

## **Динамические имитаторы звездного неба, предназначенные для комплексной отработки астроприборов в составе космических аппаратов**

**С.В. Воронков, Б.С. Дунаев, А.В. Никитин, В.А. Шамис**

*Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

В первой части статьи рассмотрен комплекс наземной отладки приборов БОКЗ-М, предназначенный для использования на предприятии-разработчике космического аппарата с целью проверки работы измерительных и исполнительных органов системы управления. Вторая часть посвящена стенду моделирования контура стабилизации телескопа Т-170М, использующего информацию от системы датчиков гида.

**Ключевые слова:** звездный датчик, стенд, мини-компьютер, имитатор, система датчиков гида, блок обработки данных, телескоп.

### **Введение**

Основным направлением деятельности отдела оптико-физических исследований Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) является разработка датчиков звездной ориентации – приборов семейства БОКЗ. Для решения задач наземной отработки звездных датчиков в ИКИ РАН разработаны различные имитаторы звездного неба, как статические, с помощью которых может быть проверена правильность работы оптико-электронного тракта прибора, так и динамические, позволяющие моделировать условия работы приборов в космосе с высокой достоверностью и проводить проверку функционирования звездных датчиков в штатных режимах (Аванесов и др., 2009). Такие имитаторы изготавливаются институтом для проведения собственных проверок функциональных характеристик приборов, а также по заказу различных предприятий космической отрасли России и зарубежья.

В представленной статье речь пойдет о новой модификации динамических имитаторов, обеспечивающих возможность не только выполнения автономных проверок приборов на предприятии-изготовителе, но и внедрения имитаторов в состав комплексных стендов у заказчика для проведения совместных испытаний звездных датчиков и других измерительных приборов, а также исполнительных органов системы ориентации и стабилизации (СОС) космического аппарата (КА).

В настоящий момент в ИКИ РАН разработаны два устройства подобного рода – инструментальный модуль комплекса проверки функционирования приборов (ИМ КПФ) БОКЗ-М и стенд полунатурного моделирования контура прецизионной стабилизации телескопа Т-170М с использованием системы датчиков гида (СДГ).

## *1. Инструментальный модуль комплекса проверки функционирования приборов БОКЗ-М*

К основным заказчикам приборов БОКЗ-М относится ОАО «ВПК «НПО Машиностроения»» (НПОМАШ), для которого ИКИ РАН поставил нескольких образцов звездных датчиков. При проведении наземных испытаний перед разработчиками системы ориентации и стабилизации стояла задача отладки программного обеспечения (ПО) СОС при взаимодействии с входящими в ее состав двумя приборами БОКЗ-М. Помимо этого, существовала необходимость проверки в наземных условиях работы СОС при моделировании движения космического аппарата по планируемой для него орбите. С точки зрения прибора БОКЗ-М, движение по орбите представляет собой изменение изображений звездного неба в его поле зрения; при этом конфигурация звезд, скорость их перемещения относительно прибора и другие параметры внешней среды зависят от орбитальных параметров. Моделирование перемещения звезд в поле зрения прибора может быть осуществлено на стенде динамических испытаний, подробная работа которого описана в (Аванесов и др., 2009). Тем не менее, для решения рассматриваемой задачи совместной отработки СОС и функционирования БОКЗ-М такой стенд не совсем подходит, в первую очередь из-за ограниченных функциональных возможностей. Кроме того, габариты стенда не обеспечивают возможность работы с приборами, установленными на космический аппарат. В связи с этим перед ИКИ РАН была поставлена задача разработки так называемого инструментального модуля комплекса проверки функционирования приборов БОКЗ-М, который должен был отвечать следующим требованиям:

