

## ИМИТАТОРЫ ЗВЕЗДНОГО НЕБА ДЛЯ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ ДАТЧИКОВ ЗВЕЗДНОЙ ОРИЕНТАЦИИ

*Г.А. Аванесов, С.В. Воронков, Б.С. Дунаев,  
В.А. Красиков, В.А. Шамис, А.А. Фори*

Институт космических исследований  
Российской академии наук, Москва

Рассмотрены статические имитаторы звезд, предназначенные для проверки работоспособности оптико-электронных трактов датчиков звездной ориентации. Описан принцип работы стенда динамических испытаний, используемого для осуществления проверок функционирования звездных датчиков и отладки их программного обеспечения.

Static star imitators designed for testing operation ability of star trackers' electronic channels are considered. Principle of operation of the dynamic testing bench used for star trackers operation testing and debugging their software is described.

### Введение

Рано или поздно перед разработчиками приборов космического назначения встает вопрос о создании различного рода имитаторов, позволяющих в наземных условиях воссоздать те или иные факторы космического пространства. Использование таких имитаторов на стадии наземной отработки приборов позволяет проверить различные режимы функционирования приборов, устранить возникающие неполадки в их работе, отладить программно-алгоритмическое обеспечение. При этом необходимо, чтобы разработчики обеспечивали высокую степень достоверности моделирования на имитаторах воздействующих на прибор факторов.

В статье речь пойдет об имитаторах, которые предназначены для моделирования звездоподобных объектов в задачах испытаний и отладки датчиков звездной ориентации — приборов, позволяющих определять параметры трехосной ориентации путем обработки изображений произвольных участков звездного неба.

Рассматриваемые имитаторы разработаны и созданы в оптико-физическом отделе Института космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН).

### 1. Статические имитаторы звезд

Первый имитатор звезд (ИЗ), позволяющий спроецировать в поле зрения звездного прибора БОКЗ изображения точечных объектов, был разработан в ИКИ РАН в конце 90-х гг. прошлого века. Имитатор (рис. 1) представлял собой конструкцию, устанавливаемую на бленду прибора БОКЗ вместо технологической крышки, как показано на рис. 2. Внутри имитатора располагались металлическая пластина с пятью отверстиями в форме креста и светодиоды за каждым отверстием. При подаче питания светодиоды загорались, и в поле зрения прибора проецировалось пять точечных объектов.

С учетом того, что положение имитатора относительно поля зрения прибора было точно известно и не менялось во времени, с помощью имитатора проверялась правильность работы оптико-электронного тракта прибора в режиме регистрации точечных объектов, их локализации и определения энергетических центров яркостей.

Следующей модификацией ИЗ являлось устройство, конструктивно аналогичное представленному на рис. 1, но функционально более совершенное. Модифицированная версия имитатора включала светодиод, слайд с изображением



Рис. 1. Имитатор звезд

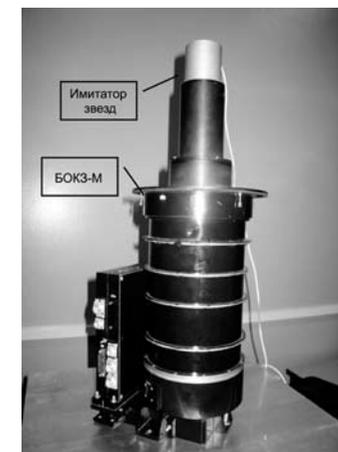


Рис. 2. Установка имитатора звезд на прибор

ем точечных источников и коллиматорный объектив. Слайд представлял собой изображение участка небесной сферы, угловой размер которого соответствовал угловому полю зрения прибора. Звезды разных звездных величин отображались на слайде разными по площади объектами белого цвета, фон слайда был черным. При подаче питания на светодиод слайд подсвечивался, прошедший через него световой поток попадал в коллиматорный объектив, на выходе которого формировался параллельный световой пучок от каждого точечного объекта. В результате на объектив прибора, как и в случае работы по звездам реальной небесной сферы, приходил параллельный поток от каждого из подсвеченных точечных объектов на слайде. При работе с таким имитатором звезд реализовывалась возможность проверки правильности работы не только оптико-электронного тракта прибора, но и отладки его программно-алгоритмического обеспечения.

