

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 623.592 EDN KBHOFH

**Особенности построения оптических систем
навесных имитаторов
для проверки углоизмерительных приборов
ориентации космических аппаратов**

А. Я. Гебгарт, к. т. н., info@geofizika-cosmos.ru

АО «НПП «Геофизика-Космос», Москва, Российская Федерация

М. П. Колосов, д. т. н., info@geofizika-cosmos.ru

АО «НПП «Геофизика-Космос», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Рассмотрены особенности построения оптических систем навесных имитаторов для проверки углоизмерительных приборов ориентации космических аппаратов, работающих по Солнцу, Земле и звездам. Приведены рекомендации по их проектированию. Представлены оптические схемы ряда навесных имитаторов и их оптические характеристики. Материалы статьи могут быть полезны разработчикам аппаратуры для проверки и контроля углоизмерительных приборов космического назначения.

Ключевые слова: оптические системы, объектив, навесной имитатор, коллиматор

Для цитирования: Гебгарт А. Я., Колосов М. П. Особенности построения оптических систем навесных имитаторов для проверки углоизмерительных приборов ориентации космических аппаратов. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*. 2025. Т. 12. № 1. С. 22–29.

**Design Features of Optical Systems of Mounted Simulators
for Testing Angle Measuring Devices for Spacecraft Orientation**

A. Ya. Gebgart, *Cand. Sci. (Engineering)*, info@geofizika-cosmos.ru

Research and production enterprise “Geofizika-Cosmos”, Moscow, Russian Federation

M. P. Kolosov, *Dr. Sci. (Engineering)*, info@geofizika-cosmos.ru

Research and production enterprise “Geofizika-Cosmos”, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper considers the design features of optical systems of mounted simulators for testing angle measuring devices for spacecraft orientation operating by the Sun, Earth and stars. Recommendations for their design are provided. The optical design drawings of a number of mounted simulators and their optical specifications are presented. The materials of the paper can be useful for developers of equipment to test and control spacecraft angle measuring devices.

Keywords: optical systems, lens, mounted simulator, collimator

For citation: Gebgart A. Ya., Kolosov M. P. Design Features of Optical Systems of Mounted Simulators for Testing Angle Measuring Devices for Spacecraft Orientation. *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems*. 2025. Vol. 12. No. 1. P. 22–29. (in Russian)

Введение

Навесные имитаторы необходимы для проверки углоизмерительных оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов.

В общем случае навесные имитаторы представляют собой малогабаритную оптико-электронную систему, устанавливаемую перед испытуемым прибором и имитирующую в его угловом поле астроориентиры, по которым работает тот или иной прибор: Солнце (для приборов ориентации по Солнцу — ПОС), Земля (для приборов ориентации по Земле — ПОЗ), звезды (для приборов ориентации по звездам — ПОЗв), а также в ряде случаев световые помехи и помехи, возникающие из-за действия на фотоприемное устройство прибора заряженных частиц космического пространства.

Небольшие габариты и масса навесных имитаторов, а также удобство их эксплуатации позволяют достаточно просто и быстро без наличия специального стендового оборудования обеспечить проверку функционирования прибора, в том числе проверку работоспособности оптико-электронного тракта, отладку и проверку правильности работы ряда блоков программного обеспечения, проведение входного контроля. Следует отметить, что навесные имитаторы часто используются для проверки приборов в вакууме, в том числе при рабочих температурах эксплуатации, что накладывает определенные ограничения на выбор осветительных элементов и конструкцию имитатора.

Реализация малых габаритно-массовых характеристик (ГМХ) навесных имитаторов достигается за счет снижения требований к ним в части воспроизведения геометрических, энергетических и точностных параметров имитации ориентиров, в отличие от стендов и используемых в них имитаторов, с помощью которых проводится настройка, паспортизация и проверка точностных параметров указанных приборов.

Следует отметить, что до настоящего времени вопросы разработки оптических систем навесных имитаторов для ПОС и ПОЗ в литературе практически не освещались, а для ПОЗв не освещались в должном объеме. Поэтому представляет интерес рассмотрение особенностей разработки таких

оптических систем, в том числе созданных на предприятии АО «НПП «Геофизика-Космос» при участии авторов.

