

размер диагонали которого составляет несколько сантиметров, а разрешение сопоставимо с разрешением бытовых жидкокристаллических мониторов. Такие дисплеи широко представлены на рынке и используются, например, в системах бинокулярного зрения. В настоящее время проводится анализ рынка микродисплеев для выбора модели, наиболее полно отвечающей требованиям к разрешению, контрасту, яркости и т. п. Имитатор на базе микродисплея будет иметь гораздо меньшие массу и габариты, чем имитатор на базе мини-ноутбука, что позволит использовать его при некоторых видах испытаний, в которых одновременно требуется вращать звездный датчик и при этом моделировать с такой же угловой скоростью движение небесной сферы в его поле зрения. Предполагается, что опытный экземпляр такого имитатора будет создан в ИКИ РАН в течение полутора-двух лет.

Заключение

Завершая обзор моделей разработанных в ИКИ РАН имитаторов и стендов, отметим еще раз актуальность таких устройств для решения задач наземной отработки датчиков звездной ориентации. Возможность всесторонней проверки функционирования программно-алгоритмического обеспечения прибора на стенде при моделировании различных штатных и нештатных ситуаций позволяет свести к минимуму число сбоев в работе прибора в реальных условиях. В настоящее время в ИКИ РАН на динамическом стенде проводятся в обязательном порядке многоэтапные испытания всех создаваемых приборов.

Тенденция миниатюризации стендового оборудования позволяет надеяться на то, что через некоторое время все поставляемые звездные приборы будут комплектоваться малогабаритными и многофункциональными устройствами, позволяющими производить различные действия с прибором на всех этапах работы с ним, вплоть до установки прибора на космический аппарат.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЗВЕЗДНОГО ПРИБОРА БОКЗ-М ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАЗЕМНЫХ И ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Г.А. Аванесов, В.А. Красиков, А.В. Никитин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Проанализированы факторы, влияющие на точность определения угловых параметров ориентации осей внутренней системы координат (ВСК) прибора относительно осей инерциальной системы координат (ИСК). Приведены результаты оценки величины суммарной среднеквадратической ошибки определения угловых параметров ориентации по результатам обработки одиночных изображений участков звездного неба. Оценивался вклад в общий бюджет ошибки обобщенной фотограмметрической дисторсии и «методической» ошибки. Проанализированы оценки точностных характеристик приборов БОКЗ по результатам наземных натуральных и летных испытаний. Для обеспечения равной точности определения параметров трехосной ориентации по всем осям предложен алгоритм обработки данных синхронно работающих приборов на борту КА. Приведен алгоритм апостериорной оценки точности при обработке натуральных и стендовых измерений звездного координатора БОКЗ-М.

Factors influencing on the accuracy of determining angular parameters of the instrument's internal coordinate system relative to the axes of the inertial coordinate system are analyzed. Total RMS of the angular orientation parameters determination is estimated based on the results of processing single images of the starry sky sections. Contribution of generalized photogrammetric distortion and method error to the total error budget is estimated. Estimates of the BOKZ star trackers accuracy obtained during ground full-scale and flight tests are analyzed. In order to provide for the equally accurate triaxial orientation parameters determination for all three axes an algorithm for processing data from synchronously operating on-board instruments is proposed. An algorithm for the accuracy a posteriori estimation while processing full-scale and stand BOKZ star tracker measurements is described.

Введение

В настоящее время астроизмерительные приборы семейства БОКЗ успешно функционируют на российских космических

аппаратах (КА) различного назначения. Естественно, несомненный интерес представляют вопросы, связанные с оценкой точностных характеристик приборов БОКЗ. В настоящей статье анализируются факторы, влияющие на точность определения угловых параметров ориентации осей внутренней системы координат (ВСК) относительно осей инерциальной системы координат (ИСК).

Оценивается величина суммарной среднеквадратической ошибки определения угловых параметров ориентации по результатам обработки одиночных изображений участков звездного неба. Анализируется вклад в общий бюджет ошибки фотонного шума источников излучения и собственных шумов прибора (шумы ПЗС-матрицы, электронного тракта, аналого-цифрового преобразователя и т. д.).

Оценивается вклад в общий бюджет ошибки обобщенной фотограмметрической дисторсии и «методической» ошибки.

Анализируются результаты, полученные при проведении экспериментальной оценки точностных характеристик приборов БОКЗ по данным наземных натуральных и летных испытаний.

Как показали результаты летных и наземных испытаний, прибор БОКЗ-М имеет точность углового позиционирования оси Z 1,5 угл.с при измерении параметров вращения вокруг осей X , Y , а точность определения параметров вращения вокруг оси Z составляет 15 угл.с.

Так как ось Z прибора расположена под значительным углом к строительным осям КА, среднеквадратическая ошибка определения ориентации строительных осей КА будет пропорциональна косинусу угла между осями Z прибора и КА и ошибкой определения угла разворота прибора вокруг оси Z . Для достижения равной точности определения ориентации по всем трем осям КА предлагается использовать данные с одновременно работающих приборов на борту КА — достаточно получать данные с двух приборов. Тогда при расчете окончательной трехосной ориентации нет необходимости использовать углы разворота вокруг оси Z и при этом можно достигнуть точности определения ориентации до 1,5 угл.с.

Рассмотрена возможность построения равноточной базовой системы координат по результатам совместного синхронного функционирования на борту КА двух приборов.

Приведен алгоритм апостериорной оценки точности при обработке натуральных и стендовых измерений звездного координатора БОКЗ-М.