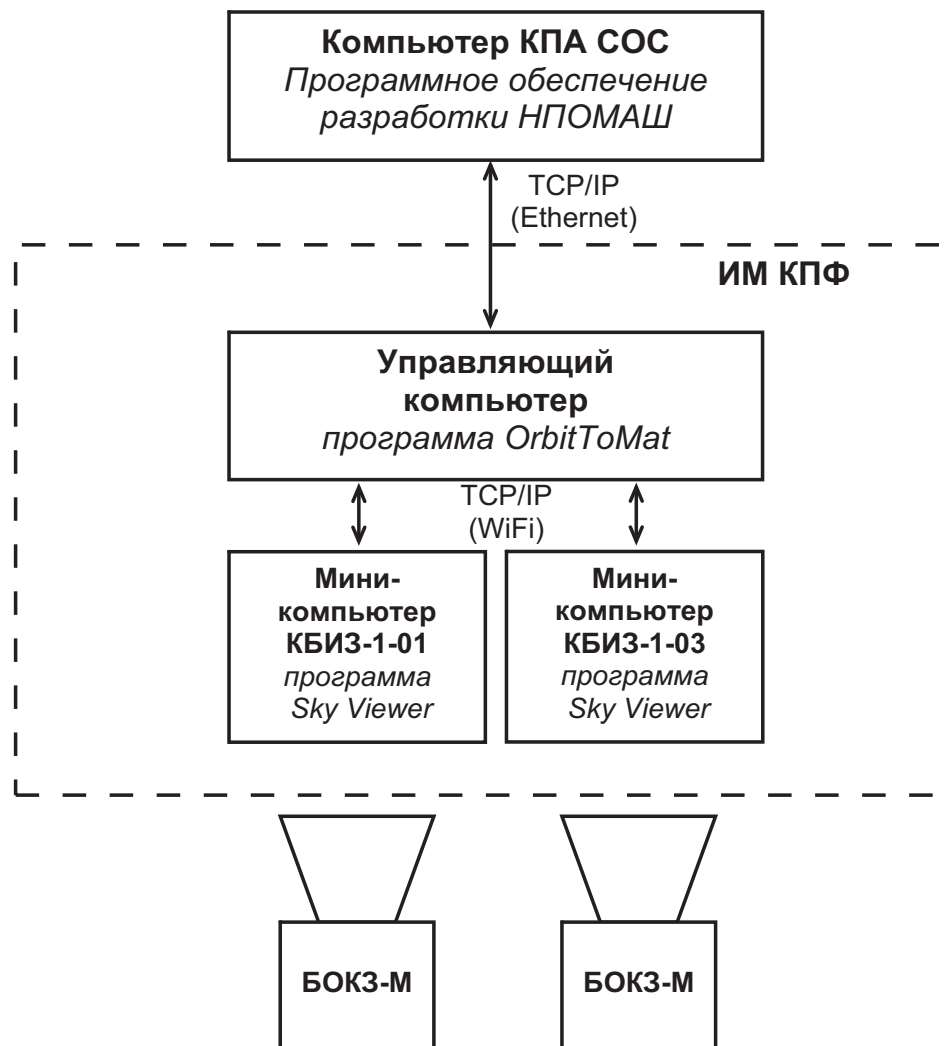
- сопоставимость габаритно-массовых характеристик комплекса с аналогичными характеристиками испытываемого прибора, что позволяет устанавливать его на бленду звездного датчика и проводить с ним работу при наземных отладках прибора на КА;
- обеспечение возможности моделирования движения небесной сферы в поле зрения прибора с учетом динамики движения КА и параметров внешней среды;
- возможность осуществления приема управляющих команд от компьютера контрольно-проверочной аппаратуры (КПА) СОС, совместимости с модулем расчета параметров ориентации орбитальной системы координат относительно инерциальной, а также модулем расчета положения Солнца и Луны в инерциальной системе координат.

