

Анализ функционирования трех приборов звездной ориентации БОКЗ-М при съемке звездного неба

А.В. Никитин, Б.С. Дунаев, В.А. Красиков

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

E-mail: andvnik935@yandex.ru

В работе изложены результаты эксперимента по синхронному определению ориентации системы из трех приборов звездной ориентации в инерциальной системе координат путем наблюдения звезд в штатном режиме и в режиме съемки одиночных кадров. Оценена точность определения угла между осями Z приборов. Построена зависимость точности определения угла вращения вокруг оси Z от угла между осями приборов.

Ключевые слова: прибор звездной ориентации, инерциальная система координат, приборная система координат, прямое восхождение, склонение, угловые параметры ориентации.

Введение

Эксперимент по синхронному определению угловых параметров ориентации осей внутренних систем координат приборов БОКЗ-М (ВСК) в осях инерциальной системы координат (ИСК) планировался для решения следующих основных задач, связанных с оценкой точностных характеристик приборов семейства БОКЗ-М:

- оценка точности, основанная на анализе изменений двух угловых параметров ориентации (угол δ – склонение оси $Z_{\text{ВСК}}$ прибора и угол азимута A – разворот вокруг оси Z);
- альтернативная оценка точности, основанная на анализе изменений угловых расстояний между осями $Z_{\text{ВСК}}$ трех приборов, а также величины сферического избытка;
- оценка точности определения угловых параметров ориентации осей обобщенной системы координат, построенной по информации о направлении осей Z первого и третьего приборов в ИСК, оси которых развернуты на угол $\sim 20^\circ$.

В основе подходов к проведению оценки точности лежит следующая предпосылка.

На интервале проведения сеанса синхронной съемки при отсутствии механических и температурных деформаций, а также ошибок измерений должны оставаться постоянными:

- два угловых параметра ориентации A и δ каждого прибора;
- три угла между осями Z трех приборов;
- величина сферического избытка;
- отличие суммы углов между осями Z крайних и центральных приборов от угла между осями Z крайних приборов.

При проведении эксперимента использовалась специально сконструированная установка (рис. 1), включающая:

- кронштейн с тремя посадочными местами под приборы БОКЗ-М; при этом посадочные места приборов ориентировались относительно друг друга таким образом, чтобы оси $Z_{\text{ВСК}}$ приборов располагались приблизительно в одной плоскости

- и углы между осями Z соседних приборов составляли 10° , оси $Y_{\text{ВСК}}$ приборов должны быть соосны и приблизительно параллельны друг другу;
- штатив для размещения на нем кронштейна с приборами БОКЗ-М; штатив может разворачиваться вокруг осей $Z_{\text{ВСК}}$ и $X_{\text{ВСК}}$ центрального прибора БОКЗ-М2;
 - контрольно-испытательная аппаратура (КИА) БОКЗ-М, обеспечивающая синхронное функционирование трех приборов и регистрацию результатов в файле протокола; программное обеспечение КИА выполняет, кроме служебных, прикладные функции, позволяющие обрабатывать полученные в процессе проведения эксперимента данные в режиме «реального времени».