Оптические системы навесных имитаторов приборов ориентации по Солнцу

Навесные имитаторы для проверки ПОС должны имитировать изображение Солнца в угловом поле прибора. Для реализации этой задачи для ПОС с объективом и матричным фотоприемным устройством (МФПУ) [1–3] возможно использование нескольких коллиматоров с угловым полем $2\omega = 32'$, выполненных в виде осветителя 1, диафрагмы 2 и линзы 3, расположенных перед ПОС под разными углами к его оптической оси (рис. 1, а). Оптические оси коллиматоров должны пересекаться в центре входного зрачка объектива. Проверка прибора производится по поочередно полученным изображениям имитируемого Солнца в различных участках МФПУ.

В случае ПОС в виде диафрагмы и фотоприемного устройства («щелевые» ПОС) [1, 3–7] оптические оси коллиматоров должны пересекаться в центре прозрачной диафрагмы (рис. 1, б). Фотоприемное устройство в таких ПОС может быть как матричного типа, так и в виде одноплощадочных, двухплощадочных или квадрантных приемников излучения (ФПУ).

В качестве осветителей 1 наиболее рациональным решением с точки зрения оптимальных ГМХ является использование светодиодов.

Ввиду того, что спектральный диапазон излучения светодиодов достаточно узок, хроматизм линзы коллиматора 3 будет незначителен. Расчет показал, что при фокусном расстоянии плосковыпуклой линзы 3 (близкой к линзе с минимальной сферической аберрацией) $f' = 50$ мм, диаметре зрачка $\varnothing_{зр.} = 2$ мм, вынесенного на 50 мм, и спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 0,85\text{--}0,87$ мкм, формируемое качество изображения будет на уровне дифракционного.

Следует отметить, что в навесном имитаторе, являющемся малогабаритной системой, обеспечить с помощью светодиодов облученность,

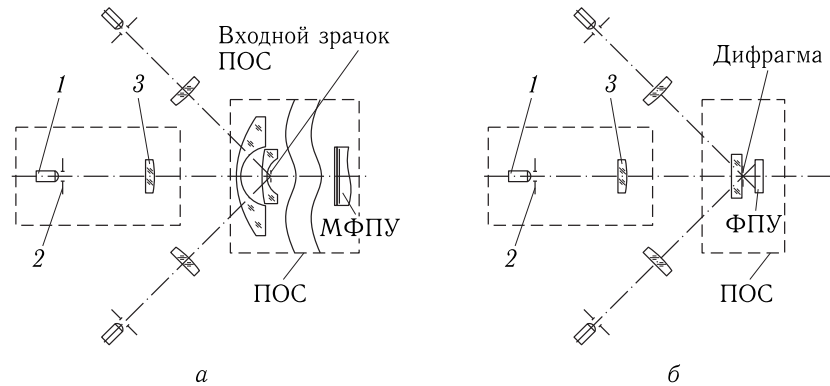


Рис. 1. Оптические системы навесных имитаторов для проверки ПОС: а) оптическая система навесного имитатора для проверки ПОС с объективом; б) оптическая система навесного имитатора для проверки «щелевого» ПОС
 Fig. 1. Optical systems of mounted simulators for testing the devices for orientation by the Sun (DOS): а) optical system of a mounted simulator for DOS testing with a lens; б) optical system of a mounted simulator for testing the “slit” DOS

эквивалентную солнечному излучению, воспринимаемому ПОС, достаточно сложно, а использование мощных источников излучения в виде ксеноновых ламп, применяемых в имитаторах Солнца для точностных стендов [1, 4, 7], требует специальной системы охлаждения и габаритной оптической системы, что в данном случае неприемлемо. Очевидно, что реализовать большую облученность при работе имитатора легче в ПОС, содержащих узкополосный светофильтр, полоса пропускания которого сдвинута относительно длины волны, соответствующей максимальной интенсивности излучения Солнца [1–3].

Пути решения задачи по повышению уровня эквивалентной облученности является также работа с большими временами накопления МФПУ, чем это предусмотрено для штатного режима, усложнением осветительной системы (например, использование конденсора), использование мощных светодиодов [8], лазерных модулей [1, 4], а в отдельных случаях — увеличением имитируемого углового поля имитаторов.

