

ИТМО

**Г.С. Мельников, С.В. Михеев, А.Ю. Карузин,
В.В. Коротаев, В.М. Самков, В.А. Тупиков**

ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Санкт-Петербург 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

**Г.С. Мельников, С.В. Михеев, А.Ю. Карузин,
В.В. Коротаяев, В.М. Самков, В.А. Тупиков**

ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки 12.04.02 ОпTOTехника
в качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

ИТМО

Санкт-Петербург
2024

УДК 621.833

ББК 34.92

Т34

Т34 Тепловизионные системы. Г.С. Мельников, С.В. Михеев, А.Ю. Карузин, В.В. Коротаев, В.М. Самков, В.А. Тупиков / Под ред. профессора В.В. Коротаева. – СПб: Университет ИТМО, 2024. – 152 с.

Рецензент:

Новиков Игорь Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д.Ф. Устинова.

Излагаются физические основы тепловидения, состояние развития элементной базы, основы построения тепловизионных приборов, их сравнение по зарубежным и отечественным публикациям.

ИТМО

ИТМО (Санкт-Петербург) – национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ИТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализуется программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития – научно-образовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд – в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере ИТ. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

ISBN 978-5-7577-0716-7

© Университет ИТМО, 2024

© Г.С. Мельников, С.В. Михеев, А.Ю. Карузин,
В.В. Коротаев, В.М. Самков, В.А. Тупиков, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	6
1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ.....	7
1.1. Назначение и принцип работы тепловизионных систем	7
1.2. Хронология развития тепловидения	10
1.3. Основные законы теплового излучения	15
1.4. Диапазоны оптического излучения и их использование в тепловидении	17
1.5. О методах расчета и проектирования тепловизоров	19
1.6. Основные направления развития тепловизионных систем	20
2. МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ....	28
2.1. Тенденции развития фотоприемников видимого и ИК диапазонов	28
2.2. Полупроводниковые материалы матричных фотоприемников	29
2.3. Полупроводниковые матричные фотоприемники	32
2.4. Микроболометрические матричные фотоприемники	34
2.5. Системы охлаждения фотоприемников	36
3. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ	40
3.1. Обоснование разработки многоканальных тепловизионных систем ...	40
3.2. Принципы построения многоканальных тепловизионных систем	41
3.3. Комплексование каналов наблюдения для создания всепогодных помехоустойчивых тепловизионных систем.....	42
3.4. Выбор спектральных диапазонов	44
3.5. Комплексование каналов видимого и ИК диапазона	48
3.6. Универсальный объектив для комплексованных систем	51
3.7. Перспективы комплексования ИК и ТГц каналов наблюдения.....	58
3.8. Комплексование LWIR, VLWIR и FIR диапазонов	59
3.9. Двухканальные приборы с совмещением изображений	63
3.10. Проблема совмещения изображений и возможности ее решения	65
4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОЙ ПОДСВЕТКИ	71
4.1. Лазерная подсветка в тепловизионных системах	71
4.2. Зарубежные разработки лидарных систем	74
4.3. Отечественные разработки лидарных систем	79
4.4. Пассивные сканирующие тепловизионные системы	83
4.5. Активно-пассивные тепловизионные системы	86
5. ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМ ПЕРВОГО–ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЙ .	92
5.1. Тепловизионные системы первого и второго поколений	92
5.2. Тепловизионная измерительная система радиометра авиационного базирования.....	95

5.3. Тепловизионные системы третьего поколения	114
5.4. Четырехспектральный сканирующий радиометр	115
6. УМЕНЬШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ	127
6.1. Малогабаритные тепловизионные системы зарубежного производства	127
6.2. Малогабаритные тепловизионные системы отечественного производства	132
6.3. Камеры, работающие в видимом и SWIR диапазонах	134
6.4. Камеры, работающие в LWIR диапазоне	135
7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ	137
7.1. Анализ методов цифровой обработки изображений с учетом фоно-целевой обстановки.....	137
7.2. Обработка тепловизионных изображений методом микросканирования.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	141

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
АЧТ – абсолютно черное тело
ГОИ – Государственный оптический институт
ИК – инфракрасный
КРТ – соединение кадмий–ртуть–теллур
КПД – коэффициент полезного действия
МБМ – микроболометрическая матрица
МДВ – метеорологическая дальность видимости
МЧС – министерство чрезвычайных ситуаций
ОЭП – оптико-электронный прибор
ОЭС – оптико-электронная система
ПВМ – пространственно-временной модулятор оптического излучения
ПЗС – прибор с зарядовой связью
РЛС – радиолокационная станция
ТВ – телевизионный
ТПВ – тепловизор/тепловизионный
УФ – ультрафиолетовый
ФПУ – фотоприемное устройство
ФРЛ – функция рассеяния линии
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭОП – электронно-оптический преобразователь
3D (3-dimensional) – трехмерное пространство/графика
FLIR (Forward Looking Infrared Radar) – «впередсмотрящая инфракрасная система»
FPA (Focal Plate Area) – «одновременно смотрящие» – фокально-плоскостные фотоприемники
GPS (Global Positioning System) – глобальная система позиционирования
LWIR (Long-Wavelength Infrared) – длинноволновое инфракрасное излучение
MWIR (Medium-Wavelength Infrared) – средневолновое инфракрасное излучение
NEP (Noise-Equivalent Power) – порог чувствительности в единичной полосе частот
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – эквивалентная шуму разность температур
NIR (Near Infrared Radiation) – ближнее инфракрасное излучение
PAL (Phase Alternating Line) – система аналогового цветного телевидения с построчным изменением фазы
QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector) – фотоприемники на основе структур с квантовыми ямами
SPRITE (Signal Processing In The Element) – обработка сигнала внутри элемента
SWIR (Short-Wavelength Infrared) – коротковолновое инфракрасное излучение
T2SL (Type-II Superlattice) – фотоприемники InAs/GaSb по технологии сверхрешеток типа II
UV (ultraviolet) – ультрафиолетовое оптическое излучение
VIS (Visible) – видимое оптическое излучение, свет

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии изложены физические основы тепловидения, а также показано состояние элементной базы тепловизионных приборов на основе зарубежных и отечественных публикаций. В нем достаточно подробно описаны основные процессы, происходящие в элементной базе систем тепловидения, технические и технологические приемы их построения.

Пособие предназначено для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования (магистратуры) при изучении дисциплин «Инфракрасная техника», «Тепловидение», «Системы локации», «Оптико-электронные приборы и системы».

В литературе неплохо раскрыты различные аспекты применения инфракрасной (ИК) техники с широким охватом, начиная с описания законов теплового излучения и до практического применения, однако редко приводятся ретроспективный анализ развития ИК техники и практические схемы различных ее узлов. Данное пособие восполняет этот пробел.

Пособие целесообразно применять в учебном процессе параллельно со специализированной литературой, которая раскрывает конкретные практические аспекты применения ИК техники. Представленный теоретический базис и практические примеры предполагают самостоятельное совершенствование компетенций студентов в сфере построения и применения ИК техники.

Рекомендации преподавателям:

- пособие целесообразно применять при подготовке и проведении всего лекционного курса;
- материалы пособия можно использовать как базовую основу при подготовке и проведении практических занятий.

Рекомендации студентам:

- после каждой лекции во время самостоятельной работы для закрепления материала желательно составлять опорный конспект кратких ответов на вопросы самопроверки;
- целесообразно анализировать представляемый материал, сравнивая его с научными статьями, отражающими современный уровень развития ИК техники.

1. ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

1.1. Назначение и принцип работы тепловизионных систем

Зрительный аппарат является уникальным инструментом, позволяющим человеку и животным ориентироваться в окружающем пространстве и познавать его. Более 95% информации, поступающей в мозг человека, формируется его зрительным аппаратом. Поступающее в глаз оптическое излучение видимого спектрального диапазона (свет) преобразуется в энергию нервных импульсов, которые обрабатываются мозгом человека и позволяют не только познавать окружающее пространство и ориентироваться в нем, но и принимать решения для различных действий, в том числе для активного воздействия на окружающий мир.

Глаз – уникальный по функциональности приемник оптического излучения, который за счет своих адаптационных возможностей преобразует свет в диапазоне яркостей от 2×10^{-6} до 2×10^5 кд/м, т.е. его относительный яркостный диапазон составляет 10^{11} . В то же время спектральный диапазон зрения человека достаточен узок: мы воспринимаем оптическое излучение в диапазоне длин волн электромагнитного излучения примерно от 0,38 мкм до 0,78 мкм, который называется светом. Этот спектральный диапазон чувствительности сформировался в процессе эволюции человека под влиянием излучения естественного источника, которым является Солнце. Максимум чувствительности человеческого глаза примерно соответствует максимуму солнечного излучения.

Однако собственное излучение большинства предметов окружающего нас мира связано со степенью их нагрева и не регистрируется органами зрения. Человек начинает видеть нагретые участки объектов только при достижении ими определенной температуры, когда часть спектра их излучения попадает в темно-красную зону диапазона видимого света:

- 800° ($\lambda_{\text{макс}}=2,7$ мкм) при неярком дневном освещении;
- 600° ($\lambda_{\text{макс}}=3,2$ мкм) в затемненном помещении;
- 420° – 450° ($\lambda_{\text{макс}}=6,9$ – $6,4$ мкм) после 15-минутной адаптации в полной темноте.

Оптическое излучение с длиной волны более 0,78 мкм называется инфракрасным (ИК). Регистрация ИК излучения объектов материального мира позволяет получить информацию об их температуре. Визуализация ИК изображений позволяет определить распределение температуры в пределах наблюдаемой сцены.

Человек регистрирует ИК излучение за счет нагрева кожного покрова, воспринимая его как ощущение «тепла», исходящего, например, от печки или иного нагретого объекта, но кожный покров не позволяет его визуализировать.

Как писал М.М. Мирошников [1], «...все предметы материального мира являются источниками оптического излучения. В оптических сигналах содержится информация о размерах, форме, положении и энергетическом состоянии тел. Эта информация может использоваться различным образом, однако во всех

случаях в процессе ее использования происходит преобразование энергии оптического излучения в другие виды энергии».

Развитие оптики как науки об оптическом излучении, т.е. электромагнитном излучении в диапазоне от 1 нм до 1 мм [2], и его взаимодействии с веществом привело к появлению технических средств (элементов, приборов и систем), которые позволяют регистрировать оптическое излучение во всем спектральном диапазоне, в том числе формировать и обрабатывать изображения в видимом (0,38–0,78 мкм), в ИК (0,78–1000 мкм) и в ультрафиолетовом (0,001–0,38 мкм) диапазонах оптического излучения.

Одним из важнейших разделов оптики является тепловидение – направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабо нагретых объектов. Тепловидение описывает характеристики тепловых полей и соответствующего им ИК излучения, формирование ИК изображений и их преобразование в совокупность электрических сигналов, которые могут быть подвергнуты последующей обработке.

Техническую реализацию тепловидения осуществляют тепловизоры (термографы) – приборы, которые позволяют наблюдать или измерять распределение температуры в пределах наблюдаемой сцены [3].

Обработка ИК изображений в тепловизорах и тепловизионных системах (ТПВ) позволяет формировать информационные, информационно-измерительные и управляющие сигналы в различных системах бытового, научного, промышленного и иного назначения.

Тепловизоры относятся к оптико-электронным приборам (ОЭП) пассивного типа, работающим в ИК диапазоне спектра излучения.

Оптико-электронными называют приборы, в которых информация об исследуемом или наблюдаемом объекте переносится оптическим излучением (содержится в оптическом сигнале), а ее первичная обработка сопровождается преобразованием энергии оптического излучения в энергию электрического сигнала. С этой целью используются приемники оптического излучения (фотоприемники) – элементы или устройства, предназначенные для преобразования энергии оптического излучения в другие виды энергии (электрическую, тепловую, энергию химического процесса, энергию нервных импульсов).

После преобразования в фотоприемнике информация об излучающем объекте содержится в параметрах электрического сигнала – амплитуде, частоте, фазе, длительности импульсов и т.д. Эта информация подвергается обработке по заданному алгоритму и передается оператору или используется для автоматического управления наблюдаемым процессом.

Обобщенная структурная схема тепловизора представлена на рис. 1.1. Излучение объекта поступает во входной зрачок оптической системы, которая строит его изображение на чувствительной площадке фотоприемника. Фотоприемник преобразует оптический сигнал в электрический. Электрический сигнал преобразуется в электронном тракте и поступает в выходной блок, в качестве которого может выступать монитор, визуализирующий изображение объекта,

или устройство управления параметрами объекта, например, его температурой или распределением температуры, что характерно для систем управления технологическими процессами.

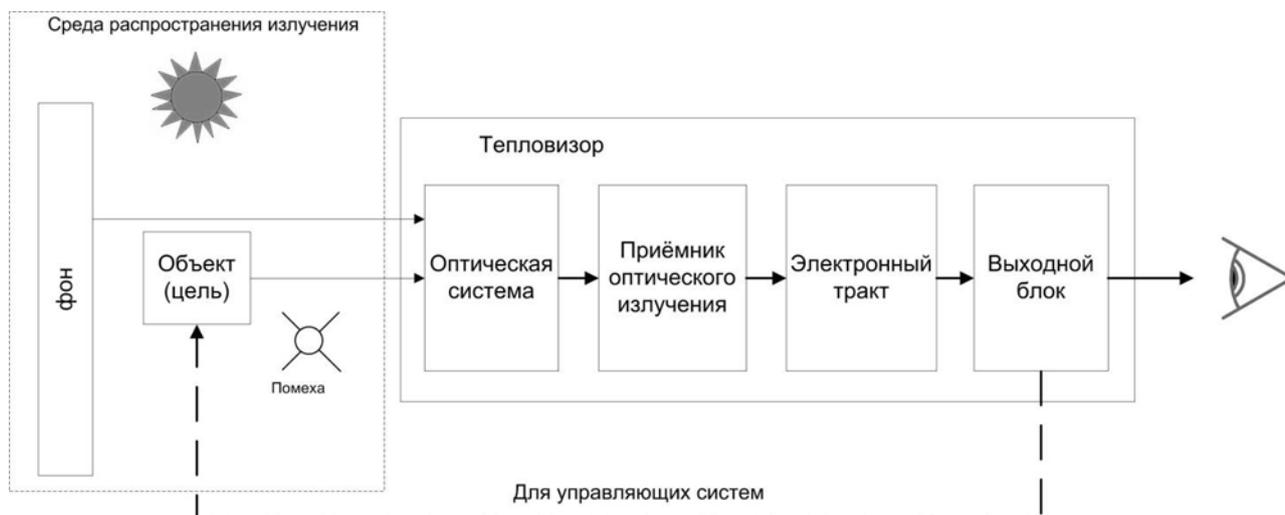


Рис. 1.1. Обобщенная структурная схема тепловизора

В реальной обстановке, кроме собственного излучения объекта, во входной зрачок поступает излучение внешних источников (например Солнца), как прямое, так и отраженное от объекта, а также излучение фона (собственное и отраженное), расположенного за объектом, и помех, попадающих в поле зрения прибора.

Рассмотрим типичную ситуацию – с помощью тепловизора осуществляется наблюдение за человеком. Человек как объект наблюдения находится в поле зрения тепловизора. Но, кроме него, в поле зрения тепловизора присутствует фон, например деревья. Между объектом и тепловизором могут присутствовать помехи, например кусты, которые также попадают в поле зрения. Объект, фон и помехи освещаются источниками фонового излучения, например Солнцем. Таким образом, во входной зрачок оптической системы тепловизора поступает излучение объекта (собственное и отраженное), фона (собственное и отраженное) и помех. Во входной зрачок оптической системы также попадает прямое солнечное излучение. Если Солнце не находится в поле зрения тепловизора, то всегда присутствуют блики, обусловленные отражением излучения от оправы объектива и других элементов конструкции, которые также создают помехи.

В результате на фотоприемник поступает как собственное излучение объекта (оптический сигнал), так и смесь составляющих, обусловленных отраженным от объекта, а также собственным и отраженным излучением фона, помех и внешних источников. Элементы тепловизора, представленные на рис. 1.1, должны выполнить выделение полезного сигнала, обеспечивающее решение функциональной задачи ТПВ с заданными параметрами качества.

Основные функции элементов тепловизора распределяются следующим образом.

Оптическая система, как правило, содержит объектив и спектральный фильтр. Объектив строит изображение объекта в зоне анализа. Спектральный фильтр выделяет излучение в заданном спектральном диапазоне. Фотоприемник преобразует оптический сигнал в электрический, т.е. он является и последним элементом оптической системы, и первым элементом электронного тракта обработки сигнала. При этом и объектив, и спектральный фильтр, и фотоприемник формируют спектральную характеристику тепловизора в целом, которая должна обеспечить достаточное для последующей обработки превышение сигнала над шумами и помехами.

Функция преобразования сигнала в электронном тракте может иметь совершенно разный вид в зависимости от назначения и требуемых параметров качества выходного сигнала, а также принятых алгоритмов его обработки.

При визуализации распределение температуры наблюдаемой сцены отображается на дисплее как черно-белое изображение с различными значениями яркости или как цветное изображение, на котором различным значениям температуры соответствуют разные цвета.

1.2. Хронология развития тепловидения

Считается, что тепловидение началось с известного опыта Уильяма Гершеля в 1800 г. У. Гершель работал над защитой своих глаз от солнечного света и обнаружил эффект нагрева ртутного термометра, который был расположен за красной полосой спектра [4].

Однако и до этого опыта были работы, показывающие, что спектр оптического излучения заключен не только в диапазоне видимого спектра. Гипотезу о существовании невидимых тепловых лучей высказывал в своем сочинении «О природе вещей» еще Тит Лукреций Кар, живший до нашей эры. В 1790 г. М. Пикте опубликовал описание своего опыта по фокусировке тепла и холода. До работ Гершеля в 1758 г. М.В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения (*tubo noctoptico*), а в 1762 г. создал зеркала с высокой отражающей способностью. В 1829 г. Л. Нобили создал первую термопару, работа которой была основана на термоэлектрическом эффекте, открытом Т. Зеебеком в 1821 г. Несколько лет спустя М. Меллони удалось с помощью термостолбика зарегистрировать тепловое излучение человека на расстоянии до 3 м.

Новый этап тепловидения начался с изобретения в 1857 г. А. Сванбергом нового фотоприемника ИК излучения – болометра. Усовершенствование этого прибора позволило Л. Ленгли в 1880 г. регистрировать тепловое излучение животных на расстоянии до 400 м.

В 1895 г. российский физик П.Н. Лебедев, прославившийся исследованием светового давления, предложил вакуумный термоэлемент, который оставался длительное время самым чувствительным фотоприемником.

В 1898 г. другой известный российский физик, А.Г. Столетов, разработал газонаполненную фотоячейку, работавшую на основе внешнего фотоэффекта.

Начало XX-го века можно охарактеризовать бурным развитием тепловизионной техники. Появились первые рабочие ИК системы, которые могли обнаруживать людей и технические объекты на расстояниях до километров. Был создан популярный фотоприемник на основе сернистого таллия.

В 1900 г. произошло второе рождение ИК техники – уже в качестве строгой научной дисциплины. Это было обусловлено, с одной стороны, фундаментальными исследованиями М. Планка, А. Эйнштейна, Г. Кирхгофа, Б.Б. Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения, а с другой стороны – прогрессом в технологии ИК фотоприемников. Патентная литература начала XX-го века содержит множество предложений по созданию ИК приборов для обнаружения кораблей, самолетов и людей, а также систем связи и автоматического наведения на цель средств поражения.

В 1917–1920 гг. Т. Кейз создал фоторезисторы для ближнего ИК диапазона. Эти фотоприемники использовались в системе связи, принятой Германией на вооружение в 1935 г.

Перед Второй мировой войной начались систематические исследования воздействия теплового излучения на твердотельные фотоприемники. Были разработаны охлаждаемые фоторезисторы на основе сульфида свинца. Объем их выпуска в Германии достигал 4 тысяч штук в месяц.

В 1941 г. в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ, СССР) С.М. Лучинин разработал первый в мире быстродействующий полупроводниковый болометр. Первые эксперименты по обнаружению военных кораблей были проведены в г. Ленинграде С.И. Покровским, Б.П. Козыревым, В.А. Гуровым и др. еще в 1927 г. К 1934 г. были созданы отечественные береговые системы обнаружения, которые использовали фокусирующие зеркала диаметром до 1,5 м и термоэлементы.

В годы Второй мировой войны в СССР системы ИК обнаружения были использованы при охране конвоев союзников, а в армию поступили первые образцы приборов ночного видения, разработанных под руководством С.М. Николаева. В Берлинском университете в те же годы был создан первый тепловизор – эвапорограф «ЭВА».

В 1946 г. появились люминесцентные преобразователи (метаскопы), которые, не получив дальнейшего распространения, были вытеснены оптико-механическими устройствами.

Часто считают, что прообразом тепловизоров с оптико-механическим сканированием является бортовая ИК система фирмы Barnes, США, созданная в 1954 г. и положившая начало так называемым «впередсмотрящим» ИК системам (Forward Looking Infrared Radar – FLIR), размещаемым на летательных аппаратах. В этих тепловизорах была предусмотрена только строчная развертка сцены.

В СССР в 1961 г. М.М. Мирошников продемонстрировал тепловой след, оставшийся через 30 минут от человека, лежавшего на деревянном полу. Было возможно различить контуры тела благодаря уникальной для тех лет температурной чувствительности – 0,03°C.

Первые измерительные тепловизоры (англоязычный термин – scanning radiometers, т.е. сканирующие радиометры) появились в 1960-х гг. в качестве побочного продукта военных разработок.

В 1970-х гг. шведская фирма AGA выпустила первый портативный измерительный тепловизор, Thermovision-650, больше напоминающий телескоп. Следующая коммерческая модель имела массу 35 кг, требовала охлаждения фотоприемника жидким азотом и также была далека от последующих портативных приборов. В 1986 г. фирма отказалась от охлаждения ИК фотоприемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрический холодильник, а также встроенный процессор для расчета температуры и калибровки в реальном времени.

В 1960-е гг. благодаря работам М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского и других происходило становление отечественного тепловидения. М.М. Мирошников и М.А. Собакин с сотрудниками выполнили фундаментальные исследования в области медицинского тепловидения с помощью системы, обладавшей температурным разрешением $0,3^{\circ}\text{C}$ и временем кадра 15 мин. Эти работы основывались на пионерных исследованиях Н.Н. Красногорского (1942 г.) и Р. Лоусона (1956 г.) по применению тепловидения в медицине.

Отечественные разработки в 1980–1990-х гг. развивались по нескольким направлениям. Прежде всего, в ГОИ им. С.И. Вавилова под руководством М.М. Мирошникова разрабатывалась оригинальная теория оптико-электронных приборов и систем, на основе которой совместно с Азовским оптико-механическим заводом были созданы тепловизоры как военного, так и гражданского применения – «Филин», «Рубин», «Алмаз», «Радуга», «Статор», «Вулкан» и их модификации [4]. Параллельно в НИИ «Исток» А.Г. Жуков разрабатывал концепцию отечественного тепловизора ТВ-03, которая повторяла основные технологические идеи ранних тепловизоров фирмы AGA и потребовала создания отечественной элементной базы.

Основными проблемами того периода было налаживание производства фотоприемников на основе InSb и HgCdTe, оптических материалов ИК диапазона (кремния, германия и ИК стекол), а также прецизионных оптико-механических систем сканирования.

Существенный вклад в разработку отечественной тепловизионной аппаратуры тех лет внесли М.М. Мирошников, Р.Н. Иванова, Е.Н. Минеев, А.Г. Жуков, П.Ф. Тимофеев, А.И. Горячев, И.И. Таубкин, В.Е. Абрамчук, Г.А. Падалко, Н.Д. Куртев, В.И. Хахин, А.В. Кормушкин, С.С. Воронцов, В.Г. Федчишин, С.П. Морозова, П.А. Морозов и др.

Приведем хронологию развития ИК техники и тепловидения [5, 6].

1758 г. – М.В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения.

1762 г. – М.В. Ломоносов создал зеркала с высокой отражающей способностью.

1800 г. – У. Гершель открыл ИК излучение, названное им «тепловыми лучами».

1821 г. – Л. Нобили изобрел термопару.

- 1840 г. – Д. Гершель получил видимое изображение ИК излучения, проектируя солнечный спектр на поверхность тонкой бумаги, покрытой углеродной сажой и смоченной спиртом.
- Конец XX-го века – П.Н. Лебедев и А.Г. Столетов проводят исследования в области внешнего фотоэффекта.
- 1900 г. – М. Планк открыл основной закон теплового излучения.
- 1905 г. – изготовлена фотопленка, чувствительная к излучению с длиной волны до 800 нм.
- 1927 г. – в СССР проводятся исследования С.И. Покровского, Б.П. Козырева, В.А. Гурова по ИК обнаружению военных кораблей.
- 1929 г. – М. Черни создал «эвапорограф» в качестве первого ИК термографа.
- 1932 г. – У. Адамс и Т. Данхэм получили первое свидетельство наличия CO₂ в атмосфере Венеры путем ИК фотографирования отраженного солнечного излучения.
- 1934 г. – Д. Холст с сотрудниками разработал электронно-оптический преобразователь (ЭОП) на длины волн до 1,5 мкм.
- 1942 г. – в Форте Бельвуар, США, продемонстрировано первое военное применение ИК визуализирующей системы.
- 1946 г. – в США разработан первый военный ИК строчный сканер со временем кадра 1 ч.
- 1954 г. – в США разработан ИК сканер со временем кадра 45 мин.
- 1958 г. – в США разработан первый ИК прицел для военных применений.
- 1950–1960 гг. – в США разработан первый коммерческий эвапорограф.
- 1960-е гг. – ИК сканеры создают изображения за 5 мин в исследованиях М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского, М.А. Собакина. Происходит становление российского тепловидения.
- 1961 г. – П. Линдберг и Х. Холмберг разработали сканирующую систему с использованием вращающихся призм.
- 1964 г. – фирма Texas Instruments разработала первую «впередсмотрящую» (FLIR) ИК систему.
- 1965 г. – на рынке появился первый коммерческий ИК тепловизор AGA-650 (фирма AGA, Швеция).
- 1967 г. – фирмой AGA получена первая электронная цветная термограмма.
- 1972 г. – в США разработан измерительный двухканальный ИК тепловизор Dynarad 210.
- 1973 г. – в Швеции разработан портативный ИК тепловизор AGA 750 с питанием от аккумуляторов.
- 1974 г. – в США разработан малогабаритный («ручного» применения) ИК тепловизор Hushes Probeye.
- 1977 г. – в США разработан ИК тепловизор Inframetrics 510 с телевизионным выходом.
- 1978 г. – в Швеции разработан двухканальный аналоговый ИК тепловизор AGA-780 для научных исследований, работающий в реальном времени.

- 1970–1980 гг. – в СССР разработаны тепловизоры «Факел», «Рубин», ТВ-03, «Радуга», ИФ-10ТВ, АТП, «Лазеровизор».
- 1980 г. – разработан длинноволновый пироэлектрический видеокон ISI VideoTherm.
- 1984 г. – в США разработан портативный ИК тепловизор Inframetrics 600 с питанием от аккумуляторов и измерением температуры в реальном времени.
- 1987 г. – в Швеции разработан одноблочный ИК тепловизор AGEMA 470 со встроенной цифровой записью термограмм.
- 1987 г. – в Японии разработан первый тепловизор Mitsubishi IR-5120 на матричном ИК FPA-фотоприемник (Focal Plate Area) с холодильником Стирлинга.
- 1990 г. – в СССР разработаны охлаждаемые линейки фотоприемников, предназначенные для использования в тепловизорах военного применения.
- 1993 г. – в США разработан малогабаритная FPA ИК камера InfraCAM фирмы Inframetrics на стандартных аккумуляторах с холодильником Стирлинга.
- 1995 г. – в США разработан полнофункциональный тепловизор камкордерного исполнения ThermaCAM фирмы Inframetrics со встроенными измерительными функциями и цифровой записью.
- 1997 г. – разработана первая низкостоимостная ИК камера типа snap-shot (ИК фотоаппарат) на базе линейного сканера (Infrared Solutions IR Snapshot).
- 1997 г. – в Швеции разработан тепловизор AGEMA 570 на базе неохлаждаемого болометрического матричного фотоприемника.
- 1999 г. – в США разработан первый коммерческий тепловизор SC 3000 фирмы FLIR Systems на базе фотоприемника на основе структур с квантовыми ямами (QWIP).
- 2000 г. – разработан тепловизор с записью ИК видеоизображений, звука и текста ThermaCAM PM 695 фирмы FLIR Systems, затем модель ThermaCAM P65 той же фирмы.
- 2003–2009 гг. – на рынке появились низкостоимостные измерительные тепловизоры на базе неохлаждаемых FPA, фотоприемников с форматом изображения 80×80 и 160×120 (фирмы FLIR Systems, NEC, Raytek, Irisys и др.), а также тепловизионные модули. Одновременно частота записи термограмм в специальных моделях повысилась до нескольких сотен (в специальных случаях – до тысяч) Герц.
- 2011 г. – начало перехода на ИК-датчики высокой четкости и уменьшение размера пикселей. Появился тепловизор SC 8000 фирмы FLIR Systems для научных исследований с форматом изображения 1240×1024.
- 2014 г. – фирма FLIR Systems представляет первый тепловизор, разработанный специально для смартфонов FLIR ONE.
- 2015 г. – продолжают исследования по уменьшению размера пикселя до 5 мкм при высоком разрешении с форматом 2040×1156.
- 2016 г. – фирма Sofradir объявила об уменьшении размеров элементов ИК-датчиков с 17 до 12 мкм.

- 2017 г. – запущен проект Digital Dual Use Sensor (DDUS) по созданию цифрового ИК-датчика двойного назначения с высоким разрешением 2048×2048 пикселя размером 12 мкм для работы в диапазонах LWIR и MWIR.
- 2021 г. – появились тепловизоры серия Neutrino Performance Series фирмы FLIR Systems с форматом изображения 1280×1024 и 2048×1536 с размером пикселя 12 и 10 мкм соответственно.
- 2022–2023 г. – начато производство неохлаждаемых ИК матричных фотоприемников с размером пикселя 10 мкм и приемлемыми значениями шумов (например, фирма Leonardo DRS и тепловизоры Tenum®640 и Tenum®1280).

1.3. Основные законы теплового излучения

Поскольку первичным источником информации в тепловизоре является оптическое излучение объектов материального мира, рассмотрим основные законы излучения, которым подчиняется тепловое излучение фона, помех и внешних источников. Излучение газоразрядных, люминесцентных, светодиодных источников, а также лазеров описывается другими законами.

Г. Кирхгоф в 1860 г. установил, что отношение излучательной способности любого тела к его поглотительной способности одинаково для всех тел при данной температуре для данной длины волны и не зависит от их формы и химической природы. Другими словами, чем больше тело поглощает, тем больше оно излучает.

Отношение спектральной плотности энергетической светимости тела и его спектрального коэффициента поглощения не зависит от природы тела и является универсальной функцией, определяемой длиной волны излучения и температурой тела:

$$\frac{M_{e\lambda_1 T_1}}{\alpha(\lambda)_{T_1}} = \frac{M_{e\lambda_2 T_2}}{\alpha(\lambda)_{T_2}} = \frac{M_{e\lambda T}}{\alpha(\lambda)_T} = f(\lambda, T) = M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T), \quad (1.1)$$

где $M_{e\lambda T}$ и $\alpha(\lambda)_T$ – спектральная плотность энергетической светимости и спектральный коэффициент поглощения при длине волны λ и температуре T .

Если тело поглощает все падающее на него излучение независимо от длины волны, направления падения и состояния поляризации излучения, $\alpha(\lambda)_T = 1$, то оно называется **абсолютно черным телом (АЧТ)**. Для АЧТ справедливо соотношение

$$\frac{M_{e\lambda T}}{\alpha(\lambda)_T} = f(\lambda, T) = M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T). \quad (1.2)$$

АЧТ – физическая абстракция, у реальных тел $\alpha(\lambda)_T < 1$, следовательно,

$$M_{e\lambda T}(\lambda) = \alpha(\lambda)_T \cdot M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T). \quad (1.3)$$

В 1900 г. М. Планк вывел формулу, определяющую зависимость спектральной плотности энергетической светимости АЧТ от длины волны излучения. Вывод формул основан на представлении, что тепловое излучение генерируется в процессе простого гармонического колебания линейных атомных

осцилляторов не непрерывным образом, а дискретными квантами, энергия E которых является функцией частоты излучения ν : $E = h\nu$, где h – постоянная Планка [3].