В качестве аналога при разработке комплекса был взят коллиматорный блок имитатора звездного неба (КБИЗ), разработанный в ИКИ РАН в рамках проекта «Фобос-Грунт» (Аванесов и др., 2009). При этом для ИМ КПФ в качестве имитатора источников излучения был выбран используемый в КБИЗ мини-компьютер Sony VAIO VGN UX, а конструкция КБИЗ претерпела значительные изменения, направленные на уменьшение ее массы и габаритов. Кроме того, в силу особенностей стоящих перед ИМ КПФ задач, программное обеспечение КБИЗ было модифицировано в части, касающейся возможности управления моделированием орбитального движения на основе команд, передаваемых по локальной сети.

В состав ИМ КПФ вошли:

- два (по числу используемых приборов) коллиматорных блока имитатора звездного неба (КБИЗ-1-01, КБИЗ-1-03), каждый из которых устанавливался на соответствующий прибор БОКЗ-М и обеспечивал имитацию изображений небесной сферы в поле его зрения;
- управляющий компьютер со специальным программным обеспечением, предназначенным для дистанционного управления совместной работой КБИЗ-1-01 и КБИЗ-1-03, а также для взаимодействия с компьютером контрольно-проверочной аппаратуры СОС.

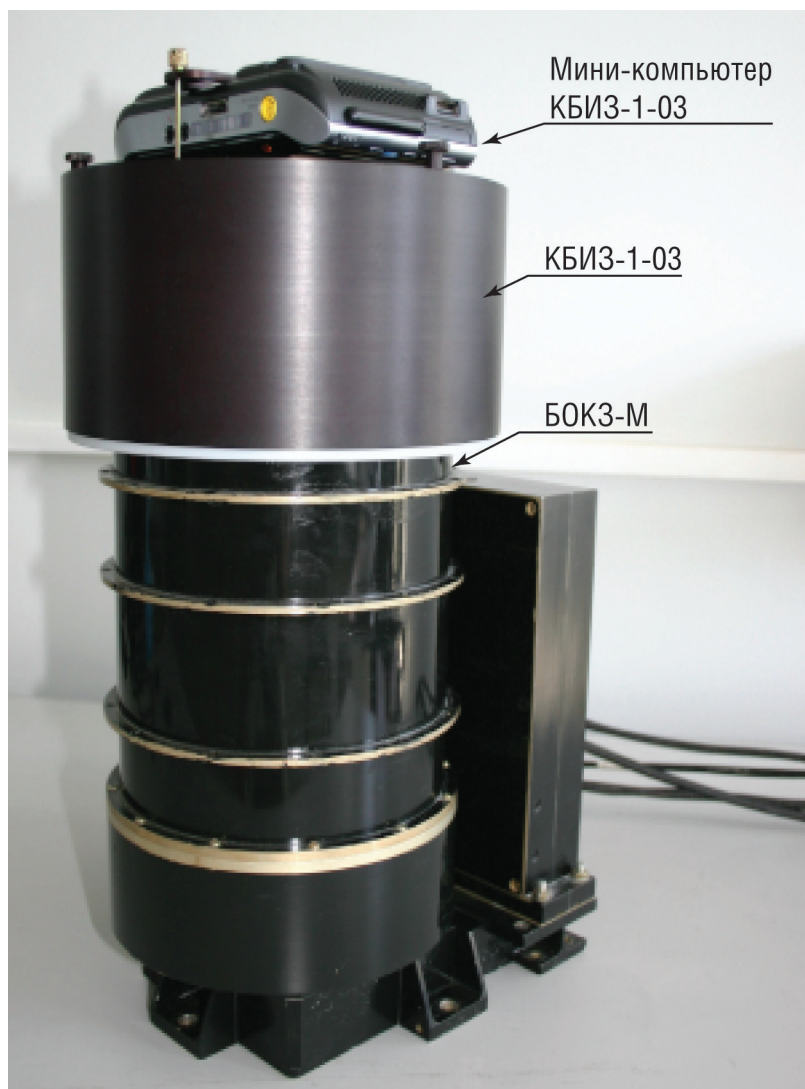
Структурная схема ИМ КПФ представлена на *рис. 1*.