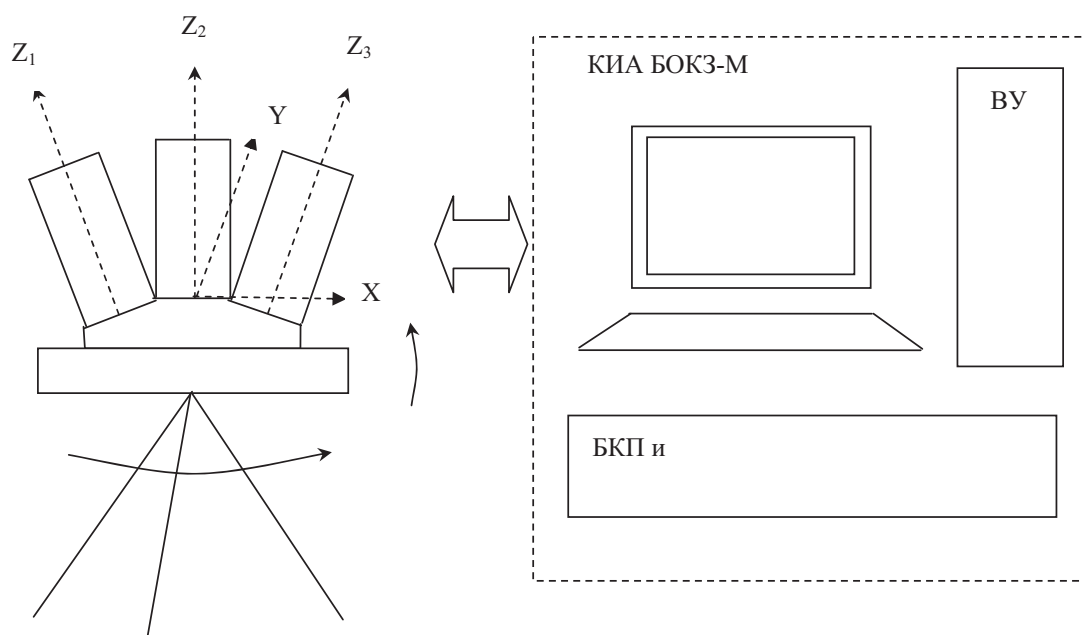


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: ВУ – вычислительное устройство; БКП и К – блок коммутации питания и контроля

Принятые системы координат (СК)

При проведении эксперимента использовались следующие системы координат (рис. 2):

- инерциальная (вторая экваториальная) система координат (ИСК), задаваемая стандартным способом;
- внутренняя система координат (ВСК) каждого прибора БОКЗ-М, задаваемая направлением строк и столбцов ПЗС-матрицы, а также ее положением относительно задней узловой точки объектива;
- система координат кронштейна, совпадающая с системой координат центрального (второго) прибора БОКЗ-М;
- обобщенная система координат (ОСК), образованная двумя осями Z первого и третьего приборов: ось Z_0 расположена в плоскости, образованной осями Z_1 и Z_3 ВСК и направлена по биссектрисе угла между этими осями; ось Y_0 совпадает с нормалью к плоскости, образованной осями Z_1 и Z_3 ; ось X_0 дополняет систему координат до правой тройки векторов.