Закон Планка выражает зависимость величины спектральной плотности энергетической светимости ЧТ $M_{e\lambda}(\lambda, T)$ от длины волны излучения и температуры:

$$M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)^{-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм}), \quad (1.4)$$

где λ – длина волны излучения в метрах; T – абсолютная температура ЧТ в кельвинах; C_1 и C_2 – постоянные ($C_1 = 3,74150 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мкм}^4$, $C_2 = 1,43879 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$).

Закон Стефана–Больцмана определяет интегральное значение энергетической светимости ЧТ. Его можно получить, взяв интеграл по функции Планка во всем интервале длин волн:

$$M_e^{\text{ЧТ}} = \int_0^{\infty} M_{e\lambda}^{\text{ЧТ}}(\lambda, T) d\lambda = \sigma \cdot T^4 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot T^4, \text{ Вт}/\text{м}^2, \quad (1.5)$$

где σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$.

С учетом излучения окружающей среды избыточная энергетическая светимость ЧТ в установившемся режиме равна

$$\Delta M_e^0 = \sigma \cdot (T^4 - T_{\text{окр}}^4), \quad (1.6)$$

где $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды.

Закон смещения Вина определяет длину волны, при которой имеет место максимальная спектральная плотность энергетической светимости, т.е. максимум функции Планка. Взяв производную функции Планка по длине волны и приравняв ее нулю, получаем уравнение, которое дает следующее решение:

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897}{T}, \quad (1.7)$$

где λ_{max} – длина волны максимальной спектральной плотности энергетической светимости черного тела (в мкм) при заданной температуре T .

Если в формулу Планка (1.5) подставить λ_{max} из закона смещения Вина (1.7), то получим значение максимальной спектральной плотности энергетической светимости ЧТ:

$$M_{e\lambda_{\text{max}}} = C'_\lambda \cdot T^5, \quad (1.8)$$

где $C'_\lambda = 1,315 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мкм} \cdot \text{К}^5)$.

Спектральная плотность энергетической светимости излучения АЧТ в диапазоне температур от 280 К до 320 К показана на рис. 1.2.

Из рис. 1.2 следует, что поток излучения АЧТ быстро возрастает с ростом температуры, при этом максимум спектральной плотности энергетической светимости с увеличением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

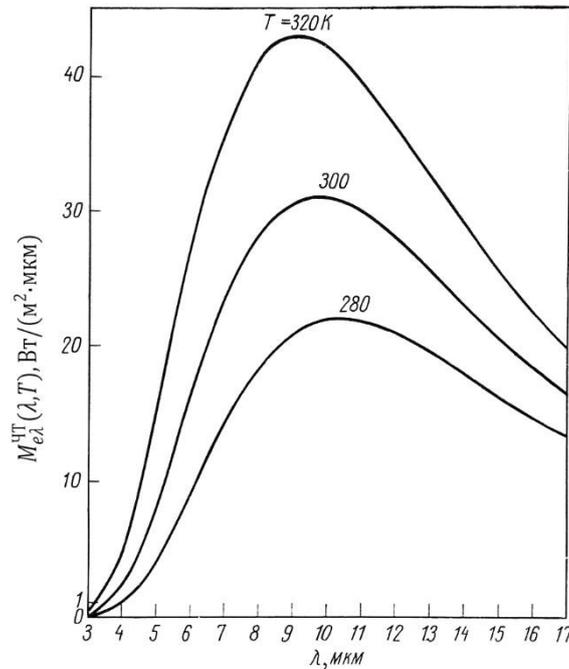


Рис. 1.2. Спектральная плотность энергетической светимости абсолютно черного тела в зависимости от длины волны при различных температурах

1.4. Диапазоны оптического излучения и их использование в тепловидении

Оптическое излучение охватывает интервал от 0,001 до 1000 мкм, и его разбивают на ряд диапазонов. В оптико-электронном приборостроении эти диапазоны определяются сочетанием нескольких факторов: спектральной характеристикой излучения Солнца, физиологическими свойствами человеческого глаза, спектральным пропусканием (окнами прозрачности) атмосферы, а также достигнутыми характеристиками фотоприемников.

Атмосфера обеспечивает хорошую передачу в следующих окнах: 0,3–1,38 мкм; 1,45–1,9 мкм; 2,0–2,7 мкм; 3,0–4,2 мкм; 4,3–5,2 мкм и 7,5–14 мкм (рис. 1.4).

Границы диапазонов излучения весьма условны и в различных источниках определяются по-разному. Примем классификацию, принятую в [7, 8, 9] и приведенную в таблице 1.1.

Видимое излучение (свет) – это область максимума излучения Солнца и чувствительности человеческого глаза.

Видимое (VIS) и ближнее инфракрасное излучение (NIR) – это область чувствительности фотоприемников на основе кристаллического кремния, которые обладают лучшими параметрами и характеристиками в этом диапазоне. Максимум излучения ламп накаливания, температура нити накаливания которых приходится на интервал 2800–3000 К, составляет примерно 1 мкм.

Коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR) приходится на область чувствительности фотоприемников на основе ряда двойных и тройных полупроводников, среди которых можно выделить соединения InGaAs, InSb, InP и ряд других, а также их сочетания.

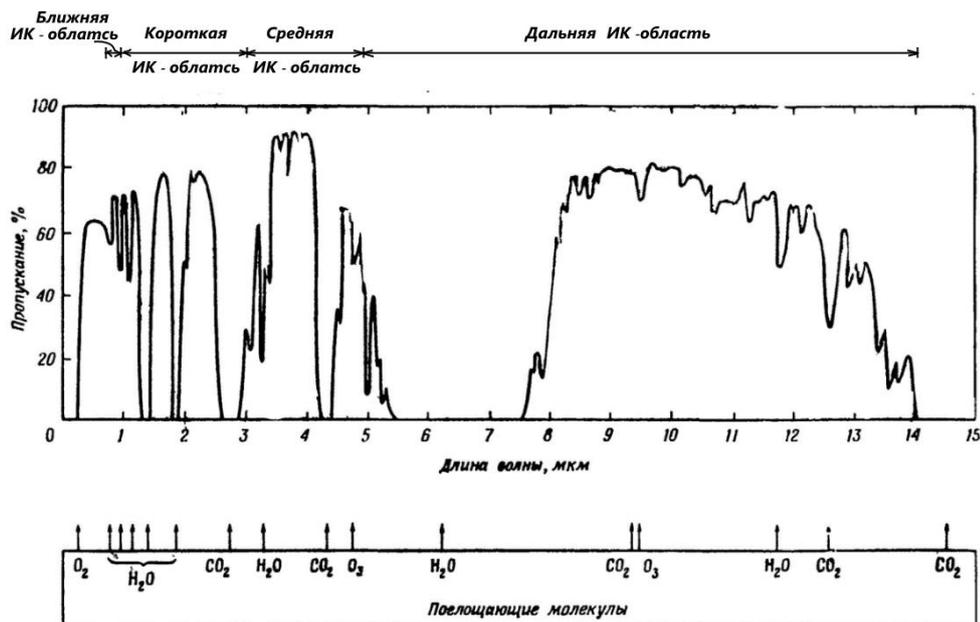


Рис. 1.4. Спектральное распределение пропускания атмосферы на горизонтальной трассе протяженностью 1,8 км на уровне моря при толщине слоя осажденной воды 17 мм [10]

Таблица 1.1. Классификация диапазонов оптического излучения

Длина волны, мкм	Название	Обозначение
0,001–0,025	Экстремальный ультрафиолет (extreme ultraviolet)	EU
0,025–0,2	Вакуумный ультрафиолет (vacuum ultraviolet)	VUV
0,2–0,38	Ультрафиолет (ultraviolet)	UV
0,38–0,78	Видимое оптическое излучение, свет (visible)	VIS
0,78–1	Ближнее инфракрасное излучение (near infrared radiation)	NIR
1–3	Коротковолновое инфракрасное излучение (short-wavelength infrared)	SWIR
3–5	Средневолновое инфракрасное излучение (medium-wavelength infrared)	MWIR
5–14	Длинноволновое инфракрасное излучение (long-wavelength infrared)	LWIR
14–30	Особо длинноволновое инфракрасное излучение (very long wavelength infrared)	VLWIR
30–100	Дальнее инфракрасное излучение (far-infrared)	FIR
100–1000	Субмиллиметровое (терагерцовое) излучение (submillimeter)	SubMM

Средневолновое инфракрасное излучение (MWIR) приходится на область чувствительности фотоприемников на основе соединений InSb, PtSi и ряда других, а также фотоприемников на квантово-размерных ямах (Quantum Well Infrared Photo-detector, QWIP-фотоприемники). Чувствительные элементы в них создаются на основе соединений GaAs/Al_xGa_{1-x}As и некоторых других [11].

Длинноволновое инфракрасное излучение (LWIR) приходится на область чувствительности фотоприемников на основе таких соединений, как кадмий–ртуть–теллур (КРТ), GeHg и болометров на основе оксида ванадия (VO_x-микроболометров), а также QWIP-фотоприемников.

Поскольку диапазон температур большинства окружающих нас предметов материального мира приходится на интервал от –100 С до +700 С, т.е. от 173 К до 973 К, а спектральный состав излучения – на интервал от 1 мкм до 14 мкм, тепловизоры работают в диапазонах SWIR, MWIR, и LWIR-излучения.

Примерное соответствие диапазонов излучения и основных материалов фотоприемников приведено в таблице 1.2.

Таблица 1.2. Диапазоны излучения и основные материалы фотоприемников

Спектральный диапазон, мкм	Название	Материалы фотоприемников
0,38–1,0	видимое (VIS) и ближнее ИК (NIR)	Si, матрицы на лавинных InGaAs-диодах
1–3	коротковолновое ИК (SWIR)	InGaAs, InSb, InP
3–5	средневолновое ИК (MWIR)	InSb, PtSi, GaAs/Al _x Ga _{1-x} As, QWIP-матрицы
8,0–12,0	длинноволновое ИК (LWIR)	микроболометры, КРТ, GeHg, QWIP-матрицы

1.5. О методах расчета и проектирования тепловизоров

При разработке тепловизионных (ТПВ) приборов основными задачами являются обеспечение заданного температурного, спектрального и пространственного разрешения на заданной дистанции при различных атмосферных условиях, а также выявление параметров объектов на изменяющемся фоне и в условиях наличия помех. При этом возникают новые, все более сложные задачи, которые требуют достижения все более высоких требований.

Вопросы расчета ТПВ подробно рассмотрены в классических трудах по тепловидению [1, 3 12–15] и в работах современных исследователей [16–22]. В [13] разработан методологический подход и математическая модель для инженерной оценки основного демаскирующего признака низкотемпературных наземных объектов, их теплового контраста в диапазонах спектра 3–5 и 8–12 мкм, соответствующих «окнам прозрачности» атмосферы. В [23] предложена методика расчета пороговой чувствительности несканирующих тепловизионных приборов, работающих по наклонным атмосферным трассам.

1.6. Основные направления развития тепловизионных систем

ТПВ используются для теплового мониторинга зданий, энергетических систем и машин, для вождения и профилактики транспортных средств, в медицинской диагностике, экологии, системах охраны и предупреждения о пожарах, для обнаружения военных целей и во многих других областях.

Тепловидение давно сформировалось в отдельный раздел науки и технологии, в рамках которых ТПВ непрерывно совершенствуются. Основные направления развития ТПВ можно объединить в следующие группы:

- использование новых и модификации существующих фотоприемников;
- создание многоканальных ТПВ;
- использование активной подсветки;
- уменьшение массогабаритных показателей;
- использование возможностей цифровой обработки информации.

Использование новых и модификации существующих фотоприемников. Поколения ТПВ. Характеристики фотоприемников играют исключительно важную роль в реализации технических и энергетических возможностей ТПВ. В соответствии с ними принято делить ТПВ на поколения [24, 25]:

- нулевое поколение основано на применении единичных охлаждаемых фотоприемников и двумерной (строчной и кадровой) развертки с помощью сканирующей оптико-механической системы;
- первое поколение – на применении строчных линеек фотоприемников и упрощенной кадровой развертки;
- второе поколение – на использовании нескольких (от 2 до 6) сгруппированных линеек с временной задержкой, накоплением и низкоскоростной системой развертки; ко второму поколению также относят вакуумные приборы с электронным сканированием приемной мишени – пировидиконы;
- третье поколение основано на применении «одновременно смотрящих» – фокально-плоскостных (Focal Plate Area, FPA) и двумерных твердотельных многоэлементных (матричных) фотоприемников, т.е. без использования оптико-механических систем развертки.
- четвертое поколение связывают с применением в качестве фотоприемников неохлаждаемых болометрических матриц.

Приборы ночного видения, построенные на электронно-оптических преобразователях (ЭОП), и отдельные виды тепловизоров, как правило, 1-го и 2-го поколений, используются по настоящее время для некоторых специальных задач, как раздельно, так и в системах с комплексированием информации. Однако, учитывая, что приборы ночного видения на ЭОП-ах могут решать лишь ограниченный круг задач, основной элементной базой фотоэлектроники стали матричные фотоприемные устройства (ФПУ) и фотоэлектронные модули [5, 26, 27].

В настоящее время разработано и активно используется большое количество тепловизоров средневолнового и длинноволнового ИК поддиапазонов. Идет активная разработка приборов ближнего и коротковолнового ИК поддиапазонов.

Интенсивно развивается направление по созданию комбинированных и комплексированных приборов, сочетающих в своем составе несколько каналов приема УФ, видимого и ИК излучения. Так, ведутся работы по построению тепловизоров, чувствительных в ИК средневолновом и длинноволновом окне прозрачности атмосферы.

Особый интерес проявляется к разработке тепловизоров, чувствительных как в длинноволновом окне прозрачности атмосферы, так и в ТГц диапазоне [28–32].

В системах безопасности в основном используются тепловизоры длинноволнового ИК поддиапазона. Это связано с тем, что на диапазон LWIR приходится максимум излучения тел при температуре окружающей среды, и с наличием неохлаждаемых болометрических фотоприемников указанного диапазона, в то время как большинство фотоприемников MWIR–диапазона – охлаждаемые [33–37].

Для современного этапа развития элементной базы характерны матричные тепловизоры с неохлаждаемыми болометрическими матрицами четвертого поколения, которые широко используются для создания ТПВ:

- тепловизионных и тепlopеленгационных систем для обнаружения и распознавания различных объектов, в том числе космического базирования [24, 25, 38, 39];
- многоспектральных систем для селекции целей и дистанционного зондирования Земли [40, 41];
- систем дальнометрирования, лазерной локации и связи [24, 42, 43];
- обзорно-прицельных станций [24, 25, 33, 44, 45, 46];
- приборов ночного видения [24, 33, 47, 48];
- систем переднего обзора и навигационных систем для авиационной техники [24];
- систем слежения и обнаружения, в том числе для борьбы с терроризмом [44, 47, 49–53];
- систем для оптического высокоскоростного считывания информации с предельно низким уровнем искажений с носителей большой емкости [46, 54, 55];
- систем технического зрения, обеспечивающих функции автоматического опознавания образов в реальном масштабе времени и выдачи управляющих сигналов [45, 47].

Создание многоканальных ТПВ. В настоящее время номенклатура оптических и оптико-электронных приборов, предназначенных для работы в различных условиях (время суток, состояние атмосферы), очень широка. Однако все они имеют свои ограниченные возможности применения вследствие свойственных каждому из них недостатков. В связи с этим создаются многоканальные приборы на базе известных типов одноканальных систем, чтобы в синтезированном приборе недостатки одних каналов компенсировались достоинствами других. Это позволяет обеспечить такой аппаратуре решение поставленных задач круглосуточно (в том числе в полной темноте), в любых погодных условиях, а также при воздействии локальных оптических помех.

Многоканальные приборы по принципам объединения в них отдельных каналов можно подразделить на комбинированные, комплексированные и интегрированные.

Комбинированные системы состоят из двух или нескольких каналов, работающих в различных спектральных диапазонах и объединенных в единой конструкции. Эти каналы имеют одно общее или несколько различных входных окон для разных областей спектра. При этом каждый канал может работать самостоятельно. Изображения выводятся на отдельные дисплеи или на единый дисплей при условии переключения каналов. Совместная обработка информации от отдельных каналов отсутствует. Каналы комбинированных систем могут быть смонтированы в нескольких корпусах, но установленных на едином носителе и имеющих функциональные связи (механические, электрические и др.).

Комплексированные приборы, в отличие от комбинированных, построены из каналов, объединенных как конструктивно, так и на основе совмещения оптических осей (полного или частичного). У них имеется одно входное окно, а информация представляется либо раздельно, либо на общем дисплее. Система смонтирована в едином корпусе. Отдельные каналы могут работать совместно или автономно.

В интегрированных многоканальных приборах отдельные каналы объединены на основе общей оптической схемы, а также системы обработки и представления на единый дисплей интегрированного изображения. Последнее формируется на основе анализа специфических признаков – сигналов с различных каналов, обработки сигналов в реальном масштабе времени в микро-ЭВМ и представления в оптимизированном виде на едином дисплее. Задача эта является достаточно сложной, однако в настоящее время она решается, и это направление развития многоканальных приборов является наиболее перспективным.

Использование различных режимов подсветки. Как показано в п.1.1., источником информации для ТПВ является излучение от анализируемого объекта и фона, которое может быть как собственным, так и отраженным. Это создает разнообразные возможности для повышения эффективности ПВС за счет дополнительной подсветки объекта.

В ТПВ используются три режима подсветки:

- активная оптическая локация;
- полуактивная оптическая локация;
- пассивная оптическая локация.

Хотя дополнительная, т.е. активная, подсветка демаскирует наблюдателя, она может дать больше информации об области наблюдения [56]. Основное преимущество активной подсветки [57] состоит в том, что она позволяет повысить вероятность обнаружения и распознавания при низкой контрастности объекта или в сложных условиях наблюдения. С помощью дополнительной подсветки можно получить дополнительную информацию об объекте, к примеру – расстояние до него.

Активная оптическая локация может проводиться с использованием некогерентных (прожекторных) и когерентных (лазерных) оптических сигналов.

Прожекторная локация использовалась в период первой и второй мировых войн. Отраженные сигналы видимого диапазона наблюдались визуально. Прожекторы обеспечивали большую энергетику излучения, однако его некогерентность снижала возможности угловой концентрации. Прожекторы ИК диапазона используются в системах ночного видения, содержащих преобразователи принятых ИК изображений в видимые.

Лазерная локация появилась в начале 60-х годов в результате создания источников оптического когерентного излучения – лазеров, которые входят в состав локаторов ТПВК. Основным элементом передающего устройства является лазер. Спектральная линия излучения рабочего тела лазера определяет несущую частоту локатора.

Лазерные локаторы имеют следующие области применения [58, 59]:

- измерение дальности и угловых координат движущихся целей: кораблей, самолетов, искусственных спутников Земли и т.д. (лазерные дальнометры, локаторы типа MCMS, PAIS и др.);
- высокоточные измерения скоростей перемещения целей и потоков жидкостей и газов (лазерные доплеровские измерители скоростей и анемометры);
- получение некоординатной информации о целях – параметров поверхности (шероховатости, кривизны), параметров вибрации и движения вокруг центра масс, изображений и др. (многофункциональные лазерные локаторы типа КА-98, Lotaws и др.);
- высокоточное наведение систем оружия (лазерные локаторы подсвета целей, обзора пространства и целераспределения);
- обеспечение стыковки космических аппаратов, посадки самолетов, судовождения (лазерные навигационные системы);
- элементы технического зрения в автоматических и роботизированных системах (системы измерения дальности, формирования изображения, селекции и распознавания целей и др.);
- диагностика параметров и измерение вариаций характеристик окружающей среды, включая атмосферу, а также контроль ее загрязнения продуктами хозяйственной деятельности человека (лидары типа DIAL и др.).

Полуактивная оптическая локация использует явление вторичного излучения (отражения) целями оптических волн от источника естественного интенсивного первичного излучения. Чаще всего таким источником является Солнце. Средства полуактивной локации, основанные на этом принципе, называют оптико-электронными станциями. К средствам полуактивной оптической локации можно отнести также биологические зрительные системы. Пренебрегая фактором использования вторичного излучения, оптико-электронные станции часто относят к средствам пассивной оптической локации.

Пассивная оптическая локация использует собственное оптическое излучение нагретых участков поверхности цели или ионизированных образований в ее окрестности. Известно, что максимум излучения абсолютно черного тела при температуре T (по Кельвину) приходится на длину волны $\sim 2898/T$ мкм. Длина волны, на которую приходится максимум излучения реальных целей, обычно

находится в инфракрасной области спектра (лишь при $T \sim 4000\text{ K}$ максимум совпадает с красной, а при $T \sim 5000\text{ K}$ – с желтой областью видимого спектра). Поэтому средства пассивной оптической локации обычно работают в ближнем ИК диапазоне. К подобным средствам относят ИК пеленгаторы, тепловизоры, тепловые головки самонаведения, пассивные приборы ночного видения и др.

Лазеры, обладая исключительно высокой монохроматичностью и направленностью излучения, вот уже более 30 лет являются одним из основных инструментов в оптических информационных, измерительных и диагностических методиках. В различных областях науки и техники лазеры используются для прецизионного контроля перемещений, в интерферометрии, дальнометрии и локации, в оптических линиях связи и для оптической обработки информации. Использование лазеров в спектроскопии и газоанализе позволило достичь чувствительности и спектрального разрешения ранее не доступных оптическим методам [43].

В 1960–1970-х гг. с были разработаны лидары – лазерные локаторы, работающие в видимом или ближнем ИК диапазонах волн (англ. Lidar, Light Detection and Ranging – обнаружение света и определение дальности). Первоначально лидары в основном использовались в военной технике. Сегодня они с успехом применяются для решения многих задач, например, для мониторинга состояния атмосферы, измерения скорости ветра и т.п. Лидары, установленные в районах аэропортов, измеряют сдвиги ветра на летном поле, завихренность следа самолета и другие атмосферные параметры, знать которые необходимо для обеспечения безопасности взлета и посадки. Хорошие результаты дает применение таких систем для измерения дальности, доплеровской скорости и при формировании изображений объектов, находящихся на летном поле.

Уменьшение массогабаритных показателей. Снижение массогабаритных показателей положительно сказывается на себестоимости, повышении надежности, улучшении характеристик и расширении областей применения ТПВ.

Первые поколения ТПВ с системами сканирования имели массогабаритные показатели по массе от 25–30 кг (системы однозеркального и двухзеркального сканирования) до 60–80 кг (зеркальные системы с переменным углом визирования), при этом для некоторых систем было невозможно изменить угол визирования [60]. В последующих поколениях за счет развития материальной базы удалось снизить массу систем сканирования до приемлемых величин в 10–20 кг. Применение матричных фотоприемников для широкого круга задач позволило отказаться от механического сканирования, что привело к еще большему снижению веса и габаритов. Вес некоторых современных тепловизоров составляет сотни и даже десятки грамм.

Дополнительно улучшить массогабаритные показатели ТПВ с матричными фотоприемниками можно путем использования в оптической схеме асферических дифракционных элементов, что позволяет снизить их массу и размеры на 20–50%.

Использование возможностей цифровой обработки информации. Следующий этап развития ТПВ – это использование дополнительной цифровой

обработки поступающей информации с матричного фотоприемника. При такой обработке можно решать широкий круг задач. Одна из задач – это уменьшение влияния шумов на изображения. Предварительная калибровка позволяет уменьшить влияние неоднородности темновых токов и чувствительности отдельных элементов матричных фотоприемников, а также увеличить отношение сигнал/помеха [61]. В этом случае, например, можно использовать для обработки изображения вейвлет-преобразования.

На рис. 1.6 наглядно показан пример обработки изображения с использованием быстрого трехуровневого вейвлет-преобразования с применением вейвлета типа CDF 9.7 [62]. В численном виде улучшение изображения отражено на графике (рис. 1.7).

Тот же подход позволяет, помимо фильтрации, перейти к выделению интересующих элементов. При этом в некоторых задачах вероятность правильного распознавания объекта существенно повышается [63, 64].



а



б

Рис. 1.6. Пример зашумленных (а) и обработанных (б) кадров из видеопоследовательности

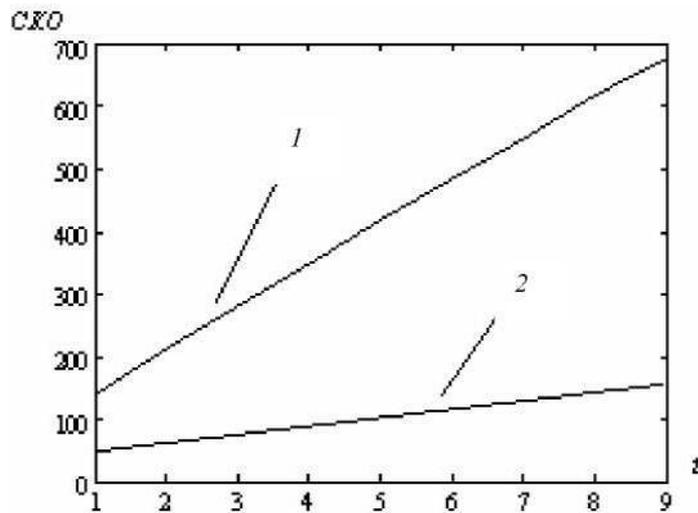


Рис. 1.7. Изменения среднеквадратического отклонения (СКО) по кадрам (в увеличенном временном масштабе): без обработки (кривая 1), с обработкой предложенным алгоритмом (кривая 2)

В комплексированных системах на основе вейвлет-преобразования и других алгоритмов можно объединять изображения ИК и видимого диапазона [65] не только для многоканальных стационарных систем, но и для переносных небольших ТПВ [66], а также интегрировать в ТПВ ряд других операций.

Следующим этапом развития ТПВ является использование алгоритмов машинного обучения для обработки тепловизионного изображения. Таким образом могут решаться задачи поиска дефектов в ближайшем слое различных материалов, как композиционных, так и металлических, поиска дефектов в строительных конструкциях, медицинской диагностики и др. В качестве примера можно привести задачу контроля дорожного покрытия с учетом сезонных изменений, когда по инфракрасному изображению после процедуры глубокого обучения система может сама выделять дефекты покрытия от других артефактов [67].

На рис.1.8 показан пример формируемой разбивки изображения покрытия по категориям.

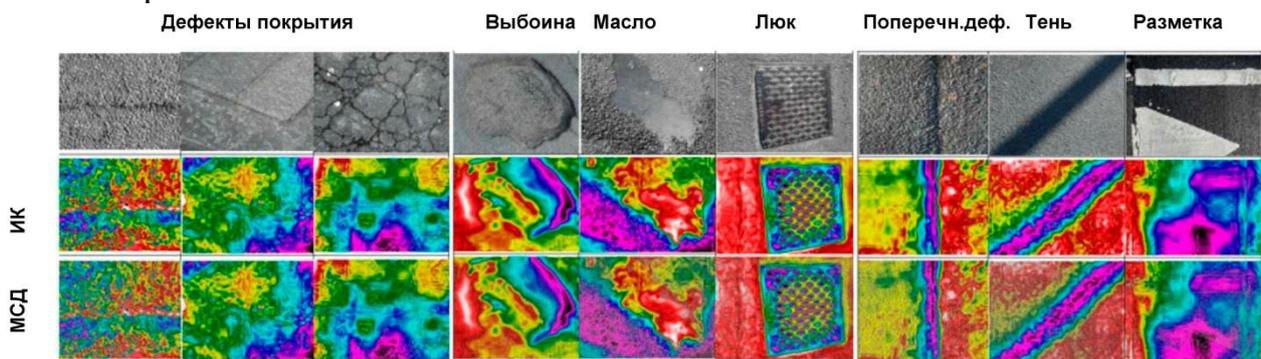


Рис. 1.8. Образцы изображений по категориям в разбивке по типу. ИК – инфракрасное изображение, МСД - мультиспектральное динамическое изображение

В целом погрешность определения параметров дефектов дорожного покрытия снижается из-за присутствия нежелательной информации, такой как дорожная разметка, масляные пятна, тени и т.д. на изображениях. Введение

дополнительных элементов в оптическую систему позволяет дополнительно расширить возможности обработки ИК изображения. Таким элементом является поляризационный фильтр, который может быть выполнен в виде отдельного элемента или непосредственно на матрице.

На рис. 1.9 [68] приведен пример изображения поверхности льда с тепловизора FLM640, у которого в группе из четырех пикселей на каждый пиксель нанесен поляризатор, причем поляризация каждого фильтра отличается на 45° . Яркость элемента соответствует энергетической яркости теплового излучения, а цвет – углу поляризации.



Рис. 1.9. Пример изображения объекта с рельефом: полученного в инфракрасном диапазоне, поляризованное инфракрасное излучение («восстановленные» углы поляризации) и совмещенное изображение с тепловизора FLM640-Polar, слева направо соответственно [68]

Сведения об углах поляризации ИК изображения позволяют получить информацию о форме поверхности и угле наклона. Тем самым появляется возможность подчеркнуть поверхностные дефекты, даже незначительные.

С многочисленными примерами применения цифровой обработки и машинного обучения в построении современных ТПВ можно познакомиться по литературе (см., например, [69–72]). Существенное развитие методы обработки изображений получили в работах Р.О. Малашина [73–78].

2. МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

2.1. Тенденции развития фотоприемников видимого и ИК диапазонов

Тенденции и история развития фотоприемников, описанные в [5] и проиллюстрированные на рис. 2.1 [27], позволяют сделать вывод, что в настоящее время доминирующим типом для ТПВ являются матричные фотоприемники со все большим числом элементов, размер которых постоянно уменьшается.

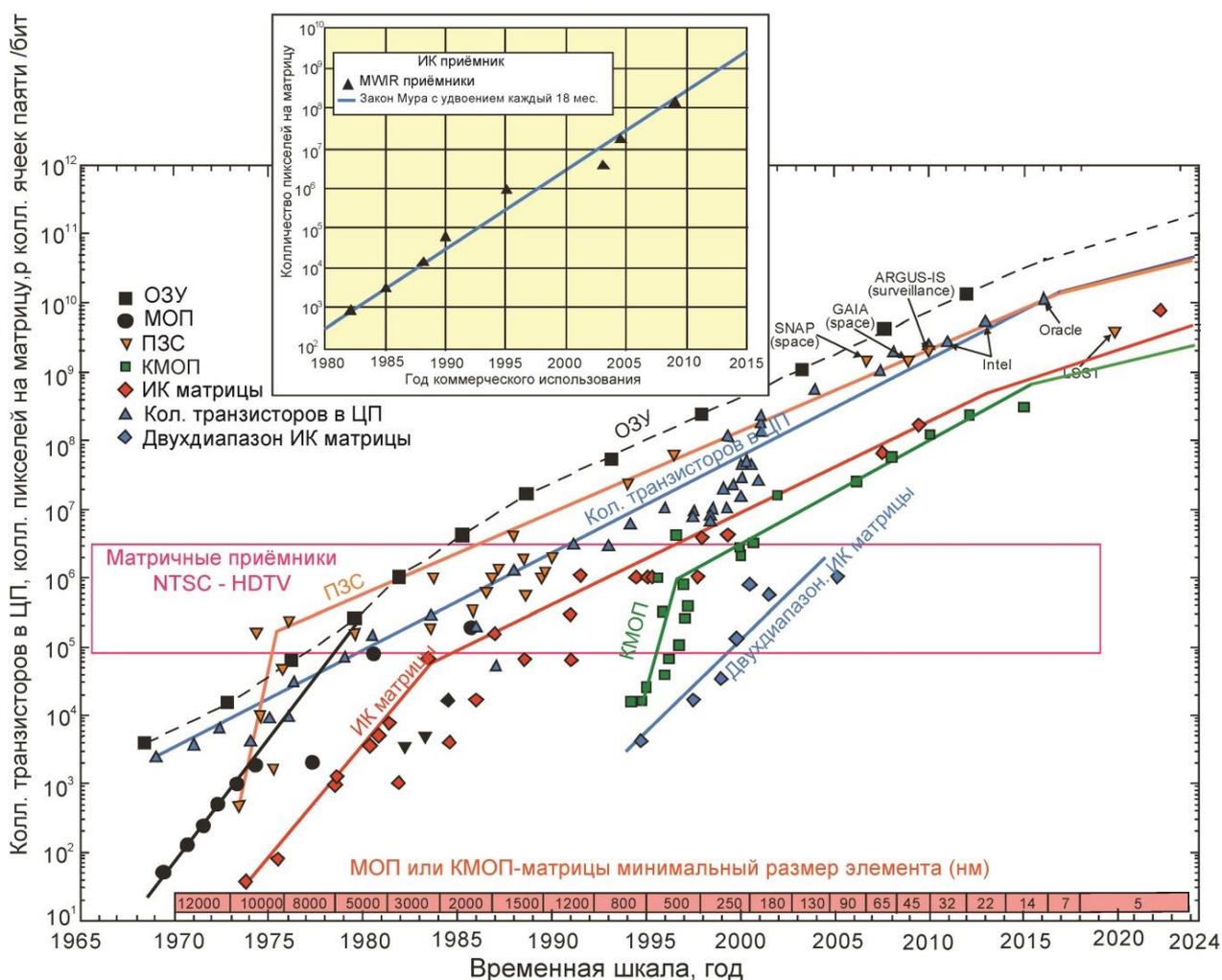


Рис. 2.1. Тенденции и ход развития матричных фотоприемников видимого и ИК диапазонов

Рис. 2.1 наглядно показывает линейное увеличение количества элементов в изделиях твердотельной электроники, такая же тенденция до последнего времени наблюдалась и для ИК матриц. Однако в настоящее время этот рост замедлился, что связано с очевидными фундаментальными ограничениями и техническими трудностями.

