Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 24–33

Прибор звездной ориентации БОКЗ М60/1000. Методика и результаты исследований на динамическом стенде

Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, В.Ю. Дементьев

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: DemV87@yandex.ru

В статье представлено описание прибора звездной ориентации БОКЗ-М60/1000 разработки ИКИ РАН. Получено подтверждение характеристик прибора, заложенных требованиями технического задания, при помощи стенда динамических испытаний. Доказана работоспособность прибора при наличии фоновой засветки, а также в условиях светооптических помех. Определены границы его работоспособности.

Ключевые слова: прибор звездной ориентации, наземная отработка, стенд динамических испытаний.

Введение

Приборы звездной ориентации находят широкое применение в составе систем управления ориентацией космического аппарата. Принцип их работы состоит в следующем. Прибор визирует звезды, находящиеся в его поле зрения, вычисляет угловые расстояния между ними (в элементах ПЗС-матрицы), проводит сравнение с данными бортового каталога и выдает угловые параметры в геоцентрической инерциальной системе координат в виде кватерниона или матрицы направляющих косинусов. На борту космического аппарата устанавливается, как правило, несколько таких приборов.

Прибор звездной ориентации БОКЗ-М60/1000 (*рис. 1*) – плод труда коллектива оптико-физического отдела Института космических исследований. Основные характеристики прибора представлены в *табл. 1, 2.*

Рис. 1. Прибор БОКЗ-М60/1000

Таблица 1. Характеристики оптической части прибора БОКЗ-М60/1000

Параметры объектива:	
• фокусное расстояние, мм	60
• поле зрения, град	16
Параметры матрицы:	
• тип	ПЗС «Сфера-1000»
• размеры, число элементов	1024×1024
• размер элемента, мкм	16
• разрядность АЦП	12
• время экспонирования, мс	< 120
Устройство бортового звездного каталога:	
• число секторов / размер сектора, град	162/32
• объем каталога, число звезд	2900

Таблица 2. Технические характеристики прибора БОКЗ-М60/1000

Характеристика	*Значение по ТЗ*	*Реальное значение*
1. Быстродействие		
Режим «НО»		
Время определения ориентации при наличии в поле зрения прибора четырех или более звезд из бортового каталога, с	< 50	< 11
Время реакции при наличии в поле зрения прибора четырех или более объектов с конфигурацией, невозможной для распознавания, с	< 50	< 11
Время реакции при наличии в поле зрения прибора менее четырех объектов, с	< 50	1,75
Режим «ТО»		
Время определения ориентации при наличии в поле зрения прибора четырех или более звезд из бортового каталога, с	< 3	< 3
Время реакции при наличии в поле зрения прибора четырех или более объектов с конфигурацией, невозможной для распознавания, с	< 3	< 3
Время реакции при наличии в поле зрения прибора менее четырех объектов, с	< 3	1,75
Режим «Слежение»		
Период обновления выходной информации, с	0,25	0,25
2. Допустимые значения угловой скорости и ускорения		
Режим «НО»		
Проверка функционирования прибора при моделировании орбитального движения космического аппарата с заданной угловой скоростью, град/с	0,5	0,5
Режим «ТО»		
Проверка функционирования прибора при моделировании орбитального движения космического аппарата с заданной угловой скоростью, град/с	0,5	0,5
Режим «Слежение»		
Проверка функционирования прибора при моделировании орбитального движения космического аппарата с заданной угловой скоростью, град/с	3	3
Проверка функционирования прибора при моделировании орбитального движения космического аппарата с заданным угловым ускорением, град/с^2	0,03	0,03
3. Погрешность расчета параметров ориентации		
Угловой эквивалент шума (СКО, угл. с): • прямое восхождение • склонение • азимут		 0,25 0,16 2,4

В качестве фотоприемного устройства в приборе БОКЗ-М60/1000 используется ПЗС-матрица «Сфера-1000» размером 1024 × 1024 элемента. Формат матрицы и объектив с фокусным расстоянием 60 мм обеспечивают поле зрения прибора равным 16°. Объем бортового каталога – 2900 звезд до 6-й звездной величины.