*Рис. 1. Структурная схема ИМ КПФ*

Рассмотрим принципы работы ИМ КПФ. КБИЗ устанавливается на бленду соответствующего прибора, как показано на *рис. 2*. Входящий в состав каждого КБИЗ мини-компьютер (*рис. 3*) содержит разработанное в ИКИ РАН программное обеспечение (программа Sky Viewer), обеспечивающее моделирование движения изображений небесной сферы по экрану мини-компьютера. Моделирование может осуществляться в автономном и комплексном режимах. Автономный режим требует ввода начальных параметров и подачи

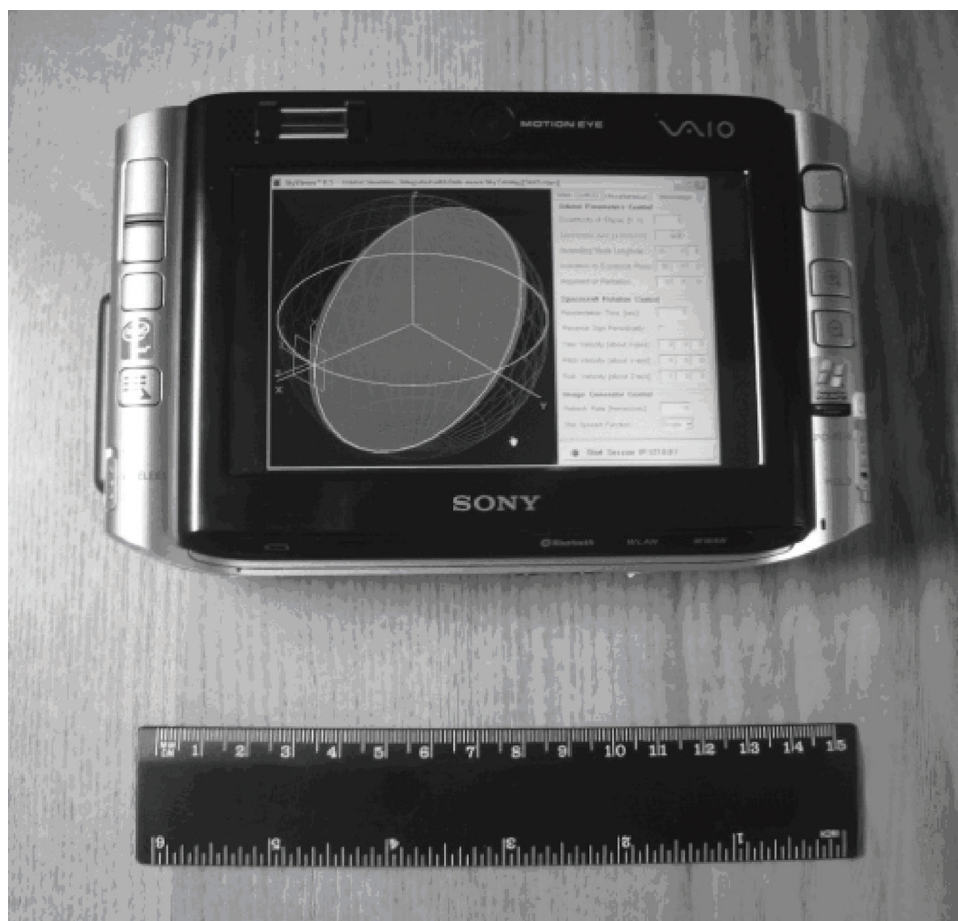
команды на запуск моделирования, после которой программа начинает рассчитывать кеплеровские элементы орбиты и отображать на экране конфигурацию звезд, соответствующую текущей ориентации. Такой режим может использоваться при необходимости проверки работы отдельного прибора, отладки его программного обеспечения или связи с бортовой вычислительной системой при функционировании в штатном режиме.



