2018). В результате измеренные координаты звёзд зачастую отличаются от каталожных значений, иногда на весьма большую величину.

В работе (Аванесов и др., 2018) приведены статистические данные по результатам исследования величин систематических и случайных погрешностей измерения координат звёзд значительного по площади участка небесной сферы, где расположены 1184 каталожные звезды, что составляет 13,5 % от общего числа звёзд бортового каталога прибора БОКЗ-М60. В этой же работе предложена условная классификация звёзд бортового каталога по величине систематической ошибки измерения их координат по отношению к каталожным значениям — L:

- группа № 1 L < 1",</li>
- группа № 2 1 ≤ L < 3",</li>
- группа № 3 *L* ≥ 3".

Задача данной статьи заключается в проверке приведённых в работе (Аванесов и др., 2018) результатов измерения координат звёзд на примере небольшого участка небесной сферы. Его площадь лишь в несколько раз превышает площадь поля зрения прибора БОКЗ-М60. В пределах выбранной площадки можно будет получить данные по величинам систематических ошибок измерения большинства находящихся в нём каталожных звёзд и проследить их влияние на результат вычисления параметров ориентации. Карта выбранной для этой цели площадки, получившая условное название «северная», показана на *рис. 1*.



Рис. 1. Карта «северной» площадки. Красным цветом обозначены звёзды бортового каталога



*Рис. 2.* Картина прохождения звёзд исследуемого участка через поля зрения приборов: a — прибор № 31; б — прибор № 32

Площадка наблюдалась двумя приборами БОКЗ-М60 с борта КА «Ресурс-П» № 3 на протяжении 20 суток, т.е. примерно на 320 витках.

Бортовые каталоги этих приборов сформированы на базе каталога SAO таким образом, чтобы на любом участке небесной сферы в поле зрения прибора 8×8° находилось не менее 6 звёзд до 7,5 звёздной величины. Всего в бортовой каталог приборов включено 8713 звёзд.

На карту «северной» площадки нанесены координаты всех 1433 звёзд, содержащихся в каталоге SAO. Звёзд до  $7,5^{m}$  на этой площадке — 83. Из них 42 входят в состав бортового каталога. Заметим, что в соответствии с каталогом GAIA (1-й релиз) на этой площадке находится 18 567 звёзд до  $12^{m}$ .

На *рис. 2* показана картина прохождения каталожных звёзд исследуемого участка небесной сферы через поля зрения обоих приборов.

Следует иметь в виду, что визирные оси приборов № 31 и № 32 развёрнуты друг относительно друга на угол в 43°. Таким образом, приборы наблюдали одни и те же звёзды исследуемого участка в разное время и при разных азимутальных углах. Этим, а также тем, что площадь исследуемого участка соизмерима с размерами полей зрения приборов, обусловлено разное число звёзд, принятых приборами в обработку. Прибором № 31 было использовано 29 каталожных звёзд, а прибором № 32 — 33. Разным оказалось и число наблюдений каталожных звёзд. Часть поля зрения прибора осталась не заполненной звёздами исследуемой площадки. В этом смысле выбор площадки для исследования оказался не самым удачным.

Звёзды с малым числом наблюдений исключались из рассмотрения. В конечном счёте были отобраны результаты измерений 25 звёзд, их список приведён в *табл. 1*. Число наблюдений каждой из них обоими приборами оказалось в пределах от 100 до 23 000.

В табл. 1 и далее использованы следующие обозначения:  $N\_SAO$ , Mg, Sp — номер, звёздная величина и спектральный класс звёзд по каталогу SAO; Al, Dt — координаты звезды по бортовому каталогу; Br — средняя интегральная яркость звезды (в градациях АЦП); Nel — среднее по всем измерениям количество пикселей в звезде; N — количество кадров, на которых звезда была распознана.

Виртуальная геометрическая калибровка приборов осуществлялась путём пересчёта координат измеренных ими взвешенных центров яркости звёзд на ПЗС-матрице с учётом предварительно вычисленных поправочных коэффициентов аппроксимирующих полиномов 5-й степени. Вслед за этим проводилось распознавание звёзд и уточнение их координат методом наименьших квадратов. Получаемые при этом осреднённые значения остаточных рассогласований  $dAl_{cp}$ ,  $dDt_{cp}$  принимаются здесь как численные приближения измеренных координат звезды к их каталожным значениям.