В настоящее время разработана еще одна модифицированная версия такого имитатора звезд (рис. 3), который будет использоваться не только как средство для отладки, но и как технологическая защитная крышка. Перед отправкой прибора на предприятие-заказчик на него будет устанавливаться



Рис. 3. Модифицированный имитатор звезд

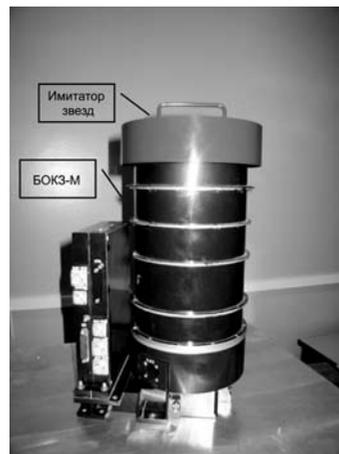


Рис. 4. Установка модифицированного имитатора звезд на прибор

имитатор (рис. 4), который в процессе перемещения прибора будет выполнять роль защитной крышки, предохраняющей бленду от загрязнений.

Одновременно с этим при проведении работ по входному контролю прибора и прочих регламентных проверок на имитатор будет подаваться питание, и в поле зрения прибора будет проецироваться изображение участка небесной сферы. Имитатор будет демонтирован с прибора после проведения всех необходимых регламентных работ и установки прибора на космический аппарат (КА).

Основным достоинством описанных в настоящем разделе имитаторов является относительная простота, что позволяет их использовать на различных этапах проверки работоспособности прибора как на предприятии-разработчике, так и у заказчика. В то же время описанные имитаторы имеют ограниченные функциональные возможности и не позволяют проводить отработку штатных режимов функционирования приборов в полном объеме.

Для выполнения работ по отладке режимов работы приборов в условиях, максимально приближенных к реальным, в ИКИ РАН был разработан специальный стенд, позволяющий моделировать светооптическую обстановку и динамику движения прибора в процессе его функционирования на космическом аппарате. Рассмотрим принципы работы стенда и его место в задачах наземной отработки прибора.

## 2. Стенд динамических испытаний

В отличие от статических имитаторов звезд, на так называемом динамическом стенде реализована возможность моделирования движения точечных объектов в поле зрения прибора. Принцип действия стенда, внешний вид которого представлен на рис. 5, заключается в замене при испытаниях прибора звезд небесной сферы их изображениями, выведенными на экран расположенного в поле зрения прибора жидкокристаллического монитора.

Тестируемый прибор жестко закрепляется при установке на стенд, и моделирование перемещения его поля зрения по небесной сфере в процессе орбитального движения космического аппарата осуществляется за счет изменения изображе-

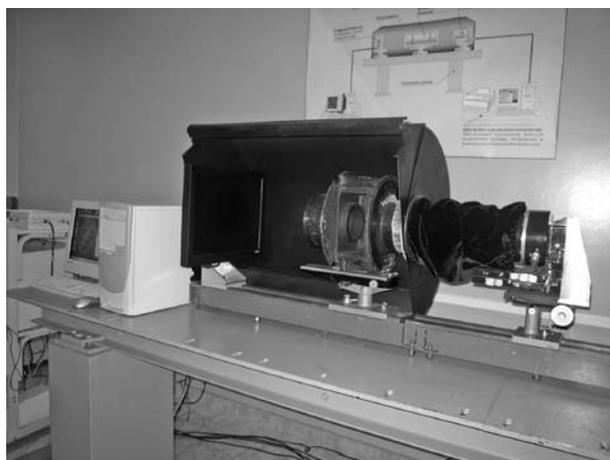


Рис. 5. Стенд динамических испытаний

ний участков звездного неба, выводимых на экран монитора. Вывод изображений звезд на экран монитора реализуется с помощью специального программного обеспечения, которое использует данные каталога звезд, охватывающего всю небесную сферу. При моделировании на стенде звездного неба происходит пересчет сферических координат звезд на небесной сфере в прямоугольные координаты проекций звезд на плоскость экрана монитора, формирование графического изображения и его вывод на экран монитора. Повторение описанного цикла с заданной частотой позволяет реализовать перемещение участка небесной сферы по экрану монитора в поле зрения неподвижно закрепленного прибора. Кристаллическая структура экрана монитора обуславливает дискретность изменения координат изображений звезд. Для имитации плавного изменения положения изображений звезд в поле зрения прибора координаты звезд пересчитываются и выводятся на экран монитора несколько раз в секунду.

Для воспроизведения визуальной обстановки космического пространства на стенде реализуется оптическое удаление изображения небесной сферы от прибора в бесконечность с применением коллиматора, расположенного на оптической скамье между монитором и прибором так, что

монитор находится в его фокальной плоскости. На выходе коллиматора от каждого изображения звезды формируется параллельный пучок света, регистрируемый прибором.