*Рис. 2. Установка КБИЗ-1-03 на прибор БОКЗ-М*

Комплексный режим является более важным и востребованным с точки зрения разработчиков СОС. В этом режиме моделирование изображений звездного неба на каждом КБИЗ осуществляется на основе матрицы направляющих косинусов осей системы координат КА в инерциальной системе координат, передаваемых в КБИЗ по локальной сети управляющим компьютером с заданной частотой. Программное обеспечение КБИЗ позволяет задавать в качестве исходных данных матрицу ориентации осей приборной системы координат (ПСК) БОКЗ-М относительно осей системы координат (СК) КА. Таким образом, при работе с ИМ КПФ обеспечивается возможность моделирования в поле зрения каждого БОКЗ-М именно той картины звездного неба, которую он будет наблюдать при движении по орбите в составе конкретного КА.





*Рис. 3. Мини-компьютер Sony VAIO VGN UX*

В общем случае схему работы ИМ КПФ при отработке приборов в составе космического аппарата можно представить следующим образом. Программное обеспечение КПА СОС реализует динамическую модель движения КА по выбранной орбите, используя оскулирующие элементы орбиты с привязкой к заданному времени. Одновременно ПО КПА СОС рассчитывает направляющие косинусы положения Солнца и Луны в инерциальной системе координат. По локальной сети Ethernet (с использованием протокола ТСР/ІР) ПО КПА СОС передает рассчитанные баллистические параметры в управляющий компьютер, который тот, в свою очередь, транслирует в КБИЗ по локальной сети с использованием беспроводного протокола Wi-Fi. Программное обеспечение каждого КБИЗ на основе полученных орбитальных параметров с учетом матрицы установки прибора на КА рассчитывает текущую ориентацию поля зрения прибора на небесной сфере и выводит соответствующее изображение на экран мини-компьютера КБИЗ. При наступлении ситуации, когда угол между оптической осью прибора и одним из небесных тел станет меньше некоторого граничного значения (для прибора БОКЗ-М с установленным КБИЗ-1-03 это значение составляет  $30^\circ$ , прибора БОКЗ-М с установленным КБИЗ-1-01 –  $36^\circ$ ), произойдет засветка поля зрения, что при работе с ИМ КПФ будет выглядеть как увеличение фона предъявляемого прибору изображения звездного неба на экране мини-компьютера.

Как следует из сказанного, с помощью ИМ КПФ у разработчиков СОС появилась реальная возможность смоделировать на Земле практически все возможные ситуации,

с которыми приборам БОКЗ-М придется столкнуться в космосе при выполнении полетной миссии.

## *2. Стенд полунатурного моделирования контура прецизионной стабилизации телескопа Т-170М с использованием СДГ*

Относительно новой разработкой ИКИ РАН является система датчиков гида (СДГ) телескопа Т-170М космического аппарата «Спектр-УФ» (Аванесов и др., 2008). Для решения задач совместной отладки СДГ с другими измерительными и исполнительными органами, входящими в состав системы управления телескопом Т-170М, ИКИ РАН по заказу НПО им. С.А. Лавочкина создал стенд полунатурного моделирования контура прецизионной стабилизации телескопа Т-170М с использованием системы датчиков гида, предназначенный для разработки алгоритмов управления угловым движением КА «Спектр-УФ», моделирования работы контура управления угловым движением в переходных режимах и в режиме прецизионной стабилизации телескопа Т-170М. Прообразом стенда служит программно-аппаратный комплекс СДГ (ПАК СДГ).

