

УДК 535.317.2

Стенд для проверки статических широкоугольных приборов ориентации по Земле, работающих в инфракрасном спектральном диапазоне

© 2017 г. **А. Я. ГЕБГАРТ**, КАНД. ТЕХН. НАУК; **М. П. КОЛОСОВ**, ДОКТОР ТЕХН. НАУК;
Н. М. СТРИЖОВА; **К. Н. НАЗАРБАЕВ**

Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос», Москва

E-mail: yanuch2003@inbox.ru

Поступила в редакцию 13.06.2017

Рассматривается стенд для проверки статических широкоугольных приборов ориентации по Земле, работающих в инфракрасной области спектра. Выявлены недостатки существующих способов построения имитаторов Земли–атмосферы–космоса. Показаны особенности проектирования имитатора Земли–атмосферы–космоса, входящего в данный стенд.

Ключевые слова: инфракрасные приборы ориентации по Земле, имитаторы Земли–атмосферы–космоса.

Коды OCIS: 220.0220, 220.3620, 220.4830

Создание статических углоизмерительных оптико-электронных приборов ориентации космических аппаратов (КА) по Земле, работающих в инфракрасном (ИК) спектральном диапазоне, на основе многоэлементных болометрических приемников излучения [1–6] привело к необходимости разработки специализированных стендов, предназначенных для их настройки и проверки.

Назначение приборов ориентации по Земле (ПОЗ), как и приборов сканирующего типа — определение угловых координат отклонения оси визирования прибора от местной вертикали. Статические ПОЗ не содержат подвижных элементов, что обеспечивает их высокую надежность и оптимальные массогабаритные характеристики. Однако платой за это является использование больших угловых полей, которые у ряда таких приборов составляют около 180° , что естественно усложняет возможности их настройки и проверки.

Наибольшую сложность представляет собой задача создания стенда для проверки широкоугольных статических ПОЗ, работающих в ИК спектральном диапазоне (длины волн $\lambda \approx 8\text{--}14$ мкм) в диапазоне высот от 180 до 36000 км, где необходимо имитировать угловые размеры Земли порядка $17\text{--}153^\circ$ и космоса около 180° при обеспечении соответствующих энергетических характеристик.

В общем случае стенд для проверки приборов ориентации КА по Земле содержит имитатор

Земли–атмосферы–космоса (ИЗАК), а также поворотное устройство (подвес) с посадочным местом для проверяемого прибора.

Проверка точности прибора осуществляется путем наклона прибора в подвесе на фиксируемый с помощью датчиков угла поворота угол и последующего сравнения этого угла с угловой координатой вертикали (направление на центр имитируемой Земли), измеренной непосредственно прибором.

На практике наибольшее распространение получили ИЗАК, у которых разность температур между фоном, имитирующим космос, и черным телом, имитирующим Землю, обеспечивает энергетический контраст (контраст электрических сигналов), регистрируемый приборами ориентации КА по Земле, эквивалентный реально имеющемуся энергетическому контрасту между Землей и космосом. Так, при температуре фона $t = 15^\circ\text{C}$ и температурном контрасте между фоном и черным телом порядка $\Delta t = 85^\circ\text{C}$ во всех имитационных моделях обеспечивается требуемый энергетический контраст [2]. Очевидно, что его реализация существенно проще, чем воспроизведение реальных значений температур космоса (0 К) и Земли (около 240 К).

Известные стенды на основе параболических зеркальных торов [2], разработанные для проверки сканирующих ПОЗ, имеют ряд недостатков, которые ограничивают их использование для

проверки широкоугольных статических ИК ПОЗ. К ним относятся незначительный диапазон изменения имитируемого углового размера Земли (порядка градуса), неравномерность имитируемой энергетической яркости по полю. Попадание механических креплений в поле зрения статического ПОЗ снижает точность определения энергетического центра имитируемой Земли и ограничивает угловое поле измерений. Кроме этого, изготовители стендов несут большие стоимостные затраты (в том числе при изготовлении зеркальных торов для имитации разных высот полета КА).

В стендах на основе плоских охлаждаемых (для имитации космоса) и подогреваемых (для имитации Земли) излучателей [2, 7] из-за их плоской формы невозможно реализовать большие угловые размеры Земли и космоса, они имеют большую неравномерность имитируемой энергетической яркости по полю.