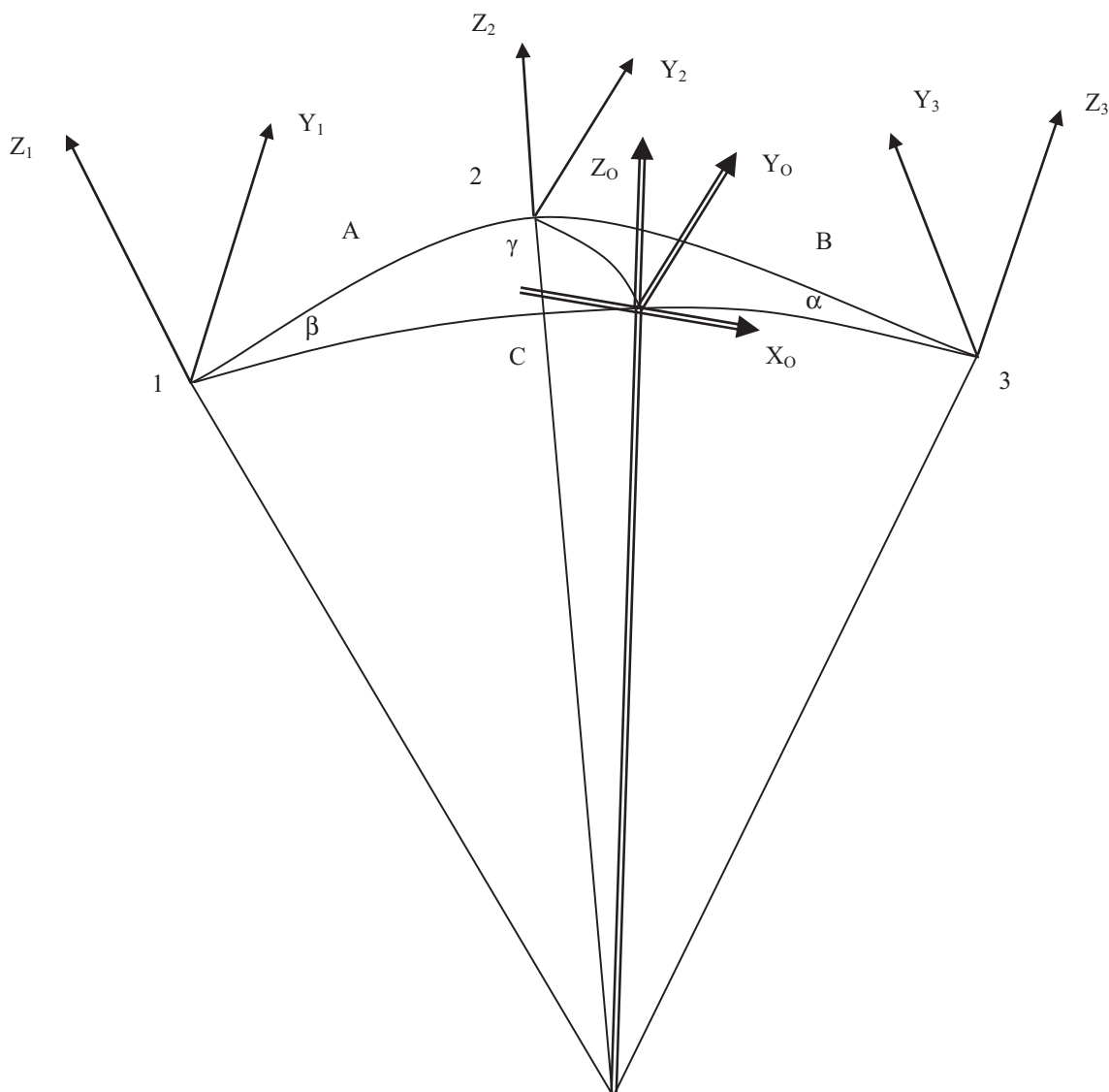


Рис. 2. Системы координат, используемые при проведении эксперимента.
Индексами 1, 2, 3 показаны номера приборов в обозначении осей СК (X, Y, Z);
 A, B, C – стороны сферического треугольника; α, β, γ – углы сферического треугольника

Описание эксперимента

Эксперимент по синхронной съемке проводился в Подмоскowie, д. Кочетовка, $\varphi = 55^{\circ}09'$ с 04.05 по 07.05.2010. Условия видимости средние.

Съемка проводилась как в покадровом режиме, так и в режиме штатного определения ориентации.

Всего было проведено шесть сеансов наблюдений в штатном режиме. Продолжительность сеанса составляла 15...20 мин, что позволило выполнить 300...400 определений параметров ориентации каждым из трех приборов.

В исходном положении кронштейн с установленными на нем приборами ориентировался таким образом, чтобы ось Z_2 ВСК была направлена в зенит, а ось Y_2 лежала в плоскости небесного меридиана. Остальные четыре сеанса проводились с отклонениями ориентации осей от исходного положения на величины, приведенные в табл. 1.

Таблица 1. Ориентация осей кронштейна при проведении сеансов съемки

<i>Дата съемки</i>	<i>Зенитное расстояние Z, град</i>	<i>Азимут A, град</i>
04.05	0	0
05.05	0	11
05.05	–10	15
06.05	0	0
07.05	0	20
07.05	–14	15

Порядок проведения эксперимента

Эксперимент проводился по следующей методике.

1. Сборка установки выполнялась в соответствии с *рис. 1*.
2. Приборы подключались к КИА БОКЗ-М в соответствии со схемой, приведенной в руководстве по эксплуатации (РЭ) КИА БОКЗ-М.
3. Запускалась программа КИА БОКЗ-М 3-го прибора; в дальнейшем работа с приборами в штатном режиме осуществлялась в соответствии с РЭ КИА БОКЗ-М как с одним прибором.
4. В программном обеспечении предусматривалась запись кватернионов и углов ориентации с трех приборов.
5. В программном обеспечении предусматривались фиксация и вычисление геометрических параметров системы трех приборов в режиме реального времени.
6. Горизонтальным поворотом штатива осуществлялась выставка азимутального угла оси Y 2-го прибора в направлении на «Север» в значение 0.
7. Вертикальным поворотом штатива выставлялось склонение оси Z 2-го прибора на величину, равную широте места проведения эксперимента, т.е. в направлении «Зенит».
8. Фиксировались углы ориентации в течение 1 ч (проход звезды через поле зрения прибора).
9. Выполнялась синхронная съемка полных кадров с трех приборов с помощью программы ПЗС 512х512 16 бит в течение 1 ч.
10. Штатив поворачивался в горизонтальной плоскости на углы 10, 15, 25° и на угол 10° вокруг оси Y, при этом выполнялись п. 8 и 9 для всех сочетаний вертикальных и горизонтальных углов.