В программно-аппаратном комплексе СДГ на одном персональном компьютере (ПЭВМ1) моделируется получаемое от датчика гида (ДГ) изображение и осуществляется его обработка алгоритмами, идентичными алгоритмам, заложенным в блок обработки данных (БОД) штатной СДГ. Рассчитанные параметры ориентации передаются по мультиплексному каналу обмена в другой персональный компьютер (ПЭВМ2), имитирующий бортовой комплекс управления и реализующий математическую модель движения телескопа Т-170М, по данным которой в ПЭВМ1 моделируется движение звезд в поле зрения ДГ. На стенде логика работы остается прежней, только вместо математической модели СДГ используется образец СДГ, включающий один датчик гида и нерезервированный блок обработки данных, идентичный штатному образцу с точки зрения шумовых характеристик. Моделирование изображения участка звездного неба на стенде осуществляется в так называемом имитаторе изображений звезд (ИИЗ), представляющем собой персональный компьютер со специальным программным обеспечением, с двумя мониторами: монитором оператора и монитором ИИЗ – жидкокристаллическим монитором со светодиодной подсветкой, располагаемым в поле зрения датчика гида (рис. 4).

Перемещение звезд по экрану монитора ИИЗ осуществляется на основе данных об угловом положении осей системы координат СДГ относительно осей второй экваториальной системы координат, передаваемых в ИИЗ из ПЭВМ2 по локальной сети Ethernet. С помощью объектива изображение с экрана монитора ИИЗ проецируется на ПЗС-матрицу датчика гида, расположенного на фиксированном расстоянии от монитора ИИЗ. Макет СДГ получает от ПЭВМ2 по мультикомплексному каналу обмена (МКО) команды, в соответствии с которыми он выполняет экспонирование, обработку кадра, расчет параметров ориентации и выдачу их в ПЭВМ2 по МКО. Функциональная схема стенда приведена на рис. 5.