№ п/п	N_SAO	Mg	Sp	Al, град	Dt, град	Прибор № 31		Прибор № 32			
						Br	Nel	N	Br	Nel	N
1	40609	6,4	K0	86,81	42,53	1493	14	1380	1426	11	619
2	40720	6,4	G5	89,27	49,03	1055	12	716	907	9	650
3	40756	4,6	M0	89,98	45,94	19836	48	18105	18832	38	8597
4	40769	6,4	G5	90,08	44,59	1825	16	18258	1767	12	7765
5	40778	5,7	A0	90,24	47,90	2576	18	9157	2402	13	5427
6	40789	6,2	K0	90,43	48,96	2392	20	4877	2206	15	3842
7	40801	6,0	A0	90,70	49,91	1554	14	1393	1420	10	1783
8	40818	6,1	G5	90,82	42,91	1961	15	6422	1856	11	3359
9	40840	5,9	F0	91,26	42,98	2222	17	17246	2084	11	7660
10	40868	6,3	K0	91,86	41,85	1927	15	12565	1702	8	4929
11	40881	6,4	K0	92,10	41,06	1421	13	7942	1338	8	2267
12	40925	6,1	A0	92,90	48,71	2225	15	14495	2092	12	8319
13	40999	6,5	F0	94,39	46,42	818	5	16353	1160	8	8711
14	41010	6,5	K0	94,57	46,36	253	3	1990	655	5	5804
15	41076	5,1	K2	96,22	49,29	8456	33	10845	8165	25	5301
16	41109	6,3	B9	96,96	47,41	1113	12	20116	1049	8	10341
17	41130	6,0	K0	97,51	46,69	3034	22	22333	2894	14	10979
18	41134	6,6	B8	97,60	41,40	874	9	10074	765	6	4247
19	41168	6,8	B8	98,29	46,48	647	8	16008	653	6	7165
20	41239	5,1	G5	99,83	42,49	7732	26	6914	7096	15	2426
21	41288	5,2	K5	100,77	44,52	6770	26	14487	6615	17	5101
22	41330	5,3	G0	101,68	43,58	4508	21	5642	4284	14	1387
23	41406	6,1	A5	103,28	44,84	1318	11	5023	1225	8	1232
24	41463	4,8	A2	104,40	45,09	4777	20	794	4446	14	230
25	59319	5,3	B8	99,70	39,90	3215	16	315	2925	12	102

Таблица 1. Список звёзд бортового каталога на «северной» площадке

В *табл. 2* приведены статистические данные по полученным в наземных условиях результатам измерений координат 25 звёзд. Используются следующие обозначения: *CKO\_dAl*, *CKO\_dDt* — среднеквадратичные отклонения остаточных рассогласований по прямому восхождению и склонению звезды в угловых секундах;  $dAl_{cp}$  и  $dDt_{cp}$  — средние значения dAlи dDt; *L* — систематическая ошибка измерения координат звезды на небесной сфере в угловых секундах; *S* — случайная ошибка измерения координат звезды в угловых секундах.

Величины *L* и *S* не используются в дальнейших вычислениях. Они введены для иллюстрации вклада систематической и случайной составляющих погрешности в общую ошибку измерения.

Систематическая ошибка *L* вычисляется по формуле:

$$L = \arccos\left(\sin(Dt) \cdot \sin(Dt + dDt_{cp}) + \cos(Dt) \cdot \cos(Dt + dDt_{cp}) \cdot \cos(dAl_{cp})\right)$$

где *Al*, *Dt* — координаты звезды по бортовому каталогу в пересчёте на момент съёмки с учётом собственного движения и годичной аберрации.

