

УДК 621.397

## Двухдиапазонная тепловизионная система для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм

Л. И. Горелик, Е. В. Дрогайцева, А. В. Полесский, А. В. Сидорин,  
В. Н. Соляков, Д. Ю. Тренин

*Представлены результаты разработки двухдиапазонного (3—5 и 8—12 мкм) тепловизионного прибора на основе серийно выпускаемых в ФГУП «НПО "Орион"» матричных фотоприемных модулей из  $InSb$  и  $CdHg_{1-x}Te_x$  формата 256×256 элементов.*

PACS: 42.30.Va

*Ключевые слова:* двухдиапазонный тепловизор, пирометр, MWIR/LWIR, МФПУ.

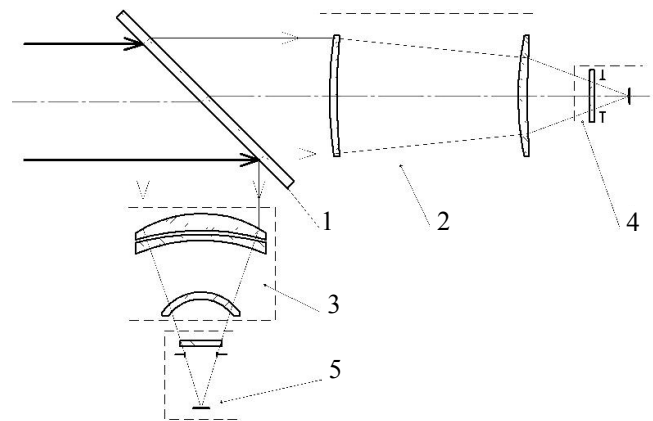
### Введение

Основными магистральными направлениями развития инфракрасных систем являются: повышение информативности, увеличение помехозащищенности, возможность работы в более сложных метеоусловиях и т. д. Для достижения этих целей и в связи с бурным развитием элементной базы в последнее время наметилась тенденция перехода от однодиапазонных систем к двухдиапазонным. При применении двухдиапазонных систем для измерения температуры не требуется априорных данных о коэффициенте излучения.

### Двухдиапазонный тепловизор

Существует несколько схем построения двухдиапазонных систем, каждая из которых обладает своими преимуществами и недостатками. В качестве базовой для разработки двухдиапазонной тепловизионной системы в ФГУП «НПО "Орион"» была выбрана классическая схема с двумя оптиче-

ски сопряженными матричными фотоприемными устройствами (МФПУ) и спектральным разделением потока в параллельном пучке лучей (рис. 1). Достоинства этой схемы — относительная простота реализации оптического тракта из-за отсутствия в нем децентрированных элементов и элементов со специальными технологически сложными многослойными покрытиями. Недостатки: необходимость сведения с высокой точностью каналов (порядка одного пикселя изображения), относительно небольшое угловое поле системы, технологические сложности изготовления спектроделителя.



**Рис. 1. Оптическая схема двухдиапазонного тепловизионного прибора:**

1 — спектроделитель; 2 — объектив диапазона 8—12 мкм; 3 — объектив диапазона 3—5 мкм; 4 — МФПУ на основе  $CdHg_{1-x}Te_x$ ; 5 — МФПУ на основе  $InSb$

Спектральное разделение потока в этой схеме происходит в параллельном пучке лучей, поэтому спектроделитель не вносит дополнительных аберраций, однако имеет относительно большие размеры и должен быть изготовлен с очень высокой параллельностью. Разделение потока в параллельном ходе лучей также позволит относительно просто установить дополнительную оптику, которая

Горелик Леонид Иосифович, главный специалист<sup>1</sup>.  
Дрогайцева Евгения Владимировна, техник<sup>1</sup>, студент<sup>2</sup>.  
Полесский Алексей Викторович, ведущий инженер<sup>1</sup>.  
Сидорин Алексей Васильевич, инженер<sup>1</sup>, студент<sup>2</sup>.  
Соляков Владимир Николаевич, начальник НТЦ<sup>1</sup>, профессор<sup>3</sup>.  
Тренин Дмитрий Юрьевич, инженер 1-й категории<sup>1</sup>, аспирант<sup>3</sup>.  
<sup>1</sup>ГНЦ РФ ФГУП «НПО "Орион"». Россия, 111402, Москва, ул. Косинская, 9.  
E-mail: opus48@mail.ru solyakov@mail.ru  
<sup>2</sup>МГТУ им. Н. Э. Баумана. Россия, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5.  
<sup>3</sup>Московский физико-технический институт. Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2010 г.