2.2. Полупроводниковые материалы матричных фотоприемников

Главным материалом для матричных ФПУ в спектральном диапазоне 8–12 мкм остается кадмий–ртуть–теллур (КРТ), особенно для высокочувствительных систем военного назначения [5, 26, 27]. Они обладают самым высоким достигнутым на сегодня температурным разрешением – менее 10 мК. Однако параметры этих фотоприемников сильно зависят от температуры охлаждения. Наиболее распространенные форматы КРТ-матрицы с временной задержкой и накоплением – 240/288×4 элементов (европейский формат) и 480×4/6 элементов (американский формат SADA II); матрицы до 640×512 элементов (8–9 мкм), 1280×720 элементов (3–5 мкм), 4096×4096 элементов (1,0–2,5 мкм) [5, 27].

Наряду с ФПУ на КРТ, определенное развитие получили монолитные охлаждаемые высокотехнологичные фоторезисторные структуры на основе квантовых ям (QWIP-фотоприемники) (матрицы до 640×512 элементов). Однако возможности QWIP-фотоприемников ограничены ввиду более низких температур охлаждения, чувствительности к поляризованному оптическому излучению и т.д. [34, 35, 79, 80, 81].

В спектральной области 3–5 мкм первенство сохраняют матрицы на основе соединения InSb размерами до 1922×1536 элементов [5, 34, 82].

Расширяется рынок неохлаждаемых матричных микроболометрических фотоприемников с размерами до 2048×1536 элементов, работающих в спектральном диапазоне 8–12 мкм [26, 27, 45].

Постепенно уменьшается размер элементов. Практически достигнуты результаты до 20 мкм и даже 12 мкм [26, 27, 83].

Активно разрабатываются многоспектральные фотоэлектронные модули на 2–3 спектральных диапазона [33, 34; 45, 84].

Интенсивно разрабатываются адаптивные фокальные матрицы (AFPA) [85], а также легированные сверхрешетки с собственным поглощением излучения [26, 83].

Поверхностные плазмоны для усиления инфракрасного обнаружения широко исследуются в связи с их способностью ограничивать электромагнитные волны на границах раздела металл–поглотитель, и уже продемонстрированы фотоприемники с усилением на основе поверхностного плазмонного резонанса. Хотя большинство фотоприемников MWIR и LWIR диапазонов работают при низкой температуре, продемонстрированный прогресс фотоприемников с усилением поверхностного плазмонного резонанса позволяет им работать при более высоких температурах [27, 86, 87].

Большое значение придается совершенствованию систем охлаждения, главным образом увеличению срока службы. В большинстве случаев применяются миниатюрные микрокриогенные системы, работающие по циклу Стирлинга.

Обсуждается концепция теплового инфракрасного сенсорного массива на основе микро- и наноэлектромеханической системы с нестационарным эффектом Зеебека [88].

Материалы для создания матриц охлаждаемых фотоприемников имеют свою специфику [5, 26], охарактеризованную ниже.

Фотоприемники InAs/GaSb, изготовленные по технологии T2SL (англ. Type-II Superlattice – сверхрешетки типа II), обеспечивают производительность, аналогичную HgCdTe, при эквивалентной длинноволновой границе чувствительности, но со значительным снижением рабочей температуры из-за присущей разницы во времени считывания.

Антимонид индия (InSb) был впервые использован в качестве полупроводника в начале 1950-х гг. Он имел наименьшую ширину запрещенной зоны среди всех известных в то время полупроводников, и, естественно, его применение в качестве фотоприемника инфракрасного диапазона стало очевидным.

GaSb является полупроводником с шириной запрещенной зоны 0,8 эВ – не такой широкой, как у GaAs и InP, и не такой узкой, как у InAs и InSb. GaSb особенно интересен в качестве материала подложки, поскольку его решетка соответствует твердым растворам различных тройных и четвертичных соединений III-V групп, полосы пропускания которых охватывают широкий спектральный диапазон от 0,3 до 1,6 эВ (т. е. 0,8–4,3 мкм). GaSb (постоянная решетки $a_0=6.095+$), AlSb ($a_0=6.135+$), и их родственные соединения ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$, $\text{AlAs}_x\text{Sb}_{1-x}$ и $\text{GaAs}_x\text{Sb}_{1-x}$) образуют почти согласованное с решеткой семейство полупроводников, известное как семейство 6.1+, поскольку константы решетки этих материалов составляют около 6,1+.

HgCdTe в настоящее время является наиболее распространенным материалом для высокоэффективных инфракрасных фотоприемников [89]. Его положение обусловлено тремя ключевыми особенностями [5]:

- возможность задания ширины запрещенной зоны для обеспечения чувствительности в диапазоне от 1 до 30 мкм за счет изменения легирования Cd;
- высокая квантовая эффективность;
- благоприятные внутренние механизмы рекомбинации, которые приводят к высокой рабочей температуре.

Кроме того, специфическими преимуществами HgCdTe являются способность получать как низкие, так и высокие концентрации носителей, высокую подвижность электронов и низкую диэлектрическую проницаемость. Чрезвычайно малое изменение константы решетки в зависимости от состава позволяет выращивать высококачественные слоистые и градуированные целевые структуры. В результате HgCdTe может быть использован для различных видов фотоприемников: фоторезисторов, фотодиодов или фотоприемников на основе структуры металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) [32, 90].

Фотодиоды T2SL, как правило, основаны на двойных гетероструктурах со слабо легированной внутренней областью, расположенной между сильно легированными *p*- и *n*-слоями материалов с большей шириной запрещенной зоны. Более низкая концентрация неосновных носителей в слоях с высокой шириной запрещенной зоны приводит к более низкому диффузионному темновому току и более высокому показателю динамического сопротивления фотодиода при нулевом

смещении (R_0A , Ом·см²) [32], который главным образом определяет удельную пороговую чувствительность.

Производительность ИК системы сильно зависит от сценария его использования, т.е. хорошее решение для одного приложения может быть не столь подходящим для другого приложения [91]. Например, в то время как для MWIR HgCdTe темновой ток отличается на несколько порядков по сравнению с InSb, существует несколько применений, в которых InSb предпочтительнее HgCdTe из-за аргументов технологичности. С годами рынок HgCdTe сократился из-за успеха InGaAs, InSb, QWIPs и неохлаждаемых микроболометров. HgCdTe является материалом II–VI групп и не имеет другого коммерческого использования. В результате становится все труднее поддерживать всю промышленную базу с ограниченными требованиями к количеству. С другой стороны, T2SL – это материал III–V групп с существующей отраслевой инфраструктурой для производства устройств по низкой цене. Возможности материалов III–V групп поддерживаются коммерческими продуктами (чипы сотовых телефонов, интегральные схемы миллиметровой волны), которые представляют меньше проблем для правительств в сохранении базы ИК индустрии.

Важным преимуществом T2SL является высокое качество, высокая однородность и стабильная природа материала. В целом полупроводники III–V групп более прочны, чем их аналоги II–VI групп, благодаря более сильной и менее ионной химической связи. В результате фотоприемники на основе III–V групп отличаются работоспособностью, пространственной однородностью, временной стабильностью, масштабируемостью, производительностью и доступностью по цене – так называемыми преимуществами “ibility” [92].

Резюмируем сказанное выше.

- Материалы III–V групп имеют короткое время жизни носителей Шокли-Рида-Холла (меньше 1 пс), что требует архитектуры барьерного фотоприемника (nBn-архитектура) для работы при разумной температуре и в условиях ограниченной диффузии. Это относится как к простому типу структуры фотодиода, так и к T2SL.
- HgCdTe характеризуется гораздо более длительным временем жизни носителей Шокли-Рида-Холла, превышающим 100 пс в зависимости от длины волны. Для такой структуры можно использовать любую архитектуру, а все ограничения определяются диффузионным током и процессами генерации-рекомбинации.
- II-Vs обладают аналогичными характеристиками с HgCdTe при эквивалентной длине волны, но со значительным снижением рабочей температуры из-за присущей им разницы во времени рекомбинации Шокли-Рида-Холла.

Современные исследования российских ученых в области создания полупроводниковых структур и фотоприемников на их основе отражены, в частности, в работах [93–96].

2.3. Полупроводниковые матричные фотоприемники

Бурное развитие технологий производства матричных фотоприемных устройств привело к тому, что они практически вытеснили одноэлементные фотоприемники в проектируемых и производимых ТПВ и ТПС. В зарубежной литературе эти устройства часто обозначают как FPA (Focal Plate Area, «фокально плоскостные одновременно смотрящие фотоприемники»).

При изготовлении FPA основной технологической проблемой T2SLs является отсутствие стабильной пассивации. Загрязнение поверхности донора и фиксированный положительный заряд изолятора являются обычным явлением в технологии. Это не составляет проблему для архитектур nBn , но для изготовления T2SL фотоприемников типа p является крайне нежелательным. Барьерный фотоприемник p -типа T2SL также будет чувствителен к дислокациям донорского ядра, в то время как фотоприемник nBn типа относительно невосприимчив к дислокациям донорского ядра.

Быстрый прогресс, достигнутый в T2SL за последние несколько лет, показал целесообразность использования технологии T2SL с небольшим размером пикселей (5 мкм) в качестве привлекательной альтернативы технологии HgCdTe, главным образом из-за более низкой стоимости, простоты масштабирования для больших форматов.

С экономической и технологической точек зрения важным аспектом является организация отрасли. Производство матриц HgCdTe вертикально интегрировано. Пластины выращиваются на каждом заводе по производству FPA (или его эксклюзивном партнере). Одним из важных недостатков такой организации является высокая стоимость. В случае с III-V групп полупроводников горизонтальная интеграция более выгодна. Это решение особенно эффективно для того, чтобы избежать больших инвестиций в капитальное оборудование и последующую модернизацию и техническое обслуживание, а также затрат на высококвалифицированных инженеров и техников.

Основные параметры матричных фотоприемников представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Параметры матричных фотоприемников, предлагаемых крупными производителями [26]

Производитель	Размер матрицы	Размер пикселя (мкм)	Материал матрицы	Спектрал. диапазон (мкм)	Рабочая темп.	$D^*(\lambda_{\text{макс}})$ (см \cdot Гц/Вт) NETD (мК)
Sensors Unlimited www.sensorsinc.com	320 \times 256	12,5 \times 12,5	InGaAs	0,7-1,7	300	$12,9 \times 10^{13}$
	320 \times 256	25 \times 25	InGaAs	0,4-1,7	300	$<5 \times 10^{12}$
	640 \times 512	25 \times 25	InGaAs	0,7-1,7	300	$4,2 \times 10^{13}$
	1280 \times 1024	12,5 \times 12,5	InGaAs	0,4-1,7	300	
Raytheon Vision Systems	1024 \times 1024	30 \times 30	InSb	0,6-5,0	50	
	2048 \times 2048 (Orion II)	25 \times 25	HgCdTe	0,6-5,0	32	
	2048 \times 2048 (Virgo-2k)	20 \times 20	HgCdTe	0,8-2,5	4-10	23

Производитель	Размер матрицы	Размер пикселя (мкм)	Материал матрицы	Спектрал. диапазон (мкм)	Рабочая темп.	D* ($\lambda_{\text{макс}}$) (см \cdot Гц/Вт) NETD (мК)
www.raytheon.com/businesses/ncs/rvs/index.html	2048 \times 2048 1024 \times 1024 2048 \times 1024	15 \times 15 25 \times 25 25 \times 25	HgCdTe/Si Si:As Si:As	3,0-5,0 5-28 5-28	78 6,7	
Teledyne Imaging Sensors http://teledynesi.com/imaging/	4096 \times 4096 (H4RG) 4096 \times 4096 (H4RG) 4096 \times 4096 (H4RG) 2048 \times 2048 (H2RG) 2048 \times 2048 (H2RG) 2048 \times 2048 (H2RG)	10 \times 10 or 15 \times 15 10 \times 10 or 15 \times 15 10 \times 10 or 15 \times 15 18 \times 18 18 \times 18 18 \times 18	HgCdTe HgCdTe HgCdTe HgCdTe HgCdTe HgCdTe	1,0-1,7 1,0-2,5 1,0-5,4 1,0-1,7 1,0-2,5 1,0-5,4	120 77 37 120 77 37	
Sofradir www.sofradir.com	640 \times 512 640 \times 512 1280 \times 1024 (Jupiter) 1280 \times 720 (Daphnis) 640 \times 512 (Scorpio) 640 \times 512 (Leo) 640 \times 512 640 \times 512 640 \times 512/	15 \times 15 15 \times 15 15 \times 15 10 \times 10 15 \times 15 15 \times 15 20 \times 20 24 \times 24 24 \times 24	InGaAs InSb HgCdTe HgCdTe HgCdTe HgCdTe QWIP HgCdTe HgCdTe	0,9-1,7 3,7-4,8 3,7-4,8 3,4-4,9 1,5-5,1 3,7-4,8 8,0-9,0 MW(dual) MW/LW (dual)	300 80 77-110 110 <90 110 73 77-80 77-80	<18 18 <20 \leq 16 20 31 15-20 20-25
Selex www.leonardocompany.com	320 \times 256 (Saphira) 640 \times 512 (Hawk) 1280 \times 720 (Horizon)	24 \times 24 16 \times 16 12 \times 12	HgCdTe APD HgCdTe HgCdTe	0,8-2,5 3-5 3,7-5	up to 170	17
	640 \times 512 (Hawk) 640 \times 512 (CondorII)	16 \times 16 24 \times 24	HgCdTe HgCdTe	8-10 MW/LW (dual)	up to 90 80	32 24/26
IAM www.aimir.com	640 \times 512 640 \times 512 640 \times 512 384 \times 288	15 \times 15 15 \times 15 20 \times 20 40 \times 40	HgCdTe HgCdTe HgCdTe Type II SL	1-5 8-9 MW/LW MW(dual)	95-120 67-80 80 80	17 30 18/25 20/25
SCD www.scd.co.il	640 \times 512 1280 \times 1024 1920 \times 1536 1280 \times 1024	15 \times 15 15 \times 15 10 \times 10 15 \times 15	InSb InSb InSb InAsSb nBn	3-5 3-5 1-5,4 3,6-4,2	77 150	20 20 <25 20

Производитель	Размер матрицы	Размер пикселя (мкм)	Материал матрицы	Спектрал. диапазон (мкм)	Рабочая темп.	$D^*(\lambda_{\text{макс}})$ (см ² ·Гц/Вт) NETD (мК)
	640×512	15×15	InAs/GaSb T2SL	$\lambda_c = 9,5$	80	15
Teledyne FLIR http://www.flir.com	640×512	15×15	InGaAs	0,9-1,7	300	10^{10} ph/cm ² s (NET)
	640×512	15×15	InSb	3,4-5,2	80	<25
DRS Technologies	1280×720	12×12	HgCdTe	3-5		20
	640×480	12×12	HgCdTe	3-5		25
	2048×2048	18×18	Si:As	5-28	7,8	
	1024×1024	25×25	Si:As	5-28	7,8	
	2048×2048	18×18	Si:Sb	5-40	7,8	

2.4. Микроболометрические матричные фотоприемники

При построении ТПВ аппаратуры на данный момент в основном используются многоэлементные фотоприемники, работающие в различных спектральных диапазонах.

Основным типом ИК матриц на данный момент являются микроболометрические матрицы, которые занимают примерно 90% рынка. Еще с 2010 г. (см. рис. 2.2) была видна тенденция к увеличению доли микроболометров на рынке ИК матриц, которая сохраняется до сих пор. Ежегодный прирост продаж неохлаждаемых фотоприемников составляет 8% в год [90].



Рис. 2.2. Количество продаваемых микроболометрических матриц по сравнению с иными ИК фотоприемниками

В настоящее время разработкой микроболометрических матриц (МБМ) и тепловизионных устройств на их основе занимаются ведущие фирмы США,

Европы, Японии, Кореи, Австралии. МБМ непрерывно совершенствуются. Данные (табл. 2.2) иллюстрируют прогресс, который был достигнут в последние годы.

Повышается уровень всех основных характеристик:

- температурного разрешения («рекорд» прежнего периода – 30–50 мК, а текущего – 10–30 мК);
- пространственного разрешения (минимальный шаг элемента снизился с 46–47 мкм до 15–28 мкм);
- формата (фирма Lockheed Martin сообщила о проводимой разработке матрицы с числом элементов разложения 640×480).

Производители в США традиционно опираются на разработанную фирмой Honeywell технологию получения температурочувствительного слоя из оксидов ванадия. В Европе, Азии, Австралии используется более широкий спектр материалов. В производственный процесс активно вовлекается аморфный кремний. Такая замена весьма показательна, поскольку ИК преобразователь в этом случае полностью базируется на кремниевой технологии – основной технологии современной микроэлектроники. Большой интерес представляет сообщение японских разработчиков фирмы Advanced Tech. R&DC, хотя приводимые ими значения эквивалентной шуму разности температур (NETD) пока еще уступают лучшим достижениям. В данной разработке не только используется кремний в качестве температурочувствительного материала, но и формируются *p-n*-переходы, что позволяет в несколько раз повысить чувствительность МБМ за счет большей величины температурного коэффициента отклика элемента МБМ (до $7 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$).

Таблица 2.2. Параметры неохлаждаемых МБМ, предлагаемых крупными производителями [97]

Компания	Тип болометра	Формат матрицы	Размер пикселя (мкм)	Разность температур эквивалентная шуму, NETD (мК) (f/1, 20-60 Гц)	Постоянная времени (мс)
L-3 (USA) www.l-3com.com	VO _x bolometer	320×240	37,5	50	
	α-Si bolometer	160×120 – 640×480	30	50	
	α-Si/α-SiGe bolometer	320×240 – 1024×768	17	30-50	
BAE(USA) http://www.baesystems.com	VO _x bolometer	320×240	28	<35	<10–15
	VO _x bolometer (standard design)	640×480 1024×768	12 17	<50	<10–15
DRS (USA) www.drsinfrared.com	VO _x bolometer (standard design)	320×240	25	≤40	≤18
	VO _x bolometer (umbrella design)	320×240	17	≤40	≤14
		640×480, 1024×768	17	<40	≤14

Компания	Тип болометра	Формат матрицы	Размер пикселя (мкм)	Разность температур эквивалентная шуму, NETD (мК) (f/1, 20-60 Гц)	Постоянная времени (мс)
Raytheon (USA) http://www.raytheon.com/capabilities/products/uncooled/	VO _x bolometer	320×240, 640×480	25	30-40	
	VO _x bolometer (umbrella design)	320×240, 640×480	17	50	
		1024×480, 2048×1536	17		
ULIS (France) www.ulis-ir.com	α -Si bolometer	80×80	34	<100	
		160×120	25	<60	<10
		320×240	12	<60	<10
		384×240	17	<55	<10
		640×480, 1024×768	17	<50	<10
SCD (Israel) www.scd.co.il	VO _x bolometer	384×288	25	<20	22
		384×288	25	<35	16
		640×480	17	<35	16
		1024×768	17	<35	14
Teledyne FLIR http://www.flir.com	VO _x bolometer	640×512	17	<60	<12
		336×256	17	<50	<15
NEC (Japan)—— http://www.nec.com	VO _x bolometer	320×240	23,5	<75	
		640×480	23,5	<75	
		640×480	12	60	
		320×240	23,5	NEP<100pW*	

2.5. Системы охлаждения фотоприемников

Для тепловизионных систем, предназначенных для специальных целей и задач охраны особо важных объектов со средними и большими дальностями обнаружения объектов, как правило, применяются фотоприемные системы с охлаждением рабочего тела фотоприемников, а также отдельных элементов оптического тракта (диафрагмы, светофильтры, градуировочные элементы) до соответствующих температур. Классификация систем охлаждения фотоприемников приведена на рисунке 2.3. Наибольшее распространение получили системы, работающие по циклу Стирлинга, основные параметры которых приведены в таблице 2.32.

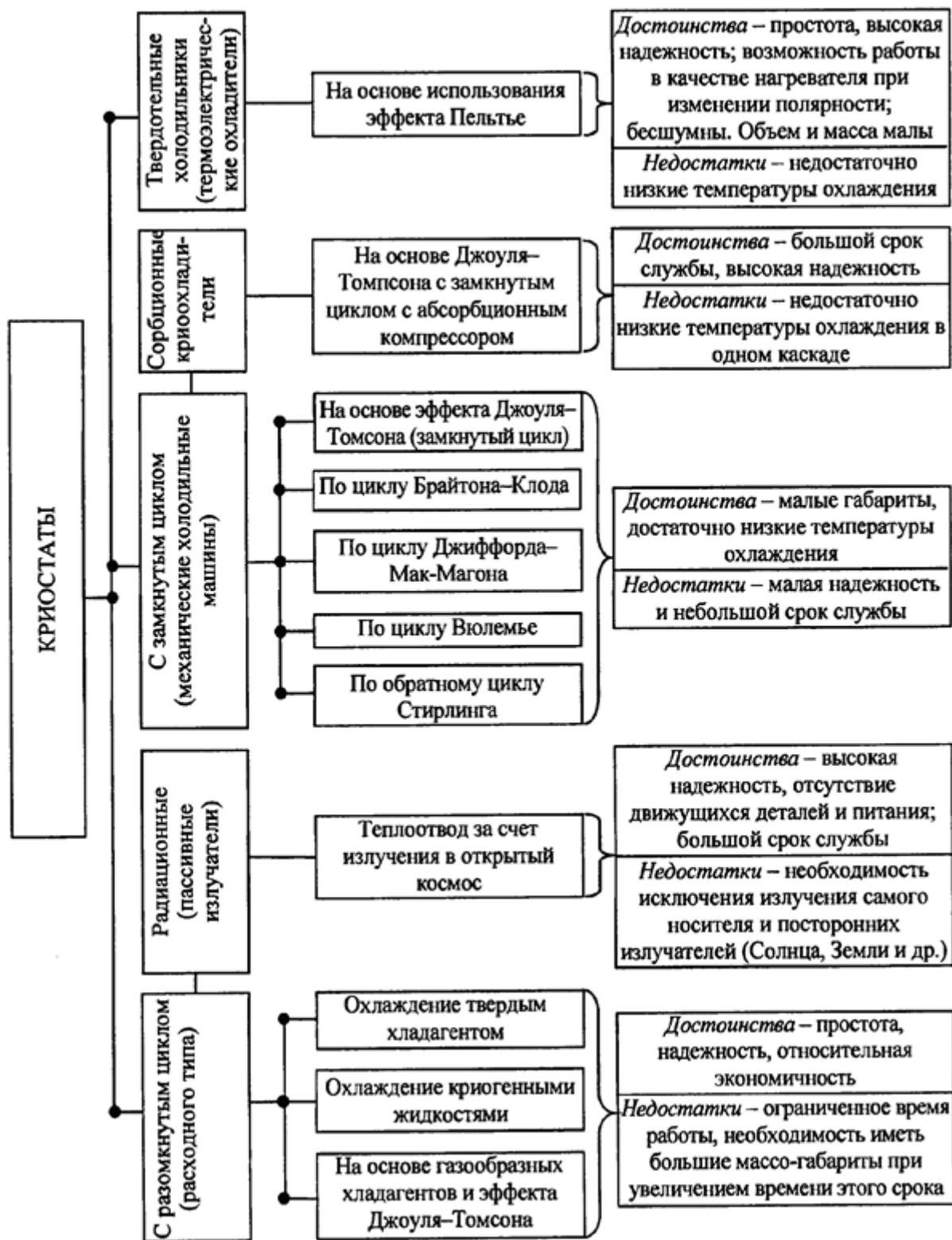


Рисунок 2.3 –Классификация систем охлаждения фотоприемников [98]

Таблица 2.3 – Параметры систем охлаждения, работающих по замкнутому циклу Стирлинга [98]

№ п/п	Наименование модели, тип криостата	Фирма-производитель	Холодопроизводительность, Вт, при 77 К для темпе-	Время выхода на режим, мин	Тепловая масса при охлаждении от 300 до 77 К (80) К	Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг	Выходная вибрация	Минимальная наработка	Диапазон температур окружающей среды	Примечание
1	НМ 7060-196, Сплит-Стирлинг, линейный привод	Raytheon	0,45	6,0	250	≤18	0,5	≤0,123	>4000	-40...+60	Напряжение питания 11,0±0,5 В постоянного тока, А, В, С, Е*
2	НМ 7050-196, Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	0,60	≤3,0	250	60	1,2	≤0,205	>4000	-54...+71	То же
3	НМ 7050-514, Сплит-Стирлинг, линейный привод		1,50	≤10	1440	60	13	≤0,205	>4000	54...+71	Напряжение питания 11,0±0,5 В постоянную тока, А, В, С, Е*
4	НМ 7052-260S, Сплит-Стирлинг, линейный привод		0,90	≤2,5	250	60	1,2	≤0,205	>5000	-54...+71	Напряжение питания 3,1 ± 0,5 В постоянного тока, А, В, С, D*
5	SL 020, IDDCA**	AEG Infrarot Module GmbH	0,2	≤4,0		15	0,6 компрес-сора	-	>6000	+71	Напряжение питания 17.. .32 В переменного тока; А, В, С, F*
6	SL 100, Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,5	12,0	1440	55	2,1	-	>6000	+71	
7	SL200		2,5	7,0	1700	80	3,5	-	>6000	+71	

	Сплит-Стирлинг, линейный привод										
8	B500C Сплит-Стирлинг, линейный привод	CMC Elec- tronics Cin- cinnati	0,15...0,5	<5,0	250	22	0,45	0,08	>4000	-54...+71	'
9	B 1000 Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,0	<10,0	1440	60	1,64	0,205	>4000	-54...+71	'
10	B 5000 Сплит-Стирлинг, линейный привод	*	5,0	<4,0 <14,0	1440 8000	120	4,1	0,307	>4000	'	'
11	P/N: 327105 Сплит-Стирлинг, линейный привод	Litton Life Support	0,6	<10,0	450	35	1,0	<0,123	>4000	м40...+71	Напряжение пи- тания 17...32 В пере- менного тока, нестабилизиро- ванного; А. В. D/E, F*
12	P/N: 3271047 Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,0	<13,0	1440	60	1,8	<0305	>4000	-54...+71	Напряжение пи- тания 17...32 В пере- менного тока, нестабилизиро- ванного; А. В. D, F*

* А- низкий уровень вибрации; В – низкий акустический шум; С – предусмотрена возможность регулирования температуры; D и E – торцевое и боковое подключения соединительной трубки к корпусу компрессора; F – наличие фильтров от радиочастотных и электромагнитных помех.

** Обозначает объединение сосуда Дьюара, фотоприемника и системы охлаждения в один узел.

3. МНОГОКАНАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

3.1. Обоснование разработки многоканальных тепловизионных систем

Оптические методы обнаружения и распознавания объектов по их излучению или/и отражению в видимой и ИК областях спектра отличаются высокой разрешающей способностью при минимальных габаритах приемной системы (благодаря малости длины волн) и высокой чувствительности. Последнее утверждение связано с относительно широкой (по сравнению с радиодиапазоном) полосой частот принимаемых колебаний и значительной энергией излучения в этой полосе (при пассивном режиме приема).

Основным недостатком этих методов является сильное затухание колебаний в тумане, облаках, дымке и пыли (рис. 3.1). Кроме того, недостатком при применении считается и относительная простота создания искусственных помех.

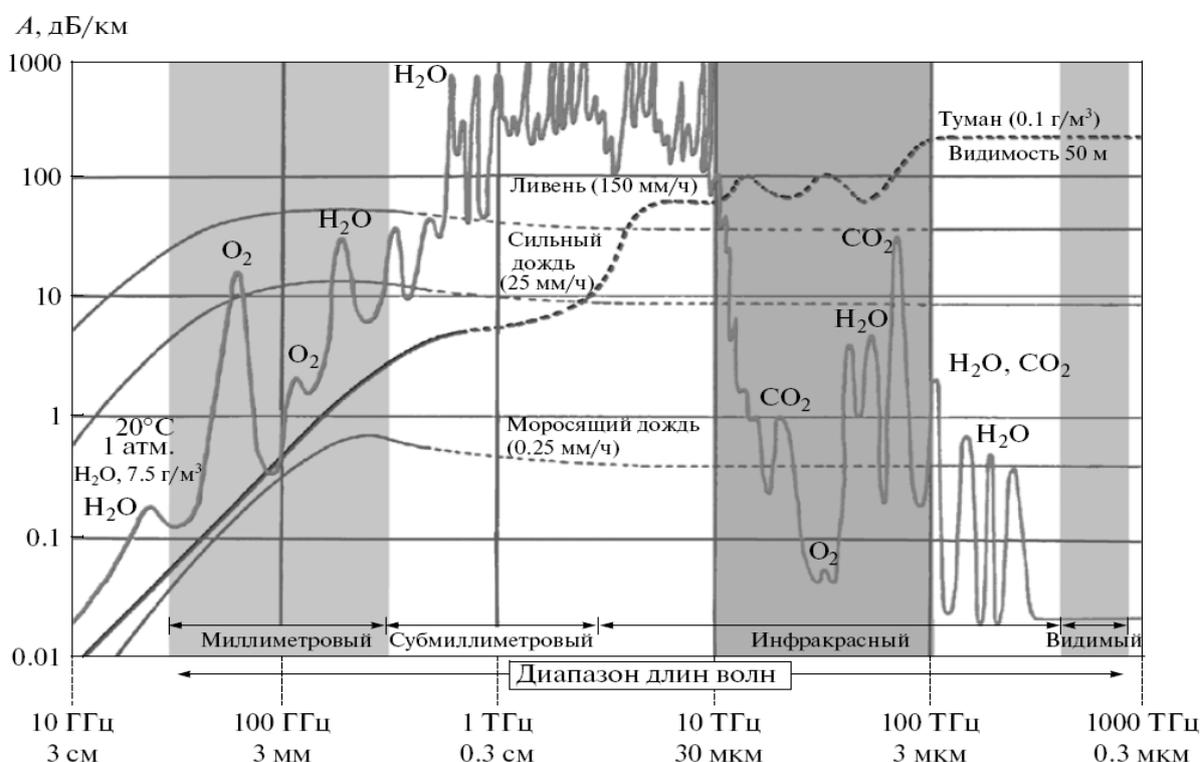


Рис. 3.1. Пропускание атмосферы в диапазоне частот от 10 ГГц до 1000 ТГц (диапазон длин волн от 3 см до 0,3 мкм) [99]

С увеличением длины волны эти недостатки играют все меньшую роль, и уже при $\lambda \geq 3$ см атмосфера становится практически прозрачной, ослабляется влияние гидрометеоров и твердых частиц, а также молекулярного поглощения. Однако с ростом λ ухудшается разрешающая способность при тех же размерах антенн и уменьшаются возможности распознавания объектов. Поэтому актуальной является задача комплексирования оптического и радио каналов, решение которой позволило бы объединить их достоинства. Дополнительным аргументом в пользу комплексирования является возможность существования информативных признаков, выражающихся через соотношения между сигналами разных диапазонов, т.е. признаков, характеризующих специфику изменения кажущейся

температуры объектов при изменении длины волны в пассивном режиме работы системы (либо отражательной способности – в активном). Соответствующие «многоспектральные» приемные устройства уже нашли применение в ИК диапазоне. Освоение диапазона частот осуществляется с двух противоположных направлений. С одной стороны, оптические методы распространяются в длинноволновую область, и к настоящему времени они охватили дальнюю ИК область (диапазон субмиллиметровых волн, или, как его еще называют, терагерцовый диапазон). С другой стороны, более 20 лет назад были начаты активные разработки радиотепловых систем [29, 31, 100], позволяющих освоить более коротковолновые участки диапазона по сравнению с ранее освоенным в радиолокации длинноволновым. В настоящее время происходит интенсивное освоение как миллиметрового, так и субмиллиметрового диапазонов. Обзор результатов можно найти в работе [101].