На НПП «Геофизика-Космос» был разработан и изготовлен стенд для проверки широкоугольных статических ИК ПОЗ, в котором рассмотренные выше проблемы решены [8–10] и в настоящее время стенд успешно эксплуатируется.

Оптическая схема стенда (рис. 1) содержит два излучателя – подогреваемый и охлаждаемый, последний с центральным отверстием, выполненным в виде концентрических сферических чаш двухстенной конструкции. Проверяемый прибор устанавливается в трехосном подвесе с осями I, II, III, оси вращения которого пересекаются в центре

входного зрачка проверяемого прибора ориентации, который одновременно является и выходным зрачком ИЗАК. На осях подвеса имеются датчики углов поворота и приводы. Вогнутые сферические поверхности излучателей обращены к подвесу, при этом центры их кривизны расположены вблизи центра входного зрачка прибора.

Полость каждого излучателя имеет терморегулируемую среду (теплоноситель), представляющую собой жидкость необходимой температуры, в качестве которой могут использоваться вода, тосол и др.

В полости подогреваемого излучателя есть перегородка для разделения теплоносителей, что позволяет при необходимости получить разную температуру в частях полости, т.е. создать температурный контраст на противоположных сторонах имитируемой Земли.

Излучатели имеют возможность совместного перемещения вдоль оптической оси.

В состав стенда входит (рис. 1б) сменная коллимирующая линза, выполненная из германия.

Сферический охлаждаемый излучатель имитирует излучение космоса, а сферический подогреваемый излучатель через центральное отверстие второго излучателя имитирует излучение Земли. Острая кромка по периметру отверстия в охлаждаемом излучателе имитирует границу Земля–космос. В фокальной плоскости прибора формируется изображение имитируемой Земли.

Наличие третьей оси подвеса (III) при направлении ее вдоль оси устройства позволяет реализо-