Характеристики оптической части прибора БОКЗ-М60/1000, а также сведения о бортовом звездном каталоге приведены в *табл. 1*.

Прибор БОКЗ-М60/1000 имеет следующие режимы работы: «Начальная ориентация» («НО»), «Текущая ориентация» («ТО») и «Слежение». В режимах «НО» / «ТО» запускается циклограмма, включающая: экспонирование, считывание информации с ПЗС-матрицы, распознавание в бортовом звездном каталоге и расчет параметров ориентации. Алгоритмы работы прибора в режимах «НО» и «ТО» отличаются тем, что в первом случае процедура распознавания осуществляется по всему бортовому звездному каталогу, а во втором

анализируется только небольшая его часть. При положительном исходе распознавания прибор автоматически переходит в режим «Слежение». В этом режиме выполняется ускоренное чтение с ПЗС-матрицы, что вместе с малым временем экспозиции (< 120 мс) обеспечивает расчет параметров ориентации с частотой 4 Гц.

В режиме «Слежение» обрабатывается изображение не со всей ПЗС-матрицы, а только из «окон» размером 15 × 13 элементов, формируемых вокруг каталожных звезд (*рис. 2*).

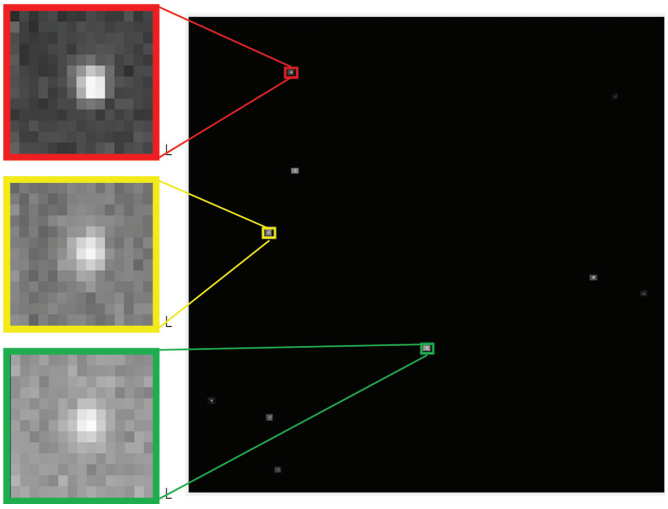

Рис. 2. Формирование «окон» прибором БОКЗ-М60/1000 в режиме «Слежение»

1. Методика проведения стендовых испытаний

Для отработки программного обеспечения (ПО) прибора БОКЗ-М60/1000 использовался стенд динамических испытаний (СДИ), который позволяет имитировать орбитальное движение космического аппарата, а также воздействие внешних факторов космического пространства. Более подробно описание стенда, а также принцип его работы можно найти в работах (Воронков, 2002; Аванесов и др., 2003; 2009).

Перед началом стендовых испытаний были поставлены следующие задачи.

1. Проверка ПО прибора БОКЗ-М60/1000 на соответствие требованиям технического задания (ТЗ):

- измерение времени определения ориентации;
- определение «углового эквивалента шума»;
- контроль работы прибора при движении с различными угловыми скоростями;
- работы прибора при движении с угловым ускорением.

2. Исследование работы прибора БОКЗ-М60/1000 при имитации неблагоприятных условий внешней среды (протоны космического пространства, засветка поля зрения).

Для измерения времени определения ориентации, а также оценки собственной погрешности прибора БОКЗ-М60/1000 («угловой эквивалент шума») на испытательном стенде моделировался неподвижный участок небесной сферы. В этом эксперименте положение звезд на экране монитора оставалось все время неизменным. Такой способ отображения звезд обеспечивает минимальный вклад стенда в общую составляющую ошибки прибора.

