

УДК 617.7 535.34

Экспериментальный маломассогабаритный многоспектральный образец радиометра инфракрасного диапазона для космического мониторинга окружающей среды

© 2020 г. **В. Д. СТАРИЧЕНКОВА**, КАНД. ТЕХН. НАУК; **А. С. ПЕРФИЛЬЕВ**;
И. В. ТЕТЕРИНА; **В. С. ТУЛЬЕВ**; **А. Г. ФЛЕЙШЕР**

Научно-производственное объединение «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова», Санкт-Петербург

E-mail: ivtete48@mail.ru

Поступила в редакцию 27.02.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-07-80-84

Приведены параметры экспериментально отработанных основных элементов широкозахватного (полоса захвата 150 км при высоте орбиты 600 км) радиометра теплового инфракрасного диапазона (8–11 мкм) с повышенным пространственным разрешением (до 150 м) и числом спектральных каналов не менее трех, предназначенного для размещения на малых космических аппаратах с целью решения широкого спектра природоресурсных и мониторинговых задач дистанционного зондирования Земли.

Ключевые слова: малобагабаритный, многоспектральный, широкозахватный, инфракрасный радиометр, минимизация фоновых помех, многоканальное многоспектральное ИК фотоприемное устройство.

Коды OCIS: 120.0280, 010.0280, 040.1520, 280.1120

Эффективность использования инфракрасного (ИК) диапазона спектра при решении широкого спектра природоресурсных и мониторинговых задач дистанционного зондирования Земли подтверждена опытом проведения аэрокосмических съемок бортовой аппаратурой США (MODIS, ASTER, MTI, VIIRS) с большим числом спектральных каналов и высоким температурным и пространственным разрешением в интересах различных потребителей.

Создание маломассогабаритных космических аппаратов (КА) с целевой аппаратурой ИК диапазона сталкивается, прежде всего, с проблемами, связанными с фотоприемными устройствами (ФПУ) теплового диапазона, требующими криогенного охлаждения и не-

обходимости экранирования этих устройств от собственного теплового излучения аппаратуры.

Целями разработки являются создание конкурентоспособного образца регистрирующей малобагабаритной ИК аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ИК радиометра) и проведение испытаний экспериментальных образцов ключевых элементов с целью экспериментального подтверждения новых технических решений.

Задачи малобагабаритного ИК радиометра: формирование оптической системой (ОС) изображения наблюдаемых районов Земли в ИК диапазоне спектра, регистрация полученного изображения ФПУ, чувствительным в ИК диапазоне, запись полученных результатов

в цифровом виде на электронные носители информации КА.

Сравнительный анализ данных по зарубежным радиометрам показал, что разработанный в ГОИ маломассогабаритный, широкозахватный, многоспектральный (имеет 3 спектральных канала) ИК радиометр «ИКАР» практически полностью соответствует по техническим

Основные технические характеристики разработанного радиометра

Параметры	Значения
Рабочий спектральный диапазон, мкм	8,0–11,0
Рабочие спектральные поддиапазоны, мкм	8,3–8,8, 10,3–10,8, 10,8–11,0
Число спектральных каналов	3
Пространственное разрешение* (проекция пиксела в надире), м	≤ 150
Температурное разрешение, К (эквивалентная шуму разность температур протяженного объекта и фона с температурой 300 К)	0,05–0,15
Полоса захвата*, км	≥ 150
Масса аппаратуры, кг	≤ 45
Максимальное энергопотребление в сеансе съемки, Вт	≤ 380
Напряжение питания, В	23–29

Примечание. * соответствует высоте орбиты КА (носителя аппаратуры) 600 км.

характеристикам ИК радиометру *Landsat 8*, разработанному в США [1].

Масса и габариты радиометра позволяют разместить его на малых КА.

Основные технические характеристики разработанного радиометра приведены в таблице.

Экспериментальный образец радиометра «ИКАР» включает следующие ключевые элементы: оптико-механическую систему, многоканальное глубокоохлаждаемое ФПУ [2–5], спектральные фильтры на входе каждого из каналов ФПУ, мультиплексор ФПУ с системой его управления, микрокриогенную систему обеспечения рабочей температуры каналов ФПУ, систему обработки и хранения многоканальной информации, систему обеспечения теплового режима; устройство калибровки.