Случайная ошибка S вычисляется по формуле:

$$S = \arccos\left(\frac{\sin(Dt + dDt_{cp}) \cdot \sin(Dt + dDt_{cp} + CKO_dDt) +}{+\cos(Dt + dDt_{cp}) \cdot \cos(Dt + dDt_{cp} + CKO_dDt) \cdot \cos(CKO_dAl)}\right).$$

блица 2. <sub>1</sub>
~

	10		Прибор	o № 31					Прибо	p Nº 32		
$dAl_{\rm cp}$	, yrn.	c $dDt_{\rm cp}, y_{\rm IJI.c}$	<i>L</i> , угл. с	<i>CKO_dAl</i> , угл. с	$CKO_dDt$ , yrn.c	<i>S</i> , угл. с	<i>dA</i> I <sub>cp</sub> , угл. с	<i>dDt</i> <sub>cp</sub> , угл. с	L, yfh.c	<i>CKO_dAl</i> , угл. с	$CKO_dDt$ , yrn. c	<i>S</i> , угл.с
7 0	<u>+1,119</u>	17,791	33,497	17,582	9,149	15,198	-44,047	16,481	34,583	18,333	7,762	14,845
- 60	-2,007	-3,280	3,550	5,347	2,933	4,659	-0,317	-3,787	3,793	6,439	2,968	5,274
.6	1,386	2,858	2,998	2,634	1,693	2,412	4,902	2,543	4,086	3,825	2,265	3,370
9	-4,096	-0,328	2,867	3,891	1,479	3,084	-1,159	-1,621	1,810	4,475	2,036	3,719
60	1,800	-2,248	2,568	6,651	2,904	5,428	4,302	-2,860	4,120	5,721	2,745	4,806
0;	1,201	2,319	2,479	5,036	3,128	4,833	2,449	0,350	1,825	4,724	2,729	4,404
11	3,033	0,112	2,290	4,312	2,732	4,247	2,837	0,121	2,143	3,848	2,833	4,056
60	-2,753	-0.569	2,107	4,360	2,265	3,931	-2,058	-1,153	1,905	3,429	2,042	3,249
8	2,450	-0,815	1,928	3,675	2,276	3,471	5,847	-1,758	4,526	4,290	2,145	3,737
4	1,363	1,612	1,909	5,810	4,949	6,595	2,037	1,699	2,286	5,583	3,199	5,270
3	0,004	-1,588	1,588	3,828	1,715	3,202	3,731	-2,287	3,489	4,368	1,764	3,554
0;	2,074	0,366	1,547	3,638	1,983	3,299	3,998	-0,115	2,900	4,303	2,007	3,709
8	1,172	-1,303	1,521	3,872	1,710	3,109	2,858	-1,615	2,506	4,593	1,994	3,668
9	-0,311	1,449	1,465	4,702	2,448	4,138	1,812	1,501	1,976	5,292	2,274	4,389
0	-1,375	0,875	1,257	4,172	2,253	3,544	-2,320	1,776	2,339	5,465	2,751	4,518
6	-1,549	0,108	1,023	3,621	1,533	2,829	0,926	0,947	1,126	4,593	2,299	3,792
6	0,502	0,784	0,862	4,603	2,063	3,873	2,541	-0.566	1,896	4,508	2,483	4,059
1	0,114	-0,842	0,845	4,051	1,940	3,252	-0,056	0,366	0,368	4,422	2,119	3,551
0	0,958	-0,522	0,839	3,606	2,268	3,356	4,234	-1,263	3,168	4,566	2,366	3,926
8	0,554	0,734	0,839	5,026	2,315	4,348	1,447	0,042	1,060	3,928	2,154	3,594
<u>∞</u>	0,574	-0,633	0,746	5,810	8,334	9,245	2,261	-1,936	2,485	6,807	4,501	6,500
6	-0,042	-0,612	0,613	3,281	1,959	3,113	2,465	-1,319	2,246	4,016	2,012	3,581
8	-0,816	0,058	0,611	4,247	2,449	4,001	-0,275	-0,040	0,209	3,724	2,263	3,580
5	0,507	0,170	0,375	4,003	1,812	3,203	2,568	0,245	1,712	8,446	4,023	6,874
6	-0,202	0,169	0,229	3,796	1,895	3,475	-0,860	0,779	1,021	3,683	2,289	3,637
	Сред	ние значения:	2,822	4,862	2,807	4,474	Средни	е значения:	3,583	5,335	2,721	4,626

Анализируя представленные в табл. 1 и 2 данные, можно отметить следующее:

- интегральная яркость звёзд фиксируется обоими приборами примерно одинаково;
- число пикселей, занятое одними и теми же звёздами на ПЗС-матрицах двух приборов, отличается примерно в 1,4 раза, что говорит о разной остроте их фокусировки: прибор № 32 сфокусирован острее, чем прибор № 31;
- в большинстве случаев фиксируемая прибором № 32 систематическая ошибка измерения больше, чем у прибора № 31;
- максимальные и минимальные фиксируемые обоими приборами значения систематических ошибок L измерения координат звёзд «северной» площадки различаются почти в 150 раз;
- аномально высокие значения *L* и *S* имеет одна звезда SAO 41010.