1. Факторы, влияющие на точность определения параметров ориентации осей внутренней системы координат относительно осей инерциальной системы координат

На точность определения угловых параметров ориентации осей ВСК относительно осей ИСК влияют следующие основные факторы:

- точность реализации и стабильность во времени ИСК (точности бортового звездного каталога и приведения координат звезд на видимое место);
- точность реализации и стабильность во времени ВСК прибора (точность определения линейных элементов внутреннего ориентирования и обобщенной дисторсии по полю кадра);
- точность определения координат энергетических центров изображений звезд во внутренней системе координат прибора;
- «методическая ошибка» (несовпадение координат геометрического и энергетического центров изображений звезд);
- количество звезд в поле зрения прибора, их взаимное расположение, звездная величина и спектральный класс;
- дисторсия, кома и астигматизм объектива.

Рассмотрим подробнее влияние каждого фактора на точность определения параметров ориентации.

Инерциальная система координат физически реализуется координатами звезд бортового каталога на эпоху J.2000 и значениями собственных движений звезд. Строго говоря, вторая экваториальная система координат не является инерциальной, а, вследствие прецессии и нутации, положение точки весеннего равноденствия и положение полюса Мира непрерывно медленно изменяются, поэтому координаты

звезд необходимо приводить на видимое место (учитывать влияние собственных движений, прецессии, нутации и общей аберрации).

Существующие к настоящему времени звездные каталоги базируются на результатах многолетних астрометрических наблюдений и позволяют восстановить угловые положения наблюдаемых звезд на произвольный момент времени с точностью не хуже угловой секунды.

Внутренняя система координат прибора физически реализуется положением плоскости фотоприемника изображения (ПЗС-матрицы) в фокальной плоскости по отношению к задней узловой точке объектива (центру проецирования).

Ввиду ограниченных возможностей точной выставки ПЗС-матрицы относительно задней узловой точки объектива, основание перпендикуляра, опущенного из этой точки на плоскость фотоприемника (главная точка снимка), как правило, не совпадает с принятым началом системы координат. Поэтому, при проведении калибровочных работ, необходимо с высокой степенью точности определять линейные элементы внутреннего ориентирования (фокусное расстояние и координаты главной точки) и параметры обобщенной дисторсии по полю кадра.

Эти величины вычисляются на этапе проведения натуральных испытаний прибора по результатам обработки изображений участков звездного неба.

Анализ результатов калибровки нескольких десятков приборов семейства БОКЗ позволяет сделать следующие выводы:

- точность определения величины фокусного расстояния характеризуется величиной среднеквадратической ошибки порядка 2...3 мкм, что может привести к ошибкам вычисления углов между направлениями на максимально отстоящие друг от друга звезды во внутренней системе координат порядка одной угловой секунды;
- точность определения координат главной точки существенно хуже, поскольку эти параметры очень сильно коррелированы с угловыми параметрами ориентации (прямое восхождение и склонение на-

правления оптической оси прибора), и характеризуется величиной среднеквадратической ошибки порядка 20...30 мкм; тем не менее, такая неопределенность в положении оси Z внутренней системы координат не влияет существенным образом на точность реализации ВСК (расчеты показывают, что смещение положения главной точки от идеального в 0,1 мм приводит к ошибкам вычисления координат звезд на краю кадра, не превышающим 0,3 мкм).

Стабильность ВСК прибора во времени определяется, в основном, стабильностью положения ПЗС-матрицы относительно задней узловой точки объектива и обеспечивается выполнением соответствующих требований к конструкции оптического блока с точки зрения влияния на него механических и температурных деформаций.

Точность определения координат энергетических центров изображений звезд в ВСК зависит от формы и размеров пятна, формируемого оптической системой (функция рассеяния точки) и трансформированного фотоприемником изображения (боковая диффузия заряда, неравномерность чувствительности, неэффективность переноса заряда и т. д.).

Таким образом, реальное пятно, полученное после считывания с ПЗС-матрицы и преобразования в цифровой код, характеризуется некоторым дискретным распределением зафиксированных яркостей.

Вид и параметры распределения яркостей в пятне существенным образом зависят от положения пятна относительно растра ПЗС-матрицы («методическая ошибка») и могут изменяться во времени ввиду наличия фотонного шума источника излучения, флуктуаций темнового тока и фонового излучения, собственных шумов ПЗС и электронного тракта, а также шумов считывания и шумов аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Все эти и другие возможные причины приводят к флуктуациям регистрируемых яркостей в пятне и, как следствие, к флуктуациям координат энергетических центров изображений источников излучения, которые вычисляются как функции зарегистрированных яркостей.

На практике чаще всего встречается вариант, когда вид и параметры распределения яркостей в пятне заранее не известны или сильно меняются в пространстве и во времени. В этом случае источником основной информации о распределении являются измерения яркостей в элементах ПЗС-матрицы, на которые спроецировалось изображение точечного источника излучения.

Как показали проведенные эксперименты, максимальный вклад в общий бюджет ошибки вносит «методическая ошибка» (несовпадение координат энергетического и геометрического центров изображений звезд).

Влияние на точность определения параметров ориентации количества звезд в поле зрения прибора, их взаимного расположения, а также звездных величин и спектральных классов очевидно и не требует детального рассмотрения.

Учитывая все сказанное выше, можно констатировать, что точность вычисления угловых параметров ориентации, в основном, зависит от точности определения координат положения звезд.

Рассмотрим три основные причины, влияющие на точность определения координат изображения звезд:

- собственная точность вычисления координат энергетических центров;
- «методическая ошибка»;
- обобщенная фотограмметрическая дисторсия по полю кадра.

2. Оценка суммарной величины среднеквадратической ошибки определения угловых параметров ориентации по результатам обработки одиночного изображения участка звездного неба

Прежде чем определять вклад каждой группы факторов в общий бюджет ошибки, необходимо оценить суммарную величину этой ошибки.