При реализации орбитального движения, когда звезды перемещались по экрану монитора стенда, проводилось тестирование бортового каталога по всей небесной сфере. Проверялось функционирование прибора БОКЗ-М60/1000 при движении с угловой скоростью и ускорением. При этом дополнительно исследовались допустимый уровень фоновой засветки, а также число «помеховых» объектов, при которых прибор способен определять параметры ориентации.

2. Результаты стендовых испытаний

2.1. Измерение времени определения ориентации прибором БОКЗ-М60/1000

В соответствии с ТЗ время определения ориентации в режиме «НО» не должно превышать 50 с, а в режиме «ТО» – 3 с. Проведенные исследования показали, что время определения ориентации прибором БОКЗ-М60/1000 в режиме «НО» составляет не более 11 с, а в режиме «ТО» – не более 3 с.

При невозможности определения ориентации в режиме «НО» (или «ТО») наступает выход в состояние «Ожидание». Алгоритм работы прибора БОКЗ-М60/1000 в режиме «НО» (в условиях различной звездной обстановки) приведен на *рис. 3,* а в режиме «ТО» – на *рис. 4.*

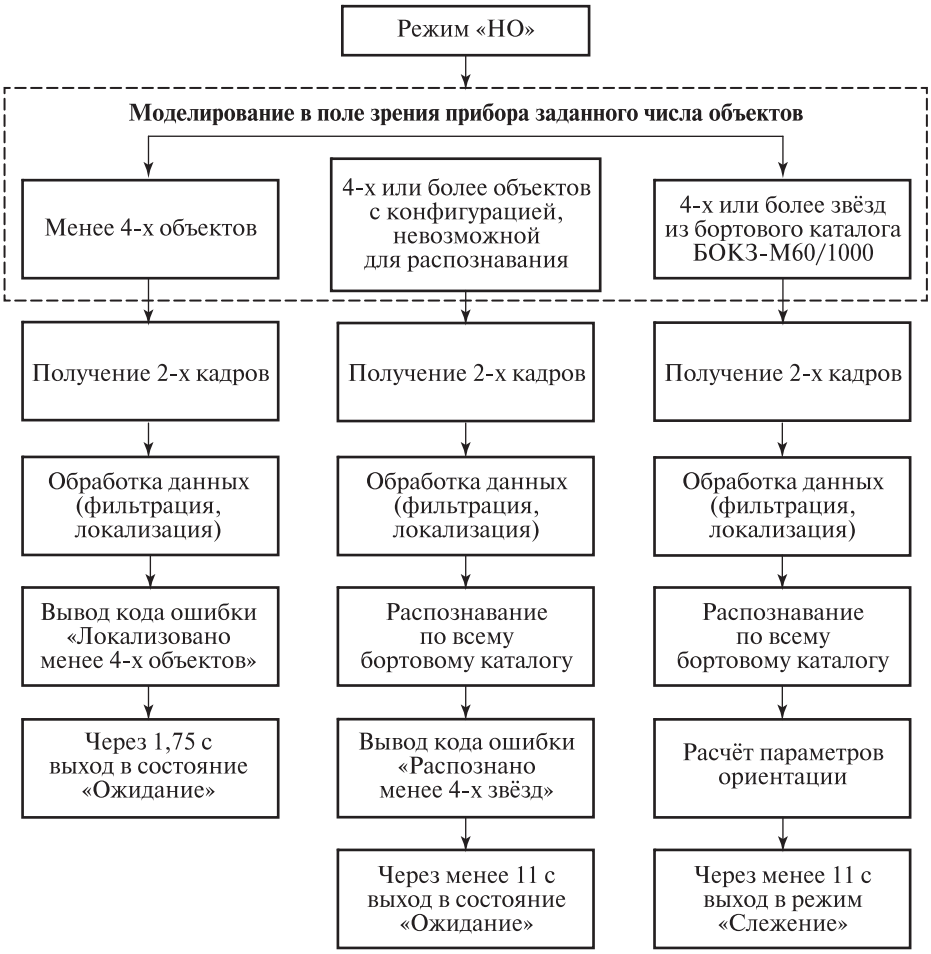

Рис. 3. Алгоритм работы прибора БОКЗ-М60/1000 в режиме «НО»