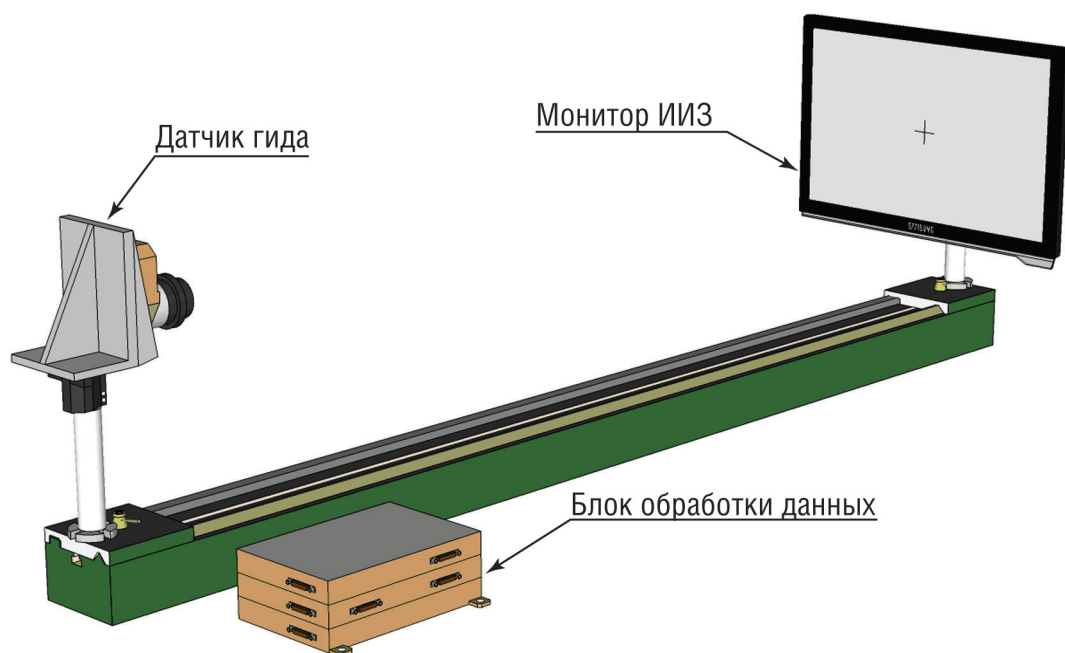


Рис. 4. Общий вид стенда

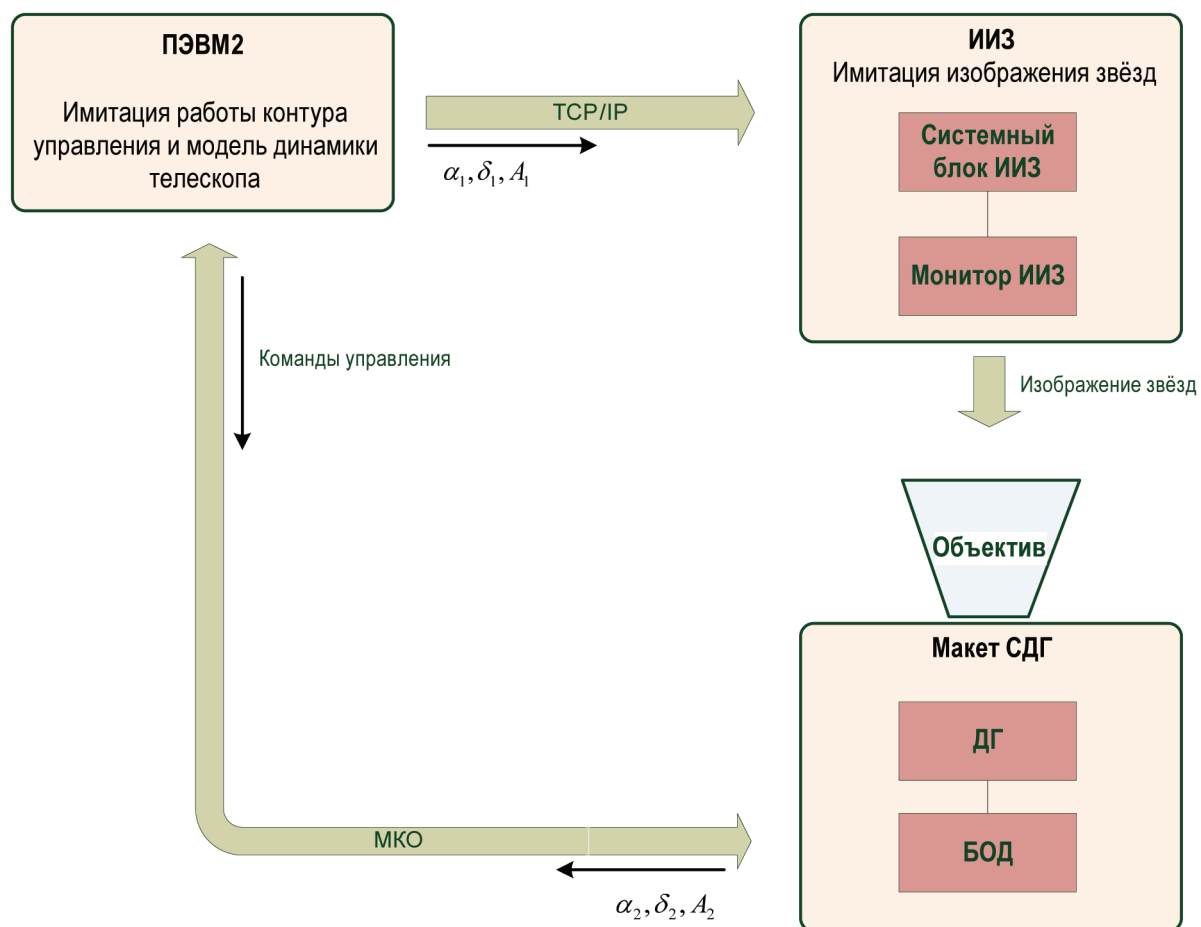


Рис. 5. Функциональная схема стенда:  $\alpha_1, \delta_1, A_1$  – углы, определяющие угловое положение осей СК СДГ, переданные в качестве исходных данных в ИИЗ из ПЭВМ2;  $\alpha_2, \delta_2, A_2$  – углы, определяющие угловое положение осей СК СДГ, рассчитанные СДГ на стенде