Обработка результатов наблюдений в сеансе съемки

В процессе проведения сеанса съемки определялись следующие геометрические параметры:

- показания компьютерных часов в режиме реального времени в секундах;
- углы обобщенной ориентации с первого и третьего приборов;

- угол между осью второго (центрального) прибора и осью Z обобщенной системы координат;
- угол между осями Z_1 и Z_2 ;
- угол между осями Z_2 и Z_3 ;
- угол между осями Z_1 и Z_3 .

По завершении сеанса съемки рассчитывались:

- средние углы между осями приборов в течение одного сеанса съемки: A , B , C (рис. 2);
- значения среднеквадратических ошибок (с.к.о.) определения углов между осями приборов;
- углы в сферическом треугольнике α , β , γ по его сторонам A , B , C ;
- сферический избыток треугольника ϵ , заключенного между направлениями осей Z трех приборов.

Пример результатов обработки одного сеанса 05.05.10 приведен на рис. 3.

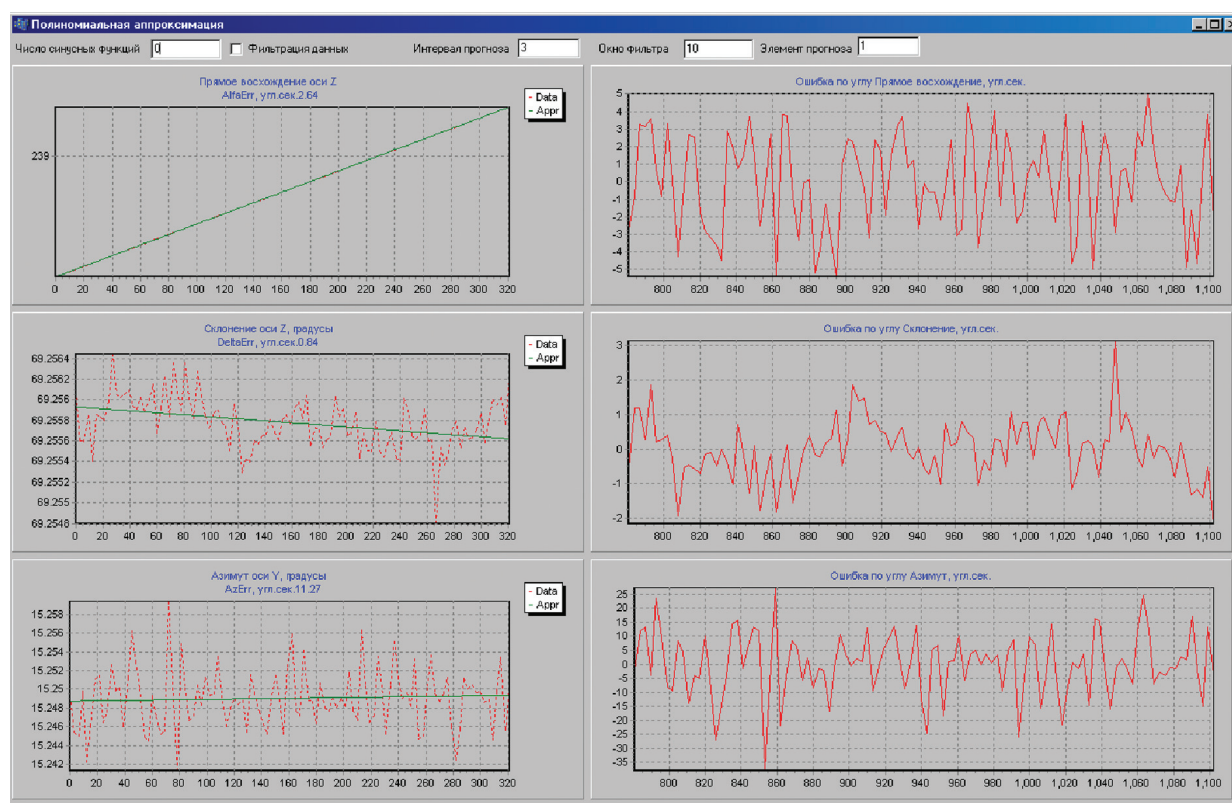


Рис. 3. Обработка параметров ориентации центрального прибора

При обработке данных центрального прибора углы ориентации – прямое восхождение оси Z , склонение оси Z и азимут оси Y – аппроксимировались полиномами второй степени от времени. Отличие измеренных данных от аппроксимирующего полинома оценивалось как ошибка измерения; среднеквадратическое значение ошибки по углу α – 2,5 угл. с; по углу δ – 0,8 угл. с и по углу A – 11,2 угл. с.