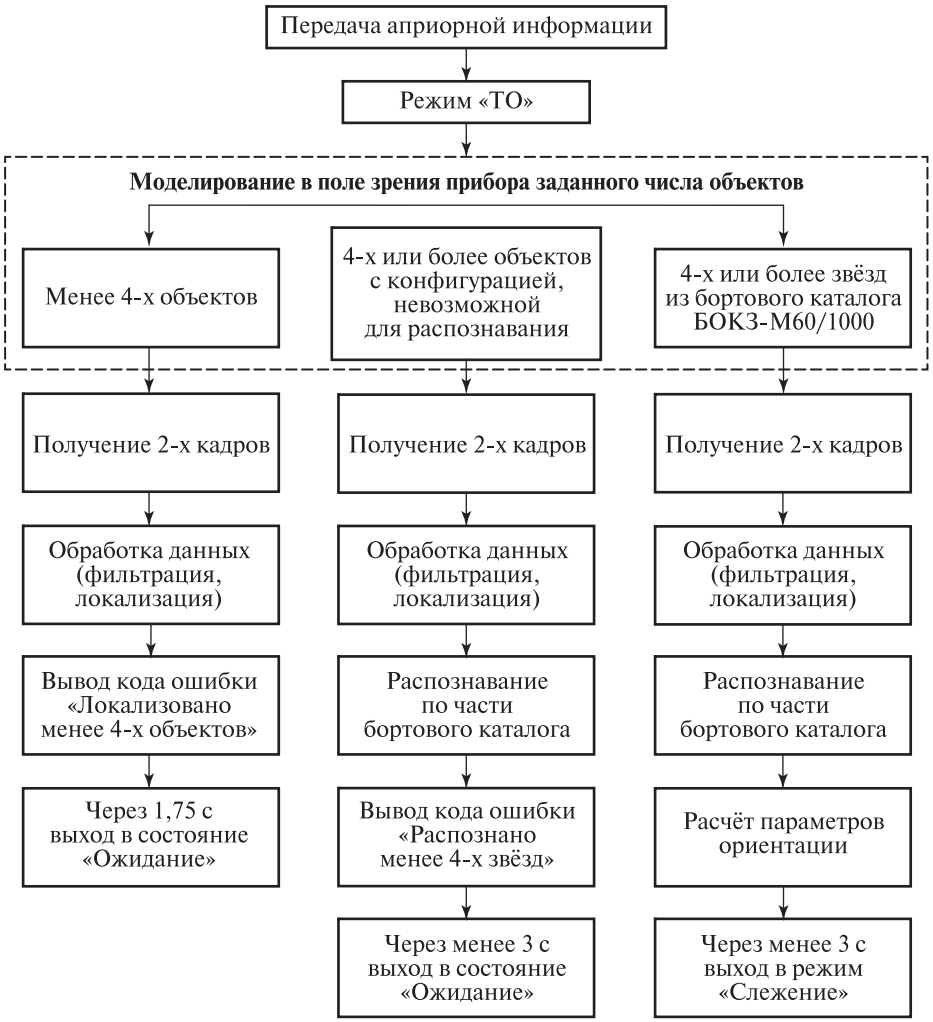

Рис. 4. Алгоритм работы прибора БОКЗ-М60/1000 в режиме «ТО»

2.2. Измерение «углового эквивалента шума» прибора БОКЗ-М60/1000

На *рис. 5–7* представлены графики углов ориентации, полученные после многократной съемки статического изображения, сформированного на СДИ. Среднеквадратическое отклонение угла прямого восхождения составило 0,25 угл. с, угла склонения – 0,160 угл. с, а угла азимута – 2,4 угл. с.