ОСНОВНЫЕ КЛЮЧЕВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИК РАДИОМЕТРА

Конструкция экспериментального образца ИК радиометра в составе оптико-механической системы, устройства калибровки и ФПУ в криостате приведена на рис. 1.

Оптико-механическая система

Угловое поле объектива — $2\omega = 15^\circ$ — определяется шириной требуемой полосы захвата с высоты 600 км.

Пространственное разрешение, исходя из реально существующих размеров пиксела ФПУ

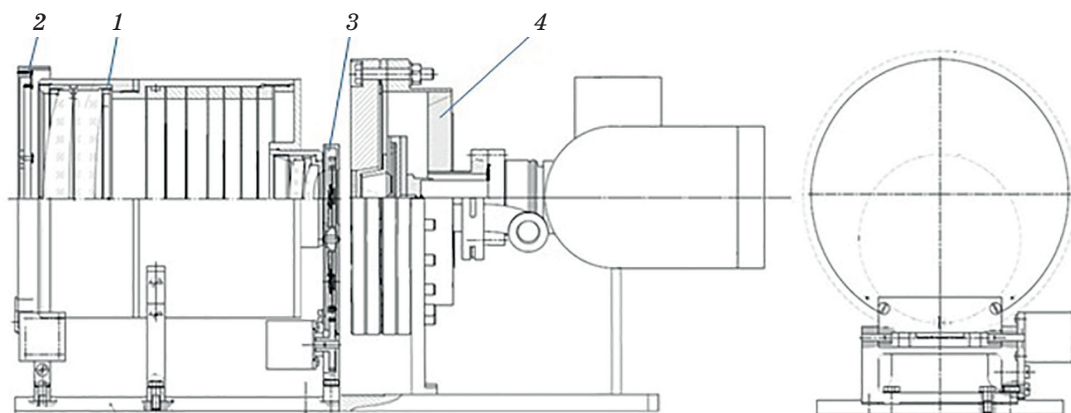


Рис. 1. Конструкция ИК радиометра «ИКАР». 1 — объектив, 2 — калибратор № 1 для сквозной калибровки, 3 — калибратор № 2 для ФПУ, 4 — многоканальное ФПУ.

ИК диапазона (30 мкм), определяет длину фокусного расстояния объектива $F = 120$ мм.

Для использования в ИК радиометре была выбрана четырехлинзовая схема объектива с параметрами: $F = 120$ мм, относительное отверстие 1:1,5, угловое поле $15^\circ 17'$, расположение выходного зрачка — между последней линзой и поверхностью изображения. Линзы — из монокристаллического германия. Диаметр поля изображения составил 31,6 мм.

Существенной проблемой, возникающей при создании оптической аппаратуры для среднего и дальнего ИК диапазонов, является борьба с фоновыми помехами, связанными с собственным тепловым излучением конструктивных элементов ОС и с рассеянием на элементах конструкции внешнего фонового излучения, проникающего внутрь ОС, но не участвующего в построении изображения.

Уменьшение помех, связанных с собственным тепловым излучением конструктивных элементов, достигается охлаждением ОС.

Снижение уровня паразитной засветки плоскости изображения, обусловленного рассеянием на элементах конструкции внешнего фонового потока, можно достичь

- уменьшением потока излучения, рассеиваемого на элементах конструкции в направлении фокальной плоскости (за счет применения конструкции с взаимным расположением элементов, обеспечивающих многократное рассеяние падающего потока, и за счет применения элементов с минимальным коэффициентом рассеяния на их поверхностях);
- использованием наружного светозащитного устройства (бленды), снижающего проникающий внутрь объектива поток лучей от внеполевых источников излучения.

Для выбранной схемы объектива была разработана конструкция объектива, состоящая из двух линзовых блоков и цилиндрического корпуса с внутренними матовыми диафрагмами между входным и выходным линзовыми блоками. Корпус — с резьбовыми окончаниями и центрирующими поясками, позволяющими собрать объектив без потери центровки блоков.

В такой конструкции корпуса объектива — с внутренней поверхностью корпуса, заполненной матовыми диафрагмами, часть рассеянного потока выходит из объектива, а оставшаяся часть направляется в сторону фокаль-

ной плоскости только после многократного дополнительного рассеяния от стенок «карманов» между диафрагмами, что существенно снижает уровень фонового облучения фокальной плоскости.