В силу сказанного построение многоканальной аппаратуры, работающей в разных диапазонах, является одной из основных тенденций при разработке различных обнаруживающих и распознающих систем прикладного применения (см. также обзоры [49, 102]). В недалеком будущем следует ожидать появления гибридных систем видимого, ИК и миллиметрового диапазонов волн.

3.2. Принципы построения многоканальных тепловизионных систем

В последние годы интенсивно разрабатываются принципы построения ТПВ комбинированного и комплексированного типов. Конечной целью разработки таких ТПВ является создание полностью интегрированной системы, в которой изображение синтезируется на основе анализа сигналов с различных каналов. Это является основой для создания полностью автоматизированной системы.

Основные методы разработки многоканальных ТПВ можно свести к следующему [24].

- Количество отдельных каналов, входящих в состав многоканальной системы, должно быть минимальным, их число и тип определяются конкретными требованиями к системе.
- Каналы должны быть подобраны по своему физическому принципу построения таким образом, чтобы недостатки одного канала компенсировались бы достоинствами другого.
- Схема построения многоканальной системы должна допускать автономную работу отдельных каналов.
- Процесс формирования изображения должен осуществляться в реальном масштабе времени.
- Отдельные каналы не должны создавать друг другу электрических, электромагнитных, механических, оптических или акустических помех, а также взаимных конструктивных неудобств.
- Итоговое изображение с вывода всех каналов, а также буквенно-цифровая информация и символы должны быть выведены на единый индикатор и

представлены в удобной с точки зрения эргономики форме. В случае необходимости должно быть предусмотрено дублирование информации.

- В интересах обеспечения высокого качества изображения входная оптика разнородных по области спектра каналов должна быть по возможности раздельной (за исключением входного защитного стекла и головного зеркала); если это невозможно, то многоспектральная оптическая система, общая для этих каналов, не должна снижать качество изображения до уровня, при котором не выполняются технические требования к системе.
- Необходимо тщательное согласование оптических осей (в большинстве случаев с погрешностью не ниже 0,1 мрад), углов полей зрения и увеличений отдельных каналов.
- Если каналы работают попеременно, то их переключение должно осуществляться быстро и не вносить каких-либо помех работе системы.
- Время выхода на режим системы и ее отдельных каналов определяется конкретными техническими требованиями к системе и может быть сокращено за счет работы отдельных узлов в дежурном режиме (например, систем охлаждения фотоприемного устройства ТПВ канала).
- Работы по созданию многоканальных ТПВ должны вестись в направлении автоматизации процесса поиска, обнаружения и распознавания объектов.
- Преимущество конкретной схемы многоканальной системы по сравнению с прототипом или с альтернативным техническим решением устанавливается по результатам расчета его вероятностных характеристик и отношения эффективность/стоимость; при этом стоимость должна определяться для сопоставимых стадий освоения образца и уровня его производства.
- Критерием эффективности многоканальной системы является повышение информативности изображения, приводящее к увеличению дальности действия при сохранении требуемой вероятности обнаружения и распознавания, либо повышение указанных вероятностей, либо уменьшение времени решения задачи с помощью данной системы при сохранении требуемых вероятностей и дальности действия.

3.3. Комплексование каналов наблюдения для создания всепогодных помехоустойчивых тепловизионных систем

Эффективность канала наблюдения зависит от времени суток, условий и состояния атмосферных трасс пропускания излучения и, конечно, от самих наблюдаемых объектов. Так, при выборе каналов ТПВ прежде всего необходимо учитывать характер формирования излучения и свойства выбранного окна прозрачности атмосферы.

Способ создания комплексированных систем дальнего всепогодного наблюдения был запатентован [103, 104].

Наиболее полное решение для построения всепогодной комплексированной системы четвертого поколения ТПВ видится в использовании в одном ТПВ всех оптических окон прозрачности атмосферы (рис. 3.1).

При выборе спектрального диапазона прежде всего необходимо учитывать, за счет какого эффекта в том или ином диапазоне спектра прозрачности атмосферы уверенно наблюдается та или иная цель. Так, в видимом и ближнем ИК диапазоне (VIS, NIR, SWIR) преобладает отраженное объектами излучение Солнца и ярких звезд. В областях SWIR, MWIR и LWIR объекты преимущественно наблюдаются за счет собственного теплового излучения.

Поэтому, например, для более контрастного выделения корпусов работающей бронетехники и двигателей самолетов необходимо выбирать средневолновый MWIR канал ИК диапазона. В то же время для более контрастного выделения людей, холодной техники и резиновых покрышек шасси самолета, вероятно, предпочтительным будет длинноволновый LWIR канал.

Не до конца объективными в настоящее время являются сведения о преобладающих свойствах изображений фона и техники в SWIR диапазоне. Из закона Планка следует, что максимум излучения человека приходится на длинноволновый диапазон ИК 8–12 мкм.

Таким образом, в канале распознавания разработки [9] новых трехканальных матричных фотоприемников объединены следующие окна прозрачности атмосферы (рис.3.2):

- видимого излучения (Visible), 0,38–0,78 мкм;
- ближнего ИК (NIR) 0,78–1,0 мкм;
- коротковолнового ИК (SWIR), 1,0–2,5 мкм.

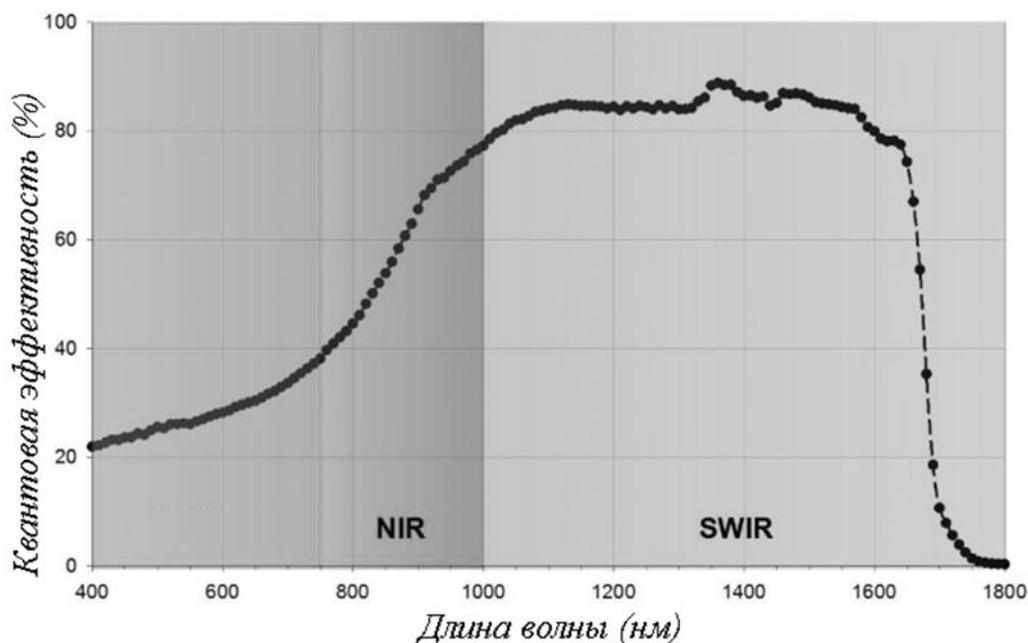


Рис. 3.2. Спектральная кривая чувствительности охлаждаемой матрицы VIS-SWIR Raptor Photonics [107]

Такое решение подтвердило свои преимущества в полунатурных и натуральных испытаниях при распознавании целей специальной техники в условиях туманов категорий 1–3 [9].

На рис. 3.3 и рис. 3.4 приводятся сравнительные изображения, получаемые в неблагоприятных метеоусловиях различными каналами указанных систем.

Этот результат получен с использованием охлаждаемой до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ матрицы на лавинных InGaAs-диодах [105, 106]. Как следует из рисунков, достигается существенное улучшение видеонаблюдения в условиях тумана 1–3 категории.



Рис. 3.3. Сравнение изображений, полученных Raptorphotonics

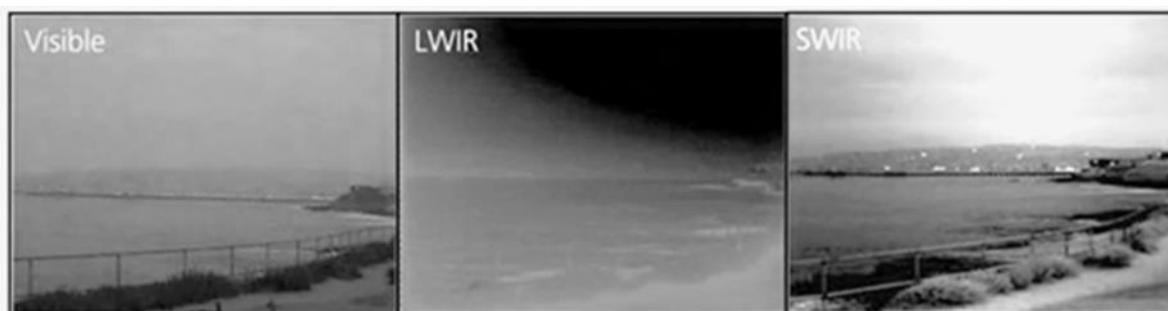


Рис. 3.4. Сравнение изображений видимого, LWIR и SWIR каналов наблюдения [<https://www.sensorsinc.com/applications/general/imaging-through-haze>]

3.4. Выбор спектральных диапазонов

Матрицы на основе силицида платины являются наиболее однородными с точки зрения чувствительности элементов по площади. Их характерная неоднородность чувствительности элементов составляет 0,5–1 %. Для JnSb эта неоднородность в настоящее время составляет 5–10 %, а для КРТ – 10–20 %. Неоднородность чувствительности элементов матрицы может быть скомпенсирована при обработке изображения. Для этого измеряют величины чувствительности каждого из элементов матрицы при ее равномерной облученности, а потом, при обработке сигнала, учитывается эта неоднородность.

В лабораторных условиях при этом было достигнуто десятикратное уменьшение влияния геометрического шума. В натуральных условиях компенсация неоднородностей может оказаться более трудной задачей, так как распределение неоднородностей может зависеть от температуры. По результатам модельных расчетов и лабораторных испытаний неоднородности могут быть выровнены до 0,05 %. В этом случае матрица КРТ имеет явное преимущество перед PtSi. Если

достигнуть указанной компенсации для матрицы JnSb, она будет особенно эффективна для диапазона 4,4–5,2 мкм.

Потеря эффективности матриц PtSi при низких температурных контрастах обусловлена, к тому же, ее низкой квантовой эффективностью на более длинных волнах. Однако достигнутый к настоящему времени высокий уровень развития технологии изготовления PtSi оставляют их достаточно конкурентоспособными.

Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения приведены в таблице 3.1 [47]. Например, в условиях сильного дождя в диапазоне длин волн излучения 3–5 мкм атмосфера пропускает только 1 % видимого света, коэффициент пропускаемого ИК излучения в диапазоне 8–12 мкм составляет 22 %.

Таблица 3.1. Типичные значения нормированных коэффициентов пропускания в некоторых диапазонах пропускания оптического излучения

Состояние атмосферы	Видимое излучение (свет)	3–5 мкм	8–12 мкм
Без тумана и дождя	1,0	1,0	1,0
В тумане	0,5	0,67	0,97
Слабый дождь	0,1	0,36	0,56
Сильный дождь	0,01	0,01	0,22

В процессе морских испытаний тепловизионного канала, установленного на платформе прицеливания 9LV–200 – Швеция (фирмы Philips – Швеция, Филипс USFA – Голландия, Mullarg LTD – Великобритания), получена дальность обнаружения цели при МДВ ≥ 20 км, равная 7 км. В качестве цели использовался имитатор – черненый сосуд диаметром 40 см, расположенный на буксируемой платформе на высоте 3 м, заполненный водой с нагревателем и датчиком температуры. Даже при плохой метеовидимости (МДВ ~ 2 –3 км) при $\Delta T = 30^\circ$ цель обнаруживалась на дальности больше 4 км [47].

Исходя из приведенных соображений, надо полагать, что наиболее приемлемым диапазоном в тепловизионном канале является диапазон окна прозрачности 8–12 мкм. Предпочтение указанного диапазона по сравнению с диапазоном 3–5 мкм определяется также тем, что в нем на порядок меньше помехи от переотраженной составляющей излучения неоднородностей небосвода от взволнованной морской поверхности. Это особенно важно при захвате и сопровождении низколетящих целей.

Перспективы повышения эффективности систем наблюдения связаны с обеспечением их работоспособности с учетом требований всепогодности, помехозащищенности, независимости от условий естественного освещения и других факторов. Одним из путей решения этой задачи является создание многоканальных комплексированных систем, работающих в различных спектральных диапазонах.

В частности, эффективному применению тепловизионных систем препятствует ряд ограничений, связанных с выравниванием температурных контрастов при отсутствии суточного изменения температуры, ухудшением пропускания

ИК излучения в атмосфере при наличии тумана, пыли, дымовых завес. В то же время затухание субмиллиметрового излучения в указанных средах значительно меньше.

Комплексирование указанных диапазонов позволит получить большую дальность действия и всепогодность при угловой разрешающей способности, свойственной ИК диапазону. Использование единой приемной системы обеспечит соответствующее уменьшение габаритов и веса интегрированной системы.

Многоканальная тепловизионная система (ТПВС) для сверхдальнего обнаружения фирмы FLIR Systems ThermoVision 2000/3000MS. Компания FLIR Systems является одним из пионеров и признанным мировым лидером в разработке и производстве тепловизионной техники. Компания прошла длительный путь развития и, по существу, ведет свою историю от шведской фирмы AGEMA Infrared Systems, которая была основана в 1958 г. Продукция компании под маркой AGEMA широко известна и в России. Многие камеры работают на наших предприятиях свыше 30 лет, подтверждая свою исключительную надежность. В 1997 г. произошло укрупнение фирмы AGEMA Infrared Systems путем ее слияния с крупнейшими производителями ИК аппаратуры в США – фирмами FLIR и Inframetrics, и была образована компания FLIR Systems. В 2004 г. в состав FLIR Systems вошла компания Indigo Systems – ведущий разработчик и производитель ИК фотоприемников и специализированного программного обеспечения (ПО) [109].

4 января 2021 г. американский промышленный конгломерат Teledyne Technologies объявил о покупке производителя тепловизионных камер Flir Systems.

Компания Teledyne FLIR производит самый широкий спектр оборудования для решения практически всех задач, связанных с применением тепловизионной техники и, в том числе, для задач технической диагностики и мониторинга состояния различных промышленных объектов.

Система ThermoVision 2000/3000MS (рис. 3.5, табл. 3.2) – мощная многоканальная система видеонаблюдения на скоростном и точном поворотном устройстве с тепловизионным каналом, видеоканалом и опциональным лазерным дальномером [109].

Дополнительно стоит отметить следующие параметры функциональных модулей и ПО ТПВС ThermoVision 2000/3000MS:

- видеоканал – фотоприемник Sony FCB EXCP 980; поле зрения $46^{\circ}-2^{\circ}$; непрерывное электронное увеличение (12X); непрерывные автоматические функции: автофокус, установка диафрагмы и шторки, баланс белого, стабилизация изображения;
- лазерный дальномер – опция Тип LP-16; дальность 20 км;
- поворотное устройство – диапазон вращения по азимуту $n \cdot 360^{\circ}$; диапазон вращения по углу места $\pm 40^{\circ}$; скорость вращения по азимуту $0,03-70^{\circ}/с$; скорость вращения по углу места $0,03-30^{\circ}/с$;
- интерфейсы и протоколы – управление RS422/232, Pelco-D Ethernet, Nexus; видео MPEG-4, MPEG-2; Ethernet;

- программное обеспечение – NEXUS Console; видео и управление по Ethernet, фовеальное изображение с тепловизоров, изображение с видеокамеры, управление, предустановки, картографирование (опция), детектор движения (опция); комплект разработчика ПО (SDK);
- питание – 18–35 В (пост.); потребляемая мощность 35 Вт – в нормальном режиме, 140 Вт – в максимуме;
- эксплуатационные характеристики – класс защиты IP65; диапазон температур -32°C – $+55^{\circ}\text{C}$; вес 25 кг.



Рис. 3.5. Внешний вид ТПВС ThermoVision 2000/3000MS

Таблица 3.2 – Основные параметры системы видеонаблюдения ThermoVision 2000/3000MS [109]

Параметр	ThermoVision 2000MS	ThermoVision 3000MS
Фотоприемник	QWIP с FPA матрицей; 320×240 пикселей	QWIP с FPA матрицей; 640×480 пикселей
Материал фотоприемника	GaAs - арсенид галлия (QWIP – фотоприемник на квантовых ямах)	
Спектральный диапазон	8,2-9,2 мкм	
Число полей зрения	3	3
	25°×19° 6°×4,5° 0,99°×0,74°	25°×19° 7,8°×5,8° 1,3°×0,96°

Многоканальная тепловизионная система для сверхдальнего обнаружения фирмы CEDIP Titanium. Titanium (рис. 3.6, табл. 3.3) – новое поколение высокочувствительных охлаждаемых камер Французской компании CEDIP Infrared Systems, которая была куплена американской компанией Teledyne FLIR [110], дальнейшая эволюция популярной серии Jade.



Рис. 3.6. Внешний вид камер серии Titanium

Таблица 3.3. Основные параметры камер серии Titanium

Тип сенсора	InSb, МСТ или QWIP
Рабочий диапазон	3–5 мкм, 8–9 мкм (опционально 1,5 – 5 мкм, 8,0 – 12,0 мкм)
Разрешение	320×256 или 640×512, разрядность сигнала 14 бит
Размер камеры (LxWxH)	253×130×168 мм
Размер пиксела	30 мкм / 25 мкм / 20 мкм/ 15 мкм
Температурная чувствительность	< 18 мК
Система охлаждения	Интегрированный охладитель Стирлинга
Частота кадров	380 Гц (до 20 КГц с уменьшением разрешения)
Время накопления	>3 мкс
Размер фоточувствительной площади	От 42°×34° (12 мм) до 2.7°×2° (200 мм)
Интерфейсы передачи данных	USB2 / CAMLINK / GigE
Диапазон температур	От -20 °С до 3000 °С
Погрешность измерения температуры	±1 °С или ±1 %
Область применения	термография, неразрушающий контроль

3.5. Комплексование каналов видимого и ИК диапазона

В работе [111] представлены свойства и возможности высококомпактного объединения мультиспектрального набора сенсоров визуализатора VIS/SWIR в один оптический канал с лазерным дальномером. Поскольку изображения снимаются с камеры SWIR и VIS в формате HD-SDI (High Definition Serial Digital Interface – цифровой последовательный интерфейс высокой четкости), у них совпадают фокусные расстояния и поля зрения, что позволяет проводить дополнительную обработку изображений (комплексование): наложение изображений, слияние изображений или дополнительную обработку для расширенных задач обнаружения и распознавания.

Этот датчик разработан и является частью новой концепции поисковых оптико-электронных систем (SP – optronics mast systems). Компактная конструкция

набора датчиков достигается за счет комбинированной оптической конструкции (рис. 3.7) с одним общим входным зрачком для всех трех датчиков – SWIR-камеры, VIS-камеры и фотоприемника лазерного дальномера, разделяющей различные спектральные диапазоны для разных фотоприемников. В этой комбинации диаметр входного зрачка в основном определяется диаметром этой оптики. Лазерный излучатель выделен в отдельный канал, но он мал по сравнению с приемной оптикой.

При ближайшем рассмотрении конструкции объектива [111] и пространственного расположения хода лучей в ней видно, что в проекте предложены варианты создания конструкции объективов и расположения электронных последовательно-параллельных каналов обработки изображений.

В очень компактной оптико-механической компоновке, показанной на рис. 3.7, второй светоделитель BS2 отвечает за одновременное соединение узкой спектральной полосы вокруг центральной длины волны излучения лазера $\lambda_{LRF} = 1,573$ мкм и ее передачу к приемному диоду, при этом передавая весь спектр SWIR излучения на SWIR-камеру FPA. Выполнено два варианта с разными характеристиками диапазона оптического излучения.

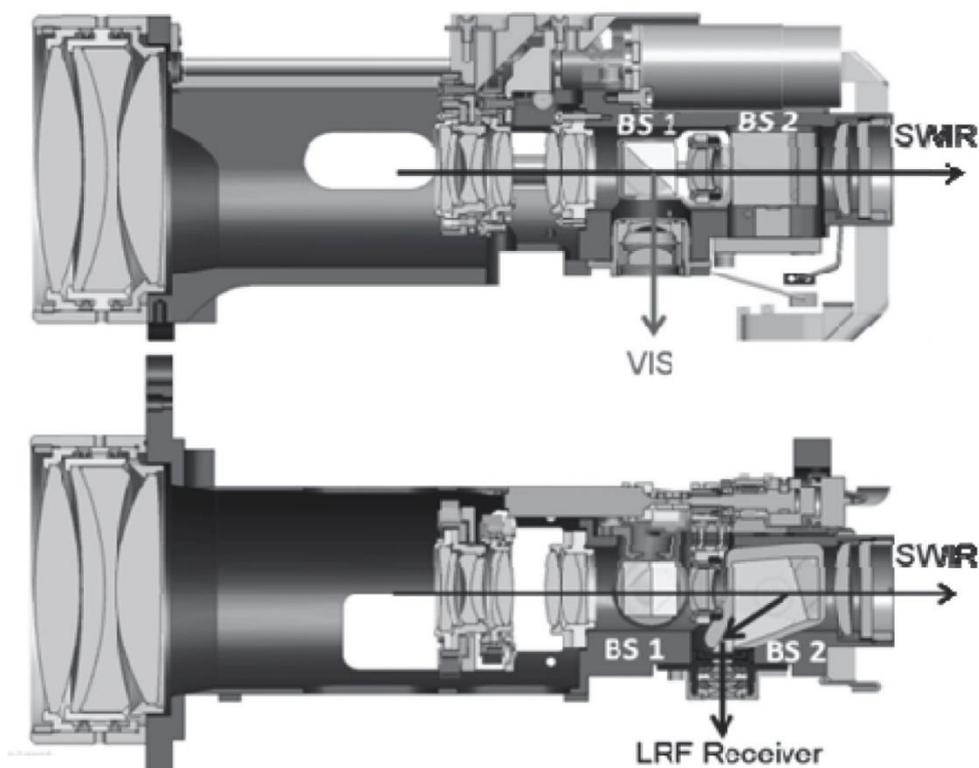


Рис. 3.7. Схема визуализатора VIS/SWIR и распределения диапазонов оптического излучения в нем, показанная для двух ориентаций, повернутых на 90° вокруг оптической оси, для двух путей светоделителя BS1 и BS2.

Группа линз между BS1 и BS2 – SWIR перефокусировка [111]

Конструкция мультиспектральной камеры (рис. 3.8) определяется требованиями к набору необходимых элементов, которые обусловлены требованием объединить все элементы – оптику, лазерный дальномер, электронику камеры,

элементы управления и питания – в ограниченное пространство, определяемое контуром головки с размером менее 210 мм в диаметре.

Корпус камеры спроектирован с учетом высоких требований к ударным воздействиям, влиянию окружающей среды. Необходимо рассеивать тепло всей энергопотребляющей электроники за пределы камеры, чтобы избежать перегрева системы, особенно при повышении температура окружающей среды до 60°. Общий вес камеры меньше 16 кг. Для отвода тепла от активных компонентов ($P_{\text{расс}} \geq 25$ Вт), таких как блоки питания, электроника и термоэлектрический охладитель, выполнено их подключение через тепловые трубки к встроенному теплообменнику.

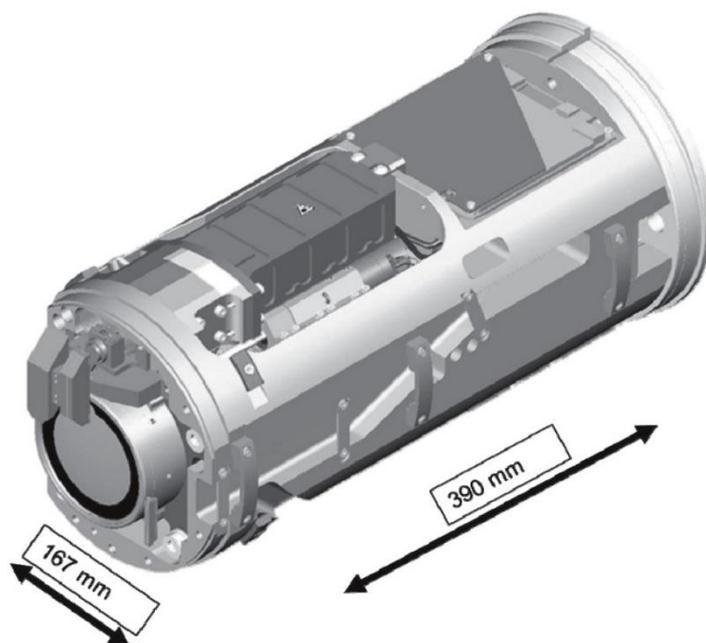


Рис. 3.8. Внешний вид модуля мультиспектральной камеры с изменяемым фокусным расстоянием, включая оптику трансфокатора, VIS-камеру, SWIR-камеру, передатчик и фотоприемник, блоки питания, видеоэлектронику и электронику управления зум-объективом

В работе [48] проведен комплекс теоретических исследований с учетом реальных особенностей конструкции и условий работы тепловизора – радиовизора, в том числе:

- разработаны методики расчета разности температур, эквивалентной шуму (NETD) для тепловизоров, спектральный диапазон которых ограничен не только со стороны длинных волн, но и со стороны коротких длин волн; в частности, показано, что тепловизоры, работающие в окне прозрачности атмосферы 8–14 мкм, отличаются от идеальных обнаружителей всего на 33 %;
- разработаны методики расчета параметров обнаружения для тепловизоров с реальными фотоприемниками, обладающими низкочастотными шумами, и с предусилителями, обеспечивающими квазиоптимальную частотную фильтрацию фотосигналов;

– значения NETD для реальных тепловизоров и других оптико-электронных приборов получаются из вышеуказанных соотношений после учета влияния коэффициентов, характеризующих потери и шумы в канале преобразователя и в атмосфере.

В работе [17, 18] предложена инженерная методика выбора диаметра и фокусного расстояния объективов современных высокочувствительных тепловизионных приборов, обеспечивающая заданную дальность действия приборов и их пороговую чувствительность. Методика учитывает возможность реализации за счет накопления сигналов весьма малых значений разности температур, эквивалентной шуму, при которых эффективность этих приборов ограничивается уже не отношением сигнал/шум, а контрастной чувствительностью зрительного анализатора оператора.

Методы атермализации оптических систем тепловизионных приборов излагаются в работе [112]. Рассмотрены различные способы пассивной атермализации за счет применения конструктивных элементов с различными температурными коэффициентами линейного расширения, а также способы активной атермализации за счет управляемого осевого перемещения одного из оптических элементов.

В работе [113] рассмотрены термонерасстраиваемые тепловизионные оптические системы. Приводится описание основных направлений разработки и полученных схемных решений в виде обобщающей таблицы вариантов оптических систем (по оптическим характеристикам и особенностям оптических схем), реализованных в ГОИ им. С.И. Вавилова, за последние несколько лет.

В работе [114] представлены результаты разработки оптической системы ИК диапазона с функцией активной фокусировки.

В работе [115] представлены результаты разработки сверхсветосильного тепловизионного триплета с градиентной линзой, показаны потенциальные возможности оптической схемы. Представлены результаты расчета трехлинзового инфракрасного объектива с задним фокусным расстоянием 40 мм, угловым полем $19,5^\circ$ и диафрагменным числом 0,84, который в рабочем спектральном диапазоне 3–5 мкм формирует изображение с контрастом 0,6 на пространственной частоте 30 мм⁻¹. Модуль дисторсии не превышает 1,5%.

3.6. Универсальный объектив для комплексированных систем

В традиционных вариантах построения комбинированных и комплексированных систем наблюдения обнаруживается ряд недостатков. Так при построении комбинированных систем, в которых канал обнаружения и канал распознавания объектов имеют в каждом спектральном канале собственные объективы, недостатком является параллакс полей зрения каналов при изменении дистанций наблюдения. Этот недостаток не позволяет обеспечить точное слежение за объектами на разных дистанциях наблюдения.

В известных схемных решениях для сохранения условия совпадения оптических осей канала обнаружения и распознавания используются, как правило,

общие входные элементы объективов с последующим разнесением элементов коррекции по каждому каналу за счет введения в общий поток светоделительных или спектроделительных пластин, что влечет за собой потерю энергетической чувствительности по каналам более чем на 50 %.

Авторы патента RU 2 305 303 C2 [41] задались целью найти схемное решение, которое бы обеспечило одновременное наблюдение, как по каналу обнаружения, так и по каналу распознавания без внесения параллакса оптических осей каналов, так и без ослабления потоков на светоделительных пластинах.

Из известных решений, устраняющих параллакс в каналах и потери на светоделительных элементах, можно назвать вариант построения универсального объектива по четырехзеркальной схеме, разработанной фирмой Thales Optics для ракетных систем. Однако эти схемные решения также обладают рядом недостатков:

- режим широкоугольного наблюдения в прототипе обеспечивается сменным первым зеркалом объектива (формируется за счет ввода в поток узкопольного объектива, с перекрытием его поля зрения, главного зеркала с другим профилем); этот объектив формирует фиксированное угловое поле зрения, что не обеспечивает возможности точного наведения на цель приемной системы канала распознавания;
- в качестве первой сборки четырехзеркального объектива каналов обнаружения и распознавания использована известная схема Касегрена, обеспечивающая малые угловые поля зрения, к тому же эта компоновка не является высокосветосильной оптической системой; кроме того, из патента [41], следует, что найденное схемное решение пригодно только для решения задач самонаведения и не позволяет расширить схемные решения на задачи создания семейства объективов, с целью обеспечения всего типоряда обзорно-поисковых и наблюдательных систем, а именно – носимых, возимых, бортовых и стационарных систем наблюдения.

Поэтому при создании универсальных объективов для систем с комплексированием разных каналов желательно придерживаться следующих принципов:

- создавать такую компоновку объективов каналов обнаружения и распознавания, которые обеспечивают безпараллаксный прием информации о целях как в широком, так и в узком полях зрения, на один или несколько разнесенных в пространстве изображений матричных фотоприемников;
- разрабатывать комплексированные системы, которые можно путем простого масштабирования подобий базовых компоновок универсальных объектов изменять под конкретные задачи;
- при необходимости и возможности реализации создавать схемные решения устройств, обеспечивающих спектрально-зональный прием во всех областях прозрачности атмосферы в оптическом и радиодиапазонах электромагнитных колебаний.

При разработке объективов необходимо учесть возможности расширения комплексирования с привлечением изображений УФ диапазона спектра оптического излучения, если это целесообразно.

Основная цель по созданию базовой компоновки объективов каналов обнаружения и распознавания, обеспечивающей безпараллаксный прием, достигнута тем, что в качестве основного узла объектива выбран канал обнаружения в виде вариообъектива УФ диапазона с подвижными элементами. Пример такого объектива показан на рис. 3.9).

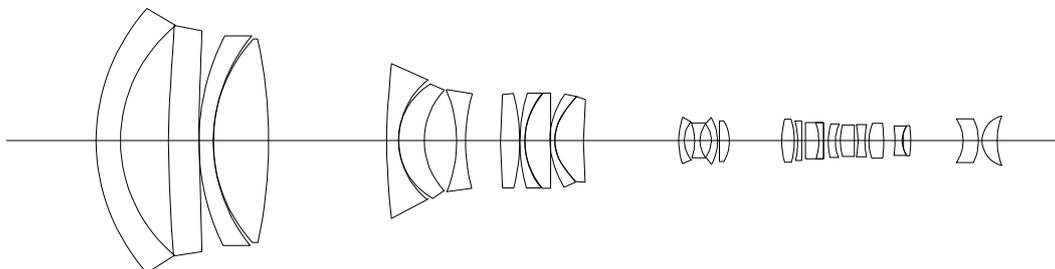


Рис. 3.9. Вариообъектив УФ диапазона канала обнаружения

Общая компоновка вариообъектива с защитным корпусом далее размещается в теневой зоне центрального виньетирования двухзеркального особо светосильного узкопольного объектива канала распознавания (рис. 3.10).