Для вычисления суммарной (абсолютной) ошибки определения угловых параметров ориентации осей ВСК в осях ИСК воспользуемся методом, базирующимся на решении переопределенной нелинейной системы уравнений коллинеарности по способу наименьших квадратов.

В результате решения такой системы уравнений, кроме трех угловых параметров ориентации, вычисляется ковариационная матрица Q и вектор остаточных рассогласований V как разность измеренных и вычисленных координат изображений звезд.

Диагональные элементы ковариационной матрицы позволяют вычислить весовые коэффициенты определяемых параметров по формулам:

$$P_A = \sqrt{Q_{11}}; P_\delta = Q_{22}; P_\alpha = \sqrt{Q_{33}}.$$

Вектор остаточных рассогласований используется для вычисления ошибки единицы веса:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{2N - K}},$$

где N — количество распознанных звезд; K — число определяемых параметров.

Следует отметить, что значения весовых коэффициентов Q зависят от числа и расположения звезд в поле зрения прибора.

В то же время ошибка единицы веса является величиной достаточно стабильной и характеризует реальную точность прибора, поскольку ее величина обусловлена влиянием всех вышеупомянутых факторов.

Именно эта величина будет использоваться в дальнейшем для оценки вклада различных групп факторов в общий бюджет ошибки.

Для приборов семейства БОКЗ-М ошибка единицы веса составляет 1,0...1,5 мкм в зависимости от конкретной реализации прибора.

В табл. 1 приведены результаты обработки одного из кадров, полученных при проведении наземных натурных испытаний прибора БОКЗ-М, зав. № 04.

Первый столбец табл. 1 содержит порядковые номера звезд, участвующих в процедуре обработки; второй — номера звезд по каталогу SAO; третий — значения интегральных яркостей в градациях восьмиразрядного АЦП; четвертый столбец — значения визуальных звездных величин.

Таблица 1

№ п/п	NSAO	Яркость	m_p	x, мм	y, мм	dx, мкм	dy, мкм	
1	2	3	4	5	6	7	8	
1	27105	72	5,7	-1,34	2,51	-0,69	-0,16	
2	27121	31	6,2	3,94	1,81	0,69	1,83	
3	27185	173	5,5	1,16	0,64	-0,55	-1,49	
4	27191	206	4,9	-1,69	0,65	-0,18	0,77	
5	27219	152	6,0	1,10	-0,20	-0,10	-0,72	
6	27268	25	6,9	0,64	-1,31	0,29	-1,78	
7	27271	35	6,5	0,12	-1,39	-0,96	-1,46	
8	27298	234	4,6	-3,72	-2,31	0,15	0,91	
9	27340	44	6,7	0,33	-3,07	0,28	0,22	
10	27359	30	6,3	-1,22	-3,46	0,82	2,43	
11	27377	262	5,4	1,71	-3,73	0,24	-0,54	
Ошибка единицы веса по осям координат:				0,59 (2,0 угл.с)			1,46 (5,0 угл.с)	

В пятом и шестом столбцах приведены координаты энергетических центров изображений звезд (в миллиметрах); в седьмом и восьмом столбцах — значения остаточных расхождений по каждой из осей координат и ошибка единицы веса (в микрометрах).

Среднее значение ошибки единицы веса — 1,11 мкм.

Матрица ориентации осей ВСК в ИСК:

$$\begin{matrix} -0,637254 & 0,524442 & -0,564684 \\ -0,636912 & -0,770931 & 0,002773 \\ -0,433878 & 0,361421 & 0,825303 \end{matrix}$$

Угловые параметры ориентации: $A = 270^\circ 16' 53''$; 0 ; $\delta = 55^\circ 37' 09''$; 2 ; $\alpha = 140^\circ 12' 20''$; 4 .

Ковариационная матрица (матрица, обратная к матрице коэффициентов нормальных уравнений):

$$\begin{matrix} 0,01145 & -0,00017 & -0,00004 \\ -0,01503 & 0,00003 & 0,00000 \\ 0,00110 & 0,00009 & 0,01819 \end{matrix}$$

Весовые коэффициенты ошибки определяемых параметров: $P_A = 0,10701$ рад/мм, $P_\delta = 0,00527$ рад/мм, $P_\alpha = 0,00933$ рад/мм. Как отмечалось выше, ошибка единицы веса является величиной достаточно стабильной и характе-

Таблица 2

Прибор БОКЗ-М	Количество обработанных кадров	Средние значения ошибок единицы веса по осям координат	
		dx, мкм	dy, мкм
№ 7	12	1,1	1,1
№ 8	12	1,0	1,2
№ 42	11	1,0	1,2
№ 43	6	0,9	1,1

ризует реальную точность прибора, поскольку ее величина обусловлена влиянием всех возможных факторов. В табл. 2 приведены значения ошибок единицы веса для четырех приборов БОКЗ-М, полученных в процессе обработки результатов натурных испытаний.

Среднеквадратические ошибки определения угловых параметров ориентации:

$$M_A = 26 \text{ угл.с}; \quad M_\delta = 1,3 \text{ угл.с}; \quad M_\alpha = 2,2 \text{ угл.с}.$$

3. Оценка вклада в общий бюджет ошибки фотонного шума источников излучения и собственных шумов прибора

Приведенные значения ошибки единицы веса обусловлены влиянием всех упомянутых выше факторов. Оценить вклад каждого фактора в общий бюджет ошибки представляется крайне затруднительным, в то же время выполнить оценку вклада конкретной группы факторов вполне реально.

Далее будет рассмотрена возможность оценки вклада в общий бюджет ошибки таких факторов как фотонный шум источников излучения и собственные шумы прибора.