В *табл. 3* приведены сводные данные о распределении звёзд по трём группам, характеризующим их по величине систематической ошибки *L*.

	Прибор № 31	Прибор № 32
Группа № 1: <i>L</i> < 1″	9	2
Группа № 2: 1 ≤ <i>L</i> < 3″	14	16
Группа № 3: <i>L</i> ≥ 3″	2	7

Таблица 3. Распределение звёзд на «северной» площадке по величине систематической ошибки

Минимальная зафиксированная в данном эксперименте величина систематической ошибки измерения координат звезды SAO 40868 составила 0,2088 угл. с, что как минимум в 20 раз хуже точности каталога SAO. При таких величинах систематических ошибок измерения высокая астрономическая точность бортового звёздного каталога практически не используется.

Систематические ошибки в измерениях координат звёзд неизбежно переходят в ошибку в решении задачи определения параметров ориентации.

Рассмотрим, как это происходит на примере одного кадра № 919519, сделанного прибором № 31 с координатами главной точки  $Al = 96,65530^\circ$ ,  $Dt = 45,09256^\circ$ . Кадр выбран случайным образом из 12 кадров, занимающих центральное положение на исследуемой площадке. Положение выбранного кадра показано на карте «северной» площадки на *рис. 3* красными линиями.



*Рис. 3.* Положение исследуемого кадра на карте «северной» площадки. Координаты главной точки обозначены крестом

В кадр с координатами главной точки  $Al = 96,65530^{\circ}$ ,  $Dt = 45,09256^{\circ}$  попали 10 каталожных звёзд, список и координаты которых приведены в *табл.* 4.

№ п/п	N_SAO		Координ	аты звёзд		
		на небесной сфере		на матрице		
		<i>Al</i> , град	Dt, град	Х, пиксель	<i>Y</i> , пиксель	
1	41239	99,8327	42,4888	292,1298	31,61564	
2	41134	97,6049	41,4014	162,2388	28,5047	
3	41330	101,6845	43,5774	404,8339	48,04537	
4	41288	100,7706	44,5245	398,6843	123,4328	
5	40756	89,9837	45,9368	39,4443	479,8324	
6	41130	97,5124	46,6856	345,5658	322,1236	
7	41109	96,9628	47,4053	350,6112	375,01868	
8	41076	96,2244	49,2879	391,7607	495,9128	
9	41168	98,2902	46,4764	367,7543	291,7935	
10	41010	94,57	46,3605	223,5970	378,1239	

Таблица 4. Координаты звёзд в кадре № 919519, полученном прибором № 31

Через уравнения коллинеарности спроецируем звёзды этого «идеального» кадра на матрицу прибора и получим «идеально» измеренные им координаты главной точки во второй экваториальной системе координат (Урмаев, 1989):

$$Al = 96,65530^{\circ} [-0,03''], Dt = 45,09256^{\circ} [-0,01''].$$
(1)

Фактически таким образом мы моделируем обработку «идеального» кадра «идеальным» прибором, для которого звезды — это точечные источники излучения и их координаты определены с точностью каталога SAO. В квадратных скобках указаны величины ошибок, возникших в ходе математических преобразований из-за ограниченной точности вычислений, достаточной, однако, для работы прибора.

Введём в координаты звёзд, приведённые в *табл. 2*, осреднённые значения ошибок их измерения и снова определим положение главной точки. Оно изменилось на величины, указанные в квадратных скобках:

$$Al = 96,65426^{\circ} [-3,72''], Dt = 45,09305^{\circ} [1,79''].$$
<sup>(2)</sup>

Основной вклад в ошибку измерения внесла звезда SAO 41010. Исключим эту звезду из расчёта и снова вычислим координаты главной точки по 9 оставшимся звёздам:

$$Al = 96,65538^{\circ} [0,31''], Dt = 45,09252^{\circ} [-0,14''].$$
 (3)

Теперь «исправим» координаты звезды SAO 41010, в данном случае это означает возвращение ей каталожного значения с введённой осреднённой ошибкой её измерения, и снова вычислим положение главной точки:

$$Al = 96,65527^{\circ} [-0,08''], Dt = 45,09258^{\circ} [0,08''].$$
(4)

Результаты приведённых вычислений сведены в *табл. 5* и иллюстрируются *рис. 4* (см. с. 55).