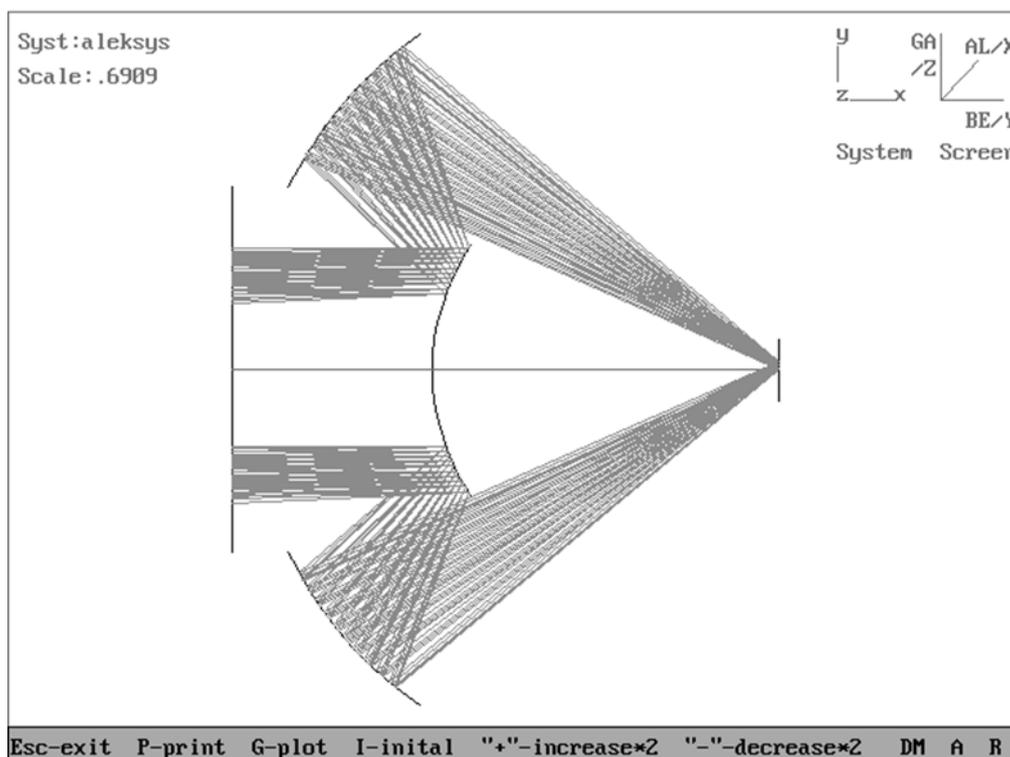


Рис. 3.10. Двухзеркальный объектив канала распознавания

Возможность размещения вариообъектива в теневой зоне зеркального объектива обеспечивается за счет особой конструкции двухзеркального объектива, представляющего собой объемную сборку главного зеркала, выполненного в виде кольцевого асферического сегмента. Внешний глубокий сферический контроотражатель обеспечивает возможность сбора энергии на матричные

фотоприемники, при котором лучи образуют кольцевую пустотелую конусную конструкцию с большим относительным отверстием ($D_{эфф}/f = 1:0,79$). В результате вариообъектив канала обнаружения без виньетирования основных потоков двухзеркального объектива встраивается в конструкцию объектива канала распознавания с юстировкой оптических осей обоих каналов. Такая конструкция обеспечивает беспараллаксный прием как на один, так и на множество матричных фотоприемников (при вынесении лучей вариообъектива во внешнюю зону двойного конуса лучей объектива распознавания с помощью зеркал или спектроразделительных пластин).

При этом обеспечение беспараллаксного режима работы канала обнаружения и канала распознавания осуществляется либо путем попеременного приема на одну матрицу потоков от вариообъектива или зеркального узкопольного объектива, при котором режим перестройки обеспечивается вводом диафрагм кругового или кольцевого типов (рис. 3.11), либо в параллельном режиме, при котором оба съюстированных объектива формируют изображения на собственных приемных матрицах. Для соблюдения условия беспараллаксного формирования изображений в каждом канале юстировка осуществляется за счет сохранения неизменными по величине задних отрезков вариообъектива, как в режиме последовательного приема потоков излучения на одну матрицу, так и в параллельном режиме, в котором пространственное разнесение потоков каналов на собственные матрицы осуществляется с помощью зеркал или светоделителей (либо спектроразделителей в задачах спектрофотометрии).

Качество изображения и энергетические характеристики для канала обнаружения и канала распознавания обеспечиваются с помощью традиционных для оптики методов расчетов по каждому каналу отдельно.

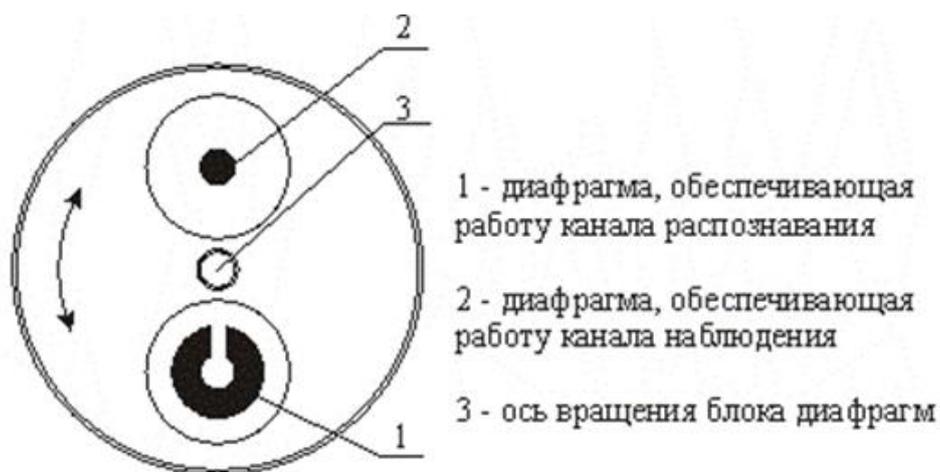


Рис. 3.11. Пример схемы блока диафрагм кругового или кольцевого типов

Реализация предложенного выше способа создания семейства универсальных объективов возможна при соблюдении требования к параметрам объективов каналов обнаружения, определяемого соотношением

$$\frac{S'}{D^*} \geq 0,5, \quad (3.8)$$

где S' – задний отрезок (мм); D^* – диаметр первой линзы вариообъектива с оправой (мм).

Таким образом, предложенный способ создания универсальных объективов заключается в том, что для построения типоряда приемных систем комплексированных приборов наблюдения выбирают парные сборки:

– двухзеркальный объектив с главным асферическим зеркалом выпуклой формы и внешним апланатическим корректором сферической формы, обеспечивающий соотношение $D_{эфф}/f < 0,8$;

– варио- или широкоугольный объектив, обеспечивающий соотношения $D_{в.о.}^* < D_{внут.з.о.}$ (3.9)

и

$$\frac{S'}{D_{в.о.}^*} \geq 0,5, \quad (3.10)$$

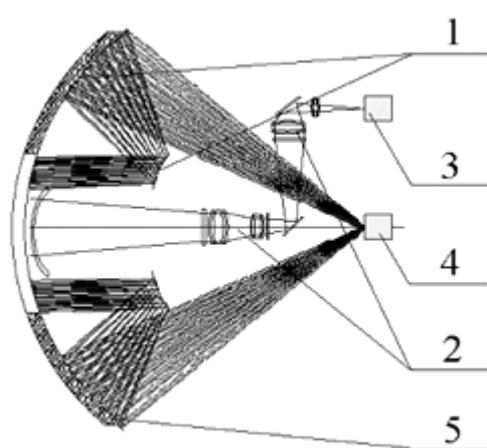
где $D_{в.о.}^*$ – диаметр первой линзы вариообъектива с оправой; $D_{внут.з.о.}$ – внутренний диаметр кольцевого главного зеркала объектива канала распознавания; S' – задний отрезок варио- или широкоугольного объектива.

Последнее условие позволяет разделять объективы каналов различных спектральных диапазонов в комбинированных системах наблюдения [41, 46].

Предложенный универсальный объектив особенно эффективен для комплексированных систем, устанавливаемых на малые и микро-малые дистанционно пилотируемые летательные аппараты. Это можно обеспечить при выборе в качестве защитного окна материала прозрачного в областях видимого, MWIR (3–5 мкм), LWIR (8–12 мкм). В отечественной промышленности это материалы керамики ПО-4 и кристалла LiF₂.

Предлагаемый способ построения универсальных объективов позволяет обосновать принципы компоновки целого ряда устройств комплексированных систем наблюдения, распознавания объектов, а также устройств самонаведения.

Вся конструкция универсального объектива размещается в сферическую оболочку, которая одновременно несет в себе поверхность кольцевой зоны апланатического корректора, защитного окна (обтекателя с областью прозрачности 0,5–12 мкм) и устройств крепления матриц ПЗС и матричных микроболометрических каналов обнаружения и распознавания. В качестве объективов канала обнаружения используются широкоугольные, в том числе и вариообъективы, прозрачные в областях спектра 3,2–5,6 мкм или 7–12 мкм. Выбор диапазонов чувствительности в канале распознавания может быть любым: видимый, 3–5 мкм и 7–12 мкм. Схема этого устройства показана на рис. 3.12.



- 1 – Двухзеркальный объектив канала распознавания,
- 2 – Объектив канала обнаружения,
- 3, 4 – ПЗС и микро болометрические приемники,
- 5 – Обтекатель, прозрачный в определенной области спектра ЭМК.

Рис. 3.12. Компонировка многодиапазонной (видимый, 3–5 мкм, 7–12 мкм) оптической системы

В этом устройстве конструкция обтекателя является гармоничным продолжением сферы апланатического корректора. В результате вся конструкция комплексированной системы устройства может быть гармонично заключена в сферическую оболочку. Это важное достоинство универсальной конструкции найдет широкое применение в вертолетных, самолетных и спутниковых системах наблюдения и распознавания, а также в устанавливаемых на малые и микро-дистанционно пилотируемых носителях аппаратуры.

В качестве широкоугольного объектива в данном устройстве может быть использован малогабаритный инфракрасный вариообъектив Euclid 3-5 μ m Low-mass Infrared Zoom Lens, фирмы Thales Optics с диапазоном перестройки поля зрения 5–13°. Область прозрачности объектива [104] от 3 до 5 мкм.

Комплексированная система видимого, NIR и УФ диапазона может быть конструктивно выполнена аналогично предыдущему устройству, но с одним фотоприемником (рис. 3.13). В этом случае режимы обнаружения и распознавания будут работать при попеременном включении. Смена режимов осуществляется с помощью электромеханического устройства смены полевых диафрагм кругового или кольцевого типов (рис. 3.11).

Могут использоваться следующие вариообъективы:

- объектив распознавания с областью пропускания 0,4–1,1 мкм (видимый и NIR диапазоны);
- объектив обнаружения с областью пропускания 0,235–0,4 мкм (УФ диапазон).

Особо важным вариантом комплексирования для задач создания аппаратуры обнаружения специальных объектов является компоновка универсального объектива, в которой в качестве объектива обнаружения используется вариообъектив УФ и видимого диапазонов, а объектив канала распознавания используется для тепловизионного или сканирующего тепловизора на область спектра 7,5–14 мкм.

Сравнительный анализ показал, что предложенная схема позволяет уменьшить габариты устройства в 2–4 раза при экономии по весовым характеристикам

в 3–5 раз в зависимости от требуемых характеристик на системы (носимые, возимые, бортовые, стационарные) по сравнению с ближайшими аналогами.

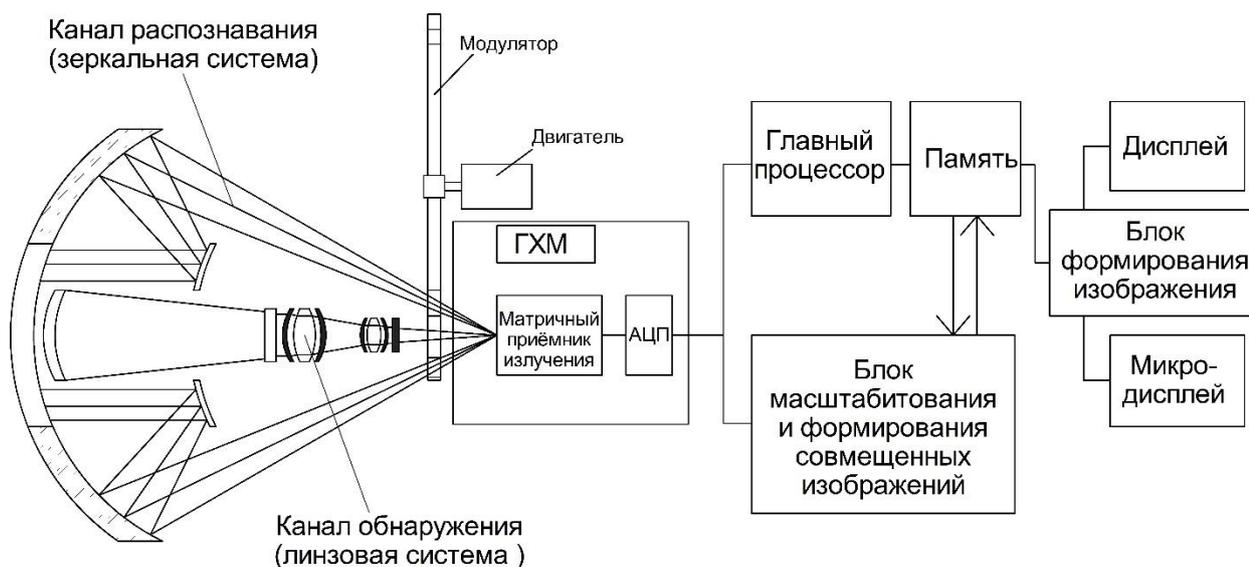


Рис. 3.13. Схема компактной комплексированной системы

Резюмируем сказанное выше.

1. Создана базовая компоновка универсального объектива, состоящего из общего обтекателя (в виде мениска), прозрачного в заданной области спектра наблюдения всех каналов, широкоугольного или вариообъективов каналов обнаружения и двухзеркального объектива канала распознавания (двухзеркальная система (с первым асферическим выпуклым зеркалом, при асферическом отклонении от ближайшей сферы не более 31,5 мкм и сферическим внешним корректором) с полем зрения 1,5° и угловым разрешением $\approx 0,001^\circ$).

2. При выбранной схеме высокосветосильный короткофокусный объектив распознавания гармонично вписывается в сферическую форму внешнего корпуса с обтекателем, а во внутренней полости удобно встраиваются без виньетирования вариообъективы каналов обнаружения с большими диапазонами варьирования полей обзора. Вариообъектив видимого и ближнего ИК диапазонов излучения имеет диапазон изменения поля обзора от 4° до 56°, при относительном отверстии не более 1:2,8 по всему диапазону. Объектив УФ диапазона имеет диапазон изменения поля обзора от 4,7° до 43,4° при относительном отверстии не более 1:3,7 для всех значений фокусного расстояния f' .

3. Объективы не имеют аналогов в РФ, а объектив УФ диапазона не имеет аналогов и в мировой практике. Объектив видимого и ближнего ИК диапазонов рассчитан В.В. Тарабукиным, а объектив УФ диапазона – Л.А. Гальперн. Результаты расчетов защищены патентами РФ [104].

4. Отличительной особенностью универсального объектива, а, следовательно, и комплексированных систем на его основе является обеспеченная расчетами возможность формирования качественных изображений на полноформатных ПЗС матрицах с числом элементов более 1000×1000.

В работе [116] предложена методика габаритного и абберационного расчета оптических систем инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми фотоприемниками. Приводится пример оптической системы, рассчитанной на основе разработанной методики.

3.7. Перспективы комплексирования ИК и ТГц каналов наблюдения

Применение аппаратуры наблюдения в субмиллиметровом (терагерцовом) диапазоне позволяет решить целый ряд дополнительных задач.

Представляет безусловный интерес богатый опыт обнаружения скрытых предметов в багаже или под одеждой методами применения систем радиовидения, работающих в субмиллиметровом диапазоне (системы терагерцового видения). Эти системы нашли широкое применение в методах контроля в таможенных и пограничных службах. На рис. 3.14 приведены примеры такого контроля [50].

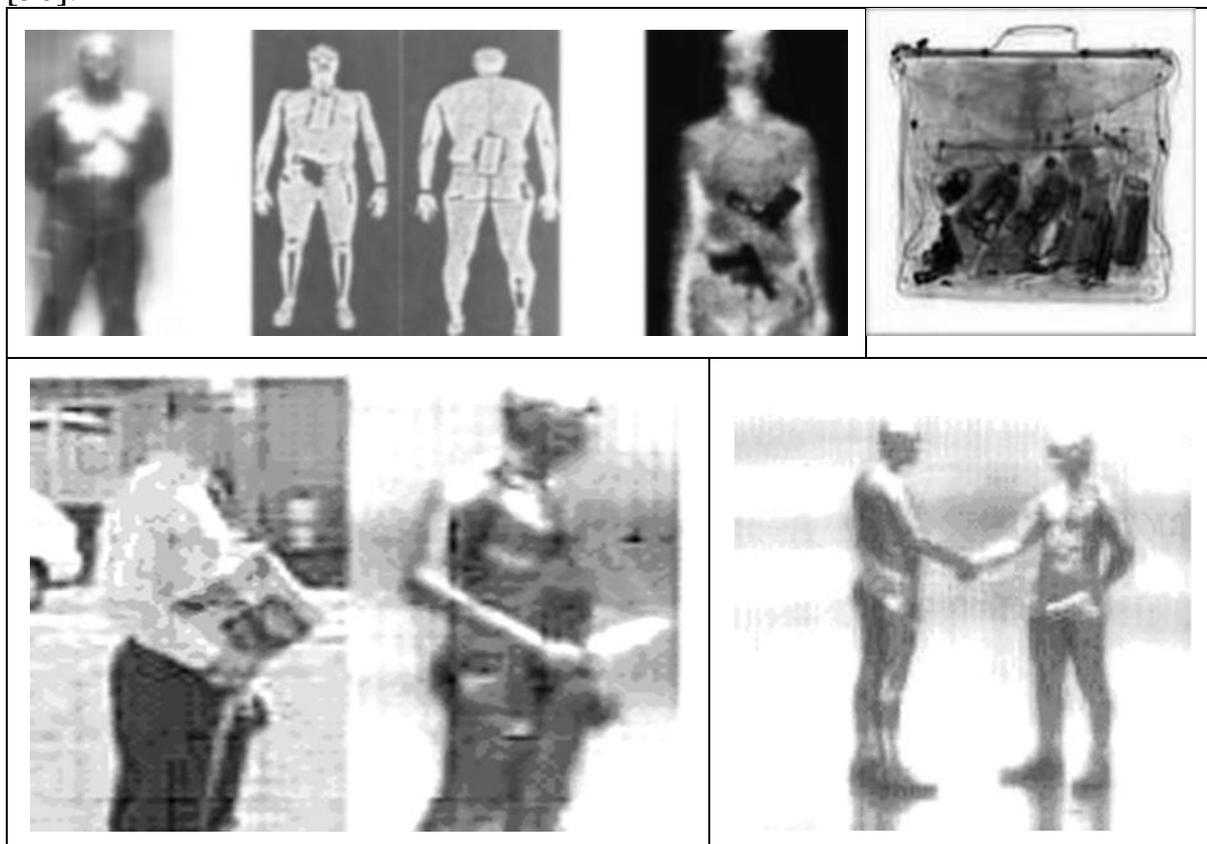


Рис. 3.14. Применение сверхвысокочастотного радиотеплового метода наблюдения в системе безопасности

В последние годы как в России, так и за рубежом создан ряд приборных комплексов формирования изображений и активного когерентного анализа, которые внедрены в практику работы пограничных и таможенных служб (см. рис. 3.13 и публикации [100, 117 - 121]).

Терагерцовый бум затронул и решил целый ряд насущных задач. К ним относятся следующие задачи.

- Таможенный досмотр ручной клади и нательного обнаружения, запрещенных к перевозке (переносу) предметов в охраняемой зоне. Здесь возможно использование системы зрения терагерцового диапазона. Если на снимке исследуемый объект совмещен с откликом от оружия, проводов, массивных металлических предметов, имеющих большую яркость в отраженном сигнале, то выдается сигнал тревоги [50, 121].
- Определение химического состава ряда сыпучих материалов и жидкостей по их интерференционному отклику на активное когерентное излучение [113, 121].
- Анализ и распознавание текстов в запечатанных конвертах и между страницами книг.

С точки зрения задач дистанционного зондирования измерения в субмиллиметровом диапазоне оптического излучения дают возможность:

- измерять одновременно скорость и направление ветра над океаном, выделять поляризованное излучение морской поверхности на фоне слабополяризованного излучения облаков и осадков;
- определять влажность почвы и зоны осадков над сушей;
- измерять параметры спектра морского волнения в гравитационно-капиллярной области.

В субмиллиметровом диапазоне волн предпочтение чаще всего отдается зеркальным антеннам, отличающимся ахроматичностью, относительно малыми энергетическими потерями и фазовыми искажениями. Они широко применяются в самолетных радиометрах, радиотелескопах и в радиолокационных станциях. В литературе отмечается и повышенная жесткость зеркальных антенн, что существенно в условиях вибрации. Для улучшения КПД и уменьшения продольных габаритов используются двухзеркальные антенны. Коэффициент рассеяния боковых лепестков диаграммы направленности у однозеркальных антенн составляет 0,3–0,5, у комбинированных рупорно-параболических и рупорно-двухзеркальных параболических – 0,01–0,03.

3.8. Комплексирование LWIR, VLWIR и FIR диапазонов

В наибольшей степени требованиям на разработку многоспектральных систем LWIR, VLWIR и FIR диапазонов удовлетворяют фотоприемники на основе квантовых ям (QWIP матрицы), которые могут быть получены, например, на основе структур GaAs/AlGaAs и GaAs/CdHgTe методом молекулярно лучевой эпитаксии. На основе гетеропары GaAs-AlAs удается получить резкие границы гетеропереходов, локализацию легирующей примеси в заданных активных слоях, почти идеальное согласование параметров решеток и, как следствие, относительно высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев квантово-размерной структуры [46].

Рассмотрим типичные схемные решения для подключения матричных ИК фотоприемников на примере двухдиапазонной матрицы ISC9803.

Принципиальная схема ¼-дюймовой матрицы ISC9803 [121] приведена на рис. 3.15, схема полноформатного варианта матрицы – на рис. 3.16, 3.17. Основные технические характеристики матрицы сведены в табл. 3.4.

Для согласования матрицы, выравнивания чувствительности ее элементов и коррекции искажений при согласовании с аналого-цифровым преобразователем обычно схемы включают элементы, представленные на рис. 3.18.

Таблица 3.4. Материалы спецификации на матричный QWIP ISC9803

Параметр	Величина	Единица измерения
Размер матрицы (стандарт)	5	дюйм
Число столбцов	640	активных элементов изображения
Число строк	512	активных элементов изображения
Размер одного элемента	25	МКМ
Размер матрицы	17,7×16,8	ММ

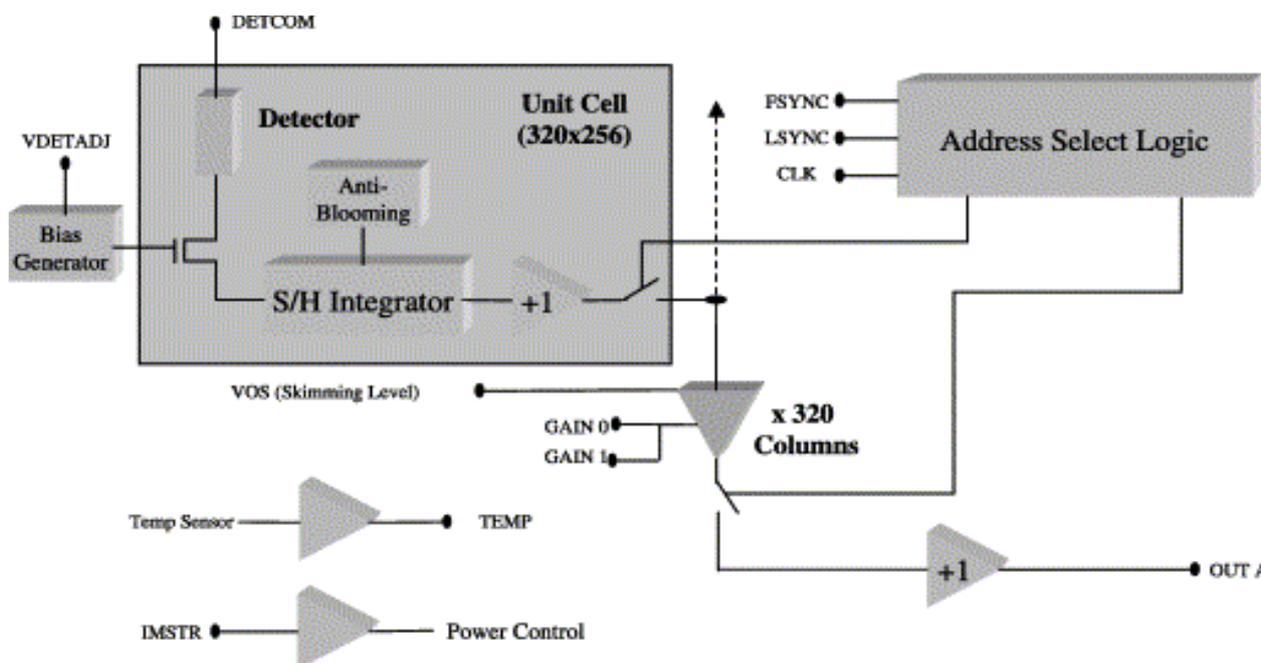


Рис. 3.15. Принципиальная схема ¼ дюймовой матрицы ISC9803

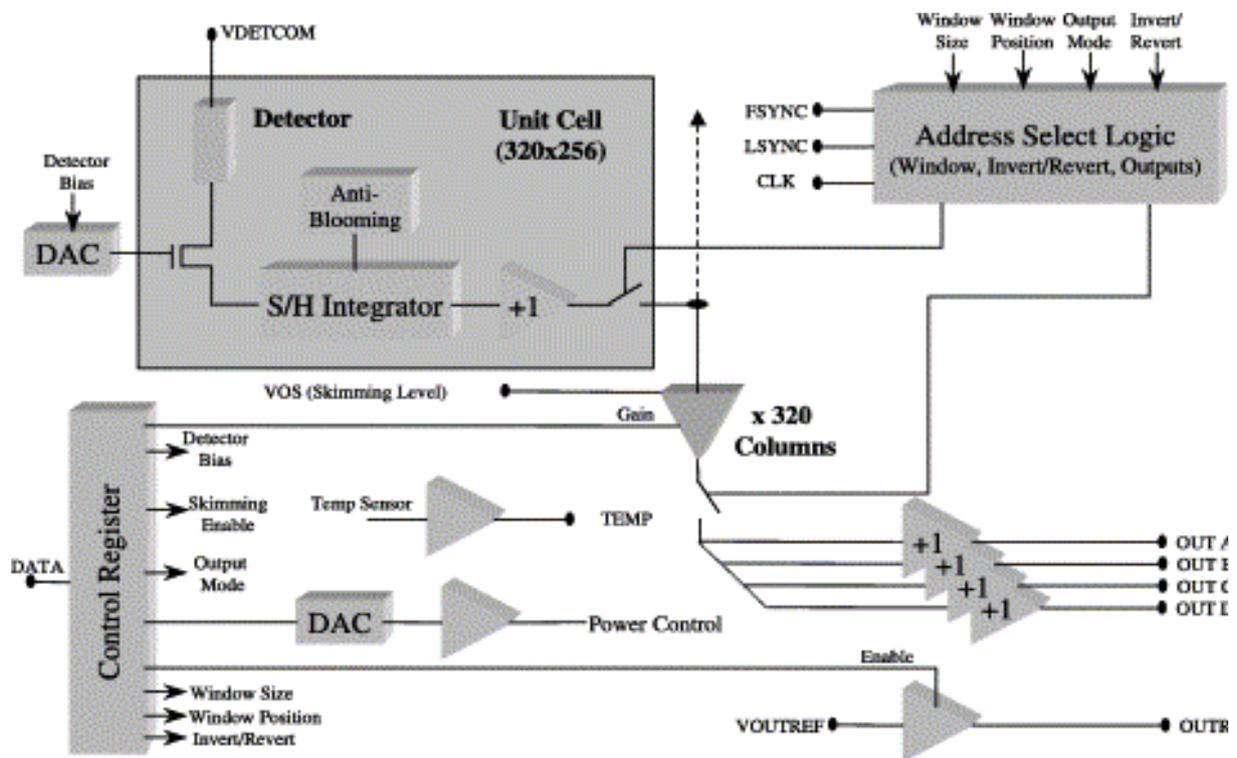


Рис. 3.16. Принципиальная схема полноформатной матрицы ISC9803

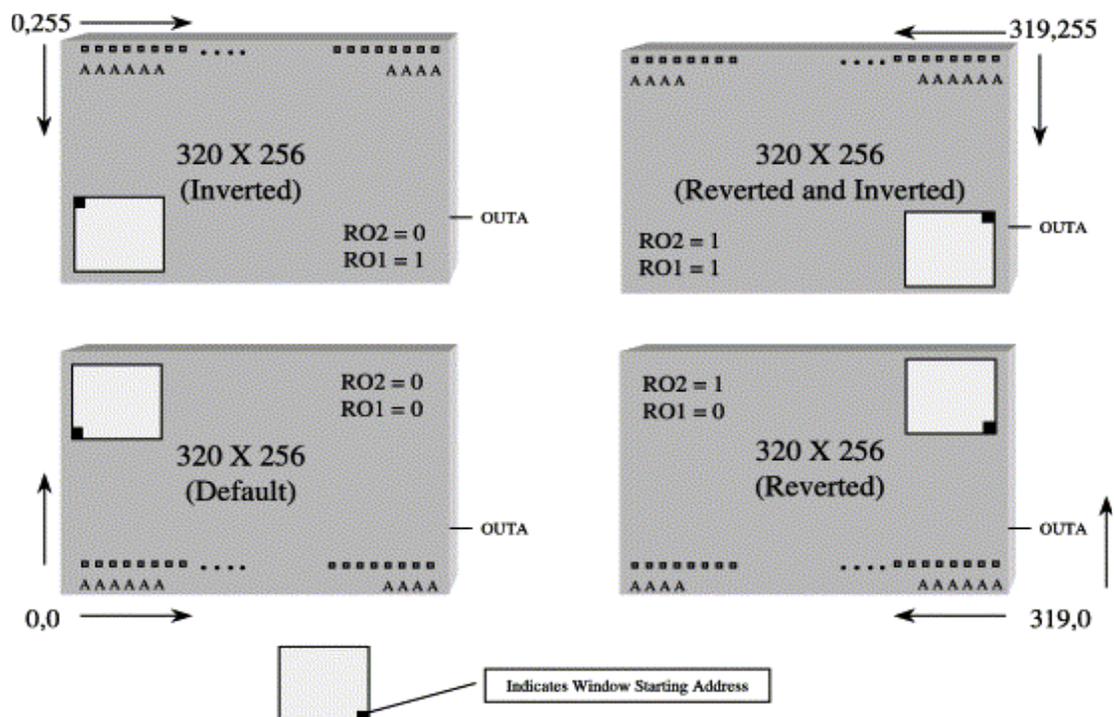


Рис. 3.17. Принцип стандартного опроса полноформатной матрицы

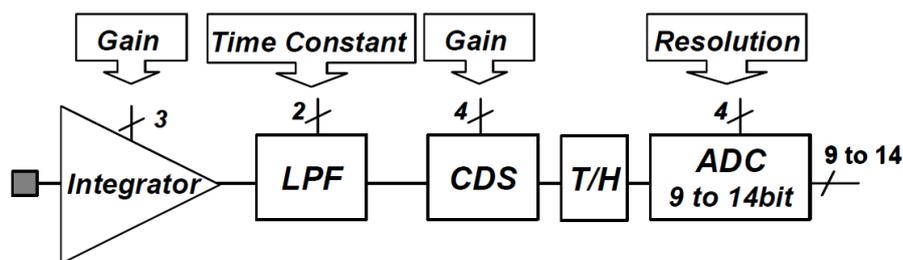


Рис. 3.18. Типовая схема аналого-цифрового блока согласования.