Для этой цели необходимо выполнить многократное экспонирование и обработку участка звездного неба при неподвижном положении прибора. В данном случае флуктуации координат энергетических центров изображений звезд будут обусловлены влиянием только фотонного шума источников излучения и собственными шумами прибора.

Организовать такого рода наблюдения на реальном небе можно только в условиях астрономической обсерватории с использованием следящей системы, которая сама по себе может являться дополнительным источником ошибок.

В нашем случае, для проведения такого эксперимента использовался стенд динамических испытаний (СДИ), разработанный в ИКИ РАН, краткое описание которого приведено ниже.

Основные узлы стенда динамических испытаний:

- жидкокристаллический монитор для отображения участка звездного неба (ЖК-монитор);
- коллиматор для создания параллельного светового потока от каждой звезды;
- персональный компьютер стенда (ПК стенда) для управления отображением участков звездного неба на ЖК-мониторе;
- контрольно-испытательная аппаратура для приема информации с тестируемого звездного прибора (КИА БОКЗ-М).

Суть проведенного эксперимента заключалась в следующем. При неподвижном положении прибора относительно участка звездного неба, выводимого на экран монитора СДИ, проводилась многократная регистрация этого участка с помощью прибора БОКЗ-М с последующим вычислением координат энергетических центров локализованных объектов.

Далее для каждого локализованного объекта выполнялась статистическая обработка с целью определения средних значений координат энергетических центров и соответствующих величин среднеквадратических ошибок, вычисленных по отклонениям от средних значений координат.

В табл. 3 приведены результаты статистической обработки массива из 30 регистраций для 13 локализованных объектов.

Первый столбец таблицы содержит порядковые номера объектов; второй и третий столбцы — средние значения координат энергетических центров (в элементах дискретизации ПЗС-матрицы); четвертый столбец — энергетические яркости объектов (в градациях восьмиразрядного АЦП); пятый и шестой столбцы — значения среднеквадратических ошибок, вычисленных по отклонениям от средних значений координат (в элементах дискретизации ПЗС-матрицы).

Таблица 3

№ п/п	x	y	u	m_x	m_y
1	2	3	4	5	6
1	394,6	493,0	1100	0,0024	0,0087
2	367,8	470,3	830	0,0039	0,0074
3	453,3	386,7	720	0,0071	0,0067
4	63,8	491,8	620	0,0069	0,0066
5	489,9	104,1	500	0,0043	0,0030
6	69,3	211,2	470	0,0048	0,0036
7	387,2	124,1	400	0,0051	0,0039
8	462,1	210,5	380	0,0039	0,0033
9	433,4	167,3	220	0,0050	0,0042
10	82,6	39,2	210	0,0050	0,0054
11	61,2	160,1	200	0,0048	0,0073
12	408,1	333,8	180	0,0069	0,0063
13	292,2	408,5	120	0,0070	0,0066
Среднее:				0,0052 (0,3")	0,0048 (0,3")

Как отмечалось выше, в данном случае на флуктуации координат энергетических центров локализованных объектов влияют только флуктуация источников излучения и собственные шумовые характеристики прибора.

Влияние дисторсии объектива и методической ошибки, естественно, имеет место, но является постоянным для каждой из 30 реализаций.

4. Экспериментальная оценка суммарной величины среднеквадратической ошибки определения угловых параметров ориентации по серии измерений

4.1. Съемка звездного неба

Точность работы прибора звездной ориентации в наземных условиях оценивалась путем съемки звездного неба. При этом с помощью средств контрольно-испытательной аппаратуры определялся кватернион ориентации в штатном режиме. По полученным значениям кватерниона ориентации вычислялись массивы численных значений углов ориентации, которые затем аппроксимировались полиномами 2-й степени и десятью первыми членами фурье-функций.

По отклонениям данных реальных измерений от значений аппроксимирующего полинома вычислялись величины среднеквадратических ошибок определения угловых параметров ориентации. Результаты аппроксимации приведены на рис. 1.

Аппроксимирующий полином описывает низкочастотную составляющую флуктуаций угловых параметров, обусловленную влиянием механических и температурных воздействий на конструкцию прибора.

На графике (см. рис. 1) приведены значения следующих параметров:

- углов ориентации;
- аппроксимирующих функций;
- отклонения данных реальных измерений от значений аппроксимирующего полинома.

Полученные величины отклонений использовались для оценки величин среднеквадратических ошибок определения угловых параметров ориентации на часовом интервале. В результате обработки были получены следующие значения среднеквадратических ошибок:

- ошибка угла прямого восхождения 2,1 угл.с на широте 55° (в пересчете на дугу большого круга ошибка составит 1,2 угл.с);
- ошибка определения угла склонения 1,2 угл.с;
- ошибка определения угла разворота 15,2 угл.с.

4.2. Оценка точности работы приборов БОКЗ-М на борту КА «Космос-2427»

Для проведения экспериментальной оценки точности функционирования приборов в условиях космического пространства использовалась телеметрическая информация о синхронной работе двух приборов БОКЗ на витке № 31 (13.06.07) с 19 ч 43 мин до 21 ч 17 мин. На интервале 94 мин с каждого прибора один раз в минуту фиксировалась информация о параметрах ориентации осей приборной системы координат относительно осей инерциальной системы координат.