На *рис.* 4 в точку (1) — начало координат — помещено положение главной точки «идеального» кадра. Результаты вычисления положения главной точки по координатам звёзд «идеального» кадра на рисунке не показаны. Ошибка, полученная при обработке координат звёзд «идеального» кадра, слишком мала, её невозможно отобразить в используемом масштабе.



*Рис. 4.* Увеличенная карта окрестности «идеального» положения главной точки исследуемого кадра

	Ошибка определения координат главной точки		Угловое расстояние <i>R</i> между «идеальным» и измеренным	
	<i>dAl</i> , угл. с	<i>dDt</i> , угл. с	положением главнои точки, угл. с	
«Идеальный» кадр	-0,00	0,00	0,00	
Результат обработки «идеального» кадра	-0,03	-0,01	0,016	
После введения осреднённых ошибок	-3,72	1,79	3,178	
в координаты звёзд				
После исключения звезды SAO 41010	0,31	-0,14	0,260	
После коррекции звезды SAO 41010	-0,08	0,08	0,095	
Ошибка определения ориентации штат- ным алгоритмом на борту КА	1,39	1,44	1,744	

Таблица 5. Ошибки определения координат главной точки

Точка (2) (dAl = -3,72 угл. c; dDt = 1,79 угл. c) отображает положение главной точки, вычисленное по координатам звёзд с внесёнными в них осреднёнными значениями ошибок, взятых из *табл. 2.* Из точки начала координат радиусом 3,178 угл. с проведена окружность, которая на равнопромежуточной проекции фрагмента карты отображается эллипсом. Он очерчивает зону, внутри которой, предположительно, может лежать систематическая ошибка измерения положения координат главной точки, сформированная другими комбинациями звёзд.

Малый эллипс с центром в точке начала координат проходит через точку (3) с координатами dAl = 0,31 угл. с и dDt = -0,14 угл. с, соответствующими результату вычисления координат главной точки по 9 звёздам. Предполагается, что внутри малого эллипса должны были бы лежать минимальные значения систематической ошибки измерения координат главной точки.

Коррекция положения звезды SAO 41010 не вернула координаты главной точки в исходную позицию, но дала очень хорошее приближение к нему, которое невозможно отобразить на рисунке выбранного масштаба.

Последняя нанесённая на карту точка (4) отображает результат расчёта координат главной точки, выполненного бортовым алгоритмом в реальных условиях при наличии одновре-

менно и систематических, и случайных ошибок измерения координат звёзд. В этом измерении R = 1,744 угл. с. Бортовой алгоритм здесь отверг звезду SAO 41010 по признаку большой величины остаточного рассогласования.

Судя по *табл. 1*, звезда SAO 41010 участвовала примерно в одном из восьми измерений прибора № 31 и в пяти из восьми измерений прибора № 32. В остальных случаях она браковалась бортовой программой. Можно с большой долей уверенности предполагать, что каждое использование этой звезды в расчётах приводило к увеличению ошибки измерения координат главной точки. А при её исключении вклад систематической составляющей ошибки в каждое конкретное измерение с участием данной группы из 9 звёзд не превышал 0,260 угл.с. Всё остальное добавлялось за счёт случайной составляющей ошибки измерения.

С учётом того, что ожидаемое число звёзд с аномальными параметрами ошибок измерения — порядка 500, их вклад в ошибки измерения может быть весьма велик. Такие звёзды должны либо исключаться из бортовых каталогов, либо в их координаты должны вноситься необходимые поправки.

Полученные для выбранного нами «идеального» кадра значения минимальной и максимальной ошибок измерения координат главной точки, обусловленных исключительно систематическими ошибками в измерениях координат звёзд, дают представления об их возможных величинах.