Схема имеет многоступенчатую архитектуру, в которую входит: малошумящий усилитель (интегратор) заряда с программируемым коэффициентом усиления, фильтр нижних частот (LPF) с программируемой постоянной времени, коррелированный усилитель с двойной дискретизацией (CDS) с программируемым коэффициентом усиления, каскад отслеживания и удержания (Т/Н), программируемый АЦП (вывод кодов серого от 9 до 14 бит) [107].

Таких схемных решений множество, они могут отличаться реализуемыми национальными стандартами, просто разными параметрами. В качестве примера можно привести модификацию микросхемы ISC0207 под Европейский стандарт – ISC0208. ISC0208 – высокоэффективная интегральная схема считывания формата 384×288 пикселей. Доступны две версии микросхемы:

- с глубиной потенциальной ямы $18 Me^-$, совместимая с датчиками QWIP;
- с глубиной потенциальной ямы $13 Me^-$, совместимая с датчиками InSb.

ISC0208 построена с использованием подмикронной подложки, дополненной металлическим окисным кремнием (КМОП), в 8-дюймовой форме пластин. Устройства типично поставляют клиентам в 6-дюймовой форме пластины с обширным набором пользовательской документации, и проверяются данные, включенные в каждой поставке.

Развитием комплексированных систем LWIR, VLWIR или FIR диапазонов может быть решение, при котором сочетаются преимущества патента РФ 2305303 [104] и возможности восстановления (электронного масштабирования) изображения формируемого на единой QWIP матрице по схеме рис. 3.13.

Возможно решение, при котором в центральную часть LWIR изображения размерами $4^\circ \times 5^\circ$, $8^\circ \times 10^\circ$ и $16^\circ \times 20^\circ$, формируемого германиевым панкратическим объективом на QWIP матрице с помощью блока обработки изображений, встраивается изображение VLWIR или FIR диапазонов, формируемого на той же QWIP матрице внешним зеркальным объективом с полем зрения $1,5^\circ \times 1,9^\circ$ [104]. Беспараллаксный режим работы канала распознавания (субмиллиметрового диапазона) и канала наблюдения (ИК диапазона) обеспечивается путем попеременного приема на одну матрицу потоков от панкратического ИК-объектива и зеркального узкопольного объектива субмиллиметрового диапазона. Режим перестройки обеспечивается вводом диафрагм кругового или кольцевого типов (рис. 3.11) в параллельном режиме, при котором оба съюстированных объектива формируют изображения на одну приемную QWIP матрицу с полукадровой сменной приемной информации в центральной зоне совмещенного монитора.

3.9. Двухканальные приборы с совмещением изображений

Многоканальные ТПВ подразделяются на комплексированные, комбинированные и интегрированные.

В комбинированных ТПВ каналы имеют одно общее или несколько различных входных окон для разных областей спектра. В комплексированных ТПВ каналы объединяются на основе совмещения оптических осей (полного или частичного). У них имеется одно входное окно, а информация представляется либо раздельно, либо на общем дисплее, при этом отдельные каналы могут работать совместно или автономно.

Наибольший уровень объединения информации обеспечивают интегрированные ТПВ. В них отдельные каналы объединены на основе общей оптической системы, а также системы обработки и представления на единый дисплей интегрированного изображения. Последнее формируется на основе анализа специфических признаков – сигналов с различных каналов, обработки сигналов в реальном масштабе времени в микро-ЭВМ и представления в оптимизированном виде на едином дисплее. Задача эта является достаточно сложной, но разрешимой, и поэтому это направление развития многоканальных приборов является наиболее перспективным.

Проводятся исследования в области совмещения видимого и инфракрасного изображений, полученных в различных каналах единого устройства. Широкие возможности для создания аппаратуры ночного видения, объединяющей в себе различные технологии получения изображений, открывает большое распространение цифровой техники и систем обработки цифровых сигналов. Создаваемая аппаратура позволит сочетать в себе все преимущества обеих технологий: сильную сторону традиционных систем усиления изображений на основе электронно-оптических преобразователей – получение высокоразрешающих изображений в условиях низких освещенностей окружающего пространства, и преимущества ИК технологий, обеспечивающих способность видеть практически в любых природных и боевых условиях. Преобладающее использование цифровых технологий открывает возможность передачи таких интегрированных изображений на большие расстояния, что является очень важным в условиях проведения современных ночных антитеррористических операций в плане взаимодействия отдельных подразделений между собой и со службами поддержки и командования.

Анализ исследований позволяет выделить три направления работ на пути синтеза изображений, полученных в каналах ночного видения и ИК:

- оптическое наложение изображений;
- аналоговое совмещение, получаемое при простом аналоговом (видео) смешивании RS-170 сигналов;
- цифровое совмещение изображений – смешивание изображений на каждом пикселе, на основании заданного алгоритма, что позволит получить единый полный цифровой массив.

В 2003 г. конкурирующими фирмами ITT Night Vision и Northrop Grumman Electro-Optics Systems (NGEOS) были разработаны первые конструкции таких интегрирующих устройств.

ITT, работая в сотрудничестве с компанией Raytheon над разработкой технологии совмещения изображений, создала прототип ТПВ [122] с оптическим совмещением изображений, обеспечивающий хорошую идентификацию объекта (за счет усиленного изображения ночного канала) и улучшенное обнаружение объекта (за счет ИК изображения), что в целом позволило повысить мобильность в работе и осведомленность оператора о конкретной оперативной обстановке.

Вопросами слитного отображения информации на одном дисплее занималась и американская компания Fluke Corporation, разрабатывающая и изготавливающая тепловизионную технику для промышленных целей. В качестве примера приведем разработанную ею технологию FLUKE IR Fusion™ [123]. Технология IR-Fusion™ позволяет получить одновременно изображения объекта в инфракрасном и видимом диапазонах спектра с совпадением изображений с погрешностью до одного пиксела, а также оптимизировать полученные изображения в пяти режимах просмотра, как прямо на приборе, так и с помощью компьютерной программы.

С помощью технологии IR-Fusion™ можно лучше анализировать и идентифицировать детали изображения тепловизора путем оптимальной комбинации ИК и видимых изображений объектов. Эта технология доступна на всех моделях тепловизоров серии FT IR FlexCam компании FLUKE.

В канале видимого диапазона установлена цифровая камера с форматом изображения 1280 (по горизонтали) × 1024 (по вертикали) пикселов, полем обзора 54° (по горизонтали) × 44° (по вертикали), чувствительностью до 1 лк и возможными рабочими дистанциями от 30 см до бесконечности.

Технология может работать в нескольких режимах.

Режим Full IR (Полный ИК) обеспечивает обнаружение и анализ неисправностей оборудования с помощью ИК изображений высокого разрешения, обнаружение малейшей разности температур для отслеживания источника неисправности, с полной документацией мероприятий по ее устранению. Программа автоматически связывает изображения, представленные в полном ИК и в полном видимом режимах.

Режим Picture-in-picture (Кадр в кадре) создает окно ИК изображения, окруженное изображением объекта в видимом диапазоне, что позволяет легко идентифицировать тепловые аномалии и одновременно увидеть объект с его окружением.

Режим Alpha Blending (Альфа-смешивание) позволяет скомбинировать инфракрасное и видимое изображения в любом соотношении и создавать детализированное изображение для оптимизации процесса локализации неисправностей.

Режим IR/Visible Alarm (Сигнализация в режиме ИК/Видимый) отображает на ИК-изображении только области с температурой выше, ниже или между

установленными пределами, отображая остальные области в режиме полностью видимого изображения.

Режим Full Visible Light (Полностью видимый) предоставляет яркое и четкое изображение в видимом свете.

Действительным преимуществом технологии IR-Fusion является программное обеспечение SmartView, которое предоставляет возможность комбинированной съемки сотен изображений в ИК и видимом диапазонах с добавлением аннотаций в полевых условиях и их оперативного импорта в программу SmartView. Средства обработки изображений, предусмотренные в программе – пять режимов регулировки IR-Fusion – позволяют повысить информационную ценность каждого изображения, выполнить сложный анализ и легко и быстро создавать профессиональные отчеты. Все функции составления отчетов SmartView полностью настраиваются пользователем.

Несмотря на широту имеющихся возможностей, предоставляемых технологиями создания интегрированных изображений в различных сферах деятельности человека, главными заказчиками и пользователями полученных результатов являются на сегодняшний день военные и специальные ведомства.

Цифровые улучшенные приборы ночного видения – это развитие обычных приборов ночного видения, которые теперь являются не просто устройствами наблюдения, но приобрели важную функцию передачи изображения другим пользователям на удаленное расстояние, а также передавать дополнительную информацию, например, координаты прибора.

3.10. Проблема совмещения изображений и возможности ее решения

Проблема совмещения изображений заключается в установлении соответствия между точками двух или более изображений. Данная проблема является фундаментальной для компьютерного видения, поскольку необходимость совмещения изображений возникает при решении таких задач, как выявление изменений в серии изображений, анализ движения, объединение информации от различных сенсоров, стереозрение и текстурный анализ.

Задача совмещения изображений также имеет глубокую связь с задачей распознавания объекта по его изображению, что позволяет переносить общие решения, найденные для одной задачи, на другую.

В настоящее время существует большое число методов совмещения изображений, которые были разработаны для различных ограничений на исходные данные. Основной задачей совмещения является приведение изображений в общую систему координат. Как пространственное преобразование, так и преобразование яркости может быть обусловлено также и тем, что совмещаемые изображения получены при помощи различного типа сенсоров.

Опорными точками при совмещении двух изображений являются такие точки, для которых соответствующие позиции были идентифицированы на обоих изображениях. Погрешности в отображении опорных точек могут быть

использованы для оценки погрешности данного пространственного преобразования.

Еще не так давно, 15–20 лет назад, выбор и отождествление опорных точек осуществлялось человеком-оператором. В более поздних, полуавтоматических методах оператору требовалось лишь производить отождествление, а отбор и точное определение координат опорных точек производилось компьютерными программами. Сейчас ведется разработка полностью автоматических методов, не требующих вмешательства человека.

Следующим важным элементом метода совмещения является тип используемых характерных признаков изображения. По этому критерию выделяют два существенно отличающихся подхода: методы, основанные на площадях, и методы, основанные на деталях изображения. В первом случае характерными признаками изображения являются сами пиксели с соответствующими им значениями сигнала. Во втором случае в качестве характерных признаков могут выступать точки контуров, структурные или геометрические элементы, пятна текстур и даже конкретные объекты физического мира (совмещение изображений, основанное на знаниях). При этом каждая деталь на изображении задает опорную точку с соответствующими координатами.

Принципы совмещения изображений, построенных в виде формирователей оптического наблюдения непосредственно по каждому из каналов, можно рассмотреть на примерах патентов и публикаций [124, 125].

Отличительной особенностью телекамеры по патенту [124] является малокадровый темп самосканируемой развертки матрицы ПЗС, режим импульсного экспонирования фотоприемника и использование его секции накопления и секции памяти в качестве двух фотомишеней одновременно. Видеосигнал строки телекамеры содержит число отсчетов (пикселов), равное суммарному числу элементов в регистрах матрицы ПЗС, а видеосигнал кадра – стандартное число строк и формат 4/3, совпадающий с форматом отдельной фотомишени.

Структурная схема телекамеры [124] показана на рис. 3.19. Она содержит оптический блок (1); матрицу ПЗС (2); четыре преобразователя уровней (3), (4), (5) и (6); формирователь управляющих сигналов (7); два видеоусилителя (8) и (9); блок обработки видеосигнала (10).

На оптический блок (1) возложены две основные задачи:

- реализация режима импульсного освещения двух контролируемых объектов (“левого” и “правого”) при помощи двух синхронно работающих импульсных источников оптического излучения;
- изменение масштаба каждого из оптических изображений в горизонтальном направлении.

Оптическое масштабирование, действующее как оптическая “растяжка” по горизонтали для входных изображений, выполняется анаморфотными объективами. Отметим, что промышленная реализация таких объективов с необходимыми коэффициентами анаморфирования по горизонтали в настоящее время не вызывает технических трудностей.

Направляющие оптические элементы (1–5), (1–6) и (1–8) выполняют параллельный перенос каждой из двух оптических осей. Оборачивающий оптический элемент (1–7) осуществляет разворот изображения на мишени (2–2) по отношению к изображению на мишени (2–1) на 180° . Следует добавить, что для упрощения начертания структурной схемы телекамеры на рис. 3.19 ход лучей кадра не показан.

При промышленном производстве оптического блока (1) оборачивающий оптический элемент (1–7) целесообразно изготовить в виде призмы Довэ или призмы Пехана.

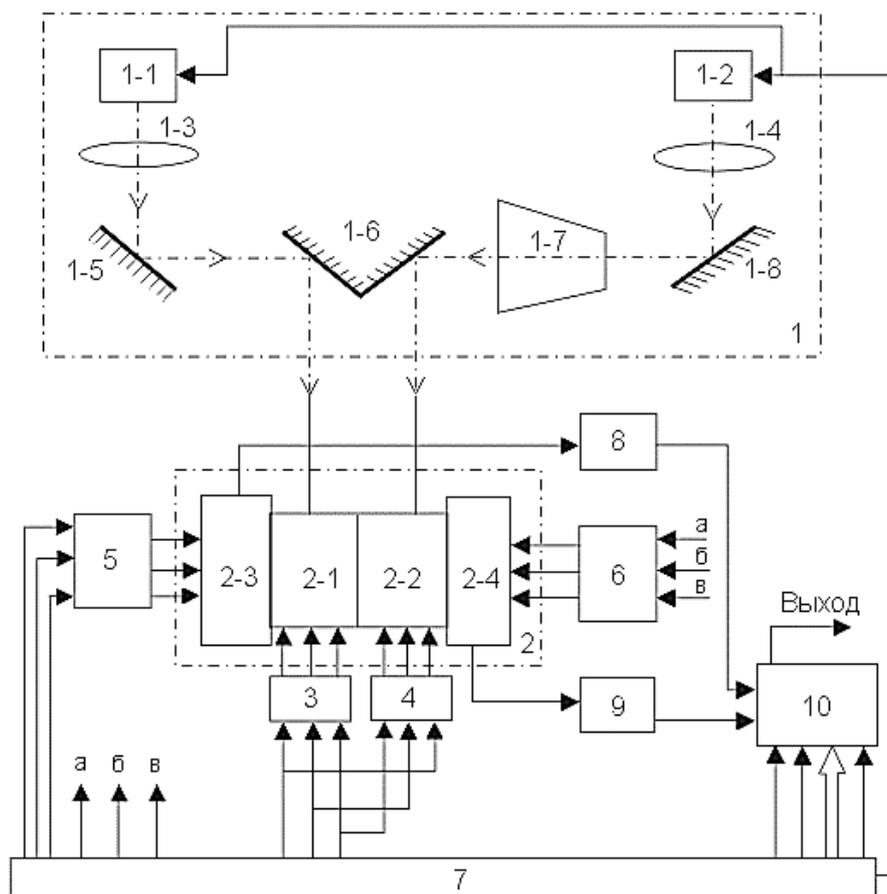


Рис. 3.19. Структурная схема телекамеры согласно изобретению [124]

Режим импульсного экспонирования, обеспечиваемый синхронно работающими импульсными источниками оптического излучения (1–1) и (1–2), осуществляется так, что в течение обратного хода кадровой развертки оба оптических канала открыты, а во время прямого хода – закрыты. Управление блоками (1–1) и (1–2) производится при помощи кадрового гасящего импульса, подаваемого с выхода формирователя управляющих сигналов (7).

Коэффициенты анаморфирования объективов (1–3) и (1–4) по полю кадра равны 0,5. Поэтому на секцию (2–1) поступает импульсное изображение “левого” объекта, растянутое вдвое по горизонтали, а на секцию (2–2) – растянутое вдвое в том же направлении импульсное изображение “правого” объекта.

К моменту окончания интервала кадрового гашения на фотомишенях (2–1) и (2–2) заканчивается формирование зарядовых рельефов соответственно для “левого” и “правого” объектов контроля. В течение прямого хода кадровой развертки выполняется поочередное считывание зарядовых пакетов при закрытых оптических каналах (в темноте) на секции (2–1) в выходной регистр (2–3) и из секции (2–2) в регистр (2–4).

Во время первой половины активной части каждой строки считываются все горизонтальные пикселы секции (2–1), а во время второй половины – все пикселы секции (2–2). Важно отметить, что удвоенная частота переноса зарядовых пакетов в регистрах, благодаря малокадровому режиму разложения, остается существенно ниже предельной частоты опроса ПЗС-линейки, для которой необходимо учитывать искажения сигнала изображения из-за неэффективности переноса.

В результате видеосигналы на первом и втором выходах матрицы ПЗС содержат видеоинформацию с восстановленным (неискаженным) масштабом для “левого” и “правого” объектов контроля. Далее через буферные видеоусилители (8) и (9) видеосигналы от матрицы ПЗС поступают на блок (10), где выполняется процедура их предварительной обработки и объединения (“сшивки”). На выходе телекамеры в малокадровом темпе формируется совмещенный видеосигнал, в каждой активной строке которого последовательно передаются полностью сигналы изображения от “левого” и “правого” объектов контроля.

Использование одной матрицы ПЗС для двух видеоканалов обеспечивает идентичность режимов работы, идентичность изменения характеристик при старении, стабильность взаимных геометрических характеристик двух мишеней изображения.

Другой вариант совмещения изображения реализован в патенте [125]. Он основан на голографическом принципе совмещения изображений и реализует совмещение изображений путем переноса оптических изображений тепловизионного и телевизионного каналов на пространственно-временные модуляторы оптического излучения с последующим лазерным считыванием и восстановлением совмещенных изображений. Такой вариант можно использовать в системах обработки оптических изображений и в системах сравнения изображений.

Оптическая схема представлена на рис. 3.20. Между каждым кадровым окном и соответствующим проекционным объективом установлен дополнительный проекционный объектив и пространственно-временной модулятор оптического излучения (ПВМ) с оптической записью и считыванием изображения, оптически сопряженный через дополнительный проекционный объектив с кадровым окном, а через основной проекционный объектив – с проекционным экраном. Источник считывающего оптического излучения снабжен телескопической формирующей системой. В системе имеется три светоделительных кубика: первый содержит отражающий внутренний слой и установлен с возможностью вращения вокруг оси, параллельно оси телескопической формирующей системы, а два других содержат полупрозражающий внутренний слой, оптически связаны с первым и установлены симметрично относительно него между

соответствующими пространственно-временным модулятором оптического излучения и проекционным объективом.

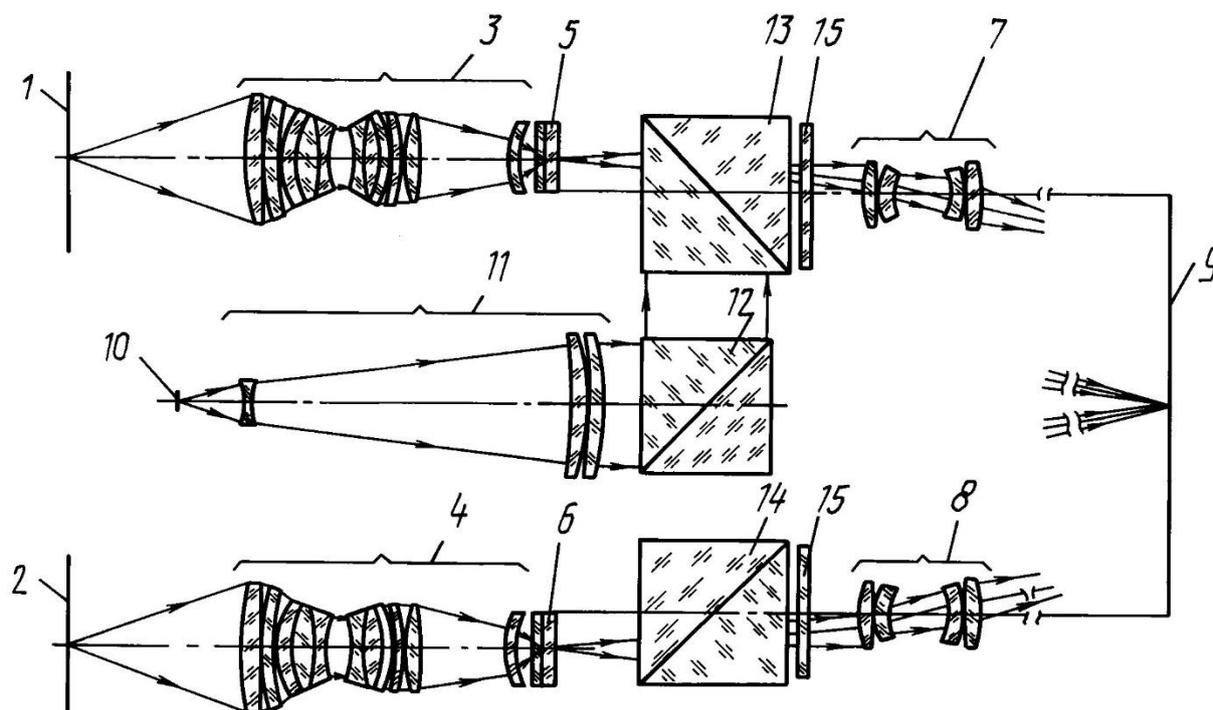


Рис. 3.20. Оптическая схема сравнения изображений на основе голографического принципа совмещения изображений

Оптическая система формирует два кадра 1, 2, изображения которых сравниваются, объективы 3, 4, элементы с активными средами 5, 6, которые запоминают полученное изображение и составляют ПВМ. Два одинаковых объектива 7, 8, оси которых смещены относительно осей изображений кадров в ПВМ, создают прямое изображение кадров в плоскости 9. Устройство также содержит лазер 10, формирующую телескопическую оптическую систему 11, вращающийся светоделительный кубик 12 с отражающим внутренним слоем, два симметрично расположенных кубика 13, 14 с полуотражающими внутренними слоями, поляризатор 15.

Сравнивание изображений обеспечивается за счет получения изображения объектов 1, 2 объективами 3 и 4 в пространстве ПВМ 5, 6. ПВМ попеременно подсвечивается лазерным пучком после системы 11 за счет поворота кубика 12 и кубиков 13, 14. Созданное в ПВМ изображение объективами 7, 8 переносится, в свою очередь, в плоскости 9, где и происходит их наложение. Возможно также помещение в плоскости 9 эталонного изображения.

Схема объективов 3, 4 представлена на рис. 3.21 и 3.22. Вращение первого кубика вокруг оси, параллельной оси телескопической системы, позволяет осуществить подсветку ПВМ поочередно. Объективы в первой части обладают увеличением 0,27 и обеспечивают удовлетворительное разрешение до 50 л/мм.

Объективы второй части обладают увеличением 3,57 и обеспечивают удовлетворительное разрешение 30 л/мм. Телескопическая система обладает угловым увеличением 0,07 при абберационной расходимости выходящего излучения.

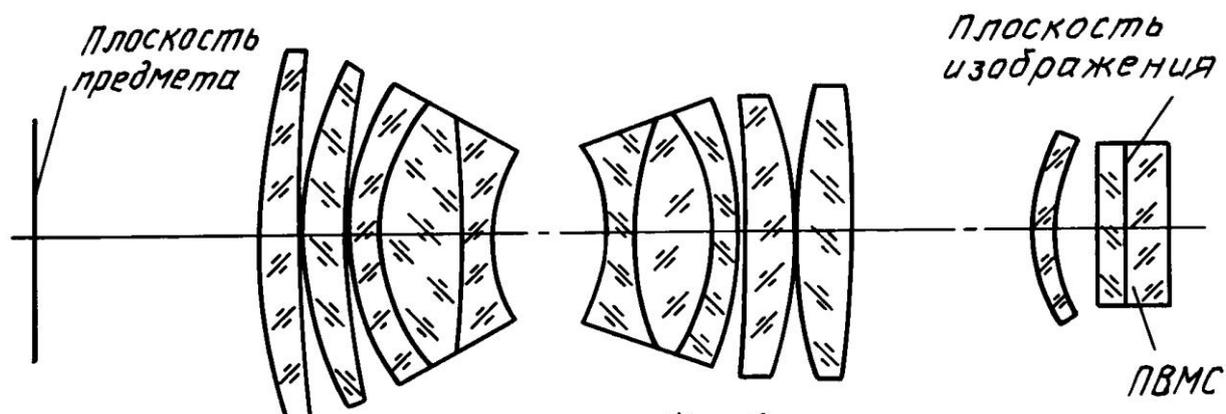


Рис. 3.21. Объектив переноса изображения одного из каналов

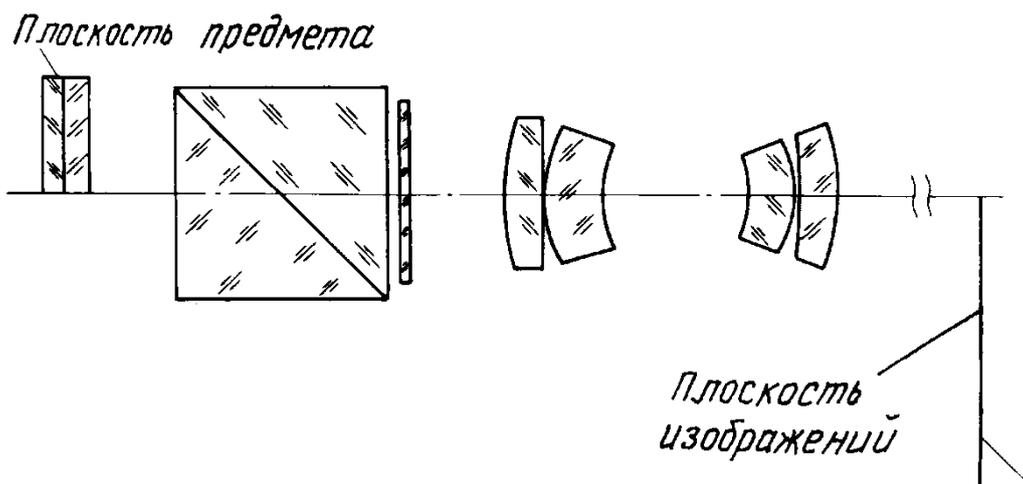


Рис. 3.22. Узел формирования изображений одного из каналов

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОЙ ПОДСВЕТКИ

4.1. Лазерная подсветка в тепловизионных системах

Одновременное использование нескольких диапазонов излучения объекта, в том числе с применением активной подсветки, создает существенные преимущества в эффективности ТПВ. В связи с этим важным направлением исследований является создание активно-пассивных тепловизионных систем (ТПС).

Основным средством создания активной подсветки в ТПС сегодня является лазер, на базе которого создаются ТПС с лазерной подсветкой (рис. 4.1).

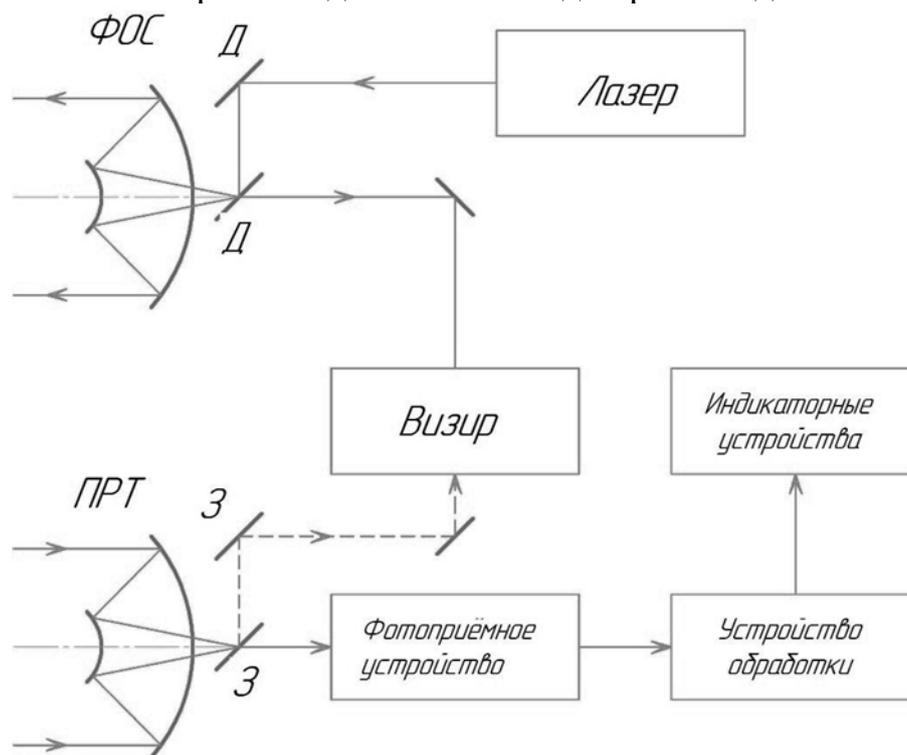


Рис. 4.1. Структурная схема и особенности построения ТПС с лазерной подсветкой

Лазерной локации присущ ряд важных особенностей.

1) Когерентность излучения лазеров позволили получать узкие диаграммы направленности (от единиц до десятков угловых секунд) даже при небольших размерах излучателей (единицы дециметров). При расходимости излучения, равной одной угловой секунде ($1'' \cong 5 \times 10^{-6}$ рад), поперечный размер облучаемой области на дальности 200 км составляет 1 м, что позволяет отдельно наблюдать отдельные элементы цели.

2) Временная и пространственная когерентности излучения лазеров обеспечивают стабильность частоты при высокой спектральной плотности их мощности; последнее, а также остронаправленность лазерного излучения обуславливают высокую помехозащищенность лазерных локационных средств от воздействия естественных источников излучения.

3) Высокая частота колебаний приводит к большим доплеровским сдвигам частоты при взаимных перемещениях цели и локатора; это обеспечивает высокую точность измерения радиальной скорости элементов цели, но требует расширения полосы приемных устройств.

4) Распространение волн оптического диапазона в газообразных и жидких средах сопровождается их значительным рассеянием; это приводит к атмосферным помехам обратного рассеяния на входе приемного устройства и является, кроме того, демаскирующим фактором.

В локации используются лазеры на двуокиси углерода CO_2 , на ионах неодима, на рубине, на парах меди и др.

Газовые CO_2 -лазеры обладают высокими средними выходными мощностями (до десятков киловатт), высокой монохроматичностью (ширина спектра несколько килогерц), высоким КПД (до 20%), они работают как в непрерывном, так и в импульсном режиме, компактны. Твердотельные неодимовые и рубиновые лазеры используются в основном в импульсном режиме (частота повторения 0,1–100 Гц); энергия их излучения в импульсе до единиц джоулей; КПД единицы процентов. Лазеры на парах меди обеспечивают высокую частоту повторения (до десятков килогерц) при средней мощности до 100 Вт.

Требуемое распределение потока зондирующего (лазерного) излучения в пространстве обеспечивается формирующей оптической системой. В нее может входить система неуправляемых зеркал (З), линз и управляемых дефлекторов (Д), обеспечивающих перемещение луча. Отраженные от целей лазерные сигналы концентрируются приемным телескопом на фотоприемных устройствах. Объединение передающей и приемной систем лазерных локаторов, в отличие от радиолокационных станций (РЛС), используется редко из-за перегрузок фотоприемных устройств и нарастания уровня помех. Как передающая, так и приемная оптическая система перспективных лазерных локаторов выполняется в настоящее время в адаптивном варианте для компенсации искажений волновых фронтов сигналов в атмосфере и средах лазерных генераторов.

В фотоприемных устройствах лазерного локатора, в отличие от РЛС, практически не используют усиления сигналов на несущей частоте. При этом усложняется конструкция и затрудняется обзор пространства. Используется лишь прямое усиление видеосигналов, а при гетеродинном приеме – радиосигналов промежуточной частоты. Видеочастотное усиление используется преимущественно в видимом и УФ диапазоне. Для этого диапазона имеются малошумящие фотоприемники с внешним фотоэффектом (т.е. с выбиванием электронов квантами оптического излучения из фотокатода). Радиочастотное усиление используется в ИК диапазоне, в котором внешний фотоэффект не реализуется из-за недостаточной энергии кванта излучения, зато гетеродинный прием снижает значимость шумов внутреннего фотоэффекта.

При гетеродинном приеме в состав фотоприемного устройства вводят лазерный гетеродин и смеситель в виде полупрозрачного зеркала или светоделительной призмы. При этом, в случае взаимной когерентности излучений лазерного гетеродина и передающего устройства, возможна когерентная обработка

принимаемого сигнала. Поэтому гетеродинный прием используется не только для подавления внутренних шумов в ИК диапазоне, но и для извлечения информации из фазовой структуры принимаемого поля в видимом и УФ диапазоне.