Схема моделирования движения небесной сферы на стенде представлена на рис. 6.

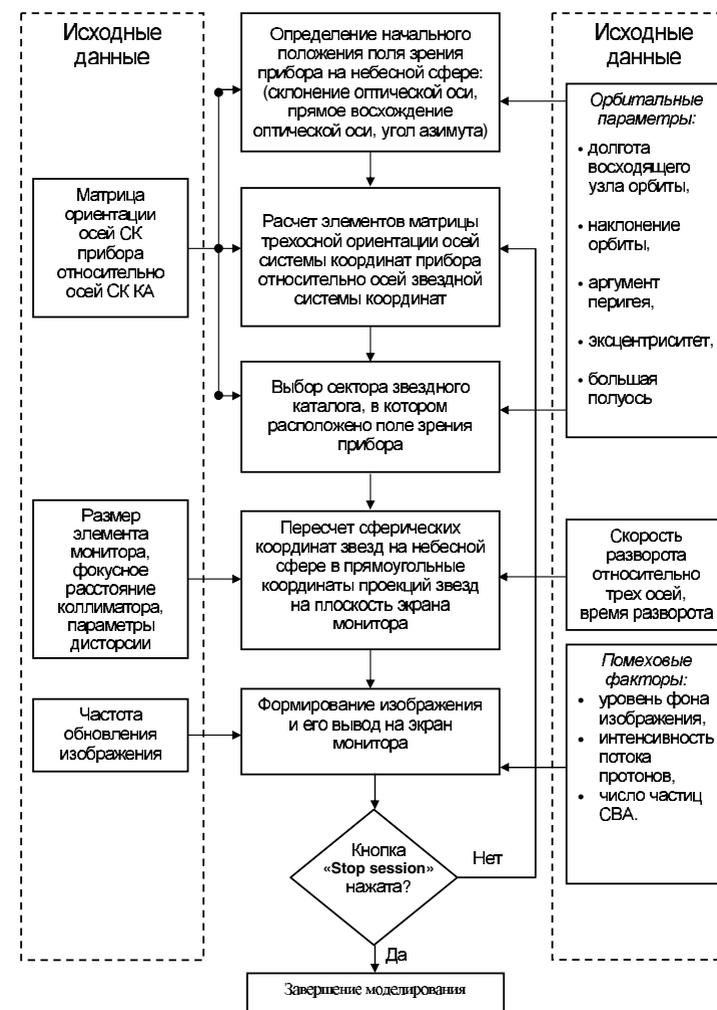


Рис. 6. Моделирование небесной сферы на стенде

Помимо моделирования динамики движения тестируемого прибора, обуславливаемой движением КА по орбите, программное обеспечение стенда дает возможность моделирования воздействия динамики системы управления КА, при котором к вектору угловой скорости добавляются дополнительные составляющие по трем осям. Кроме того, моделирование перемещения поля зрения прибора по небесной сфере осуществляется с учетом матрицы взаимной ориентации системы координат (СК) прибора относительно системы координат космического аппарата.

Имитация работы системы управления КА заключается в моделировании движения поля зрения прибора относительно геоцентрической системы координат в заданном направлении. При этом может быть выбран один из двух режимов изменения углового положения поля зрения: режим переориентации, при котором происходит однократный поворот на заданный угол в заданном направлении, и режим периодических колебаний, при котором моделируется периодический поворот поля зрения прибора на требуемый угол. Из сказанного следует, что стенд предоставляет широкий диапазон возможностей при моделировании процесса движения поля зрения прибора по небесной сфере с учетом расположения прибора на конкретном космическом аппарате, движущемся по заданной орбите.

С целью повышения достоверности реализации условий космического пространства, при которых звездному датчику приходится решать задачу определения параметров астроориентации, в программном обеспечении стенда заложена возможность моделирования ряда помеховых факторов внешней среды, в частности, протонов космического пространства, частиц собственной внешней атмосферы (СВА, см. рис. б) космического аппарата, неравномерной засветки поля зрения.