Повышение уровня облученности за счет увеличения углового поля коллиматора до нескольких градусов приемлемо при создании навесных имитаторов для проверки менее точных широкоугольных щелевых ПОС на основе одноплощадочных, двухплощадочных или квадрантных ФПУ с размером чувствительной площадки порядка миллиметра и более [1, 4, 7]. В этих ПОС для обеспечения большого углового поля расстояние от диафрагмы

до чувствительной площадки ФПУ достаточно мало (менее 1 мм) [4]. Поэтому изменение размера изображения на ФПУ от имитатора, вызванное увеличением имитируемого углового поля, будет незначительным, по сравнению с изображением на ФПУ от Солнца, и практически не будет влиять на результаты необходимых проверок прибора. Макетирование работы навесного имитатора с мощным инфракрасным светодиодом и с короткофокусной коллимирующей линзой совместно с «щелевым» ПОС показало возможность обеспечения облученности на двухплощадочном ФПУ, соответствующей облученности от Солнца.

В заключение раздела следует отметить, что в некоторых ПОС для проверки функционирования используются встроенные имитаторы [1–3]. На рис. 2 приведена схема ПОС со встроенным

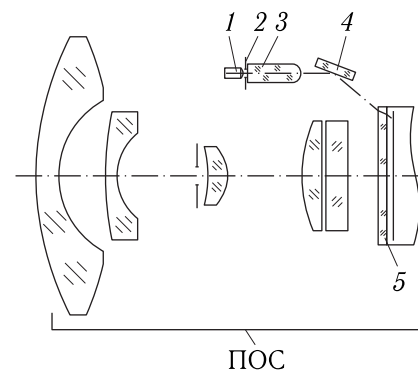


Рис. 2. Встроенный имитатор ПОС (пояснения в тексте)
 Fig. 2. Built-in simulator of a device for orientation by the Sun

имитатором, который формирует изображение диафрагмы 2, подсвеченной светодиодом 1, с помощью линзы 3 и ломающего зеркала 4 на неработающую часть матрицы 5. Имитатор позволяет проверять функционирование электронного тракта прибора как в процессе испытаний, так и непосредственно во время работы в космическом пространстве. Однако наличие такого имитатора усложняет конструкцию прибора и не позволяет обеспечить проверку его оптического тракта.

Оптические системы навесных имитаторов приборов ориентации по Земле

Навесные имитаторы для проверки статических инфракрасных ПОЗ должны имитировать изображение Земли в угловом поле прибора.

Для построения оптической системы такого навесного имитатора может быть использовано подогреваемое черное тело и охлаждаемый фон, устанавливаемые перед ПОЗ. Такого вида системы используются в габаритных имитаторах Земли, атмосферы и космоса (ИЗАК) [1, 7]. Данная система

обеспечивает энергетический контраст (контраст электрических сигналов), воспринимаемый ПОЗ, который эквивалентен реально имеющемуся контрасту между Землей и космосом.

Для проверок известных статических всевысотных ПОЗ на основе болометрической матрицы [1, 2, 7, 9] возможно построение оптической системы навесного имитатора в виде нескольких попеременно включаемых каналов с угловым полем порядка $2\omega = 15,8^\circ$, формирующих изображения имитируемой Земли, соответствующие геостационарной орбите, в разных участках МФПУ ПОЗ. Такая система приведена на рис. 3, а и содержит излучатель 1, охлаждаемый фон 2, испытываемый ПОЗ.

Недостатком такого имитатора является наличие размытых дефокусированных изображений имитируемой Земли на болометрической матрице МФПУ из-за отсутствия коллимирующей системы в имитаторе, что снижает возможности проведения проверок ПОЗ.