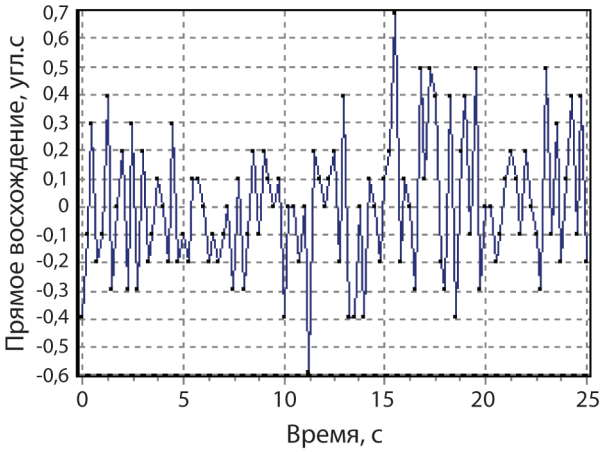

Рис. 5. График зависимости угла прямого восхождения от времени

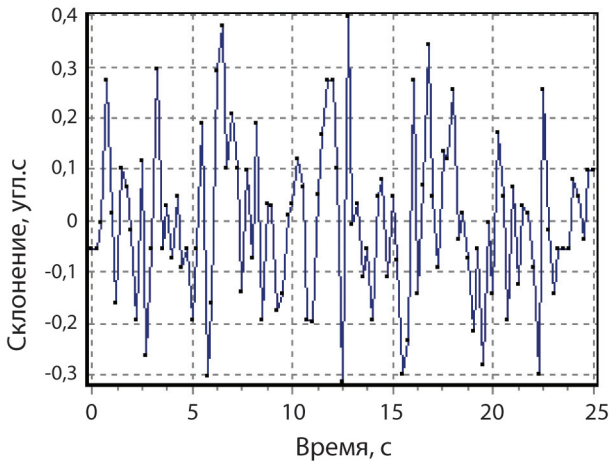

Рис. 6. График зависимости угла склонения от времени

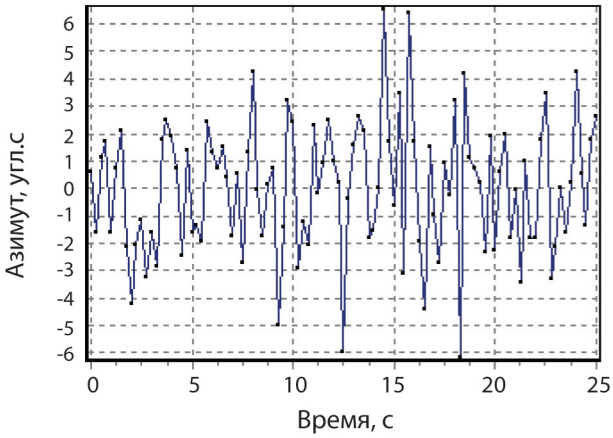

Рис. 7. График зависимости угла азимута от времени

2.3. Исследование работы прибора БОКЗ-М60/1000 при моделировании орбитального движения космического аппарата с различными угловыми скоростями

Значение допустимой угловой скорости движения в соответствии с ТЗ составляет в режиме «НО» 0,5 град/с, а в режиме «Слежение» – 3 град/с.