Имитация воздействия протонов на тестируемый прибор, в результате которого на получаемых изображениях регистрируются помеховые звездоподобные объекты, так называемые «ложные звезды», реализуется путем вывода на экран монитора световых помех. При этом имитируются как точечные помехи, вызванные фронтальными воздействи-

ями протонов на прибор, так и помехи в форме вытянутых треков, вызванные прохождением протонов через ПЗС-матрицу прибора под большими углами к его оптической оси. Моделируемые частицы СВА представляют собой объекты произвольной формы, перемещающиеся по экрану монитора с заданными скоростями на фоне движущейся небесной сферы. Для имитации на стенде ситуации, при которой за счет попадания в поле зрения прибора Солнца, Луны, Земли или света, отразившегося от зеркальных конструкций КА, может наблюдаться повышенный или неравномерный фон на полученном прибором изображении, в программное обеспечение заложена возможность добавления фоновой компоненты изображения, выводимого на экран монитора. При этом моделируемая засветка может быть как равномерной, так и равномерно изменяющейся.

На рис. 7–9 показаны диалоговые окна программного обеспечения стенда, с помощью которых оператор стенда может задавать вышеперечисленные параметры и управлять режимами моделирования. Такой способ управления стендом называется автономным и требует ввода параметров

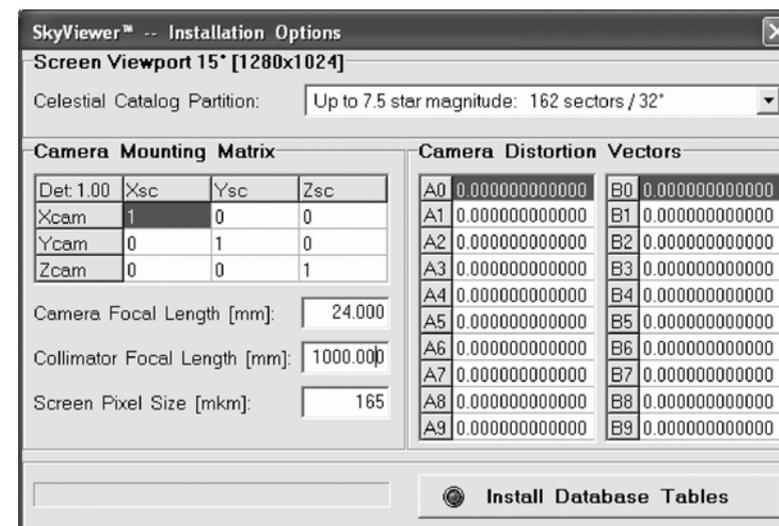


Рис. 7. Окно ввода базовых параметров стенда

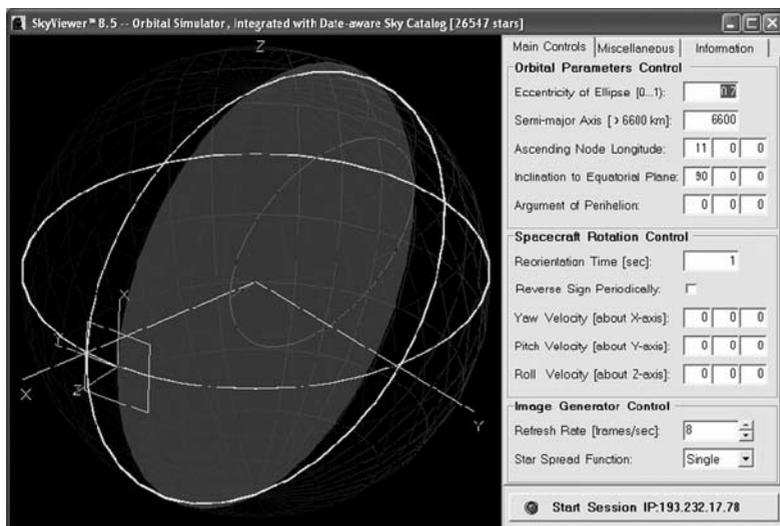


Рис. 8. Окно ввода орбитальных параметров

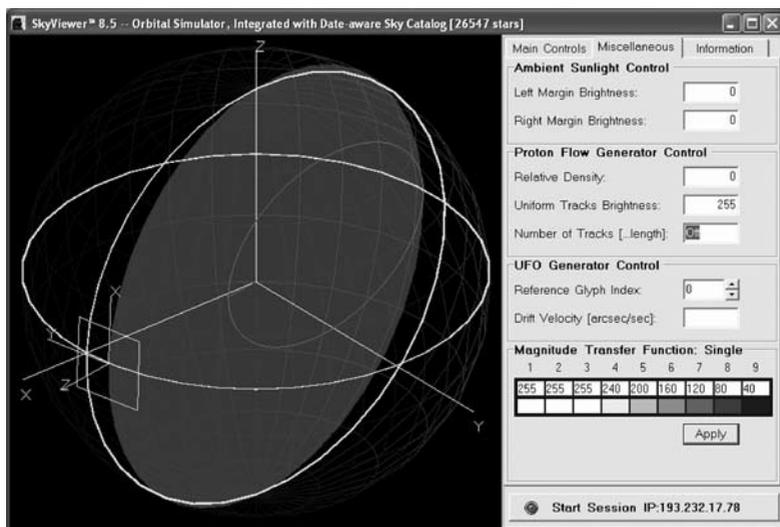


Рис. 9. Окно ввода параметров внешней среды