Не требует доказательства тот факт, что систематические ошибки в измерениях координат звёзд, группы которых используются прибором в каждый данный момент времени, преобразуются в ошибку измерения координат главной точки, зависящую от комбинации звёзд в каждой из них. По *рис. 2* видно, что каталожные звёзды находятся в кадре разное время. При равномерном движении КА, например с орбитальной угловой скоростью, максимальное время прохождения звезды через всё поле зрения прибора типа БОКЗ-М60 может составить от 120 с поперёк кадра до 260 с по диагонали. В то же время другие каталожные звёзды могут оказываться в поле зрения прибора гораздо меньшее время.

Вход звезды в поле зрения прибора и выход из него каждый раз приводит к новым комбинациям величин систематических ошибок и в конечном счёте — к очередному изменению вклада в ошибку измерения координат главной точки.

Природа возникновения систематической ошибки в измерениях координат звёзд хорошо понятна из всего предыдущего, однако разъясним её ещё раз в цифрах на примере прибора БОКЗ-М60.

При угловом размере пикселя прибора БОКЗ-М60 55 угл. с и среднем размере звезды порядка 16-20 пикселей анализируемая им площадь на небесной сфере может занимать область  $220 \times 220''$  и более — до  $300 \times 300''$ . Такая площадь на небесной сфере может накрывать и реально накрывает целые созвездия. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим ситуацию, показанную на *рис.* 5 (см. с. 57). По удачному стечению обстоятельств в бортовом каталоге приборов на исследуемой площадке присутствовали две близко расположенные звезды: SAO 41010 и SAO 40999. Из *рис.* 5а видно, что измерения координат звёзд на матрице оказались взаимосвязанными.

Неудивительно, что оба прибора, используя центроидный метод измерения координат звёзд на ПЗС-матрице, дают показанные в увеличенном виде на *рис. 6* (см. с. 57) ошибки в измерениях координат звезды, демонстрируя при этом и разницу в их настройках. Сфокусированный менее остро прибор № 31 имеет большую полуширину передаточной функции. Из-за этого звезда на матрице отображается большим числом пикселей, что делает результат измерения центра звезды более зависимым от соседства. Незначительные флуктуации порога отсечки при локализации звезды приводят к тому, что один или несколько пикселей либо входят, либо не входят в число участников измерения. В итоге этот прибор формирует два облака ошибок измерения. Но осреднённые результаты измерений обоих приборов с точностью до секунды указывают координаты звезды, отличающиеся от каталожных значений более чем на 30 угл. с. Такой результат нельзя считать ошибкой прибора. Это результат несоответствия каталога наблюдательным возможностям приборов.



*Puc. 5.* Ближайшие окрестности звёзд SAO 41010 и SAO 40999: *a* — на карте показаны результаты измерения приборов № 31 и № 32; *б* — на снимке 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))



*Рис. 6.* Результаты измерений координат звезды SAO 41010 двумя приборами БОКЗ-М60 и их средневзвешенные значения

Поскольку в рамках данной работы мы используем результаты выполненных на борту измерений координат звёзд на матрице, не представляется возможным устранить те незначительные флуктуации порога отсечки, которые приводят к появлению двух облаков ошибок измерения у прибора № 31. Понятно, что если в ближайшем окружении каталожной звезды оказывается хотя бы одна звезда 12<sup>m</sup>, центроидный алгоритм вычисления координат заметит это и отреагирует на её появление смещением расчётного положения центра.

Таким образом (ещё раз подчеркнём), звёзды, включаемые в бортовой каталог датчика ориентации, всегда наблюдаются им на фоне множества других объектов, значительная часть которых лежит за пределами его разрешающей способности, что не мешает им вносить свой вклад в результат измерения положения звезды на матрице. В результате точность измерения

координат звёзд зависит как от свойств самого прибора, так и от индивидуальных для каждой каталожной звезды особенностей окружающих её ближайших окрестностей.

Устранить или многократно уменьшить величину систематической ошибки измерения координат звёзд можно одним единственным способом: привести бортовой каталог в соответствие с наблюдательными возможностями используемого для измерения прибора. Координаты звёзд бортового каталога должны отличаться от указываемых в астрономических каталогах на строго измеренную или вычисленную величину, учитывающую параметры прибора и фоновую обстановку в ближайших окрестностях каждой каталожной звезды.