Оптическая система навесного имитатора ПОЗ, свободная от указанного недостатка, представляет собой несколько коллиматоров, выполненных в виде объектива (линзы) 3, а также излучателя 1 и охлаждаемого фона 2, расположенного в фокальных

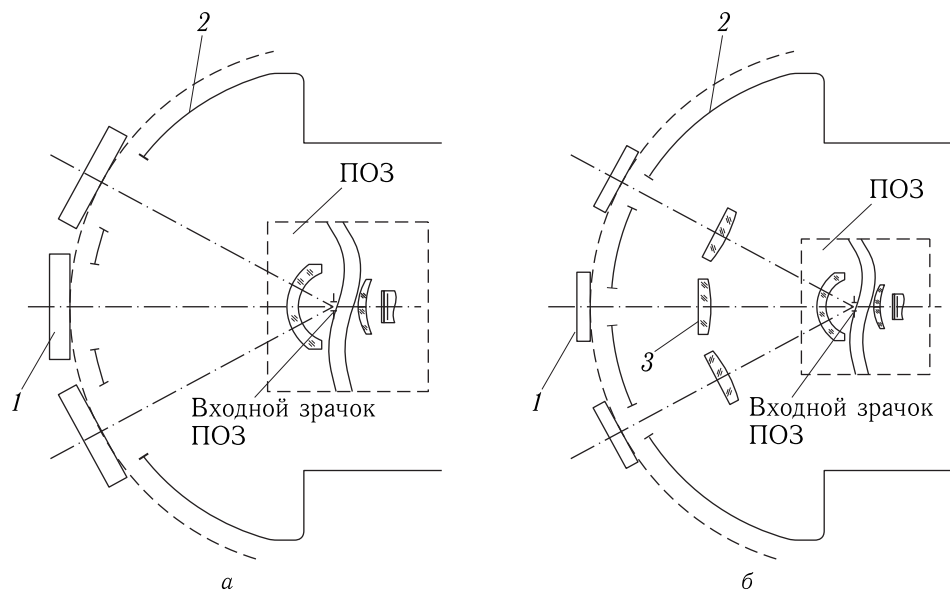


Рис. 3. Оптические системы навесных имитаторов для проверки ПОЗ: а) оптическая система навесного имитатора без коллиматоров; б) оптическая система навесного имитатора с коллиматорами

Fig. 3. Optical systems of the mounted simulators for testing of devices for orientation by Earth a) optical system of the mounted simulator without collimators; b) optical system of the mounted simulator with collimators

плоскостях объективов 3 (рис. 3, б). Объектив 3 имеет вынос выходного зрачка, который совмещается с входным зрачком проверяемого ПОЗ. Оптические оси навесных имитаторов пересекаются в центре входного зрачка объектива проверяемого изделия. Каждый из каналов формирует в разных участках МФПУ ПОЗ изображение имитируемой Земли с угловым полем порядка $2\omega = 15,8^\circ$.

Объектив коллиматора представляет собой плосковыпуклую линзу с фокусным расстоянием порядка $f' = 50$ мм, диаметром зрачка $\varnothing_{зр.} = 3$ мм, вынесенного на 40 мм, из монокристаллического германия, обладающего высоким коэффициентом дисперсии ($\nu_{8-14 \text{ мкм}} \approx 857,8$) и показателем преломления $n \approx 4$, что обеспечивает реализацию дифракционного качества изображения в спектральном диапазоне $\lambda = 8-14$ мкм.

Для обеспечения проверок прибора, соответствующих низким орбитам, например для $H_{орб.} = 2600$ км, возможно использовать коллиматор с угловым полем $2\omega = 90^\circ$, фокусным расстоянием $f' = 25$ мм и с вынесенным на 19 мм выходным зрачком диаметром $\varnothing_{зр.} = 3$ мм, в виде линзы из монокристаллического германия с ходом лучей, близким к телецентрическому. Качество изображения такой оптической системы — на уровне дифракционного.

Оптические системы навесных имитаторов приборов ориентации по звездам

Навесные имитаторы, предназначенные для проверки ПОЗв, можно разделить на две группы: статические имитаторы и динамические имитаторы [10–15]. В статических имитаторах воспроизводимые ориентиры неподвижны относительно углового поля, в динамических имитаторах воспроизводимые ориентиры могут изменять свои геометрические и энергетические характеристики и перемещаться с требуемой скоростью в пределах углового поля.