Была построена и оценена точность определения параметров обобщенной ориентации (рис. 4–6).

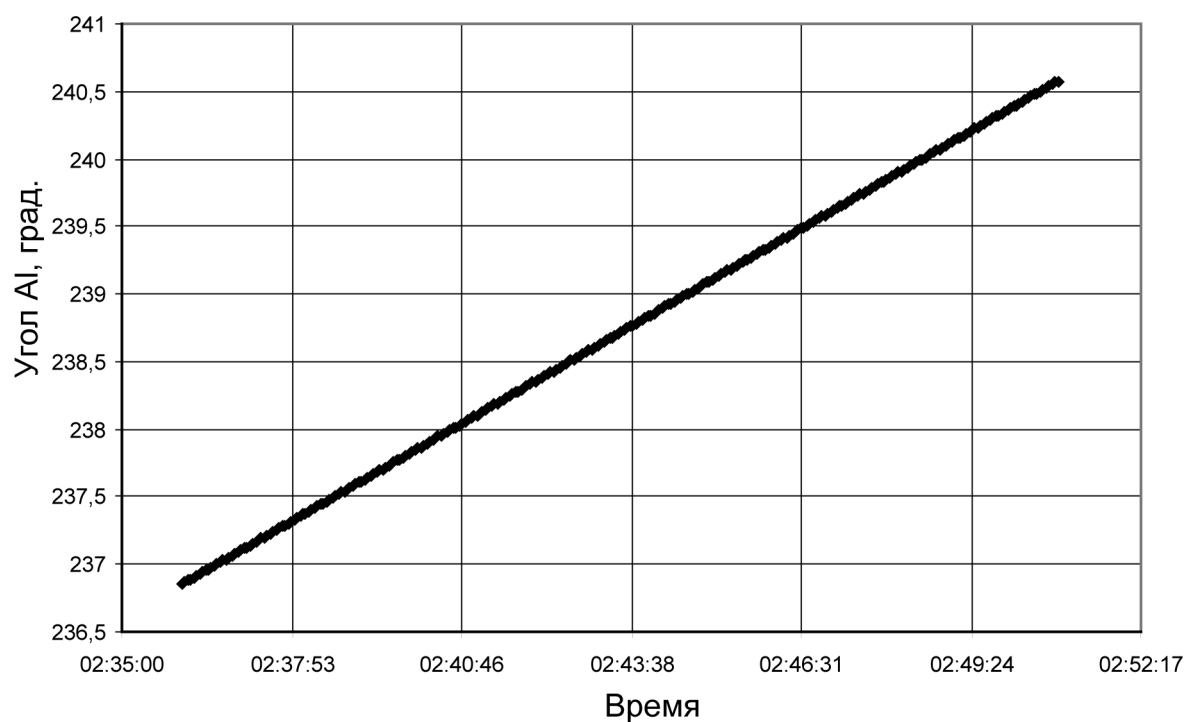


Рис. 4. Изменение прямого восхождения оси Z_{13} , град

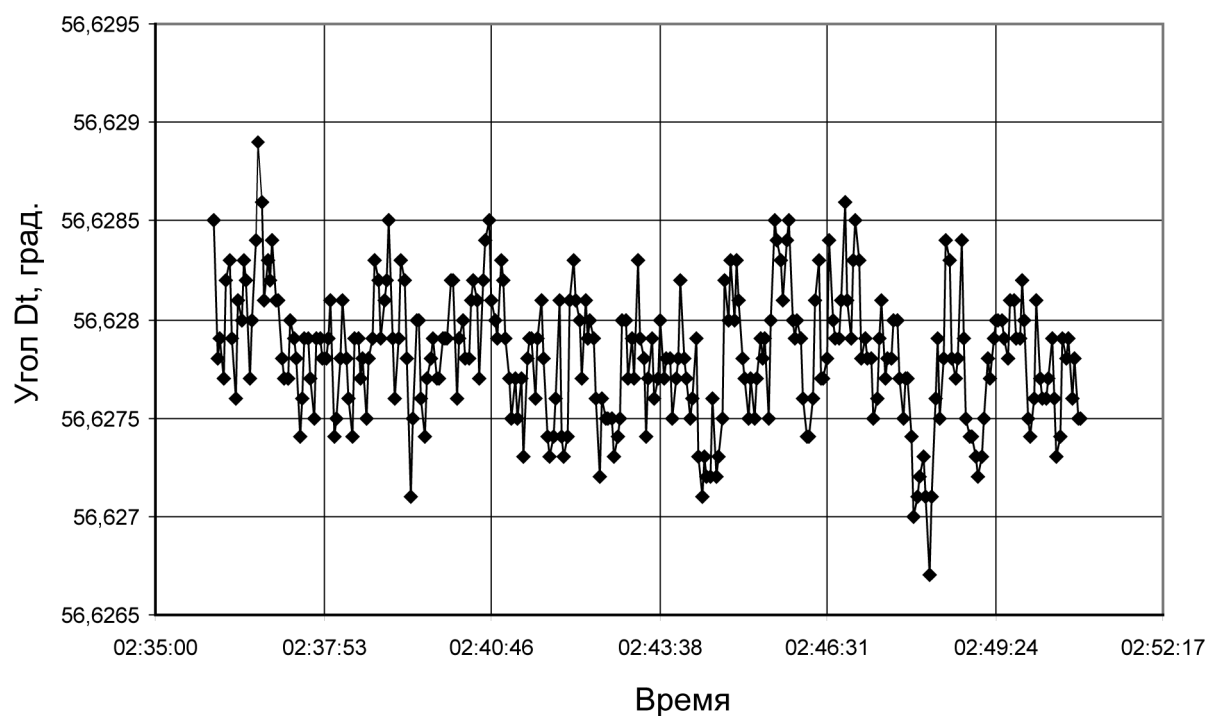


Рис. 5. Изменение склонения оси Z_{13} , град