Оценка геометрических размеров противосолнечной наружной бленды для выбранной схемы объектива с учетом условий наблюдения (при высоте наблюдения 600 км и минимальном угле на Солнце относительно оси объектива (φ_{\oplus}), равном 66°) показала, что при длине бленды 160 мм обеспечивается ограничение диапазона углов засветки от земной поверхности, проникающей внутрь объектива (углы засветки φ_{\oplus} не более 47°), а площадь зоны засветки внеполевыми лучами при $\varphi_{\oplus} < 47^\circ$ внутри корпуса уменьшается (примерно в 2,7 раза).

Фотоприемное устройство

Для заполнения требуемого поля изображения объектива по одной из осей, определяющей ширину полосы захвата, потребовались три модуля ФПУ (типа QWIP) с размером фоточувствительной площадки каждого модуля $9,6 \times 7,8$ мм [2]. На рис. 2 приведена схема заполнения поля объектива ($\varnothing 31,6$ мм) с помощью трех модулей ФПУ, размещенных в шахматном порядке — по схеме «коленвал».

Каждый модуль ФПУ считывает изображение от «своего» наблюдаемого участка земной поверхности (в процессе считывания формирует свой кадр); при движении КА формируется серия кадров, содержащих изображение

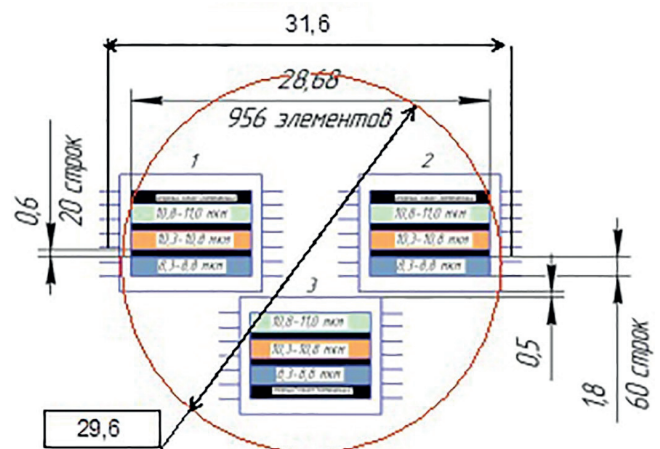


Рис. 2. Схема заполнения поля изображения объектива с помощью 3-х модулей ФПУ.

полосы земной поверхности, наблюдаемой каждым модулем ФПУ по ходу движения.

Участки земной поверхности, наблюдаемые каждым их трех модулей одновременно, разнесены в пространстве. Полная картина наблюдаемой полосы захвата земной поверхности формируется в результате последующей совместной покадровой обработки информации каждого из трех модулей.

Многоканальное ФПУ со спектральными фильтрами соответствующих каналов и микрокриогенной системой обеспечения рабочей температуры фотоприемника обеспечивает одновременное получение информации во всех спектральных каналах (после обработки с привязкой по времени — моменту наблюдения участка земной поверхности каждым пикселем).

Каждый модуль ФПУ установлен на единой охлаждаемой поверхности (ОП), расположенной в вакуумном криостате. Светофильтры, формирующие спектральные диапазоны ($\Delta\lambda$) в каждом из спектральных каналов: $\Delta\lambda_1$ — (8,3–8,8), $\Delta\lambda_2$ — (10,3–10,8), $\Delta\lambda_3$ — (10,8–11,0) мкм, — располагаются в криогенной зоне ФПУ.

Криостат снабжен входным защитным окном, прозрачным в диапазоне 8–11 мкм, и охлаждаемой диафрагмой с дополнительным холодным широкополосным светофильтром.

Система охлаждения ОП в криостате обеспечивает равномерную рабочую температуру ФПУ по всей поверхности ОП не выше 65 К [3].

Система калибровки

Система калибровки состоит из двух устройств, каждое из которых решает собственную задачу — это системы сквозной калибровки и калибровки ИК ФПУ.

Излучатель системы [4] сквозной калибровки ФД₁ размещается на открывающейся крышке, расположенной перед входным объективом.

Конструкция излучателя — площадной низкотемпературный излучающий диск диаметром около 150 мм на внутренней поверхности защитной крышки, закрепленной на корпусе объектива. При закрытой крышке излучатель-калибратор находится против входного окна объектива. При подаче электропитания происходит нагрев калибратора до требуемой температуры.

В рабочем состоянии аппаратуры крышка откинута и калибратор оказывается вне поля зрения объектива.