Обработка полученной информации заключалась в следующем:

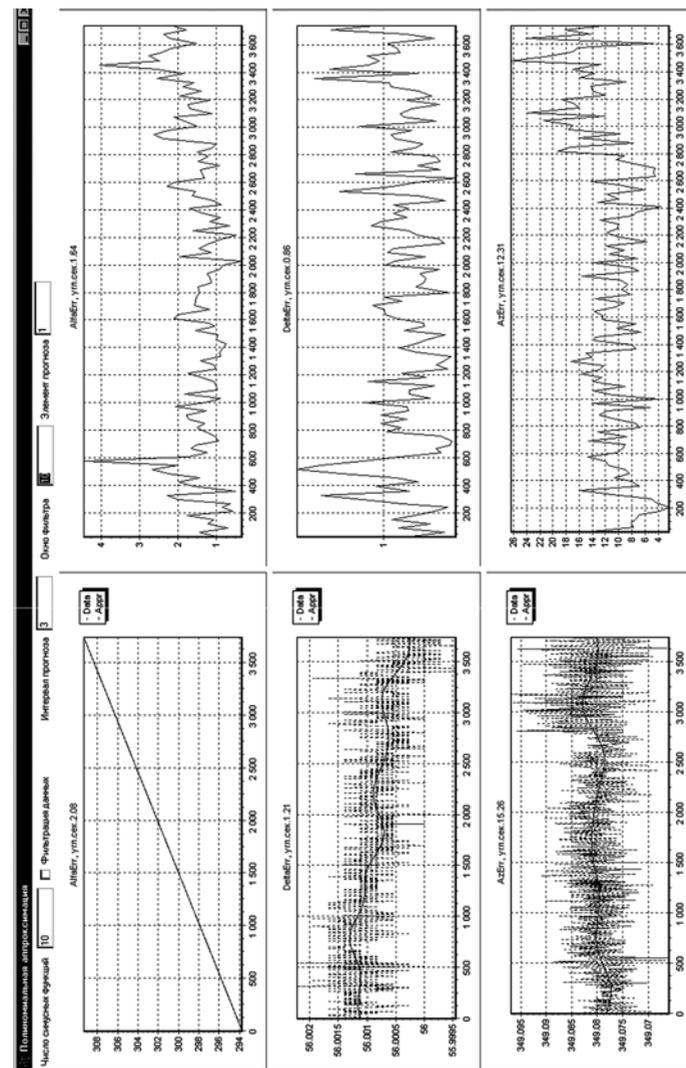


Рис. 1. Результаты аппроксимации угловых параметров ориентации и оценки точности работы прибора по результатам наземной съемки звезд

- вычисление матриц взаимной ориентации осей систем координат двух приборов на каждый момент времени и определение величины углов между одноименными осями координат;
- устранение систематической составляющей с помощью полинома четвертой степени и вычисление среднеквадратической ошибки определения углов между одноименными осями координат двух приборов.

На рис. 2. приведены графики величин соответствующих углов между осями координат приборов и значения аппроксимирующего полинома на интервале измерений. Максимальный разброс значений углов по осям за виток составляет 1,1 угл.мин между осями Z и Y приборов.

Номинальные значения углов между осями приборных систем координат составляют: $X - 90^\circ$, $Y - 180^\circ$ и $Z - 90^\circ$.

После вычисления средней матрицы взаимной ориентации установлено, что углы между осями X отличаются от номинальных на 0,6 угл.мин, осями Y — на 3,0 угл.мин.

Анализ случайной составляющей для каждого из трех углов между осями координат позволил установить следующее (рис. 3): графики значений ошибок соответствующих углов между осями координат после устранения систематической составляющей и после приведения к одному прибору показали, что величины среднеквадратической ошибки определения угла разворота составили: вокруг осей X и Y 1,5 угл.с, вокруг оси Z — 23 угл.с.

5. Определение параметров ориентации осей базовой системы координат при синхронном функционировании двух приборов

При синхронной работе двух приборов можно вычислить параметры трехосной инерциальной ориентации осей базовой системы координат с одинаковой точностью. Для этого необходимо получить направление осей Z в инерциальной системе координат с двух приборов из кватернионов ориентации. Параметры ориентации осей базовой системы координат в инерциальной системе координат можно вычислить по формулам