Статические навесные имитаторы уступают динамическим имитаторам по функциональным возможностям, однако в силу простоты, дешевизны и большей точности воспроизведения угловых

расстояний между имитируемыми звездами также находят широкое применение.

Оптические системы статических имитаторов состоят из блока осветителя, тест-объекта с точечными ориентирами и коллимирующего объектива. В ряде случаев за объективом устанавливается светофильтр.

Оптические системы динамических имитаторов состоят из микродисплея, генерирующего световые ориентиры (звезды, помехи) и коллимирующего объектива.

Поверхности тест-объектов в первом случае и поверхности дисплеев во втором расположены в фокальных плоскостях соответствующих коллимирующих объективов, что обеспечивает наличие параллельных лучей на выходе системы.

Устанавливаются навесные имитаторы на входе бленды ПОЗв, вдвигаясь в нее, и крепятся либо непосредственно к бленде, либо к посадочному месту под прибор с помощью специальных приспособлений, что исключает возможность деформации бленды.

Очевидно, что наиболее оптимальным вариантом размещения навесного имитатора является совмещение его выходного зрачка с входным зрачком объектива проверяемого прибора. В этом случае главные лучи наклонных пучков от имитатора проходят объектив прибора по тому же пути, что и визируемые звезды, вследствие чего при хорошем качестве изображения объектива имитатора отклонения положений энергоцентров изображений имитируемых звезд относительно реальных будет минимальным. В случае несовмещения зрачков вдоль оптической оси, что может произойти при большом удалении имитатора от испытуемого ПОЗв, для наклонных пучков возможно виньетирование, искажение изображений и смещение положений энергоцентров имитируемых звезд относительно реальных, что необходимо учитывать в процессе разработки навесного имитатора.

Ввиду того, что навесные имитаторы не являются основным средством контроля технических характеристик ПОЗв, воспроизведение спектральной характеристики излучения, соответствующей спектральному составу реальных звезд, в имитируемых навесных имитаторах не требуется. Поэтому в качестве источников излучения для статических

имитаторов используются в большинстве своем светодиоды, для динамических имитаторов достаточно часто применяют монохромные микродисплеи. Это упрощает реализацию оптимального качества изображения при более простой конструкции объектива из-за меньшего влияния хроматических аберраций, особенно хроматизма увеличения, свойственного объективам с вынесенным зрачком. Для проведения юстировочных работ и аттестации угловых расстояний между имитируемыми тест-объектами целесообразно использовать светодиоды, работающие в видимой области спектра.

Одной из важных задач, решаемых при разработке навесного имитатора для ПОЗв, является создание коллимирующего объектива.

Особенностью разработки такого объектива является необходимость реализации большого выноса выходного зрачка, что обусловлено наличием бленды в проверяемых ПОЗв и, вследствие этого, невозможностью установки имитатора вплотную к объективу прибора.

К наиболее известным схемам построения объективов с вынесенным зрачком можно отнести системы на основе триплета, усложненного триплета с добавлением коррекционных линз, системами на основе положительного силового компонента и конфокальной линзы, системами на основе положительного силового компонента и мениска, концентричного зрачку и т.д. При телецентрическом ходе лучей возможно использование схем с положительным компонентом и коррекционной системой [16–18].

Качество изображения объектива коллиматора не должно влиять на положение энергетических центров изображений, формируемых объективом испытуемого прибора на МФПУ. Поэтому целесообразно стремиться обеспечивать качество, близкое к дифракционному. Наибольшие трудности возникают при коррекции нечетных аберраций, свойственных объективам с вынесенным зрачком: комы, хроматизма увеличения и дисторсии. Однако хроматизм достаточно просто минимизируется при использовании монохроматических источников излучения. Дисторсия не оказывает влияния на величину пятна рассеяния, однако приводит к изменению положения имитируемых тест-объектов на МФПУ испытуемого изделия. Для статических

имитаторов это не имеет значения, так как определение координат центров прозрачных зон тест-объектов для последующего изготовления определяется расчетом в обратном ходе лучей для известного углового положения имитируемых звезд реальных созвездий.

Для динамических имитаторов при отсутствии алгоритмической возможности коррекции положения генерируемых ориентиров дисторсию необходимо минимизировать с учетом точности воспроизведения угловых расстояний.