При интерферометрическом приеме на входе фотоприемного устройства суммируются поля от двух или нескольких пространственно-разнесенных точек (областей) плоскости приемной апертуры. По результату интерференции полей определяются их взаимная когерентность и фазовые соотношения.

По набору измерений при различном разnose точек приема можно восстанавливать пространственное распределение амплитуды и фазы принимаемого поля. Интерферометрический прием используется в отсутствие гетеродина для извлечения информации из фазовой структуры принимаемого поля, а также для увеличения углового разрешения и синтеза апертуры блок-схемы ТПВК с пассивно-активными режимами работы.

Особое место среди систем с активной подсветкой занимают лидары – лазерные локаторы, работающие в видимом или ближнем ИК диапазонах волн. Лидар как прибор подобен радару, поэтому его применение – это наблюдение и обнаружение, но вместо радиоволн как в радаре в нем используется оптическое излучение, генерируемое в подавляющем большинстве случаев лазером.

В качестве примера функциональной разработки лидарных систем на импульсных диодных лазерах можно привести схему (рис. 4.2) разработанную специалистами Института электроники (Болгария, София) [126].

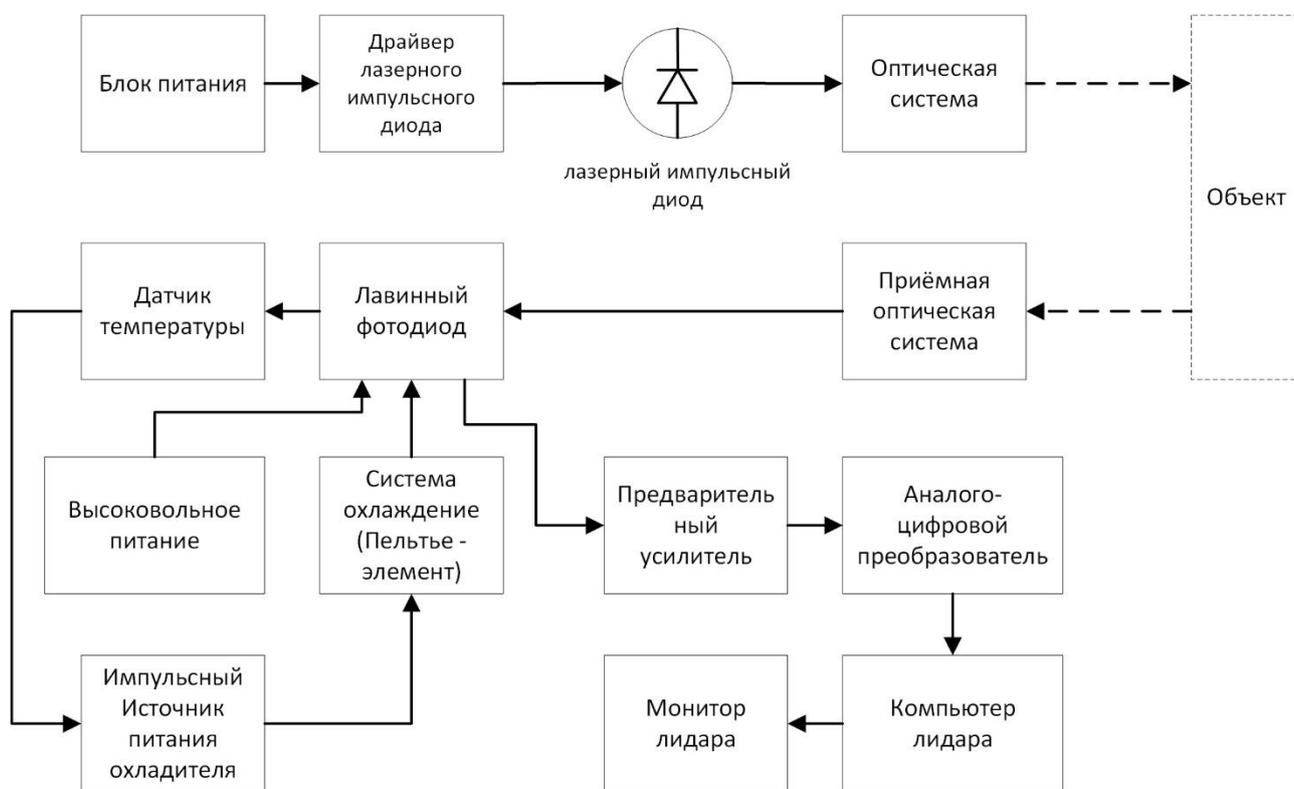


Рис. 4.2. Структурная схема типовой лидарной установки

В последние годы разработан целый класс высокочувствительных лидаров ИК диапазона, позволяющих решать не только задачи экологического мониторинга, но и обеспечивающих высокоэффективное обнаружение и распознавание целей на сложном фоне и особенно в неблагоприятных погодных условиях. Этот значительный прогресс обусловлен созданием целого ряда аппаратно-программных средств, которые не только обрабатывают лидарные сигналы в реальном времени, но также используют возможности GPS и GLONASS, что обеспечивает прецизионную топографическую привязку к местности, а также возможность построения и выдачи оператору станции 3D изображений целей и рельефа местности. В зарубежной литературе это направление получило название «LIDAR Mapping Technology».

Главные преимуществ использования лидара как технологии обзора состоят в следующем:

- все данные получаются в цифровой форме;
- не требуются определенные условия солнечного освещения или даже в принципе дневной свет;
- данные получаются быстро;
- обработка может быть автоматизирована;
- обеспечивается получение информации в труднодоступных или экологически небезопасных областях.

4.2. Зарубежные разработки лидарных систем

Лидарные системы применяются для создания цифровых моделей рельефа, нефте- и газопроводов, обследования ЛЭП, создания и обновления топографических карт. Использование лидарных систем позволяет эффективно отслеживать изменения на стадии строительства различных искусственных сооружений, что снижает затраты на строительства и позволяет оперативно вносить изменения в проект. Такой способ получения топографических данных позволяет получить максимум топографической и цифровой информации о местности съемки.

Лазерный сканер для аэросъемки местности ALTM™ Galaxy T1000 [127] (рис. 4.3). Выпускается большое количество аналогичных систем, предназначенных для картографирования местности с помощью лазерных систем (ALTM - Airborne Laser Terrain Mapping). Технические характеристики лазерного сканера ALTM Galaxy T1000 представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Характеристики ALTM Galaxy T1000

Высота съемки	150-4700м
Абсолютная погрешность по горизонтали	1/10,000 × высота; 1 σ
Абсолютная погрешность определения высоты	< 0,03-0,20м
Углы сканирования	10-60°

Ширина захвата	10-115% от высоты
Частота сканирования	0-120 Гц
Лазерная частота импульсов	50-1000 кГц
Угловое разрешение	0,25 мрад
Тип лазера	Class IV (US FDA 21 CFR 1040.10 and 1040.11; IEC/EN 60825-1)
Длина волны лазера	1064 нм
Размеры и вес	0,34 × 0,34 × 0,25 м, 27 кг — PDU: 0,42 × 0,33 × 0,10 м, 6,5 кг



Рис. 4.3. ALTM™ Galaxy T1000, установленный на гиостабилизированной платформе

Устройство ADS 80 [128] фирмы Leica Geosystems предназначено для производства аэрофотосъемки местности с нормированной метрологической погрешностью, для выполнения аэросъемки в геодезии, топографии, землеустройстве, межевании, кадастре и других видах аэрогеодезических работ.

Основные характеристики устройства ADS 80:

- первый канал (головка SH81) – две группы по 4 матрицы смещенные относительно друг друга на 0,5 пикселей (8x12000 пикселей, сдвиг 3,25 мкм);
- второй канал (головка SH82) – 4 одинарные линейки CCD (каждая – 12000 пикселей). в спектральных диапазонах: красный (608–662 нм), зеленый (533–587 нм), синий (428–492 нм) и ближний ИК (833–887 нм)
- размер элемента 6,5 мкм×6,5 мкм;
- поле обзора 64°;
- относительное отверстие – 1/4;
- система навигация Leica IPAS20 с GPS и Глонасс;
- гиросtabilизированная платформа Leica PAV30;
- вес – 61 – 65 кг.

Внешний вид и общий принцип построения устройства ADS 80 иллюстрируются на рис. 4.4, 4.5



Рис. 4.4. Оптический блок панхроматического CCD линейного сканера ADS 80

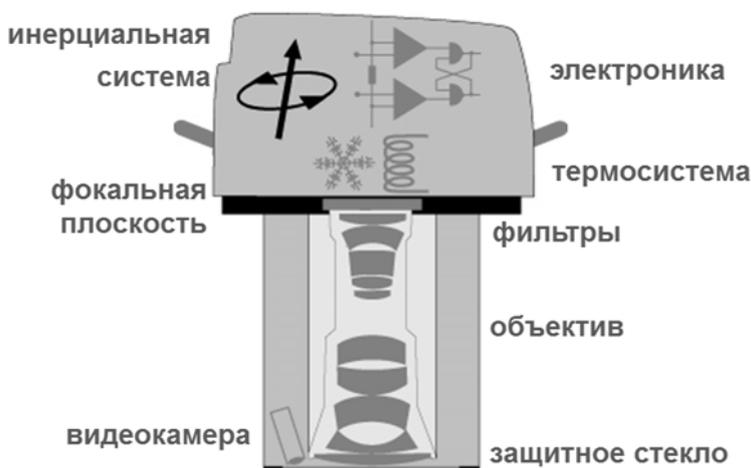


Рис. 4.5. Схема оптической системы ADS 80

Цифровая аэрофотосъемочная камера Ultra Cam Eagle [128] является на сегодняшний день одной из самых производительных крупноформатных камер в своем классе (рис. 4.6). Камеры Ultra CAM Eagle предназначены для проведения аэрофотосъемки при решении топографо-геодезических задач. При этом выполняется мультисенсорная съемка (панхроматическая, цветная и инфракрасная одновременно). Основные технические характеристики цифровой топографической аэрофотокамеры UltraCAM Eagle приведены в таблице 4.2.



Рис. 4.6. Модульные цифровые авиационные камеры UltraCAM Eagle

Таблица 4.1. Характеристики Ultra CAM Eagle

Формат изображения	Аналог пленочного формата 23×15 см
Выходные форматы изображений	JPEG; TIFF 8, 12 или 16 bit
Форматы изображений после уровня 3	Спектрзональные, цветные и/или панхроматические снимки полного разрешения
Технические характеристики сенсорного блока камеры	
Размер панхроматического изображения	20010×13080 пикселей 260 мегапикселей
Размер элемента изображения	5,2 мкм
Физический размер матрицы	104×68 мм
Фокусное расстояние	Оптическая система 1: 80 мм PAN и 27 мм RGBNIR Оптическая система 2: 210 мм PAN и 70 мм RGBNIR
Максимальная диафрагма	$f = 1/5,6$
Количество цветовых каналов (спектрзональная съемка)	4 канала - RGB&NIR
Диапазон выдержек	от 1/500 до 1/32
Максимальная величина компенсации смаза	50 пикселей
Габаритный размер сенсорного блока камеры, см	43×43×76
Вес, кг	< 75

Лидарные системы ALS-40, ALS-50 [129] (рис. 4.7) предназначены для аэросъемки. Системы имеют максимальные габариты по одному из измерений около 21,6 см, вес менее 30 кг, могут быть установлены на борту вертолета или легкого самолета. Основные характеристики системы:

- ИК лазер с частотой следования 38000 импульсов в секунду;
- Диапазон углов сканирования 0–75 °;
- Диапазон частот сканирования зеркалом 0–38 КГц;
- Номинальное пространственное разрешение 1 м;
- Пятно подсвета лазерного луча 0,5–2 м.



Рисунок 4.7. Внешний вид лидарной системы ALS-50 Lidar System для авиационных носителей

Примеры регистрации информации, получаемой с лидара, приведены на рис. 4.8, 4.9.



Рисунок 4.8. Аэродром. Общий план

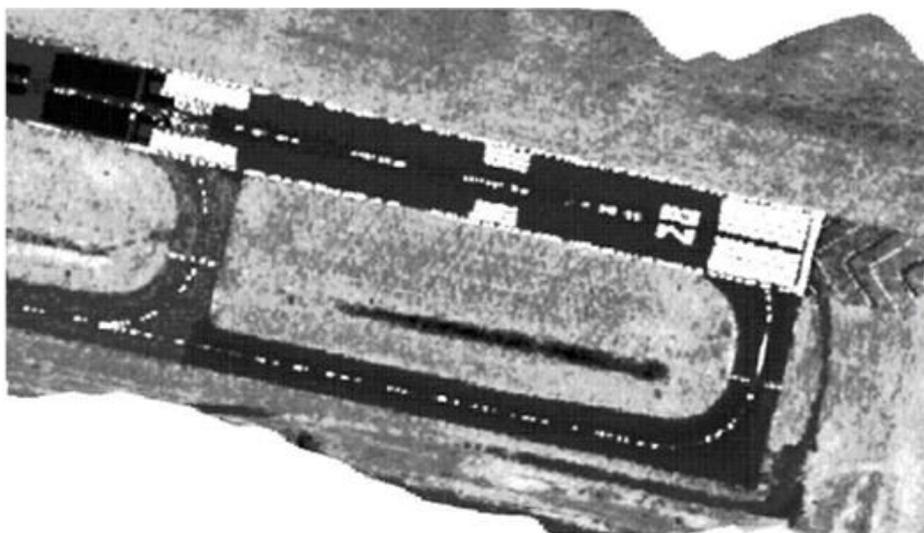


Рис. 4.9. Аэродром. Конец взлетной полосы

Лазерные радарные системы с синтезированной апертурой. Компания Northrop Grumman разработала и успешно испытала одну из первых в мире лазерных радарных систем (лидар) с синтезированной апертурой [130]. До того момента принцип синтезирования апертуры применялся только в радиолокационных системах. Программа под наименованием SALTI (Synthetic Aperture Radar for Tactical Imaging – лидар с синтезированной апертурой для тактической съемки) – финансируется управлением перспективных разработок Министерства обороны США DARPA и предназначена для внедрения принципов и технологий синтезирования апертуры, отработанных в радиотехнике на РЛС, в оптический диапазон электромагнитного спектра в целях получения беспрецедентно высокого пространственного разрешения на больших дальностях наблюдения.

Летные испытания были проведены на авиабазе Эдвардс с использованием специально разработанного CO₂-лазера, установленного на самолете ВАС 1–11 компании Northrop Grumman при технической поддержке исследовательской лаборатории ВВС AFRL и 412 испытательного авиакрыла в период 31 марта – 3 апреля 2006 г. (о результатах официально объявлено позже). Результаты испытаний доказали, что принцип синтезирования апертуры действует и в оптическом диапазоне электромагнитного спектра и позволяет получать изображения фотографического качества на расстояниях, намного превышающих дальность съемки всех существующих оптико-электронных систем [127].

4.3. Отечественные разработки лидарных систем

Многоволновой NH₃-лидар для анализа газовых загрязнений в атмосфере на основе оптически накачиваемого NH₃-лазера [131] создан в РИЦ «Курчатовский институт» совместно с Государственным научным центром ТРИНИТИ. Использование этого лидара для дистанционного зондирования атмосферы позволяет одновременно обнаруживать несколько примесей и измерять их количество.

Основные преимущества многоволнового NH_3 -лидара:

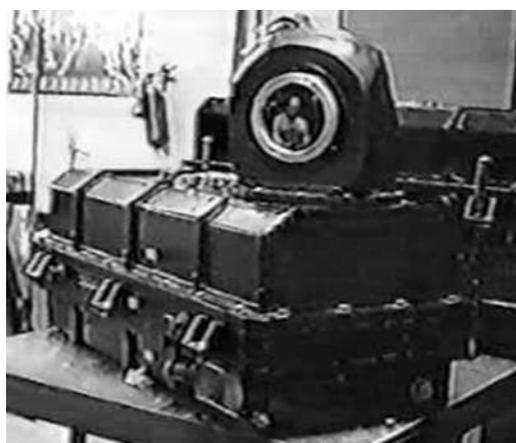
- одновременный контроль и измерение нескольких примесей в атмосфере в режиме реального времени (с временным разрешением до нескольких секунд);
- повышенная точность измерений за счет уменьшения влияния атмосферных флуктуаций при одновременном приеме нескольких линий;
- возможность создания высоконадежного относительно компактного мобильного прибора с дальностью действия в несколько километров;
- возможность контроля большого количества химических соединений, таких как фреоны, органические и неорганические вещества, имеющие в структуре химические связи типа *N-H, *C-Cl, большинство боевых отравляющих веществ;
- высокие параметры и хороший технологический уровень ИП CO_2 и NH_3 - лазеров, использующихся в лидаре.

ИК-гетеродинный лидар дифференциального поглощения и рассеяния [132], созданный в НИИ КП, обеспечивает измерения распределения в пространстве концентрации веществ в многокомпонентных смесях в виде газов (паров) и аэрозолей. Аппаратура может иметь наземное (рис. 4.10, а) или бортовое (рис. 4.10, б) базирование.

В состав аппаратуры входит ИК-гетеродинный лидар дифференциального поглощения и рассеяния с парой (или более) непрерывных перестраиваемых в диапазоне 9–11 мкм одночастотных CO_2 лазеров.



а)



б)

Рис. 4.10. Внешний вид гетеродинного CO_2 лидара:
а – в стационарном исполнении, б – в вертолетном исполнении

Излучение каждого из лазеров (рис.4.11) делится на два пучка – сигнальный и гетеродинный. Сигнальные пучки совмещаются в один канал и направляются в антенну. Гетеродинные пучки, получив частотный сдвиг в акусто-оптических модуляторах, объединяются и направляются на смеситель, где смешиваются с отраженным излучением. После этого излучение поступает на

криогенные ФПУ. Измерения проводятся в режиме синхронного детектирования, для чего в сигнальном канале устанавливается оптический модулятор.

Лидар обеспечивает непрерывный дистанционный мониторинг воздушного бассейна и подстилающих поверхностей, идентифицируя и измеряя интегральные содержания сильнодействующих ядовитых веществ как в газовой, так и в аэрозольной фазах (биоаэрозолей и радиоактивных аэрозолей). Программно-математическое обеспечение лидара содержит базу данных спектров поглощения и рассеяния на линиях излучения CO_2 лазеров объектов контроля, мешающих примесей и подстилающих поверхностей, алгоритмы и программы обработки измерительной информации.

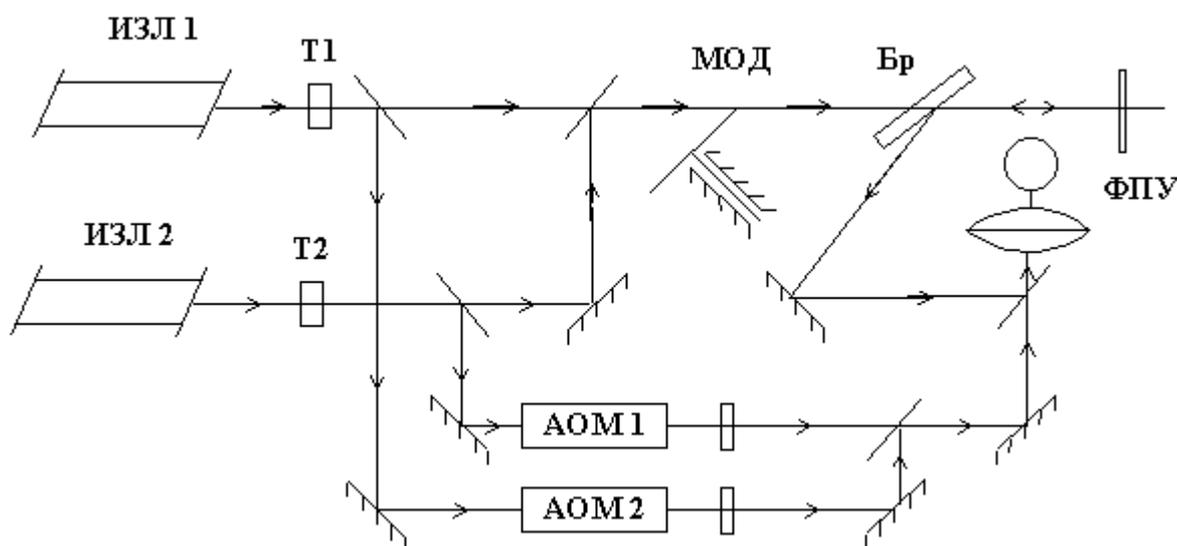


Рис. 4.11. Оптическая схема гетеродинного CO_2 лидара

Принципиальными особенностями разработки являются:

- использование различных спектральных методов в одном лидарном комплексе;
- применение в его конструкции оригинальных разработок основных элементов комплекса (лазер, ФПУ, радиоэлектронный блок и др.);
- наличие спектральной базы данных и методик дистанционной диагностики;
- апробация методик и аппаратуры в натуральных условиях.

Первый тип лидара является стационарным, работает в дежурном режиме кругового обзора и предназначен для обнаружения промышленных выбросов путем контроля аэрозоля и двух газовых компонент, наиболее характерных для промышленных выбросов данного региона.

Второй тип лидара, входящий в передвижной измерительный комплекс, является мобильным, работает по целеуказаниям лидара кругового обзора и предназначен для поэлементного анализа состава газового выброса непосредственно в районе выброса [57].

Технические характеристики гетеродинного CO_2 лидара:

- Дальность действия лидара при работе по движущейся топографической мишени или по земле (в зависимости от состояния атмосферы) – до 3–7 км; при дополнении квантовыми излучателями – до 15 км;
- Угловое разрешение: 0,25–1,0 мрад, при апертуре антенны 100 мм и 400 мм;
- Угол обзора: ± 30 град относительно линии полета;
- Время измерения в одной точке, при работе по топографической мишени: не более 3 мсек;
- Масса и габариты: 30 кг, 0,25 м³;
- Ожидаемая наработка на отказ: не менее 1000 ч.

Лидары-анализаторы [57] предназначены для дистанционного проведения анализа атмосферы или зоны интереса с целью выявления интересующих веществ как в военных, так и в гражданских целях.

Разработка представлена на рис. 4.12 и в табл. 4.3, 4.4.

Таблица 4.3. Основные характеристики анализатора. Параметры излучателя

Длина волны излучения	9,0–14,0 мкм
Число одновременно излучающих линий спектра	до 20
Длительность импульса	100 нс
Частота следования импульсов	10 Гц
Пиковая мощность импульса (в зависимости от типа лазера)	1–50 кВт
Временное разрешение	100 нс
Пространственное разрешение (в зависимости от длины трассы)	1–100 см
Максимальная чувствительность по концентрации токсичных веществ	на уровне предельно допустимой концентрации и ниже
Дальность действия системы	5–10 км
Время непрерывной работы	8–12 час
Количество обнаруживаемых веществ	150
Количество одновременно обнаруживаемых веществ	6–7

Таблица 4.4. Основные характеристики анализатора. Параметры принимающего канала

Рабочая область спектра	11–14 мкм
Число одновременно излучающих линий спектра	до 20
Число контролируемых одновременно компонент	до 5
Спектральное разрешение приемной системы	0,05 см ⁻¹
Энергия в импульсе (суммарная)	0,3 Дж
Частота повторения импульсов	10 Гц
Дальность действия (с отражателем)	до 1,5 км
Габариты (Д×Ш×В)	2660×1990×2300 мм ³
Вес	600 кг



Рис. 4.12. Аппаратурная стойка многоволнового лидара-анализатора

Основные преимущества:

- многоволновые лазеры среднего ИК-диапазона;
- надежная работа в условиях многокомпонентной атмосферы;
- функционирование в реальном масштабе времени;
- измерение концентраций основных загрязнителей атмосферы не хуже предельно допустимой концентрации;
- надежная идентификация компонентов смеси;
- оперативная обработка информации для быстрого принятия решений, так как наличие многих отравляющих веществ представляет смертельную опасность для человека.

4.4. Пассивные сканирующие тепловизионные системы

Тепловизионная сканирующая система "ИКАР-002" [133] разработана в ГНПП "Аэрогеофизика". Тепловая ИК аэросъемка выполняется аппаратно-программным комплексом, включающим цифровую тепловизионную сканирующую систему высокого разрешения.

Бортовая система обеспечивает:

- прием тепловизионного сигнала в одном (двух) спектральных диапазонах (обычно 8–13 мкм и/или 3–5 мкм) с чувствительностью $0,03^\circ$ при температуре фона 20°C ;
- упаковку принятых данных неискажающими кодами более чем вдвое в реальном времени;
- запись данных на жесткий диск бортового компьютера без ограничений параметров полета; продолжительность сеанса записи определяется только объемом хранения жесткого диска;
- регистрацию дополнительной информации – данных спутниковой навигационной системы (GPS+ГЛОНАСС) в полном объеме, значений углов курса, крена и тангажа, высоты полета для коррекции геометрических искажений,

вызванных эволюциями летательного аппарата (не требуется дополнительная гиросtabilизирующая система);

- регистрацию дополнительной цифровой информации;
- полное обслуживание съемочного процесса единой бортовой программой, включая навигационное обеспечение и визуализацию данных в режиме реального времени.

Характеристики и внешний вид сканера представлены в табл. 4.5 и на рис. 4.13 соответственно.

Таблица 4.5. Технические характеристики сканера

Число каналов	1 (2)
Спектральные диапазоны	8–14 мкм, 3–5 мкм
Типы ИК фотоприемников	InSb (3 – 5 мкм), CdHgTe (8–14 мкм)
Тип сканирующей системы	Кеннеди
Чувствительность (температура фона 20°C)	0,05°
Мгновенный угол зрения	0,7 миллирадиан
Угол полного обзора	120°
Частота строк	230 строк/сек
Число точек в строке	2500
Система охлаждения ИК фотоприемников	заливная жидким азотом 77° К
Время непрерывной работы	12 ч
Время автономной работы системы охлаждения	4 ч
Потребляемый ток (27В)	9/18А (основной режим / подогрев)
Габариты оптического блока (Д×Ш×В), см	60×34×39
Вес (оптический блок / блок регистрации), кг	12/13

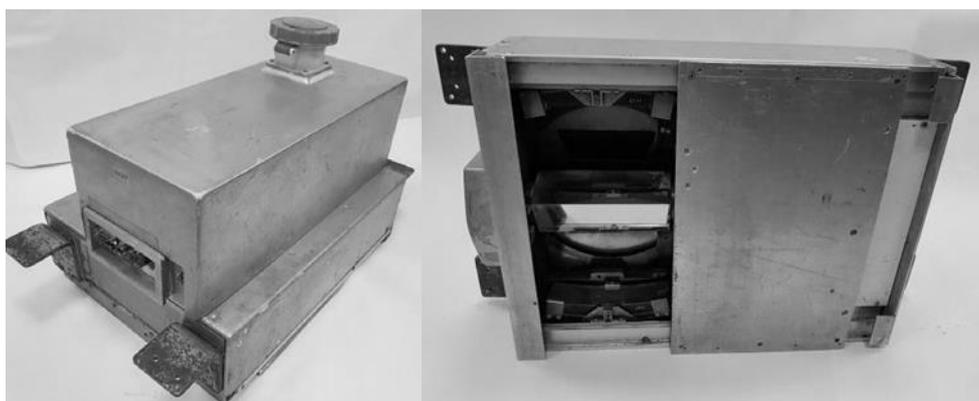


Рис. 4.13. Вид сканирующего радиометра ИКАР-002

Сканирующий радиометр "Поиск-2м" [134] разработан в ГУП ВНЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова". Сканирующий радиометр "Поиск-2м" предназначен для дистанционной регистрации с воздушных носителей (самолета или

вертолета) неоднородностей радиационной температуры подстилающей поверхности (или атмосферы) в полосе обзора вдоль линии движения носителя. Отличается высоким температурным и пространственным разрешением. Применяется в любое время суток для регистрации неоднородностей радиационной температуры поверхности водоемов при океанологических, экологических, метеорологических исследованиях и в ряде прикладных задач (обнаружение и картографирование теплового загрязнения водоемов, разливов нефти, сбросов сточных вод, поиск ослабленного льда при проводке судов в условиях крайнего севера, поиск судов-нарушителей по кильватерному следу). Может использоваться и для обзора земной поверхности с целью обнаружения скрытых очагов возгорания (в том числе подземных возгораний торфяников), утечек тепла и газа из подземных магистральных трубопроводов и др.

Внешний вид сканирующего радиометра и его характеристики представлены на рис. 4.14 и в табл. 4.6 соответственно.

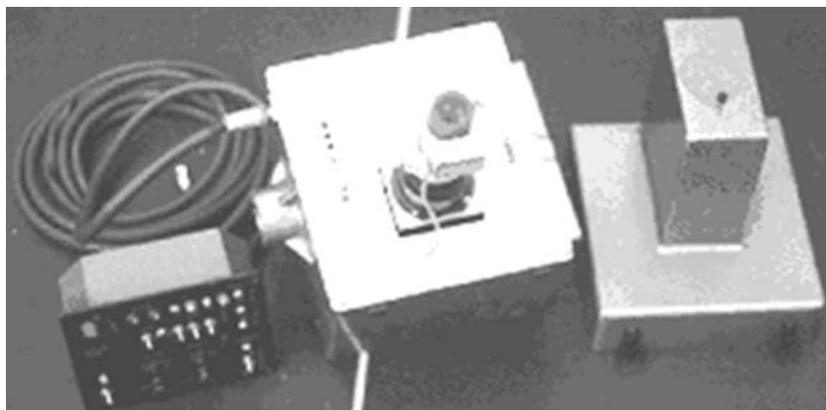


Рис. 4.14. Оптико-механическая сканирующая система сканирующего радиометра "Поиск-2М"

Таблица 4.6. Основные технические характеристики сканирующего радиометра "Поиск-2М"

Наименование	Значение	Примечание
Спектральные диапазоны	8,5–13 мкм 3,5–5,2 мкм	Спектральные диапазоны могут быть изменены в зависимости от решаемых задач.
Порог чувствительности	0,01–0,03 К	
Разрешающая способность	3,0 мрад	
Угол визирования	45–65°	
Ширина полосы промотра	(1,7–3,7) Н	Н-высота полета
Частота сканирования	25 Гц	Метод сканирования – круговой, по образующей конуса

Наименование	Значение	Примечание
Высота полета летающей лаборатории	до 2000 м	
Скорость полета летающей лаборатории	до 600 км/час	
Время использования	любое время суток	
Отображение и регистрация информации	TV-индикатор, запоминающее устройство	Возможно подключение к ЭВМ
Сопряжение с навигационной системой	Имеется.	При подключении системы GPS на экран TV-индикатора выводится поступающая от нее информация.
Энергопотребление по сети постоянного тока 27В.	до 400Вт	В зависимости от комплектации
Весовые и габаритные характеристики: - с системой стабилизации - без системы стабилизации	25–50кг 660×600×500мм ³ 10–15кг 300×300×500мм ³	Масса зависит от комплектности аппаратуры Без системы стабилизации качество индикации и регистрации тепловизионной информации в значительной степени зависит от горизонтальности и прямолинейности полета носителя.

4.5. Активно-пассивные тепловизионные системы

Режимы активного подсвета и двойного синхронного сканирования излучателем и приемной оптической системой с последующим восстановлением тепловизионных изображений целей и фонов обладают как положительными, так и отрицательными свойствами применительно к решению задач специальной техники.

Бесспорным преимуществом активных режимов работы ТПВ является тот факт, что с активным подсветом существенно увеличиваются дальности обнаружения целей. Это связано с тем, что помимо составляющих собственного излучения, обусловленных разностью температур между поверхностями целей и поверхностями фона, в общий принимаемый поток добавляются отраженные и рассеянные (обратное рассеяние) составляющие как немонохроматического, так и когерентного источников излучения. При этом возможны случаи сверхдальнего обнаружения целей при наличии на поверхности целей элементарных площадок, нормально ориентированных к приемно-передающей оптической системе ТПВ, особенно по отражениям от входных окон оптических систем целей и от пленочных камуфляжных покрытий техники противника.

В морских экспериментах в качестве демаскирующих элементов целей выступают нефтяные пленки, хорошо наблюдаемые при активном подсвете в спутных следах на поверхности акватории, формируемых надводными кораблями, торпедами и подводными лодками противника.

Вторым существенным преимуществом активного подсвета является возможность наблюдения целей в туманах, в которых собственное излучение целей существенно ослабевает.

Третье преимущество (особенно в режиме когерентного приема сигналов, отраженных и рассеянных составляющих общего потока целей) заключается в возможности селекции и классификации целей по дальностям их расположения (стробирование когерентных сигналов), а также в возможности определения распределения аэрозолей и отравляющих веществ в приземном атмосферном слое. В случае многочастотных лидарных систем удастся не только оконтуривать пространственное распределение этих составляющих в атмосфере, но даже определить их состав методами спектральной селекции.