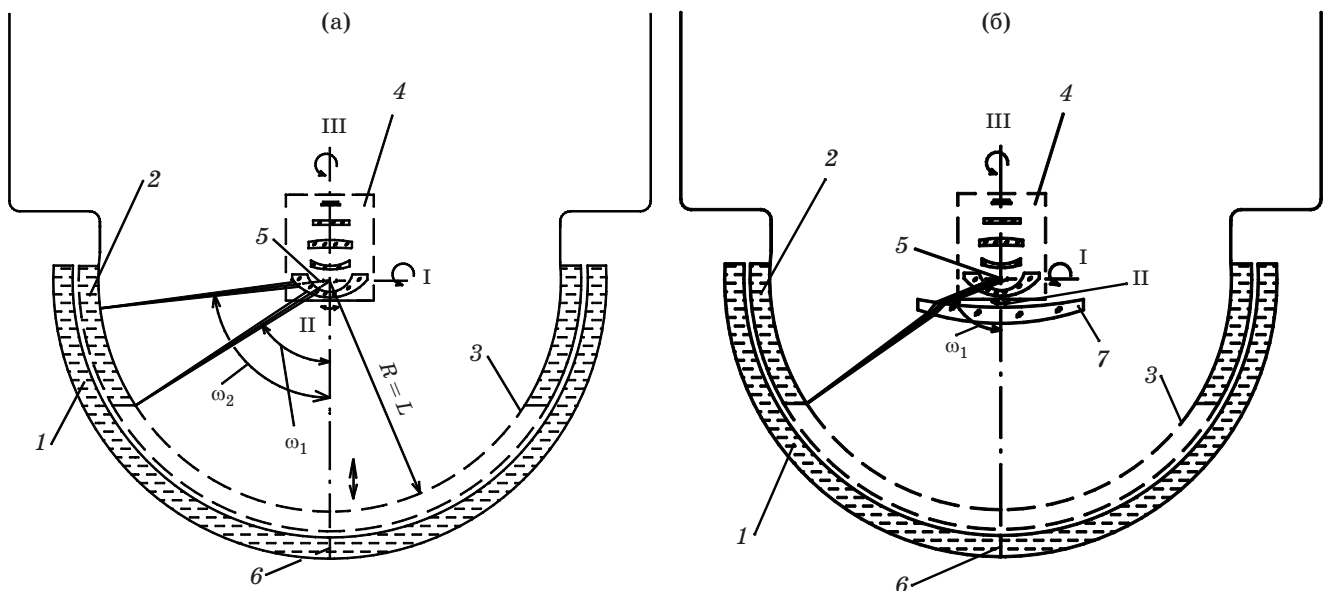


Рис. 1. Оптические схемы стендов для проверки статических широкоугольных ИК ПОЗ без коллимирующей линзы (а) и с коллимирующей линзой (б). 1 — подогреваемый излучатель, 2 — охлаждаемый излучатель, 3 — отверстие в охлаждаемом излучателе, 4 — проверяемый прибор, 5 — входной зрачок проверяемого прибора, 6 — перегородка в подогреваемом излучателе, 7 — коллимирующая линза; ω_1 — половина имитируемого углового размера Земли, ω_2 — половина имитируемого углового размера космоса, R — радиус кривизны поверхности охлаждаемого излучателя, L — расстояние от охлаждаемого излучателя до входного зрачка прибора, I, II, III — оси поворота проверяемого прибора.

вать необходимую при проверках систему координат (сферическую или полярную).

Возможны два режима работы: без коллимирующей линзы при имитации угловых полей порядка 180° (рис. 1а) и с коллимирующей линзой, фокальная поверхность которой совмещается с границей раздела Земля–космос при имитации угловых полей до 132° (рис. 1б). Такое большое угловое поле одиночной линзы обеспечивается за счет значительной отрицательной дисторсии и сферической формы излучателей. При установке коллимирующей линзы устраняется влияние линейных смещений прибора в плоскости, перпендикулярной оптической оси устройства, которые могут вносить дополнительные угловые погрешности определения центра имитируемой Земли. Некоторый «уход» от концентричности поверхностей сферических излучателей практически не влияет на равномерность энергетической освещенности в области зрачка.

Имитация угловых размеров Земли обеспечивается за счет установки сменных сферических охлаждаемых излучателей с диаметром центрального отверстия, соответствующим требуемому угловому размеру Земли, а также за счет совместного перемещения обоих излучателей в небольших пределах.

Излучатели сферической формы (без линзы) обеспечивают, в отличие от излучателей плоской формы, реализацию угловых полей 2ω порядка 180° . Кроме того, концентрические излучатели сферической формы, центр кривизны которых находится вблизи входного зрачка испытываемого прибора, обеспечивают распространение осевых пучков, входящих в объектив прибора вдоль нормалей к поверхностям излучателей, и, следовательно, высокую равномерность энергетической освещенности в области входного зрачка от разных участков обоих излучателей.

Габариты ИЗАК определяются как из конструктивных соображений, так и из условия минимизации влияния дефокусировки в объективе проверяемого прибора ориентации, возникающей в случае расположения излучателей на конечном расстоянии от него. При этом габариты ИЗАК вполне реальны для практической реализации. Это объясняется небольшими фокусными расстояниями (порядка нескольких миллиметров) объективов проверяемых широкоугольных статических ИК ПОЗ [5, 6]. Рассмотрим более подробно вопрос определения габаритов ИЗАК.

Наличие дефокусировки снижает качество изображения имитируемой границы Земля–космос, следовательно, увеличивает погрешность прибора. При совпадении центров кривизны излучателей с центром входного зрачка прибора $R = L$, где R — радиус кривизны поверхности охлаждаемого излучателя, обращенной к прибору, L — рас-

стояние от охлаждаемого излучателя до входного зрачка прибора. Диаметр пятна рассеяния испытываемого объектива ПОЗ (вследствие дефокусировки) в угловой мере (в радианах) определяется известным выражением $\Delta\psi \approx D/L$, где D — диаметр входного зрачка объектива прибора. Для минимизации влияния дефокусировки размер пятна рассеяния должен быть не больше дифракционного кружка рассеяния (кружка Эйри) испытываемого объектива, угловой размер которого определяется не менее известным выражением $\gamma = 2,44\lambda/D$, где λ — рабочая длина волны. Тогда из условия $\Delta\psi \leq \gamma$ можно получить выражение для расстояния $L(R)$: $L \geq D^2/2,44\lambda$, или $L = R \geq (f'/N)^2/2,44\lambda$, где N — диафрагменное число, f' — фокусное расстояние объектива. Например, в объективе прибора с фокусным расстоянием $f' = 4,9$ мм, диаметром входного зрачка $D = 2,45$ мм и $\lambda = 12$ мкм [5, 6] расстояние от охлаждаемого излучателя до входного зрачка прибора и радиус кривизны поверхности охлаждаемого излучателя составят $L = R \geq 189$ мм.