моделирования с использованием клавиатуры и манипулятора «мышь». В то же время в программном обеспечении стенда предусмотрена возможность управления параметрами и режимами моделирования путем удаленного доступа по локальной сети, что не требует присутствия оператора около компьютера стенда.

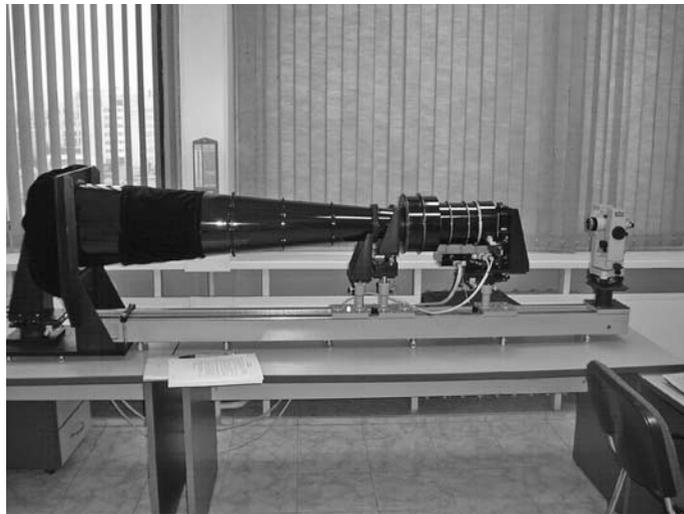
Возможность удаленного управления работой стенда, когда по локальной сети в его программное обеспечение передается массив информации об ориентации осей приборной системы координат относительно второй экваториальной системы, позволяет использовать стенд в составе комплексных установок моделирования работы системы управления КА.

Начиная с 2001 г. все разрабатываемые в ИКИ РАН звездные датчики проходят обязательную отработку на стенде динамических испытаний. Сравнение результатов испытаний приборов на стенде с экспериментальными данными, полученными в ходе натурных испытаний и летной эксплуатации приборов, позволяет утверждать, что на стенде можно моделировать светооптические условия работы приборов в космическом пространстве с высокой степенью достоверности.

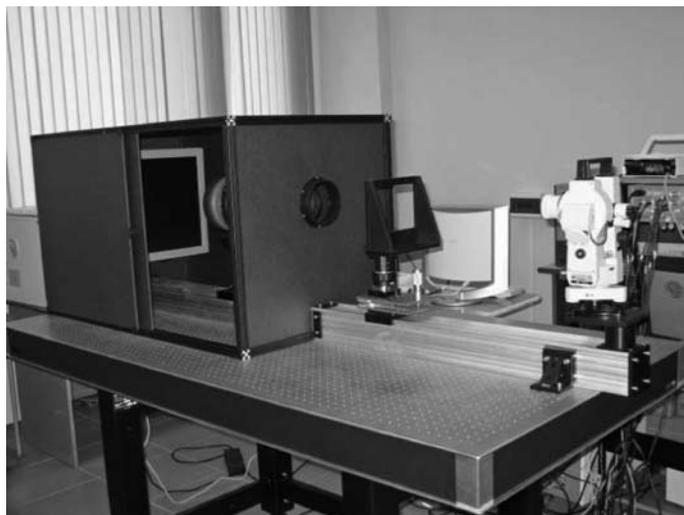
За период эксплуатации стенда на нем прошли отладку и полный цикл испытаний технологические и летные образцы разработанных в ИКИ РАН звездных датчиков нескольких поколений — БОКЗ, БОКЗ-У, БОКЗ-М, БОКЗ-МФ. За последние годы ИКИ РАН осуществил разработку и поставку различных модификаций стенда на предприятия космической отрасли России и за рубежом (рис. 10, 11), к числу которых относятся ОАО «НПП «Геофизика-Космос», ОАО «ИСС им. академика М.Ф. Решетнева», РКК «Энергия» им. С.П. Королева, фирма SaTReci (Южная Корея).