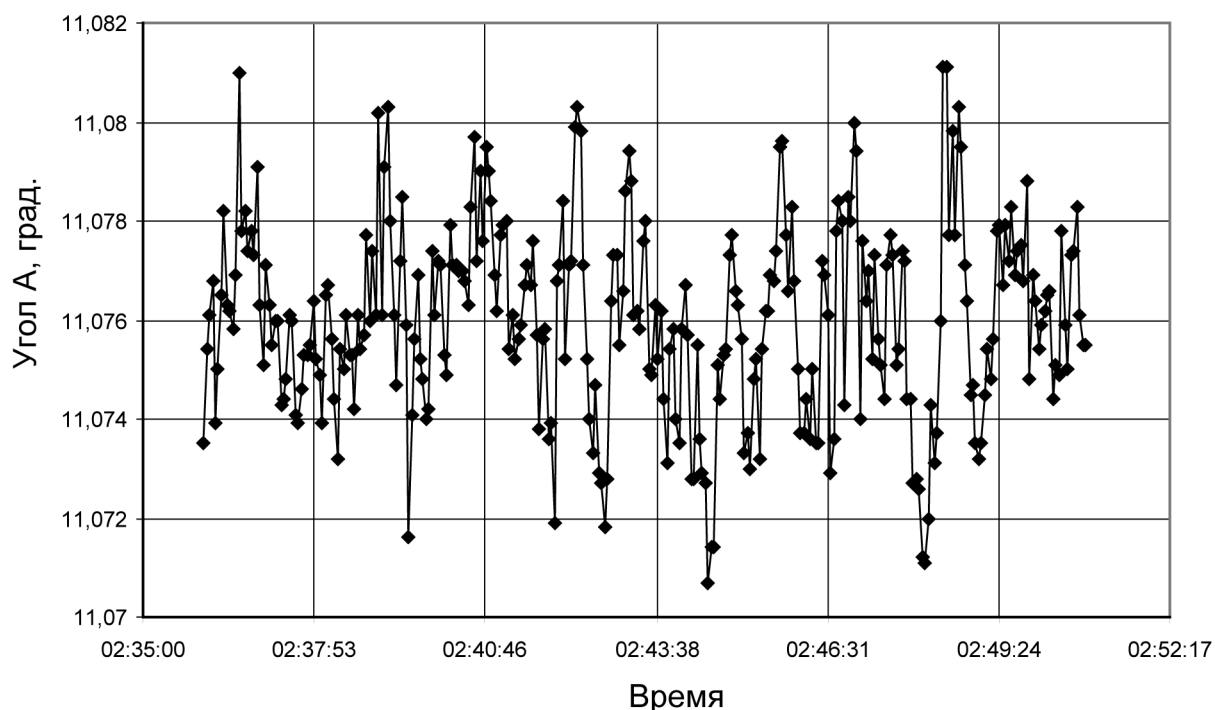


Рис. 6. Изменение азимутального угла оси Y_{13} , град

В результате обработки определены и представлены на графиках обобщенные углы ориентации, построенные по параметрам ориентации первого и третьего приборов:

- угол прямого восхождения изменяется от $232,7$ до $240,6^\circ$ (рис. 4);
- угол склонения оси Z составляет в среднем $56,6278^\circ$ со среднеквадратическим отклонением $1,2$ угл. с (рис. 5);
- азимутальный угол оси Y составляет $11,0760^\circ$ со среднеквадратическим отклонением $7,1$ угл. с (рис. 6);
- средний угол между обобщенной осью Z двух приборов и осью Z 2-го (центрального) прибора составляет $8,99$ угл. мин, его проекции на оси X и Y 2-го прибора: $-6,73$ и $-5,97$ угл. мин;
- средний угол между осями Z_1 и $Z_2 - 9,9809^\circ$, с.к.о. $1,7$ угл. с;
- средний угол между осями Z_2 и $Z_3 - 10,180^\circ$, с.к.о. $1,6$ угл. с;
- средний угол между осями Z_1 и $Z_3 - 20,1601^\circ$, с.к.о. $2,0$ угл. с;
- отличие суммы углов между осями Z крайних и центральных приборов от углов между осями Z крайних приборов составляет $4,44$ угл. с, с.к.о. $0,19$ угл. с;
- избыток сферического треугольника составляет $70,3$ угл. с.

Обобщенные результаты эксперимента приведены в табл. 2 (усредненные значения выделены полужирным шрифтом).

Из таблицы видно, что 06.05.2010 имеет место существенное отличие (на 36 угл. с) от предыдущих значений 04,05 и 05,05 средних углов между осями Z приборов, что вызвано, по всей видимости, повторной установкой приборов на посадочные места кронштейна.

Таблица 2. Результаты съемки звезд системой из трех приборов

Дата	ξ , град	A , град	σ_{δ} , угл.с	σ_A , угл.с	Z_{13} , град	Z_{23} , град	Z_{13} , град	σ_{Z13} , угл.с	σ_{Z23} , угл.с	σ_{Z13} , угл.с	ε , угл.с	A , угл.с	σ_A , угл.с
04.05.2010	0	0,1688	1,4	7,5	9,9812	10,1795	20,1596	1,86	1,91	2,26	67,2	4,39	0.19
05.05.2010	0	11,076	1,2	7,1	9,9809	10,1804	20,1601	1,70	1,60	2	70,3	4,44	0.19
05.05.2010	10	15,1942	2,1	8,1	9,9794	10,1799	20,1580	1,60	1,30	1,8	72,8	4,52	0.19
Усреднение					9,9805	10,1799	20,1592				70,1	4,45	
06.05.2010	0	0,104	1,6	9	9,9920	10,1609	20,1515	1,80	1,80	2	75,8	4,99	0.19
07.05.2010	0	19,297	2,9	8,9	9,9937	10,1629	20,1552	1,60	1,80	1,8	75,8	4,88	0.19
07.05.2010	14	28,832	1,8	6,9	9,9950	10,1633	20,1570	2,00	2,00	2	73	4,89	0.19
Усреднение					9,9935	10,1624	20,1546				74,9	4,92	

Зависимость точности определения угла A от углового расстояния между осями Z приборов приведена на рис. 7.