На *рис. 8* представлена графическая иллюстрация имитации орбитального движения космического аппарата с различными угловыми скоростями – 0,5; 1,5; 3 град/с – по трем круговым орбитам (параметры орбит указаны в *табл. 3).*

Таблица 3. Орбитальные параметры

№ орбиты	***Долгота восходящего узла, град***	***Наклонение, град***
1	0	90
2	45	45
3	90	52

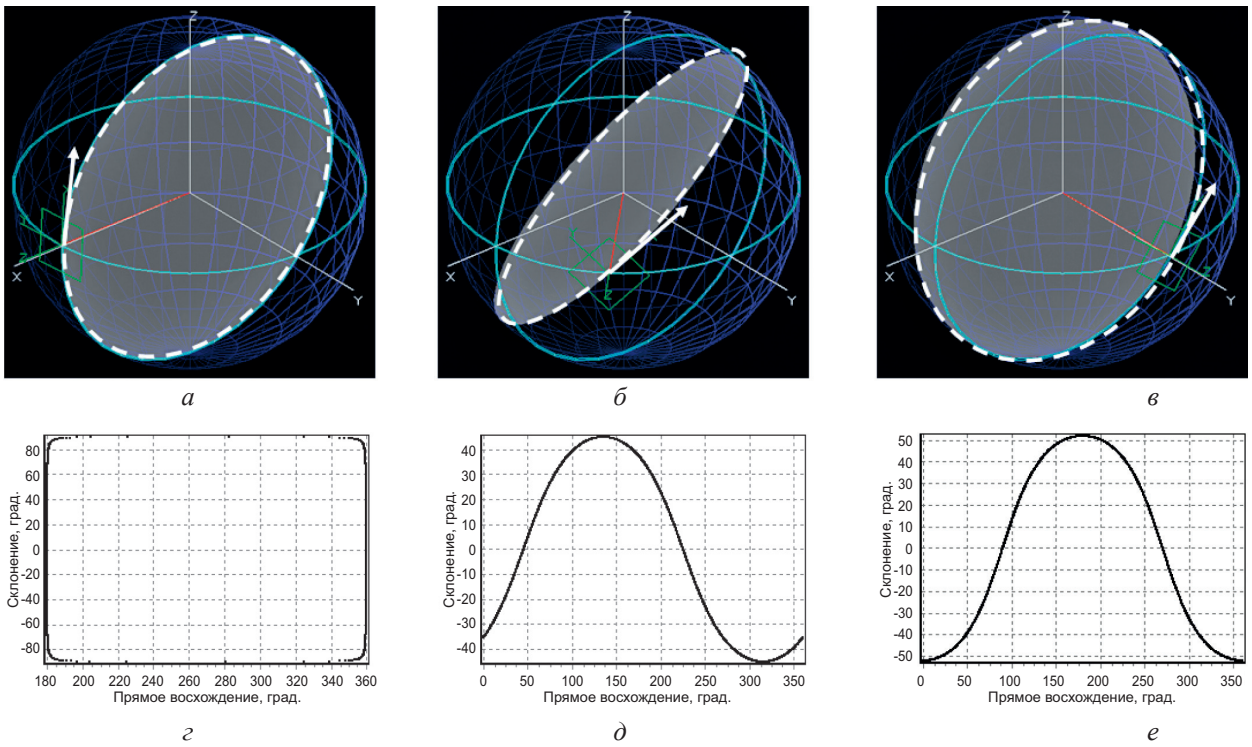

Рис. 8. Моделируемое орбитальное движение (а–в)
и полученный график угла склонения от прямого восхождения (г–е)

Проведенные исследования показали, что прибор БОКЗ-М60/1000 определяет ориентацию при движении космического аппарата с угловыми скоростями до 3 град/с.

2.4. Исследование работы прибора БОКЗ-М60/1000 при моделировании орбитального движения космического аппарата с угловым ускорением

Значение допустимого углового ускорения в соответствии с ТЗ составляет 0,03 град/с^2. Исходя из этого требования в режиме «Слежение» моделировалось угловое ускорение 0,03 град/с^2 до достижения угловой скорости 3 град/с, после этого знак ускорения менялся на противоположный (*рис. 9*). Движение происходило на одной тестовой орбите. Параметры орбиты были заданы в градусах и составили: долгота восходящего узла орбиты – 0; наклонение орбиты – 90.