Диаметр отверстия D_3 охлаждаемого излучателя определяется расстоянием L до входного зрачка испытываемого прибора и радиусом кривизны R поверхности охлаждаемого излучателя, а также имитируемым угловым размером Земли $2\omega_1$. При совпадении центра кривизны обоих излучателей с центром входного зрачка прибора расстояние до входного зрачка $L = R$, а величины ω_1 , D_3 и R , как это следует из рис. 1а, связаны зависимостью $\sin\omega_1 = D_3/2R$. Диаметр D_1 подогреваемого излучателя должен быть всегда больше диаметра отверстия D_3 в охлаждаемом излучателе, т.е. $D_1 > D_3$.

Диаметр D_2 охлаждаемого излучателя определяется расстоянием L до входного зрачка испытываемого прибора, радиусом кривизны поверхности охлаждаемого излучателя R , а также имитируемым угловым размером космоса $2\omega_2$. При совпадении центров кривизны обоих излучателей с центром входного зрачка прибора величины ω_2 , D_2 и R , как это следует из рис. 1а, связаны зависимостью $\sin\omega_2 = D_2/2R$. Очевидно, что при стремлении угла $2\omega \rightarrow 180^\circ$ диаметр $D_2 \rightarrow 2L = 2R$.

В качестве примера можно привести следующие данные. Для проверки прибора, работающего на высоте полета 500 км ($2\omega_1 = 136^\circ$, $2\omega_2 \geq 176^\circ$), имеющего объектив с фокусным расстоянием 4,9 мм, диаметром входного зрачка 2,45 мм и расположенного от охлаждаемого излучателя на расстоянии 189 мм (для минимизации дефокусировки), диаметры излучателей составят $D_3 = 350,5$ мм, $D_2 = 378$ мм (полусфера), $D_1 > 350,5$ мм.

Имитация атмосферного слоя, толщина которого на низких высотах может достигать порядка 1° , обеспечивается в основном за счет дифракции в объективе проверяемого ПОЗ, которая соизмерима с угловым размером этого слоя. В случае необходимости возможна также некоторая

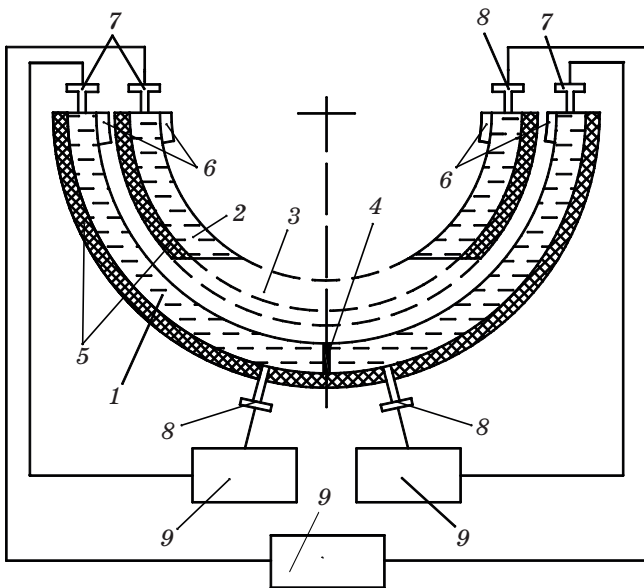


Рис. 2. Структурно-функциональная схема ИЗАК. 1 — подогреваемый излучатель, 2 — охлаждаемый излучатель, 3 — отверстие в охлаждаемом излучателе, 4 — перегородка в подогреваемом излучателе, 5 — теплоизолирующий слой, 6 — датчики температуры, 7 — впускные клапаны, 8 — выпускные клапаны, 9 — термостаты.

дефокусировка изображения границы Земля–космос за счет совместного перемещения излучателей вдоль оптической оси.

Материалом двухстенной конструкции излучателей (рис. 2) является сплав АМг6, имеющий высокий коэффициент теплопроводности. Изготовление излучателей осуществляется путем выдавливания двух сферических поверхностей и последующей их сварки друг с другом с зазором для формирования полости. Острая кромка по периметру отверстия в охлаждаемом излучателе (для формирования границы Земля–космос) изготавливается в виде отдельной вставки так же из сплава АМг6, приваренной к излучателю, а перегородка в подогреваемом излучателе – в виде сварной конструкции.