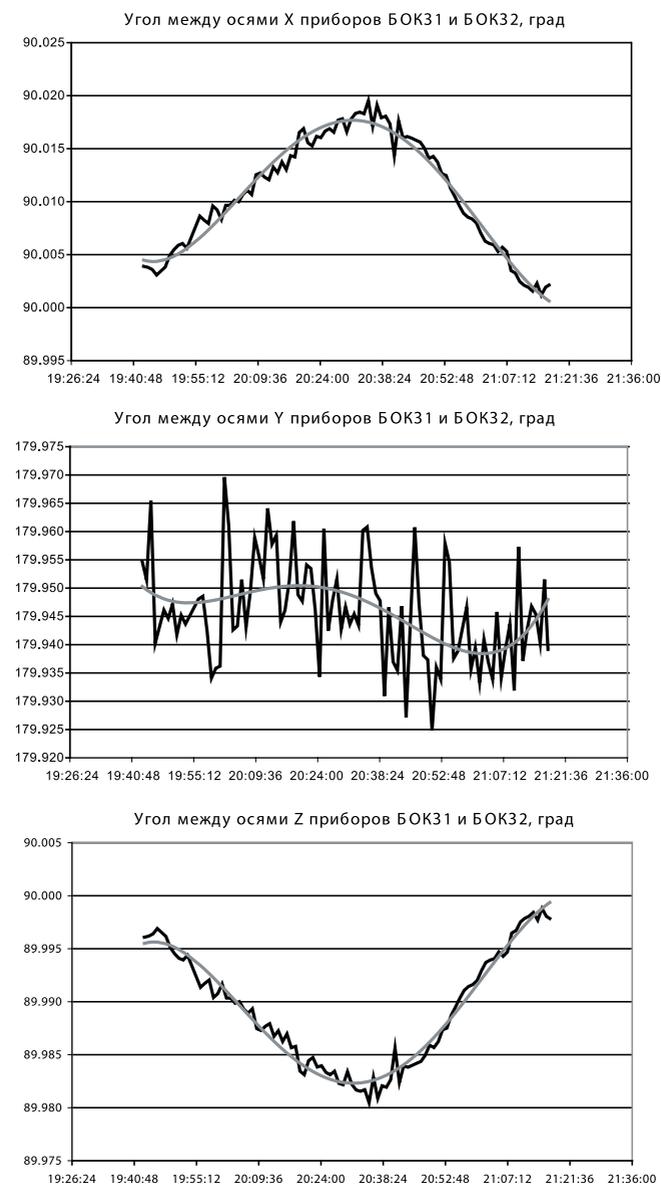


Рис. 2. График изменений углов между осями X , Y и Z прибора за виток

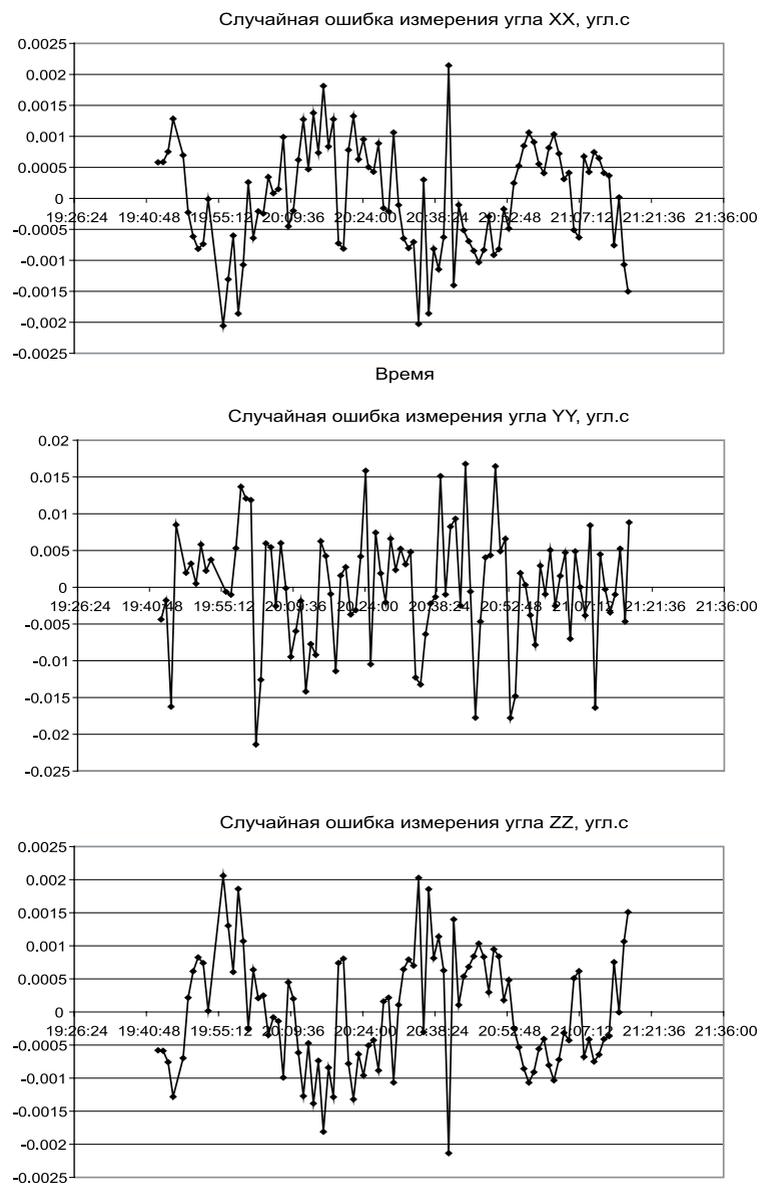


Рис. 3. Случайная составляющая ошибок измерения углов между осями прибора

$$Z_1 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_1 \cos \delta_1 \\ \sin \alpha_1 \cos \delta_1 \\ \sin \delta_1 \end{pmatrix}; \quad Z_2 = \begin{pmatrix} \cos \alpha_2 \cos \delta_2 \\ \sin \alpha_2 \cos \delta_2 \\ \sin \delta_2 \end{pmatrix};$$

$$Y_0 = Z_1 \times Z_2;$$

$$Z_0 = M_{\text{rot}} \left(Y_0, \frac{\arccos(Z_1 Z_2)}{2} \right) Z_1; \quad (1)$$

$$X_0 = Y_0 \times Z_0;$$

$$M = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}.$$

Направление оси Y_0 в ИСК получим как нормированное векторное произведение направлений осей Z ; направление оси Z_0 — через поворот оси Z_1 вокруг оси Y_0 на половину угла между направлениями осей Z_1 и Z_2 , а ось X_0 — как результат нормированного векторного произведения осей Y_0 и Z_0 (рис. 4).

Результаты построения равноточной ориентации после обработки телеметрической информации с двух синхронно работающих приборов с КА «Космос-2427» за виток приведены на рис. 5.