В соответствии с приведенными выше рекомендациями на предприятии АО «НПП «Геофизика-Космос» разработан статический навесной имитатор, оптическая система которого представлена на рис. 4. Оптическая система содержит: узел осветителя 1, пластину с тест-объектами 2, объектив 3 со светофильтром. Узел осветителя представляет собой светодиоды, работающие в видимой области спектра, каждый из которых установлен перед соответствующей точечной диафрагмой, вытравленной методом фотолитографии на поверхности пластины 2, покрытой хромом и затем просветленной для устранения влияния бликов. Поверхность с прозрачными отверстиями расположена в фокальной плоскости объектива.

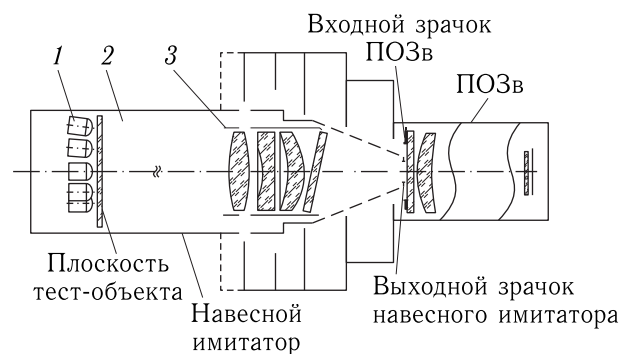


Рис. 4. Оптическая система статического навесного имитатора для проверки ПОЗв (пояснение в тексте)

Fig. 4. Optical system of the static mounted simulator for testing of devices for orientation by Earth

Светодиоды расположены с наклоном к оптической оси так, чтобы их оси пересекались в центре входного зрачка имитатора. Объектив имитатора 3 с вынесенным зрачком выполнен трехлинзовым. На выходе коллиматора установлен под углом

к оптической оси (для устранения влияния бликов) нейтральный светофильтр для обеспечения необходимой эквивалентной звездной величины.

Фокусное расстояние объектива коллиматора $f' = 90$ мм, относительное отверстие $2a/f' = 1 : 9$, угловое поле $2\omega = 18^\circ$, вынос выходного зрачка 28 мм.

Качество изображения объектива — на уровне дифракционного.

Навесной имитатор имитирует расположение реальных групп звезд на небесной сфере.

Следует отметить, что известен также статический навесной имитатор ИЗ-04 производства ИКИ РАН, в качестве тест-объекта которого используется черный слайд с изображениями участка небесной сферы и звездами в виде точечных объектов белого цвета, подсвеченный светодиодом [10, 11]. Также можно отметить имитатор по патенту [15], в котором тест-объект выполнен в виде пластины с отверстиями, в которую вводятся оптические волокна, соединенные через оптоволоконный разъем с источником света.

К известным динамическим имитаторам на основе микродисплея можно отнести имитатор КБИЗ-М производства ИКИ РАН [11], имитаторы производства «Оптехника» ИЗН-Т и ИЗН-С [12], имитатор OSI производства Jena-Optronik [13], а также макет навесного динамического имитатора НИИ «Телевидение» на основе микродисплея смартфона [14]. Оптические схемы этих имитаторов в указанных работах не приводятся.

Также можно отметить, что проверка ПОЗв (в том числе и в вакууме при рабочих температурах) возможна с помощью канала геометрического эталона (КГЭ), который используется в некоторых известных ПОЗв [1, 2, 7].

КГЭ представляет собой коллиматор (или систему коллиматоров), встроенный в оптическую систему прибора и жестко связанный с его базовой поверхностью, формирующий на приемной площадке МФПУ эталонные изображения точечных диафрагм (марок). Это позволяет в процессе эксплуатации прибора измерять угловое положение изображения визируемых звезд относительно изображений марок КГЭ и тем самым исключить погрешности определения координат звезд, вызванные нарушением геометрии прибора, например децентрировкой

линз и смещением матрицы в направлении, перпендикулярном оптической оси объектива.