Для поддержания заданной температуры и однородности температурного поля (для снижения общей погрешности измерений при настройке и проверке (паспортизации) параметров испытуемого прибора) на наружные (выпуклые) поверхности обоих излучателей наносится теплоизолирующий слой вспененного полиэтилена (пенополиэтилена),

Основные характеристики ИЗАК для высот до 180 км

Характеристики	Значения
Спектральный диапазон, мкм	7–20
Максимальное имитируемое угловое поле Земли $2\omega_1$ без коллимирующей линзы, град	153
с коллимирующей линзой, град	136
Имитируемое угловое поле фона (космоса) $2\omega_2$, град	180
Температура подогреваемого излучателя, °С	35–85
Температура охлаждаемого излучателя, °С	15–25
Диаметр пятна рассеяния для имитируемой границы Земля–космос	на уровне дифракционного (без дефокусировки)

обладающего высокими теплоизоляционными свойствами, а на внутренние (вогнутые) поверхности установлены температурные датчики (рис. 2) [10]. Регулировка потока жидкости в замкнутом контуре системы терморегулирования осуществляется с помощью входного и выходного шлангов, подключаемых к входному и выходному отверстиям полости, и регулируется с помощью ручного переключения впускных и выпускных клапанов. Заданный температурный режим обеспечивается термостатами.

В процессе работы стенда в соответствующем термостате устанавливаются заданный температурный режим. В нем же включают систему циркуляции теплоносителя по замкнутым трактам: термостат — входной шланг — соответствующий излучатель — выходной шланг — термостат. Далее осуществляют регулировку теплового поля теплоносителя, для чего фиксируют температуру термодатчиков и настраивают термостат для выхода обоих излучателей на заданный температурный режим.

Основные характеристики ИЗАК для высот до 180 км приведены в таблице.

Описанный стенд изготовлен, аттестован по геометрическим и энергетическим параметрам и используется для контроля выпускаемых приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пирогов М.Г., Видецких Ю.А., Федосеев В.И., Варламов В.И., Зензинов С.Ю., Колосов М.П., Стрижова Н.М., Гебгарт А.Я., Денисов В.В., Терехов М.А. Приборы ориентации по Земле на основе неохлаждаемых микроболометрических матричных приемников для космических аппаратов (ПОЗ) // XX Междунар. научно-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Тез. докл. М.: НПО «Орион», 2008. С. 66–67.
2. Федосеев В.И., Колосов М.П. Опτικο-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Логос, 2007. 247 с.

3. Геофизике — 175 лет / под общ. ред. Егупова А.Н. М.: Новости, 2012. 136 с.
4. Гордякин В.В., Стрижова Н.М., Шаталова Н.А. Прибор ориентации по Земле на основе микроболометрической матрицы // Патент на полезную модель № 132887. 2013.
5. Гебгарт А.Я. Особенности проектирования некоторых типов особоширокоугольных объективов // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 9. С. 17–21.
6. Гебгарт А.Я., Шатова А.Я., Медведев В.В. Оптические системы некоторых типов широкоугольных ИК объективов // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 2. С. 48–51.
7. Wang Zhe, Zhang Guo-yo. Optical and mechanical structure design of a high altitude orbits collimating infrared earth simulator // Intern. Symp. Photoelectronic Detection and Imaging 2013. Proc. SPIE. 2013. V. 8907. P. 890710-1.
8. Колосов М.П., Гебгарт А.Я., Стрижова Н.М., Назарбаев К.Н. Устройство для настройки и проверки статических широкопольных углоизмерительных инфракрасных приборов ориентации по Земле // Патент РФ на полезную модель № 147304. 2014.
9. Колосов М.П., Гебгарт А.Я., Стрижова Н.М., Назарбаев К.Н. Стенд для настройки и проверки статических широкопольных углоизмерительных инфракрасных приборов ориентации космических аппаратов по Земле // X Междунар. форум «OPTICS-EXPO 2014». Тез. докл. научно-практ. конф. «Оптика в науке и технике».
10. Колосов М.П., Гебгарт А.Я., Стрижова Н.М., Назарбаев К.Н. Устройство для проверки статических широкопольных углоизмерительных инфракрасных приборов ориентации по Земле // Патент РФ на полезную модель № 166306. 2016.