Устройство калибратора ИК ФПУ размещается между объективом и ФПУ в плоскости выходного зрачка объектива и имеет вид турели из трех гнезд: гнездо № 1 — рабочее окно, при установке которого изображение наблюдаемой местности проецируется на фоточувствительный слой ИК ФПУ, гнездо № 2 — окно излучателя ФД₂, равномерно засвечивающего рабочую поверхность ИК ФПУ, гнездо № 3 — окно, в котором установлено зеркало, отражающее на ФПУ его собственное излучение при исходной «холодной» температуре.

Последовательно регистрируя излучение окон, получаем энергетическую характеристику ИК ФПУ для двух уровней падающего на ФПУ ИК излучения. Механизм переключения гнезд состоит из зубчатой передачи и шагового электродвигателя типа А28СТН32-0674А. Крайние положения в приводе фиксируются соответствующими автопарам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рис. 3 приведен общий вид разработанного экспериментального образца ИК радиометра в целом.

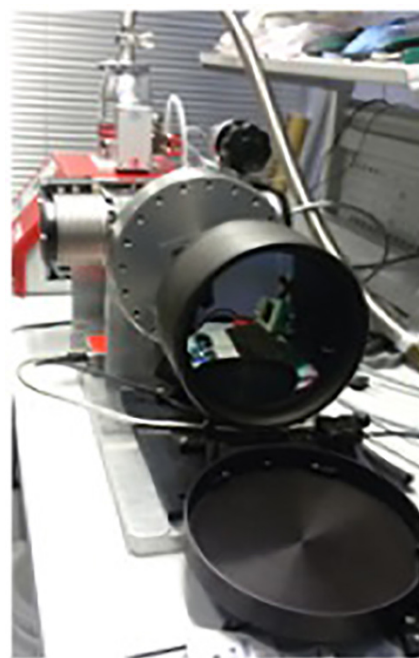


Рис. 3. Общий вид экспериментального образца ИК радиометра «ИКАР»

Достигнутые характеристики разработанного радиометра «ИКАР»

- Оптическая система широкого ИК спектрального диапазона рассчитана и изготовлена, исходя из поля зрения, обеспечивающего заданную линейную полосу захвата (150 км), и пространственного разрешения в центральной зоне поля зрения не менее 150 м.

- Использование в радиометре приемников на основе матриц типа QWIP позволило расширить рабочий спектральный диапазон до $\Delta\lambda = 8\text{--}11$ мкм. В РФ, по нашей информации, фотоприемники, работающие в широком ИК спектральном диапазоне до 8–11 мкм, неизвестны (возможно только в закрытых работах).

- В разработанном ИК радиометре с участием ГОИ (совместно с разработчиками из Беларуси) изготовлено многоканальное фото-

приемное устройство, состоящее из трех матриц типа QWIP.

- Схема заполнения поля изображения объектива с помощью трех модулей ФПУ, размещенных в шахматном порядке, позволила обеспечить заполнение требуемого поля изображения.

- Использование матриц QWIP с размером фоточувствительной площадки $9,6 \times 7,8$ мм позволило разместить оптические фильтры, обеспечивающие заданные три спектральные поддиапазона, непосредственно над матрицами модулей.

- Система охлаждения ИК ФПУ до температуры $-(20\text{--}40)$ К выполнена совместно с БГУ (Беларусь).

- Система калибровки состоит из двух устройств, каждое из которых решает собственную задачу — это системы сквозной калибровки и калибровки ИК ФПУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reuter D.C., Richardson C.M., Pellerano F.A., et al. The thermal infrared sensor (TIRS) on landsat 8: Design overview and pre-launch characterization // *Remote Sens.* 2015. V. 7(1). P. 1135–1153.
2. Слук С., Кочанов Ю., Петрошенко М. и др. Инфракрасные датчики длинноволнового диапазона на квантовых ямах компании IRnova // *Компоненты и технологии.* 2014. № 1. С. 152–157.
3. Riabzev S.V., Veprik A.M., Vilenchik H.S., et al. Vibration free stirling cryogenic cooler for high definition microscopy // *Cryogenics.* 2009. V. 49. № 12. P. 707–713.
4. Вангонен А.И., Голубовский Ю.М., Коваленко М.Н. и др. Тепловые излучатели систем освещения и калибровки спектральной и оптико-электронной аппаратуры инфракрасного диапазона // *Оптический журнал.* 2019. Т. 86. № 1. С. 60–67.