© Горелик Л. И., Дрогайцева Е. В., Полесский А. В., Сидорин А. В., Соляков В. Н., Тренин Д. Ю., 2011

может изменять назначение системы. Например, установка телескопической насадки, построенной по схеме Мерсена, позволяет создать эквивалент длиннофокусной системы, а установка тракта, построенного по схеме Швардшильда, дает возможность реализовать микроскоп.

Внешний вид разработанного прибора приведен на рис. 2. В разработанной ФГУП «НПО "Орион"» двухдиапазонной тепловизионной системе применены следующие основные элементы:

- спектроделитель;
- объектив "Макро-70" для спектрального диапазона 8—12 мкм;
- объектив "Орион-80" для диапазона 3—5 мкм;
- МФПУ ФУК10М на спектральный диапазон 8—12 мкм с соответствующим блоком цифровой обработки (БЦО);
- МФПУ ФУК11М на спектральный диапазон 3—5 мкм с соответствующим БЦО;
- программное обеспечение.



Рис. 2. Внешний вид двухдиапазонной тепловизионной системы для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм

В данной двухдиапазонной системе в качестве базовых фотоприемных устройств использовались разработанные ФГУП «НПО "Орион"» МФПУ на основе InSb и КРТ изделия ФУК10М и ФУК11М формата 256×256 элементов и шагом пикселя 35 и 30 мкм, соответственно.

Задачей спектроделителя является спектральное разделение падающего потока на два канала 3—5 и 8—12 мкм. Основой спектроделителя в разработанной системе является германиевая плоскопараллельная пластинка с клиновидностью менее 10". Столь высокий допуск на клиновидность необходим для предотвращения двоения изображения в работающем на отражение канале 3—5 мкм. Для повышения эффективности работы пластинки и уменьшения потерь на отражение на поверхность пластинки нанесено специальное покрытие.

После прохождения через спектроделитель инфракрасное излучение попадает в объективы каналов 3—5 и 8—12 мкм.

Фокусное расстояние объектива "Орион-80" канала 3—5 мкм составляет 80 мм, относительное отверстие 1:1,87. Объектив построен по схеме с

совмещенной холодной диафрагмой и обладает дифракционным качеством изображения, т. е. 80 % энергии находится в пятне 18 мкм.

Основой оптического тракта канала 8—12 мкм является объектив "Макро-70" с фокусным расстоянием 70 мм и относительным отверстием 1:1,4. Данный объектив также обладает дифракционным качеством изображения, а именно, 80 % энергии находится в пятне 30 мкм.

Отношение размеров пятен дифракционноограниченных объективов с одинаковым относительным отверстием пропорционально средним длинам для диапазонов 3—5 и 8—12 мкм и составляет примерно 2,5. Это означает, что для реализации предельного потенциала по разрешению системы в канале 3—5 мкм необходимо иметь в 6,25 раза больше элементов, чем в канале 8—12 мкм.

По этой причине в случае получения одинакового предельного разрешения в каналах двухдиапазонной системы относительное отверстие оптического тракта в канале 8—12 мкм в 2,5 раза больше, чем в 3—5 мкм.

Как уже было сказано выше, в качестве базовых МФПУ в двухдиапазонной системе используются серийно выпускаемые ФГУП «НПО "Орион"» изделия ФУК10М на основе КРТ и ФУК11М на основе InSb.

*Техническая характеристика*

	ФУК10М	ФУК11М
Спектральный диапазон, мкм	8—12	3—5
Материал фоточувствительного слоя.....	КРТ	InSb
Формат.....	256×256	256×256
Шаг ФЧЭ, мкм.....	30	35
NEDT, мК.....	Менее 30 (f# = 1,4, τ = 50 μs)	Менее 20 (f# = 2, τ = 0,64 ms)
Рабочая температура, К.....	80	80
Частота кадров, Гц.....	100	300

Применение в приборе охлаждаемых МФПУ позволило обеспечить в разработанной двухдиапазонной системе температурную чувствительность 0,06 К для канала 3—5 мкм и 0,07 К — для канала 8—12 мкм.