### 3. Мобильная модификация динамического стенда

С развитием и миниатюризацией средств отображения информации и вычислительных систем появилась возможность создать динамический имитатор звезд, обладающий массово-габаритными характеристиками, сопоставимыми с аналогичными характеристиками звездных датчиков. Первая



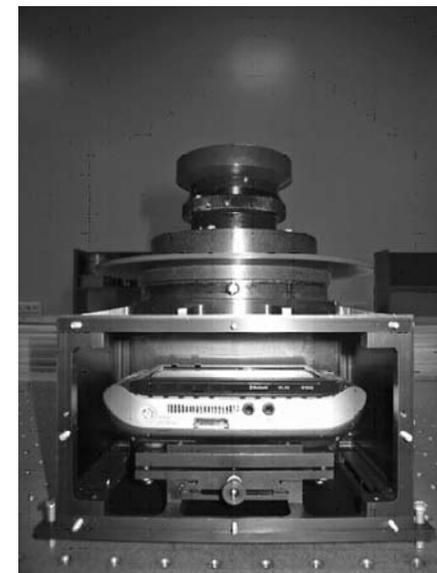
**Рис. 10.** Динамический стенд, изготовленный по заказу фирмы SaTResi, Южная Корея



**Рис. 11.** Динамический стенд, изготовленный по заказу АО «НПП «Геофизика-Космос», Россия



**Рис. 12.** Ноутбук Sony VAIO VGN UX-180P



**Рис. 13.** Динамический имитатор звездного неба

модификация такого имитатора была разработана на базе мини-ноутбука Sony VAIO VGN UX-180P, представленного на рис. 12.

Несмотря на скромные размеры, мини-ноутбук является достаточно производительным и может быть использован для моделирования движения участков небесной сферы и отображения их на собственном экране. Экран мини-ноутбука имеет разрешение в  $1024 \times 600$  элементов, что сопоставимо с разрешением жидкокристаллических мониторов, используемых на динамических стендах ИКИ РАН. При использовании коллиматора с фокусным расстоянием около 100 мм имитатор не превышает по размерам и массе звездный датчик, для тестирования которого он предназначен. Конструкция имитатора, объединяющая мини-ноутбук и коллиматор (рис. 13), имеет посадочные места, позволяющие устанавливать ее непосредственно на бленду тестируемого прибора. Также возможен вариант, когда тестируемый прибор устанавливается сверху на конструкцию имитатора (рис. 14).



Рис. 14. Испытания звездного датчика на динамическом имитаторе

Интерфейсные окна программного обеспечения, позволяющие задать параметры моделирования, отображаются на экране мини-ноутбука, доступ к которому может быть осуществлен одним из двух способов. Первый способ подразумевает прямой доступ к мини-ноутбуку и работу непосредственно с его клавиатурой. Этот способ требует снятия боковой крышки конструкции имитатора и является достаточно трудоемким. Альтернативой ему служит второй способ, при котором осуществляется удаленный доступ к программному обеспечению имитатора с использованием протокола беспроводной связи WiFi. При наличии встроенной или внешней антенны WiFi на управляющем компьютере (в роли которого, например, целесообразно использовать компьютер контрольно-испытательной аппаратуры тестируемого прибора) можно установить беспроводную связь между этим компьютером и мини-ноутбуком имитатора. В этом случае доступ к программам мини-ноутбука может быть осуществлен через управляющий компьютер, на экране монитора которого будет отображаться рабочий стол мини-ноутбука. Таким образом, используя беспроводную связь, можно выполнять разовые обращения к мини-ноутбуку имитатора с целью задания требуемых параметров, запуска и останова режима моделирования, при этом само моделирование будет осуществляться непосредственно на мини-ноутбуке имитатора. Режим управления имитатором по беспроводной связи позволяет создавать комплексные стенды для одновременной отработки приборов различного типа. Подобный стенд в настоящее время создается в ИКИ РАН в рамках проекта «Фобос-Грунт». Предполагается, что под управлением одного стендового компьютера будут одновременно функционировать шесть имитаторов, два из которых предназначены для отображения на экранах движения звезд небесной сферы при испытаниях звездных датчиков БОКЗ-МФ, а остальные — для отработки узкоугольных и широкоугольных камер, созданных для наблюдений за Марсом и Фобосом в процессе полета и посадки КА на Фобос.

В завершение темы миниатюризации стендового оборудования отметим, что дальнейшим шагом в этом направлении станет разработка имитатора на базе микродисплея,

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