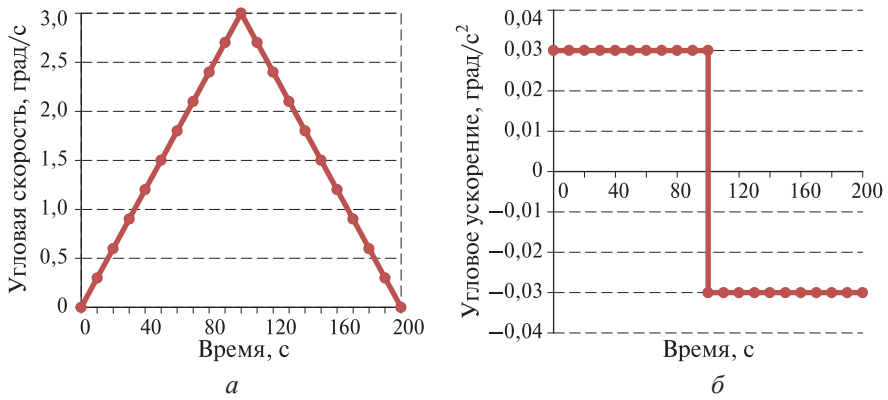

Рис. 9. Моделируемый закон изменения угловой скорости (а) и ускорения (б)

Проведенные исследования показали, что прибор БОКЗ-М60/1000 определяет ориентацию при движении космического аппарата с угловым ускорением 0,03 град/с^2.

2.5. Исследование работы прибора БОКЗ-М60/1000 при повышенном уровне фоновой засветки

Для прибора БОКЗ-М60/1000 на испытательном стенде было проведено исследование допустимого уровня фоновой засветки. Прибор БОКЗ-М60/1000 имеет 12-разрядный аналогово-цифровой преобразователь. Это означает, что максимально возможное значение принятого сигнала соответствует 4095 единицам младшего разряда (ЕМР).

Проведенные исследования показали, что прибор БОКЗ-М60/1000 сохраняет работоспособность в условиях фоновой засветки:

- до 2500 ЕМР в режимах «НО»/«ТО»;
- до 3500 ЕМР в режиме «Слежение».

На *рис. 10–12* представлены графики углов ориентации, полученные после многократной съемки статического изображения, сформированного на СДИ. В этом эксперименте уровень сигнала на ПЗС-матрице составлял 3500 единиц младшего разряда. Среднеквадратическое отклонение угла прямого восхождения составило 0,60 угл. с, угла склонения – 0,60 угл. с, а угла азимута – 7,90 угл. с.