Блоки цифровой обработки сигналов с МФПУ выполнены на основе программируемых логических схем и микропроцессора. В модуле используются микросхемы энергонезависимой перепрограммируемой памяти. Модуль имеет стандартный телевизионный и цифровой выходы и обеспечивает выполнение следующих функций:

- компенсацию постоянной составляющей каналов МФПУ и разброс их вольтовой чувствительности;
- интерполяцию или замену сигналов неисправных элементов МФПУ;

- накопление кадров (до восьми);
- обеспечение работы АРУ с использованием фоноцелевой обстановки;
- регулировку контрастности и яркости;
- функцию "стоп-кадр";
- преобразование позитивного изображения в негативное.

Управление режимами БЦО осуществляется или с пульта управления, или с персонального компьютера, соединенного с БЦО интерфейсом RS-232.

Конструктивное исполнение БЦО для канала 3—5 и 8—12 мкм одинаково, внешний вид блока приведен на рис. 3.

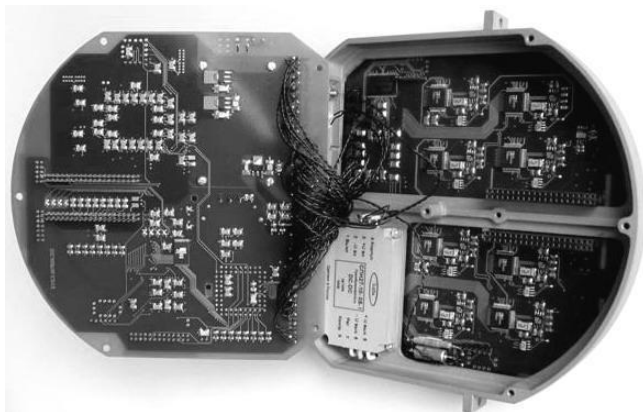


Рис. 3. Внешний вид БЦО

Для ввода данных в ПЭВМ используется специальный блок ввода данных, построенный на основе двух плат USB 2185, передающих сигналы в ПЭВМ по интерфейсу USB 2.0.

Для управления режимами работы БЦО, синтеза изображений и финишного сведения каналов в системе используется специально разработанное программное обеспечение DualBandRadiometer.

Программное обеспечение позволяет производить синтез изображений по различным алгоритмам (алгоритм обработки слабоконтрастных изображений [1], алгоритм определения цветовой температуры, алгоритм синтеза изображений на основе дихроичной палитры [2] и т. д.), и выбирать палитру для отображения результата синтеза. В текущей версии ПО имеется возможность выбора из одиннадцати предустановленных палитр, в том числе черно-белой палитры и стандартной RGB-палитры.

Главное окно приложения DualBandRadiometer имеет вид, представленный на рис. 4. В центральной его части расположена область текущего, выбранного пользователем способа индикации сцены. Для предоставления общей (справочной) информации о виде сцены в независимых каналах в левой части главного окна имеются две области (заголовки окон First band и Second band, соответственно).