Однако использование КГЭ для проведения проверок ПОЗв существенно ограничены из-за невозможности воспроизведения ряда геометрических и энергетических характеристик получаемых изображений (размеры пятен рассеяния, невозможность имитации реальных созвездий и т. д.). Также использование КГЭ приводит к усложнению конструкции прибора.

Заключение

Навесные имитаторы являются неотъемлемой частью контрольно-измерительной аппаратуры для проверки оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов.

За счет малых ГМХ и удобства эксплуатации навесные имитаторы позволяют без наличия специального стендового оборудования обеспечить проверку функционирования прибора.

В работе приведены оптические схемы навесных имитаторов для проверки приборов ориентации, работающих по Солнцу, Земле и звездам, рассмотрены особенности их построения, а также приведены рекомендации по их проектированию.

Данные материалы могут быть полезны разработчикам аппаратуры для проверки и контроля углоизмерительных приборов космического назначения.

Список литературы

1. Гебгарт А. Я., Колосов М. П. Оптика приборов ориентации космических аппаратов. М.: Университетская книга, 2017. 152 с.
2. Колосов М. П., Гебгарт А. Я. Оптические системы современных статических приборов ориентации космических аппаратов // Оптический журнал, 2017, т. 84, № 12. С. 3–10.
3. Пирогов М. Г., Варламов В. И., Цымбал Г. Л. и др. Приборы ориентации космических аппаратов по Солнцу на основе матричных приемников излучения с активными пикселями // Оптический журнал, 2017, т. 84, № 12. С. 18–24.
4. Черемухин Г. С. Приборы ориентации на Солнце для космических аппаратов. М.: Воентехиздат, 2004. 384 с.

5. Колосов М. П., Гебгарт А. Я., Лобанов Д. Ю. и др. Оптическая система малогабаритного широкоугольного солнечного датчика // Оптический журнал, 2020, т. 87, № 6. С. 66–72.
 6. Карпова В. А., Щекин А. М. Перспективный автономный малогабаритный солнечный датчик на основе фотоприемного устройства со встроенными алгоритмами обработки изображения // Тезисы 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов». Россия, Таруса, 2021. М.: ИКИ РАН. С. 269–272.
 7. Федосеев В. И., Колосов М. П. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 247 с.
 8. Коган Л. М. Мощные излучающие диоды инфракрасного диапазона // Электроника: НТБ, 2011, № 8. С. 66–73.
 9. Пирогов М. Г., Варламов В. И., Гордякин В. В. и др. Прибор ориентации по Земле для инфракрасного диапазона спектра на основе микроболометрической матрицы // Оптический журнал, 2017, т. 84, № 11. С. 22–28.
 10. Аванесов Г. А., Воронков С. В., Дунаев Б. С. и др. Имитаторы звездного неба для наемной отработки датчиков звездной ориентации // Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов». Россия, Таруса, 2008. М.: ИКИ РАН. С. 372–386.
 11. Статические имитаторы звездного неба; коллиматорные блоки имитации звездного неба. <http://www.ofo.ikiweb.ru/rasrabotki/stendy.html> (Дата обращения 15.01.2025).
 12. Имитатор звездного неба. <http://www.optotekhnika.ru/isn> (Дата обращения 15.01.2025).
 13. Ground Support Equipment. <http://www.jena-opttronik.de/products/star-sensoren/ground-support-equipment.html> (Дата обращения 15.01.2025).
 14. Баранов П. С., Манцветов А. А. Динамический имитатор звездного неба // Тезисы докладов 13-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений», СПб., 2016. С. 231–236.
 15. Иванов В. А., Левко Г. В., Морозов А. В., Попова К. А., Чиркунова А. А. Имитатор звездного неба. Патент РФ на полезную модель № 155206.
 16. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. 383 с.
 17. Николаев И. Д., Ангелов П. П. Объективы с вынесенным зрачком // ОМП, 1980, № 12. С. 13–15.
 18. Зверев В. А., Серебряков А. Г. Базовые схемы оптических систем с вынесенным зрачком // Оптический журнал, 2000, т. 67, № 6. С. 74–77.
- Дата поступления рукописи
в редакцию 22.01.2025
Дата принятия рукописи
в печать 24.02.2025