Приведённые в *табл. 2* осреднённые значения остаточных рассогласований  $dAl_{cp}$ ,  $dDt_{cp}$  являются для каждой звезды численным приближением к значению необходимой поправки, которую следует внести в бортовой каталог. Отчасти это показано в численном эксперименте, иллюстрируемом *рис. 3* и 4, а также *табл. 5*.

Поправки в бортовой каталог можно вычислить. Для этого необходимо, зная в деталях передаточную функцию прибора, смоделировать с помощью неё изображения каждой каталожной звезды и объектов её окружения, получить величины поправок и внести их в бортовой каталог.

Подведём некоторые итоги проведённых исследований.

- Систематические ошибки измерения координат звёзд возникают в звёздных датчиках ориентации из-за несоответствия бортовых каталогов наблюдательным возможностям приборов.
- 2. При вычислении параметров ориентации по группе звёзд их систематические ошибки отчасти нивелируются, однако не исчезают полностью и входят в величину систематической ошибки ВСК, становясь главной её составляющей. В приборах типа БОКЗ-М60 такая ошибка может иметь величину до ±3 угл. с по осям *Al* и *Dt*.
- Исключить систематическую ошибку измерения координат звёзд, а соответственно, и систематическую ошибку в расчётах координат главной точки можно путём внесения в бортовой каталог приборов поправок, учитывающих их параметры и индивидуальные особенности окружения каждой каталожной звезды.
- 4. Величины необходимых поправок можно измерить, как это было показано, путём статистического анализа результатов многочисленных измерений координат каждой звезды либо вычислить, зная передаточную функцию прибора и используя астрономический каталог, достаточно подробно описывающий ближайшие окрестности каждой каталожной звезды.

#### Литература

- 1. Аванесов Г.А., Бессонов Р.В., Сметанин П.С., Филиппова О.В., Эльяшев Я.Д. Особенности измерения координат звёзд оптико-электронными приборами с различными угловыми разрешениями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 6. С. 39–47.
- 2. Урмаев М. С. Космическая фотограмметрия: Учебник для вузов. М.: Недра, 1989. 279 с.
- 3. *Hirshfeld A., Sinnott R. W., Ochsenbein F.* Sky Catalogue 2000.0. V. 1: Stars to Magnitude 8.0. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge University Press, 1991. 702 p.

# Studying the stars of the celestial sphere section by two BOKZ-M60 star trackers

## G.A. Avanesov, N. I. Snetkova, O. V. Filippova, Ya. D. Elyashev

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

Two star trackers BOKZ-M60 made multiple measurements of the coordinates of the stars included in its onboard catalog on a small area of the celestial sphere with the size of 14° by declination and 21° by direct ascension. The values of random and systematic measurement errors were estimated based on the results obtained. It is shown that the causes of systematic errors are inextricably related to the background radiation in the nearest neighborhood of catalog stars. The contribution of systematic errors in the stars' coordinates measurement to the error of the main point's coordinates measurement is numerically estimated. Systematic errors in the measurement of stars' coordinates, the groups of which are used by the star tracker at each given time, are converted into a measurement error of the main point's coordinates, depending on the combination of stars in each group. It is possible to exclude systematic errors of stars' coordinates measurement and, consequently, systematic errors in the calculation of the principal point's coordinates by making corrections in the instrument's onboard catalog, taking into account their parameters and individual characteristics of each catalog star's neighborhood. The values of the necessary corrections can be measured by statistical processing of the results of numerous measurements of each star's coordinates, or calculated, knowing the star tracker transfer function and using the astronomical catalog, describing in detail the nearest neighborhood of each catalog star.

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

> Accepted: 02.11.2018 DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-6-48-59

## References

- 1. Avanesov G.A., Bessonov R.V., Smetanin P.S., Filippova O.V., Elyashev Ja.D., Osobennosti izmereniya koordinat zvezd optiko-elektronnymi 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. Urmaev M.S., Kosmicheskaya fotogrammetriya (Space photogrammetry), Moscow: Nedra, 1989, 279 p.
- 3. Hirshfeld A., Sinnott R.W., Ochsenbein F., *Sky Catalogue 2000.0. Vol. 1: Stars to Magnitude 8.0, 2<sup>nd</sup> ed.*, Cambridge University Press, 1991, 702 p.