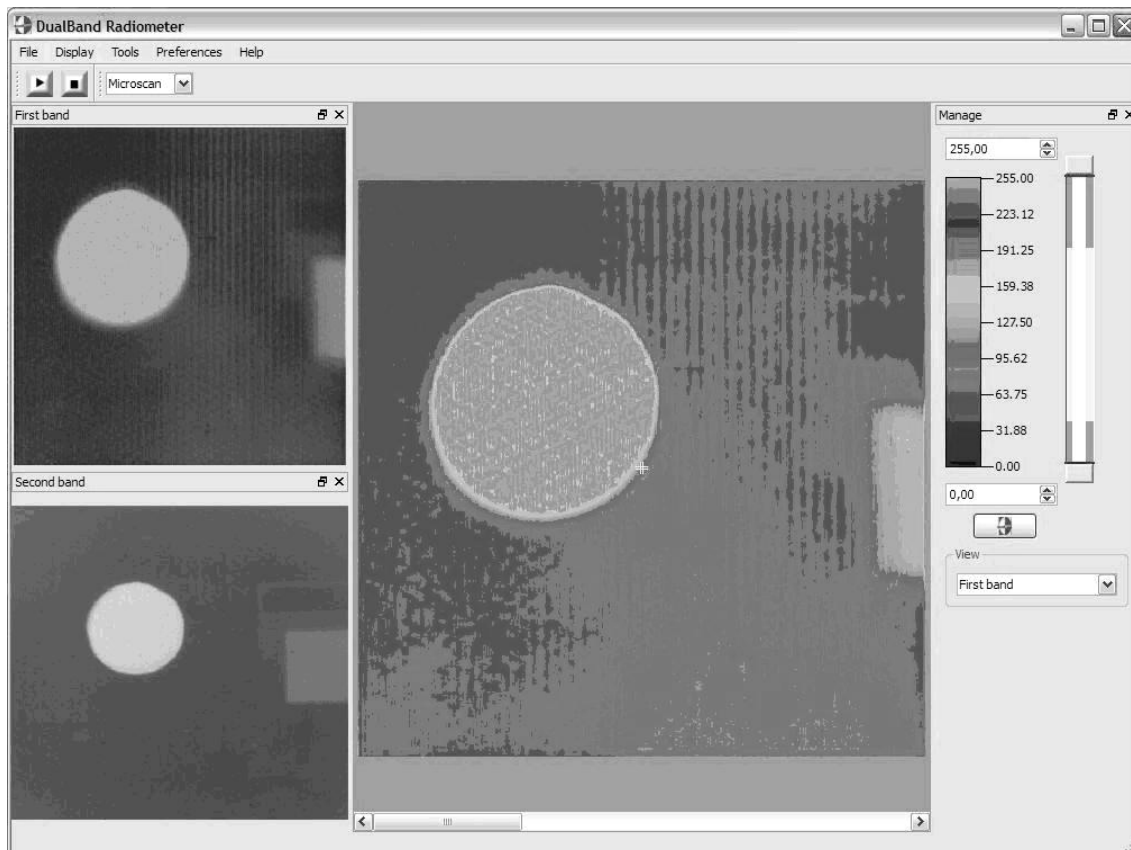


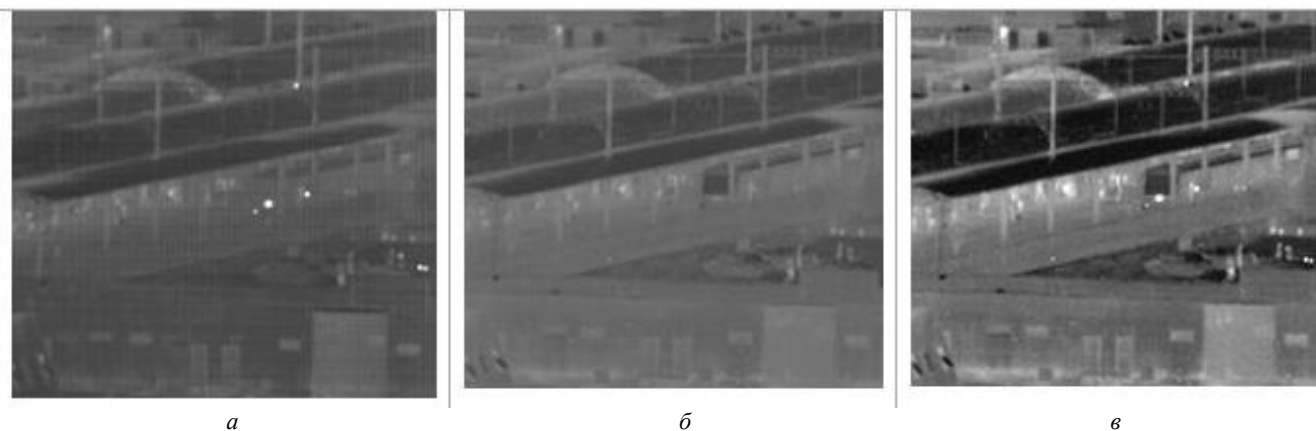
Рис. 4. Главное окно приложения DualBandRadiometer

Эти области являются неактивными, и их вид зависит от состояния каналов (яркость и контраст изображений настраиваются с помощью предоставленной функциональности приборов, образующих каналы — ручки регулировки, пульта управления и т. п.) в отличие от центральной части, позволяющей производить подстройку яркости и контраста итогового изображения сцены.

*Техническая характеристика разработанной двухдиапазонной системы*

Спектральный диапазон рабочих длин волн, мкм.....	3—5 и 8—12
Температурная чувствительность (3—5/8—12 мкм), К, не более.....	0,06/0,07
Формат тепловизионного кадра.....	256×256
Мгновенное поле зрения, мрад.....	4,3
Частота кадров, Гц, не менее.....	100
Разрядность, бит.....	12
Интерфейс передачи данных.....	USB 2.0

На рис. 5, а—в приведены примеры изображений, полученных с помощью двухдиапазонной системы. Стоит обратить внимание, что на синтезированном изображении хорошо видны детали каждого из исходных изображений, причем это особенно заметно на примере электрички.