Разработанное специальное программное обеспечение стенда дает возможность приема по локальной сети с частотой до 20 Гц новых исходных данных об ориентации СК СДГ, обновляя картину звездного неба на экране монитора ИИЗ с той же частотой. Каждая звезда на мониторе представляет собой объект, размер которого задается пользователем в опциях программы. Рассмотрим способ формирования изображения звезды на стенде. С учетом известной оптической схемы телескопа и местоположения ПЗС-матриц датчиков гда на фокальной поверхности телескопа рассчитываются распределения освещенности в изображениях звезд, попадающих на разные участки ПЗС-матриц ДГ (Аванесов и др., 2008). Полученные изображения хорошо аппроксимируются эллиптическими функциями Гаусса, параметры которых зависят от положения изображений звезд на ПЗС-матрице ДГ. Программное обеспечение стенда осуществляет расчет яркостей элементов монитора ИИЗ, входящих в изображение звезды, используя аппроксимирующие функции и таблицу кодировки звездных величин, задаваемую пользователем перед началом работы.

Работа СДГ на стенде реализуется следующим образом. Из ПЭВМ2 по мульти-комплексному каналу обмена в блок обработки данных СДГ подается команда на выдачу данных об ориентации. При первом получении такой команды СДГ осуществляет экспонирование, первичную обработку изображения, расчет координат энергетических центров локализованных объектов, распознавание их в бортовом каталоге и расчет параметров ориентации. Время выполнения указанных операций может занять до 10 с; при этом необходимо, чтобы в поле зрения ДГ попало не менее четырех звезд. В случае успешного отождествления звезд СДГ автоматически переходит в подрежим слежения за гидировочными звездами, прогнозируя перемещение их изображений по ПЗС-матрице от кадра к кадру. При этом СДГ может выдавать информацию об изменении углового положения один раз в две секунды по получении соответствующей команды от ПЭВМ2, имитирующей бортовой комплекс управления. Алгоритмы работы СДГ предусматривают возможность ее функционирования в подрежиме слежения за звездами при наличии любого количества звезд в поле зрения ДГ, вплоть до одной. Для выдачи информации об изменении углового положения относительно трех осей необходимо иметь в поле зрения не менее трех звезд; в случае же наличия в поле зрения ДГ двух звезд будут выдаваться данные об изменении положения только по двум координатам, а при наличии одной звезды СДГ будет выдавать данные об ее относительном смещении за время между двумя соседними командами.

Рассмотренный стенд позволяет разработчикам системы управления КА «Спектр-УФ» отладить алгоритмы наведения и стабилизации телескопа Т-170М и оценить шумовые характеристики СДГ.

### **Заключение**

Рассмотренный в статье инструментальный модуль комплекса проверки функционирования приборов введен в эксплуатацию в ОАО «ВПК «НПО Машиностроения»» и используется для работ с приборами БОКЗ-М.



## Литература

1. 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 астроориентации / Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», Россия, Таруса, 22–25 сентября 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 372–385. Серия «Механика, управление и информатика».
2. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Зиман Я.Л., Красиков В.А., Куделин М.Ю., Форш А.А. Система датчиков гида телескопа Т-170М / Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов», Россия, Таруса, 22–25 сентября 2008 г. М.: ИКИ РАН, 2008. С. 41–55. Серия «Механика, управление и информатика».

### **Astrotrackers ground debugging facilities as a part of complex test equipment**

**S.V. Voronkov, B.S. Dunaev, A.V. Nikitin, V.A. Shamis**

*Space Research Institute of RAS*

The ground-based complex for testing BOKZ-M star trackers is considered in the first part of the article. This complex has been designed for using at enterprises developing spacecraft to test the control system operation. The second part is devoted to the equipment for simulating the telescope's stabilization circuit using the fine guidance system's data.

**Keywords:** star tracker, testing bench, minicomputer, imitator, fine guidance system, data processing module, telescope.