После определения параметров равномерного движения аппарата в связанной системе координат КА были получены следующие результаты за виток:

$\alpha_0 = 314,3176$ — прямое восхождение обобщенной оси Z в начальный момент времени, град;

$\delta_0 = 25,7269$ — склонение обобщенной оси Z в начальный момент времени, град;

$A_0 = 205,0644$ — азимут обобщенной оси Z в начальный момент времени, град;

$\omega_x = 240,3932$ — угловая скорость вокруг обобщенной оси X , угл.с/с;

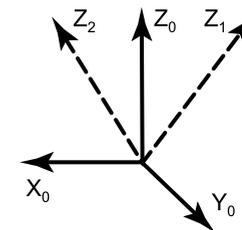


Рис. 4. Схема построения общей трехосной системы координат

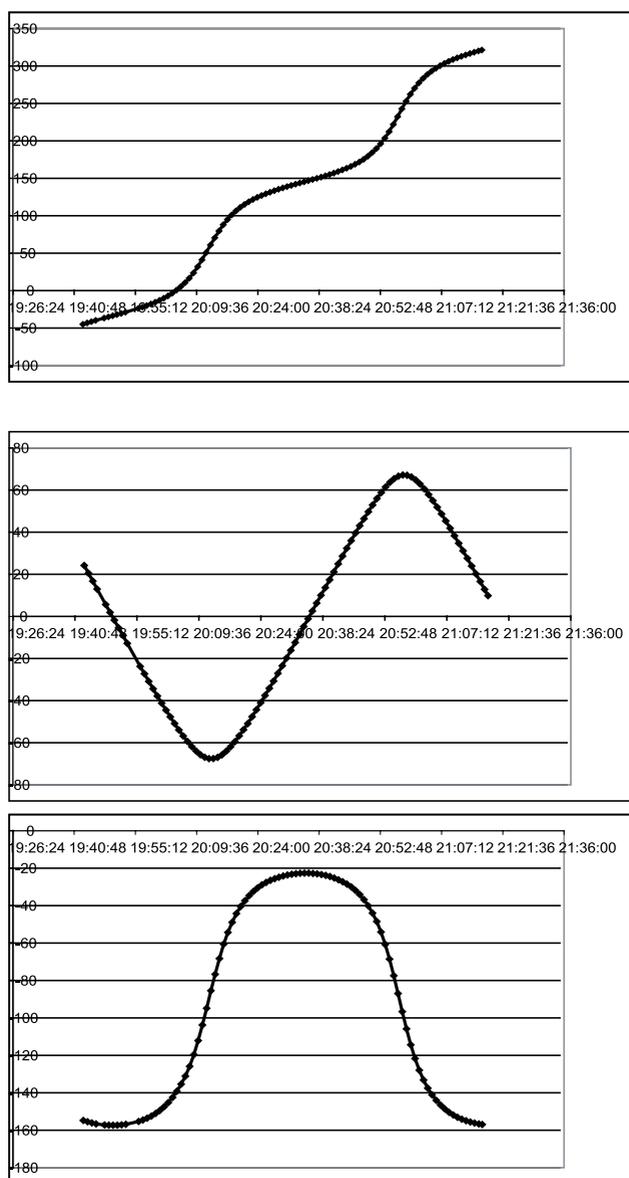


Рис. 5. Изменение углов равноточной ориентации (α , δ и A) за виток

$\omega_y = 1,0420$ — угловая скорость вокруг обобщенной оси Y , угл.с/с;
 $\omega_z = -0,9001$ — угловая скорость вокруг обобщенной оси Z , угл.с/с;
 $\mu = 0,7973$ — отклонение реального движения аппарата от модельного, град.

После аппроксимации синхронно работающих двух приборов на КА в течение 5 мин (рис. 6) параметрами равномерного углового движения остаточные рассогласования по углам между измерениями и траекторией движения были аппроксимированы суммой полинома второй степени и рядом Фурье. В итоге были получены среднеквадратические ошибки аппроксимации на уровне 10 угл.с по каждому из углов. Значительная величина ошибки вызвана методической ошибкой при описании модели движения аппарата (см. рис. 6, левая часть).

Для устранения влияния методической ошибки при описании движения КА была выполнена кусочно-полиномиальная аппроксимация семи измерений прибора. В результате получены одинаковые величины среднеквадратических ошибок определения углов ориентации, которые составили величины меньше 1,5 угл.с, что подтверждает эффективность метода определения трехосной ориентации (см. рис. 6, правая часть).

Итоговые результаты оценки точности определения ориентации всеми перечисленными выше способами сведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка точности		σ_x	σ_y	σ_z
1.	Съемка звездного неба через атмосферу	1,2	1,2	15,3
2.1.	Геостационарный спутник «Ямал-100» ($\omega = 15$ угл.с/с)	1,5	1,5	14,5
2.2.	Низкоорбитальный спутник «Космос 2427» ($\omega = 4$ угл.мин/с) (точность измерения углов между одноименными осями двух приборов)	2,2	2,2	20,5
2.3.	Низкоорбитальный спутник «Космос 2427» ($\omega = 4$ угл.мин/с) (точность одного прибора)	1,15	1,46	15,6
3.	Равноточное определение обобщенной трехосной ориентации двумя приборами	0,9	1,3	1,1