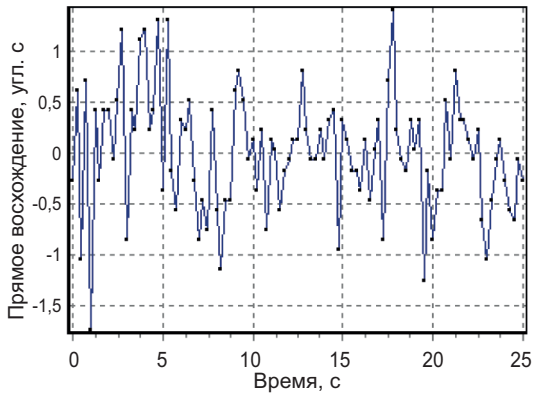

Рис. 10. График зависимости угла прямого восхождения от времени

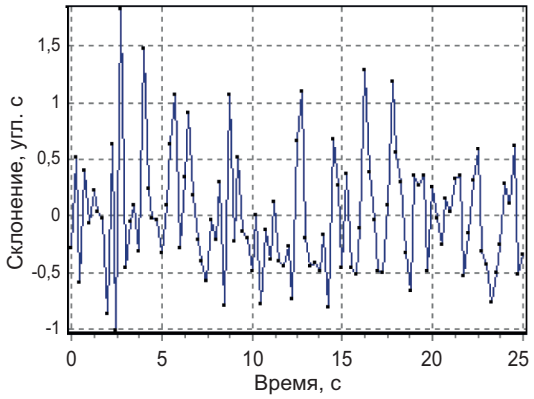

Рис. 11. График зависимости угла склонения от времени

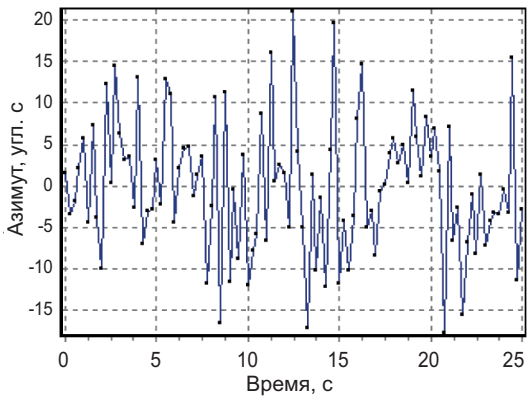

Рис. 12. График зависимости угла азимута от времени

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при повышении уровня фона до 3500 ЕМР не только прибор продолжает успешно определять параметры ориентации, но и количественные показатели по точности ухудшаются не более чем в 2–3 раза (при отсутствии фоновой засветки).

2.6. Исследование помехозащищенности прибора БОКЗ-М60/1000

Имитация воздействия протонов на прибор реализовывалась путем вывода на экран монитора световых помех, имеющих форму точек и треков различной длины. Координаты таких объектов на мониторе рассчитывались случайным образом в соответствии с равномерным законом распределения вероятностей. Точечные помехи имитировали влияние протонов, пронизывающих прибор под прямыми углами. Помехи в форме треков имитировали влияние протонов, пронизывающих прибор под большими углами к его оптической оси.

Проведенные исследования показали, что прибор БОКЗ-М60/1000 успешно справляется с задачей определения параметров ориентации при плотности «помеховых» объектов на зарегистрированном кадре ~ 400 объектов.

Заключение

При отработке программного обеспечения прибора БОКЗ-М60/1000 на испытательном стенде было получено подтверждение характеристик, заложенных требованиями технического задания: по времени определения ориентации, точности измерений ориентации, величине допустимой угловой скорости и углового ускорения (*табл. 2*).

В рамках проведенных исследований была доказана эффективность работы прибора при наличии фоновой засветки, а также в условиях светооптических помех. Определены границы его работоспособности.

Литература

1. *Аванесов Г.А.*, *Воронков С.В.*, *Форш А.А.* Стенд динамических испытаний и геометрической калибровки астронавигационных приборов // Известия вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 74–79.
2. *Аванесов Г.А.*, *Воронков С.В.*, *Дунаев Б.С.*, *Красиков В.А.*, *Шамис В.А.*, *Форш А.А.* Имитаторы звездного неба для наземной отработки датчиков звездной ориентации // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов: Сб. тр. Всеросс. научно-технич. конф. Россия, Таруса, 22–25 сент. 2008. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 372–386.
3. *Воронков С.В.* Применение стенда динамических испытаний в задачах отработки астронавигационных приборов: Препринт ИКИ РАН. Пр-2120. М.: ИКИ РАН, 2002. 22 с.

Results of software tests of the star tracker BOKZ-M60/1000 on dynamic test bench

G.A. Avanesov, R.V. Bessonov, V.Y. Dementiev

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
E-mail: DemV87@yandex.ru

A description of the star tracker BOKZ-M60/1000 developed by the Space Research Institute RAS is presented. Confirmation of characteristics of the device put by requirements of the specification, by means of the dynamic stand bench is received. Operability of the device in the presence of a background flare, and also in the conditions of light-optical noise hindrances is proved. Limits of its working capacity are defined.

Keywords*:* star tracker, ground validation, dynamic test bench.