**Рис. 5. Изображения железнодорожной платформы "Выхино" в диапазонах 3—5 мкм (а), 8—12 мкм (б) и результат синтеза по алгоритму обработки слабоконтрастных изображений (в)**

Одним из важных этапов при создании двухдиапазонной системы было сведение каналов, поскольку синтез изображения в двухдиапазонных системах возможен только при условии совпадения пикселей изображения канала 3—5 с пикселями изображения канала 8—12 мкм. В разработанной двухдиапазонной системе сведение каналов осуществляется в два этапа: предварительное сведение, которое производится путем подвижек самих каналов и спектроделителя, и окончательное, производимое с помощью специального модуля программного обеспечения.

При работе системы в режиме тепловизора — радиометра часто необходимо решать вопрос об

изменении динамического диапазона. Существует несколько вариантов изменения динамического диапазона системы: введение в оптический тракт ирисовых диафрагм, введение в оптический тракт нейтральных ослабляющих фильтров, а в случае применения МФПУ, работающих в режиме Snapshot, за счет изменения времени накопления в элементе. Для ИК-систем применение ирисовых диафрагм нецелесообразно по двум основным причинам: они могут создавать постоянный фон на МФПУ, поскольку сами излучают в ИК-диапазоне, и уменьшают относительное отверстие оптического тракта, тем самым значительно увеличивают пятно рассеяния. Создание нейтральных фильтров для ИК-диапазона также сложная технологическая задача, так как довольно тяжело получить фильтр необходимого ослабления с равномерной спектральной характеристикой.

В разработанной системе был применен третий метод изменения динамического диапазона: изменение времени накопления в элементе МФПУ. Экспериментальные исследования показали, что, изменяя время накопления, можно увеличить динамический диапазон системы в несколько десятков раз.

Для определения сфер применения разработанного макета были проведены полевые исследования в различных метеоусловиях, апробированы различные алгоритмы двухдиапазонной обработки, собрана база данных фоноцелевой обстановки.

**Заключение**

Представленные результаты разработки двухдиапазонного (3—5 и 8—12 мкм) тепловизионного прибора на основе серийно выпускаемых во ФГУП «НПО "Орион"» матричных фотоприемных модулей из InSb и CdHg<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> формата 256×256 элементов показывают перспективность избран-

ных схемных и технических решений для создания отечественных тепловизоров широкого применения.

Указанная работа проводилась при поддержке  
Российского фонда фундаментальных  
исследований (грант РФФИ №10-07-00303  
и № 10-07-00253).

#### Л и т е р а т у р а

1. *Whitenton Eric*. Simultaneously visible and thermal imaging of metals during machining // Proc. of SPIE. V. 5782.
2. *Хадсон Р.* Инфракрасные системы. — М.: Мир, 1972.
3. *Ллойд Дж.* Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978.
4. *Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г.* Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. — М.: Логос, 2007.
5. *Williams George M., Barter Archie*. Dual-Band MWIR/LWIR Radiometer for Absolute Temperature Measurements // Proc. of SPIE. 2006. V. 6205. P. 62050M.

## Dual-band thermal imaging system for spectral ranges 3—5 and 8—12 $\mu\text{m}$

*L. I. Gorelik*<sup>1</sup>, *E. V. Drogaitseva*<sup>1,2</sup>, *A. V. Polesskiy*<sup>1</sup>,  
*A. V. Sidorin*<sup>1,2</sup>, *V. N. Solyakov*<sup>1,3</sup>, *D. Yu. Trenin*<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru opus48@mail.ru

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow region, Russia

*Results of development of dual-band (3—5 and 8—12  $\mu\text{m}$ ) thermal imaging device have been represented. The device was made on the basis of the InSb and CdHg<sub>1-x</sub>Te<sub>x</sub> photodetector arrays with 256×256 format which are manufactured by Orion R&P Association.*

PACS: 42.30.Va

*Keywords:* dual-band thermal imager, pyrometer, MWIR/LWIR, photodetector, focal plane array.

Bibliography — 5 references.

*Received November 22, 2010*