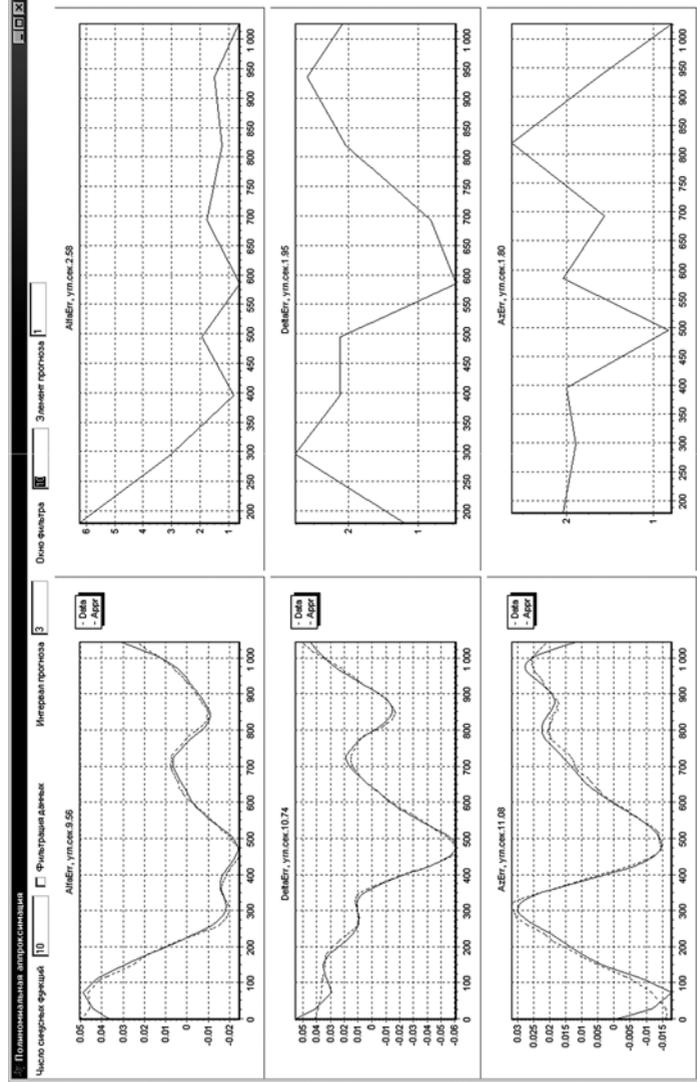


Рис. 6. Ошибки аппроксимации углов ориентации обобщенной системы координат на пятиминутном интервале работы приборов. Оценка точности измерения углов ориентации обобщенной системы координат

Выводы

1. Ошибка определения ориентации прибором БОКЗ-М обусловливается следующими факторами:

- точность реализации и стабильность во времени ВСК прибора (точность определения линейных элементов внутреннего ориентирования и обобщенной дисторсии по полю кадра);
- точность определения координат энергетических центров изображений звезд во внутренней системе координат прибора;
- «методическая ошибка» (несовпадение координат геометрического и энергетического центров изображений звезд);
- количество звезд в поле зрения прибора, их взаимное расположение, звездная величина и спектральный класс;
- дисторсия, кома и астигматизм объектива.

Основным вкладом в ошибку определения ориентации является методическая ошибка и точность определения матрицы ориентации осей ВСК в ПСК.

2. Результаты оценки точности путем обработки одиночного кадра показывают, что среднеквадратические ошибки определения угловых параметров ориентации составили: по положению оси Z $m_\delta = 1,3$ угл.с; $m_\alpha = 2,2$ угл.с, а по углу вращения вокруг оси Z — $M_A = 26$ угл.с.

3. Наиболее адекватной является оценка точности прибора, полученная по результатам обработки серии измерений угловых параметров ориентации при съемке звезд на Земле. В результате такой оценки были получены следующие величины среднеквадратических ошибок по углам: $m_\delta = 1,3$ угл.с; $m_\alpha = 2,2$ угл.с; $m_A = 14,5$ угл.с.

На геостационарном и низкоорбитальном спутниках работа системы стабилизации КА оказывает существенное влияние на измерения, что приводит к отличиям реального углового движения от равномерного. Влияние этого фактора необходимо учитывать при оценке точности определения угловых параметров ориентации, используя несколько членов разложения углов в ряд Фурье или оценивая флуктуации углов между одноименными осями двух приборов.

4. Так как точность определения ориентации существенно зависит от угла наклона оси Z к осям аппарата, для исключения влияния ошибки определения угла поворота вокруг оси Z на точность определения инерциальной ориентации КА целесообразно использовать информацию с двух синхронно работающих приборов. В результате определения инерциальной ориентации базовой системы координат для двух приборов за 5 мин и аппроксимации данных измерений было установлено, что точность определения ориентации базовой системы координат не превышает 1,5 угл.с по каждому из углов.

5. Оценка точности характеризуется среднеквадратическими ошибками определения углов вращения вокруг осей приборной системы координат, значения которых приведены в табл. 4.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОТРАБОТКИ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ДАТЧИКОВ

Т.Ю. Дроздова, А.В. Никитин

Институт космических исследований
Российской академии наук, Москва

Сформулированы задачи наземной отработки приборов ОСД. Приведен краткий состав технических средств для наземной отработки приборов. Представлены результаты отработки штатных приборов, в том числе, измерены ошибки определения направления на источник света как в лабораторных условиях, так и при натуральных испытаниях, определены реальные поля зрения штатных приборов, исследовано влияние движения космического аппарата на точность измерений прибора ОСД.

Tasks of the optical solar sensor ground testing are stated. A brief list of technical facilities for the instrument ground testing is given. Results of the standard instruments testing including measurements of errors of determining direction towards the light source both in laboratory and during full-scale tests, determination of flight models' real fields of view and investigation of the s/c motion influence on the optical solar sensor measurement accuracy, are presented.

Оптический солнечный датчик (ОСД) (рис. 1), разработанный и изготовленный в ИКИ РАН, предназначен для определения параметров ориентации космического аппарата в поле зрения $120 \times 60^\circ$ с точностью (3σ) до 3 угл.мин.

Процесс разработки и испытаний включает наземную отработку прибора как в лабораторных условиях, так и при натуральных испытаниях. Наземная отработка приборов заключается:

- в проверке алгоритмов программного обеспечения прибора, в том числе:
 - функционирования прибора в соответствии с Протоколом информационного обмена;
 - работы алгоритмов прибора по полю зрения, включая работу прибора при имитации движения космического аппарата;
 - работы прибора в условиях натуральных испытаний;