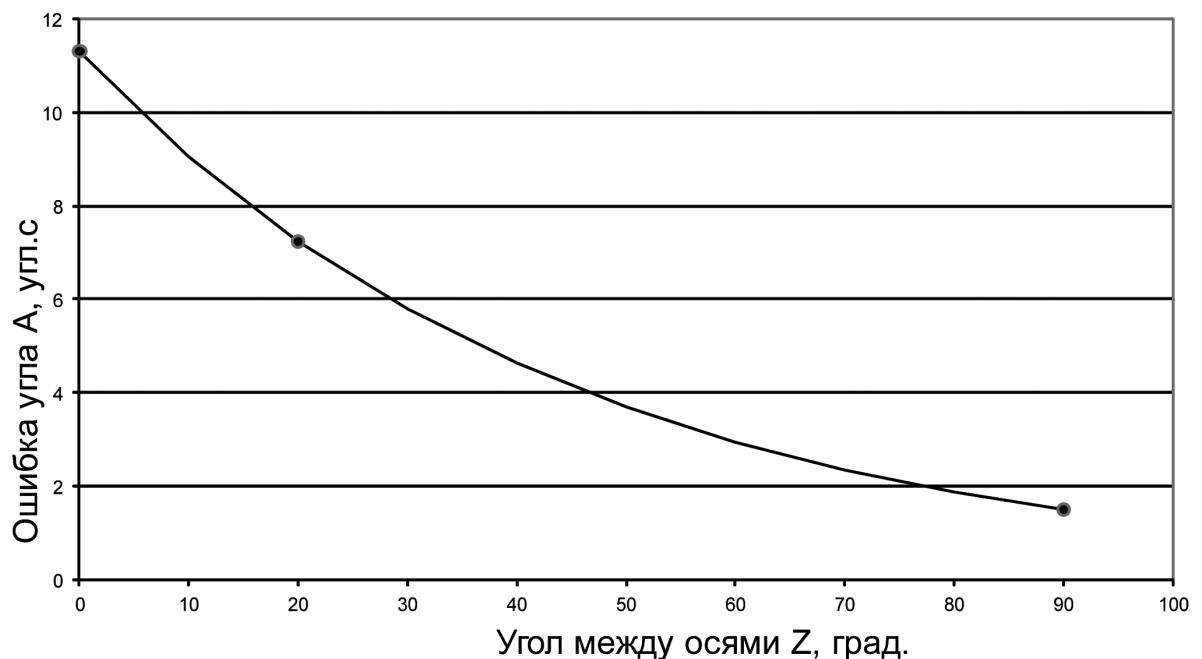


Рис. 7. Зависимость точности определения азимута от угла между осями Z

Из эксперимента, проведенного на борту космического аппарата (КА) серии «Космос», выявлено, что при установке приборов под углом 90° точность определения углов обобщенной ориентации составила 1,5 угл.с по трем осям. При параллельном расположении осей Z приборов точность определения азимута в $\sqrt{2}$ раз выше, чем у одного прибора, т.е. составляет 11 угл. с. Из результатов эксперимента видно, что при угле между осями приборов 20° ошибка определения угла составляет в среднем 7,5 угл. с. Таким образом, можно построить зависимость между точностью определения азимута и углом между осями приборов. Построенная по трем точкам эмпирическая зависимость может быть представлена экспоненциальной функцией: $\sigma_A = 11,313 e^{-0,0224\varphi}$. При этом угол φ между осями задается в градусах, а величина ошибки получается в угловых секундах.

Как видно из графика, существенное улучшение точности определения азимута обобщенной ориентации возникает при угле между осями Z приборов, большем 45° ($\sigma_A = 4$ угл. с).

Выводы

1. Отличие суммы углов между осями Z крайних и центрального приборов от угла между осями Z крайних приборов составляет в среднем $4,9$ угл. с и не зависит от углов наклона системы из трех приборов, а также от участка звездного неба. Среднеквадратическая ошибка определения составляет $0,19$ угл. с.

2. Средние углы между осями Z трех приборов и ошибки их определения, представленные в табл. 2, составляют $9,9805$, $10,1799$ и $20,1592^\circ$ для первой установки приборов на посадочные места и $9,9935$, $10,1624$ и $20,1546^\circ$ для второй установки.

3. Эксцесс сферического треугольника, построенного по точкам пересечения осей Z приборов со сферой единичного радиуса, составляет $67,2 \dots 75,8$ угл. с.

4. Точность определения параметров обобщенной ориентации составляет по углу склонения $1,2 \dots 2,0$ угл. с, а азимутальный угол оси Y – $6,9 \dots 8,9$ угл. с. Как показал эксперимент, с построением обобщенной ориентации по данным прибора с борта КА точность азимутального угла оси Y составляет $1,5$ угл. с при угле между осями 90° .

5. Система из трех приборов пригодна для контроля своего углового положения, а именно углов поворота вокруг осей координат системы, с точностью от $1,5$ до $10,7$ угл. с в зависимости от угла между осями приборов.

Analysis of three BOKZ-M star trackers operation while imaging starry sky

A.V. Nikitin, B.S. Dunayev, V.A. Krasikov

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

E-mail: andvnik935@yandex.ru

The paper presents the results of an experiment on simultaneous attitude determination for the system of the three star trackers in inertial coordinate system by observing the stars both in the normal mode and single frame shooting mode. The accuracy of determining the angle between instruments' Z axes is estimated. The dependence of the accuracy of determining the rotation angle around the Z axis and the angle between the instruments' axes is derived.

Keywords: star tracker, inertial coordinate system, instrumentation coordinate system, right ascension, declination, angular orientation parameters.