Дополнительное преимущество активного подсвета обусловлено возможностью временного ослепления оптических систем противника.

Главным же недостатком активного режима ТПВ является нарушение скрытности и большая вероятность получения упреждающего удара за счет наведения оружия противника по лазерному источнику ТПВ.

Исходя из этого, следует особо подчеркнуть, что разрабатываемые ТПВ должны иметь комбинированные, т.е. активно-пассивные, режимы работы. При этом пассивный режим работы ТПВ должен являться основным, а активный режим должен применяться в неблагоприятных погодных условиях и на этапах целеуказания и поражения техники противника. В этом аспекте лидарные принципы формирования ТПВ обладают рядом преимуществ.

Производительность лазерно-локационного метода чрезвычайно высока. На практике достигнута производительность съемки в 500–600 км за один аэросъемочный день для линейных объектов и в 500–1000 кв. км для площадных объектов. Приведенные значения требуют корректной интерпретации, так как производительность, кроме всего прочего, зависит от заданных условий съемки, таких как ширина полосы захвата, плотность (количество лазерных точек на единицу поверхности) и др. В той же самой степени производительность аэрофото-съемочных работ прямо зависит от заданного масштаба фотографирования. Тем не менее, в случае лазерной локации практически эквивалентными оказываются производительность как собственно аэросъемочных работ, так и базовых процедур наземной обработки. Иными словами, темп сбора данных в основном соответствует темпу их обработки, и, таким образом, приведенные оценочные значения производительности маршрутной и линейной съемки соответствуют уже задаче во многом законченных топографических данных [135].

Наряду с пространственными координатами точки объектового пространства, вызвавшего отражение лазерного импульса, лидары способны регистрировать энергию отраженного импульса, вернувшегося на фотоприемник. Эта доля зависит от многих факторов, среди которых – двунаправленная спектральная

отражательная способность объекта, фактическое значение дальности, величины пропускания, рассеивания и собственного излучения атмосферы и другие параметры. Однако с практической точки зрения важно то, что лазерно-локационное изображение в форме интенсивности по своим информационным свойствам чрезвычайно близко к естественным черно-белым фотографиям (аэрофотоснимкам в случае воздушного применения), что позволяет успешно использовать их для целей визуального распознавания объектов и камерального дешифрирования даже без привлечения традиционных аэрофотосъемочных данных [135].

Пример, иллюстрирующий возможности построения изображений объектов в 2D и 3D представлениях с дополнительной псевдоцветовой раскраской лоцируемой местности, показан на рис. 4.15 [136].

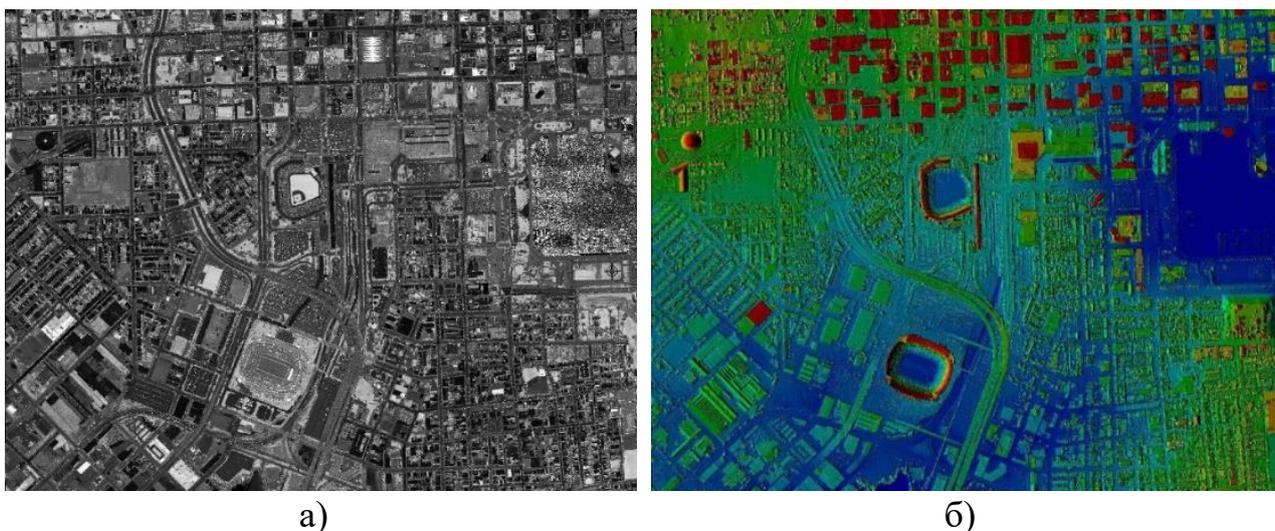
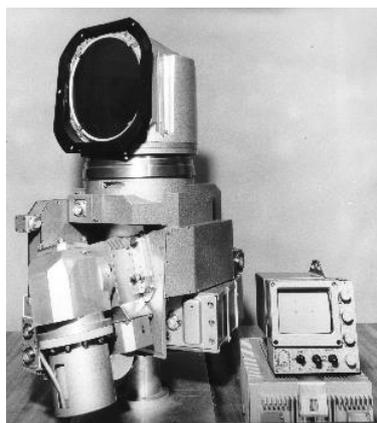


Рис. 4.15. Применение ЛИДАРА для ГИС University of Minnesota:
а) черно-белое лидарное изображение (2D представление);
б) псевдоцветовое лидарное изображение (3D представление)

Активный режим работы ТПВ в значительной степени зависит от выбора режима лазерного подсвета, типа и мощности лазерного излучения и собственного режима активного источника (непрерывный, импульсный режимы работы). В ГОИ им. С.И. Вавилова были проведены теоретические и натурные исследования по изучению этих зависимостей с использованием сканирующих тепловизионных систем "Прогресс" [47] (рис. 4.16) и IR-18 [25], построенных по принципу внутреннего сканирования. Основные характеристики этих тепловизоров приведены в табл. 4.7.

Практика показывает, что эффективность работы тепловизоров в режиме активного подсвета повышается.

При расчетах отраженных потоков лазерного излучения от поверхностей окружающего фона и поверхностей целей необходимо учитывать ряд установленных параметров.



а)



б)



в)

Рис. 4.16. Общий вид (а) тепловизора «Прогресс» и примеры тепловизионных изображений (промышленная зона (б) и отстойник (в)), полученных с его помощью с самолета (высота 1000м).

Таблица 4.2. Характеристики ТПВ «Прогресс» и IR-18

Основные характеристики	ТПВ «Прогресс»	ТПВ IR-18
Спектральный диапазон	8–13 мкм	8-13 мкм
Число элементов разложения	384×500	288×4
Тип индикатора	телевизионный	телевизионный
Поле зрения сканирующего модуля	30°×40°	38×25,5/6,3×4,4
Кратность телескопических насадок	10 и 3	
Температурная чувствительность	не хуже 0,1 К	не хуже 0,1 К
Выходной сигнал	стандартный видеосигнал	стандартный видеосигнал
Габариты:		
- оптико-механический блок	250×500×550 мм	
- БЦО и БП	215×207×305 мм	
Вес базовой комплектации	70 кг	7,4 кг
Электропитание	=27В, 30А	

Приемлемые для теории и практики соотношения для расчета дальности действия активных ТПВК с лазерами получены в работе [137]. Так, применительно к активным ТПВК с лазерами, для которых имеет место равномерное распределение энергии в сечении пучка лазера, получено следующее выражение для дальности действия l :

$$l = \sqrt[4]{\frac{\Phi_n \cdot A_0 \cdot A_{ex} \cdot \tau_n \cdot \tau_0 \cdot \tau_c^2 \cdot \tau_\phi \cdot \rho_g \cdot \cos^2 \alpha}{\pi \cdot \omega_n \cdot m \cdot \Phi_{эп} \cdot \tau_n \cdot k(\Delta f)}} \quad (4.1)$$

где Φ_n – мощность лазера; ω_n – телесный угол расходимости лазерного излучения на выходе передающей части активного ОЭП; τ_n , τ_0 – коэффициенты пропускания, соответственно, передающей и приемной части прибора; τ_c , τ_ϕ – коэффициенты пропускания, соответственно, слоя атмосферы между объектом и прибором и фильтра; ρ_g – диффузный коэффициент отражения поверхности лоцируемого объекта; α – угол между нормалью к поверхности объекта и оптической осью приемной части прибора; A_0 – площадь поверхности объекта, которая полностью освещается лучами лазера передающей части прибора.

В работе [137] при выводе выражения (4.1) считалось, что оптические оси передающей и приемной части прибора совпадают.

В тех случаях, когда угол ω_n не превышает угловых размеров объекта, отраженное излучение от объекта будет поступать на фотоприемник не со всей поверхности объекта, а только с его облучаемой части.

Для этого случая дальность действия l принимает другой вид

$$l = \sqrt[4]{\frac{\Phi_n \cdot A_{ex} \cdot \tau_n \cdot \tau_c^2 \cdot \tau_0 \cdot \tau_\phi \cdot \rho_g \cdot \cos \alpha}{\pi \cdot m \cdot \Phi_{эп} \cdot k(\Delta f)}} \quad (4.2)$$

Если поверхность объекта не является плоской, а, например, сферической, то в [137] для случая, когда ω_n превышает угловые размеры лоцируемого объекта и его покрытие имеет зеркальную и диффузную составляющие отражения, получена следующая формула для дальности действия l :

$$l = \sqrt[4]{\frac{16 \cdot \Phi_n \cdot R^2 \cdot A_{ex} \cdot \tau_n \cdot \tau_0 \cdot \tau_c^2 \cdot \tau_\phi}{\pi \cdot \theta_n^2 \cdot m \cdot \Phi_{эп} \cdot k(\Delta f)} \cdot \left(\frac{\rho_3}{4} + \frac{2}{3} \rho_g \right)} \quad (4.3)$$

где ρ_3 – коэффициент зеркального отражения материала покрытия объекта; θ_n – плоский угол расходимости лазерного пучка передающей части прибора; R – радиус сферы.

Из формул (4.1) – (4.3) следует, что при формировании площади подсвета по всему полю зрения тепловизоров потребуется применение очень мощных лазеров, но и при этом доля отраженных составляющих лазерного излучения в сравнении с составляющими собственного излучения целей и фона не превысят 1/3 от собственного излучения.

Таким образом, поле подсвета необходимо сужать, по крайней мере, до центральной зоны $1^\circ \times 1^\circ$ или формировать поле подсвета по изображению строки линейки фотоприемников лазерного излучения в плоскости предметов, сохраняя синхронность сканирования сформированного окна подсвета со скоростью сканирования зеркала строчной развертки тепловизоров.

Наиболее эффективным режимом работы ТПВ с лазерным подсветом может быть признан режим формирования изображения лидарными системами с

многоэлементными фотоприемниками. В таких сканирующих системах легко реализуются режимы стробирования отраженных сигналов. При этом требуется приспособлять режим сканирования к частотным характеристикам импульсных лазеров подсвета.

Сигналы от датчика, срабатывающего по переднему фронту импульса лазерного излучателя, через линии задержки определенной величины должны быть связаны с блоками управления сканирующими зеркалами и АЦП опроса фотоприемников. При формировании 3D изображения исследуемого пространства на индикаторах мониторов наиболее целесообразно интенсивности сигналов о целях и фонах отображать изменениями яркости свечения локальных точек экранов, а данные о стробе представлять в изменениях цвета свечения экрана, что дает близкое к реальному представлению данных о рельефе исследуемой местности.

5. ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ПЕРВОГО–ТРЕТЬЕГО ПОКОЛЕНИЙ

5.1. Тепловизионные системы первого и второго поколений

ТПВ широко используются в специальной технике для наблюдения, прицеливания, вождения транспортных средств ночью и при ограниченных условиях видимости (дымка, туман, дождь, снегопад, пыль, дым, наличие световых помех и пр.) [25].

Характеристики фотоприемников играют исключительно важную роль в реализации технических и энергетических возможностей ТПВ.

Как отмечалось в разделе 1.6, ТПВ нулевого поколения основаны на применении единичных охлаждаемых фотоприемников и двумерной (строчной и кадровой) развертки с помощью сканирующей оптико-механической системы. В процессе разработки этих ТПВ были сформулированы основы построения оптических систем ТПВ и основы обработки сигналов формирующих изображения для оператора. Эти ТПВ в настоящее время практически вышли из эксплуатации.

ТПВ первого поколения основаны на применении строчных линеек фотоприемников и упрощенной кадровой развертки. Появление таких фотоприемников было основано на прорыве в технологии их изготовления. Отдельные образцы таких ТПВ до сих пор находятся в эксплуатации.

ТПВ второго поколения основаны на использовании нескольких (от 2 до 6) сгруппированных линеек с временной задержкой, накоплением и низкоскоростной системой развертки.

Подробный обзор ТПВ 1-го и 2-го поколений можно найти в работах [25, 33, 44, 138].

В зависимости от дальности действия ТПВ можно разбить на три группы:

- 1 ТПВ малой дальности действия – до 0,7–1 км по ростовой фигуре человека и до 1,5–2 км по автомашине;
- 2 ТПВ средней дальности действия – соответственно 1,2–1,5 км и 2–4 км, а также до 8 км по самолету;
- 3 ТПВ повышенной дальности действия, превышающей значения, указанные в п.2.

К ТПВ первой группы относятся приборы для легкого стрелкового оружия, наголовные и удерживаемые в руках приборы наблюдения. К ТПВ второй группы относятся прицелы для переносных ракетных комплексов, удерживаемые в руках, и переносные приборы наблюдения. К ТПВ третьей группы относятся возимые, а также корабельные и авиационные приборы наблюдения и прицеливания. В данном подразделе рассматриваются ТПВ второй группы.

ТПВ второго поколения имеют ФПУ, выполненное на базе многоэлементных линеек ИК фотоприемников. Эти приборы содержат сканирующую систему, обеспечивающую развертку изображения. В случае одной линейки ФПУ развертка осуществляется плоским зеркалом либо зеркальным уголком. Различают последовательный, параллельный и последовательно-параллельный способы

развертки изображения. При последовательном сканировании каждая точка изображения сканируется каждым элементарным фотоприемником при их линейном расположении. Линия задержки обеспечивает фазовое интегрирование сигналов всех элементов линейки ФПУ.

При параллельном сканировании изображение “просматривается” вертикальным рядом элементов. Это обеспечивает высокую температурную чувствительность при некоторой потере информации в изображении. Четкость последнего определяется числом строк, равным числу элементов линейки ФПУ. При малой величине постоянной времени элементов и высокой скорости развертки может быть использован так называемый “интерлейсинг” (обзор элементов через равные промежутки), улучшающий качество изображения. Сканирование может осуществляться как прямой, так и обратной разверткой. В последнем случае короткий период возврата может быть использован для подачи контрольных команд. В результате пропуски в воспроизведении тепловой картины при ее развертке и обработке отсутствуют. Наконец, возможно последовательно-параллельное сканирование, являющееся комбинацией двух указанных выше методов. Оно предусматривает наличие как вертикально, так и горизонтально расположенных элементов в составе ФПУ. За счет двухкоординатной развертки сканируется все поле зрения. При этом точки поля просматриваются всеми площадками соответствующего ряда элементов ФПУ, сигналы с которых после временной задержки суммируются. При таком методе развертки используется ФПУ с меньшим числом элементов, а характерная для параллельного метода развертки неравномерность в яркости изображения устраняется за счет суммирования сигналов от различных элементов ФПУ. Недостатком метода является необходимость использования высокоскоростных двухкоординатных блоков развертки.

Конструктивное расположение элементов внутри таких тепловизоров можно рассмотреть на рис. 5.1.

Дальнейшее развитие метод последовательно-параллельной развертки получил в связи с разработкой фотоприемников SPRITE (Signal Processing In The Element – обработка сигнала внутри элемента).

В ФПУ SPRITE задержка и суммирование принимаемых сигналов происходит внутри самого чувствительного элемента. Это исключает необходимость в электронных схемах, обычно применяемых в линейных системах ФПУ, что упрощает процесс обработки сигналов. По сравнению с традиционными ФПУ SPRITE-фотоприемник имеет малое количество проводников на входе и выходе, что упрощает систему охлаждения. Кроме того, SPRITE-фотоприемник характеризуется упрощенной схемой задержки и суммирования сигналов.

Однако SPRITE-фотоприемник требует специфического блока развертки изображения. В нем используется сканирующая зеркальная призма, грани которой выполнены под определенным углом к оси ее вращения. Погрешность углового положения, измеряемого непрерывно, вводится в корректирующее электронное устройство. Горизонтальная развертка осуществляется зеркалами, расположенными через равные промежутки. Например, если их отношение составляет 6:1, то это создает 120 строк ИК изображения. Вертикальная развертка

осуществляется зеркалом, сканирующим под воздействием электромагнитного поля двигателя. Сигнал от блока развертки поступает на светодиодный индикатор. При этом для воспроизведения сигнала используется грань призмы, смещенная на 120° . Это позволяет устранить необходимость в точном определении положения призмы и синхронизации ее вращения, а также дает возможность свести к минимуму геометрические искажения.

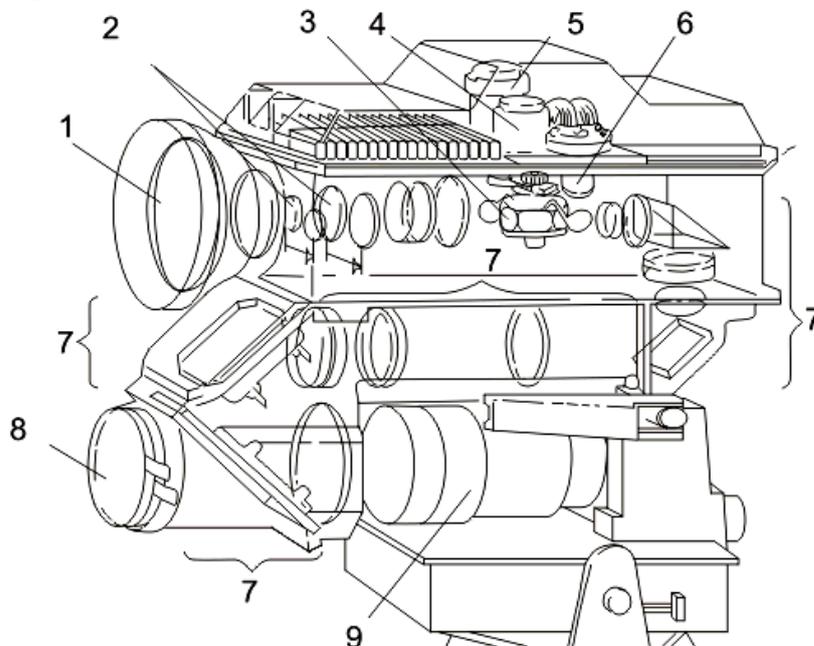


Рис. 5.1. Схема тепловизионного прицела Bill Night Sight (BNS – ночной прицел, насадка на дневной объектив): 1 – ИК-объектив; 2 – сменные компоненты объектива; 3 – сканирующий зеркальный барабан; 4 – ФПУ; 5 – блок охлаждения ФПУ; 6 – светодиодный индикатор; 7 – проекционная система; 8 – фильтр; 9 – ЭОП с окуляром [25]

Модули ТПВ приборов первого класса (приборы прямого видения) служат для портативных и переносных приборов с автономными источниками питания. Выходное изображение наблюдается через окуляр. В состав приборов входят следующие модули: блок развертки ФПУ, предусилители, оконечные преобразователи, электронные блоки управления и обработки сигналов, светодиодные индикаторы, преобразователь напряжения и элементы блока охлаждения. В типовом ТПВ приборе используются 4–5 базовых модуля и блоки оригинальной конструкции, обеспечивающие пригодность прибора для конкретного применения.

Модули ТПВ приборов второго класса (приборы косвенного видения) предназначались для систем со средней дальностью действия в переносном или возимом исполнении. В них использовался телевизионный индикатор (ТВ-индикатор), который мог быть удален от прибора. При создании таких приборов использовались 12 модулей: ИК объектив, сменные афокальные насадки, блок развертки, блок управления его работой, ФПУ, блок предусилителей, элементы системы охлаждения, блок электронной обработки сигналов, блок управления и регулировки, преобразователь сигналов в ТВ-стандарт, ТВ-индикатор,

преобразователь напряжения. Особенность ТПВ приборов второго класса состоит в автоматическом регулировании чувствительности и уровня серого, а также выравнивании усилений различных каналов [25]. В разделе 5.2 приводится типовой вариант построения сканирующего радиометра – тепловизора, который использовался в эксперименте "Акватр" [139].

5.2. Тепловизионная измерительная система радиометра авиационного базирования

В состав ТПВ входят:

- оптико-механический блок;
- блок питания и управления;
- компьютер с платой аналого-цифрового преобразователя (АЦП);
- навигационная система GPS NAVIGATOR;
- комплект кабелей.

Структурная схема ТПВ приведена на рис. 5.2.

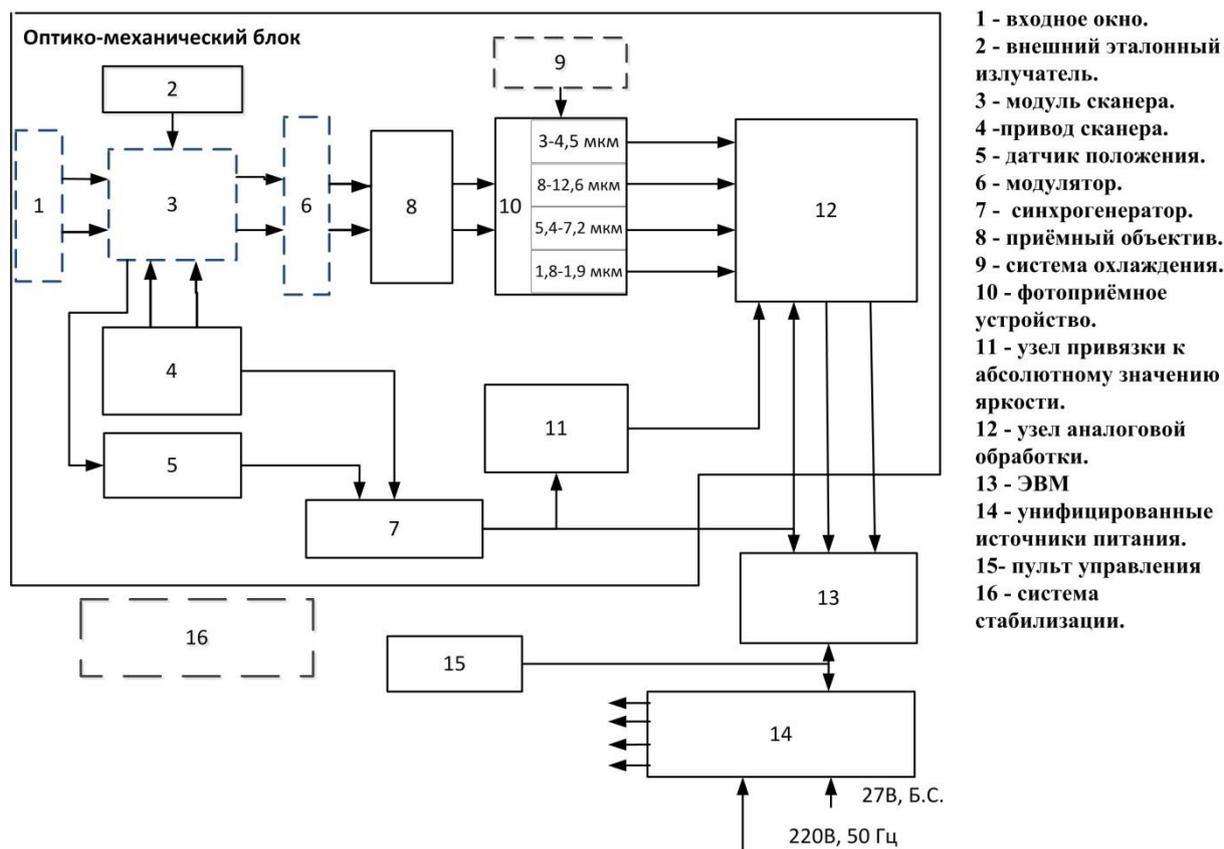


Рис. 5.2. Структурная схема сканирующего ИК радиометра

В процессе сканирования проекция чувствительного элемента фотоприемника перемещается (в горизонтальной плоскости) по окружности. Центр этой окружности перемещается вместе с носителем, на котором установлен прибор. Из всей окружности с помощью модулятора системы синхронизации выделяется передний сектор в 120°.

Принимаемое ИК излучение проектируется оптической системой на площадки фотоприемника. В нем происходит преобразование энергии ИК излучения в электрический сигнал. С выходов предусилителей и измерительного канала сигналы через узел аналоговой обработки поступают на специальную плату АЦП и далее в компьютер, где и проводится обработка информации, запись и отображение на дисплее.

В компьютер вводится также сигнал с навигационной системы с погрешностью привязки к местности в ± 5 м.

5.2.1. Оптико-механический блок

Оптико-механический блок радиометра состоит из:

- сканирующего устройства, со своим приводом и датчиком положения;
- оптической системы;
- фотоприемного устройства заливного типа (или с системой охлаждения замкнутого типа Сплит – Стирлинг);
- канала опорного излучения с эталонным источником;
- входного окна приемной системы, которое устанавливается при необходимости работы аппаратуры в гермозоне авиационного носителя.

5.2.2. Система сканирования

В сканирующих высокочувствительных ИК радиометрах, устанавливаемых на борту летательных аппаратов, с целью обеспечения реализации высокой чувствительности целесообразно применять метод кругового сканирования, позволяющий сохранять в процессе сканирования постоянными угол встречи визирного луча и наклонную дальность от входного зрачка аппаратуры до исследуемой поверхности. Этот метод сканирования был реализован в ряде приборов, и его применение полностью себя оправдало.

При выборе схемы кругового сканирования с построчной круговой разверткой визирного луча в сканирующем ИК радиометре, предназначенном для получения карт распределения поля яркостной температуры, следует обеспечить условия непропуска в центре поля обзора. Для этого скорость движения сканирующего зеркала должна быть такой, чтобы за время одного сканирования прибор переместился на расстояние, не превышающее одного элемента разложения.

Большие значения углов обзора (до 120° при углах визирования $50\text{--}70^\circ$) приводят к необходимости производить сканирование в пространстве предметов из-за ограничения возможностей построения широкоугольных объективов для ИК области спектра.

Как указывалось выше, для повышения чувствительности за счет применения последовательного накопления сигналов многоэлементного фотоприемника, изображение фотоприемника в пространстве предметов должно в процессе сканирования сохранять неизменной свою ориентацию относительно траектории сканирования (рис. 5.3)[134].

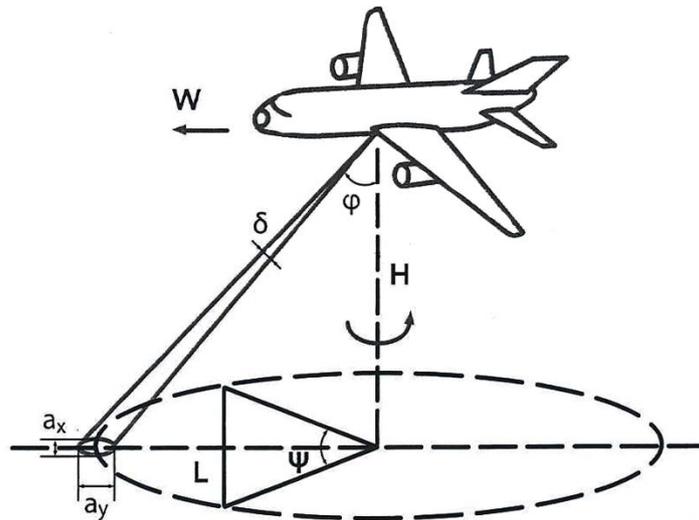


Рис. 5.3. Принцип действия и основные соотношения параметров: δ – мгновенный угол поля зрения; ϕ – угол визирования; ψ – угол обзора на местности; a_x – линейный размер элемента разрешения по строке; a_y – линейный размер элемента разрешения по кадру; L – полоса захвата на местности;

Для расчета параметров развертки используются следующие обозначения:

- F – частота сканирования;
- K – коэффициент наложения строк по кадру (при $K=1$ обеспечивается беспропускной обзор);
- n_x – число элементов разложения в строке;
- τ_{\min} – минимальная длительность импульса от элемента разложения;
- f_v – верхняя граничная частота требуемой полосы пропускания;
- W – скорость полета носителя;
- H – высота полета носителя.

Можно показать, что:

$$F = K \frac{W \cos^2 \phi}{H \delta}, \quad a_x = a_y \approx \frac{H \delta}{\cos \phi}, \quad n_x = \frac{\psi}{\delta} \sin \phi, \quad (5.1)$$

$$\tau_{\min} = \frac{1}{F} = \frac{\delta}{F \cdot 2\pi \sin \phi}, \quad f_v = \frac{\pi F}{\delta} \sin \phi. \quad (5.2)$$

Необходимо обеспечить максимальный коэффициент использования развертки, равный отношению длительности рабочего хода развертки к периоду сканирования. При заданной частоте сканирования, рассчитанной из условия беспропускного обзора, относительное увеличение длительности рабочего хода приводит к возрастанию минимальной длительности сигнала от элемента разложения и пропорциональному сужению требуемой полосы пропускания и, как следствие этого, к увеличению пороговой чувствительности.

Так как контраст регистрируемых неоднородностей поля яркостной температуры поверхности зависит от угла наблюдения (визирования), необходимо,

чтобы схема сканирования позволяла производить установку этого угла в зависимости от конкретных условий приема сигналов.

Схема сканирования должна обеспечивать минимальные габариты, вес и удобство размещения на вертолете (самолете) конструкции приемного устройства тепловизора. Применение синхронного фильтра в усилительном тракте позволяет отказаться от условия непрерывности визирования поверхности и допустить возможность пересечения визирным лучом элементов конструкции приемного устройства во время нерабочего участка цикла сканирования. Это существенно расширяет выбор возможных схем и упрощает задачу конструирования приемного устройства и размещения его на носителе.

Рассмотрим схему кругового сканирования с удвоением скорости визирного луча (рис. 5.4). В данной схеме, если рассматривать ее в обратном ходе лучей, многоэлементный фотоприемник 1 проектируется объективом 2 через наклонное зеркало 3 на исследуемую поверхность. Сканирование осуществляется в этом случае с помощью двухстороннего плоского зеркала 4, при этом за один полный обзор зеркала происходит два цикла развертки. Ширина зеркала определяется требуемым углом обзора аппаратуры; отсутствие помех, связанных со сходом пучка визирных лучей с плоскости зеркала, обеспечивается применением синхронного фильтра на входе усилительного тракта тепловизора.

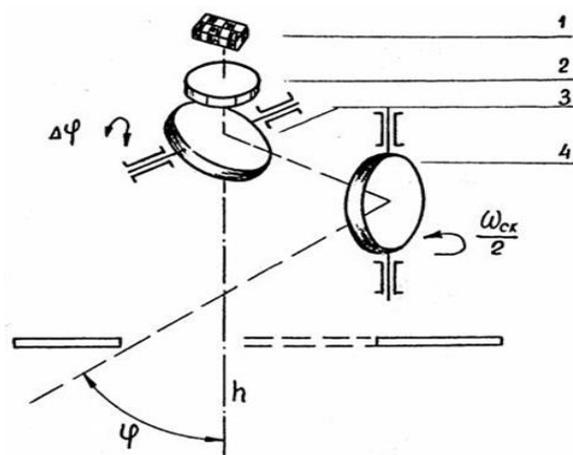


Рис. 5.4. Схема кругового сканирования с удвоением скорости визирного луча [134]

Проекция фотоприемника при движении по дуге ориентирована радиально и сохраняет свою ориентацию по отношению к траектории сканирования. Это позволяет применить многоэлементный фотоприемник и реализовать накопление сигналов.

Важным преимуществом схемы является возможность оперативного изменения угла визирования с помощью поворота плоского зеркала 3, не участвующего во вращении, что позволяет изменять угол визирования независимо от скорости сканирования. Скорость вращения сканирующего зеркала в данной схеме вдвое меньше, что упрощает конструкцию механического узла и снижает энергопотребление. При этом значительно облегчается задача динамической балансировки вращающегося узла ввиду его симметричности. Дальнейшее

уменьшение скорости сканирования может быть достигнуто применением вместо плоского зеркала зеркальной призмы (рис. 5.5).

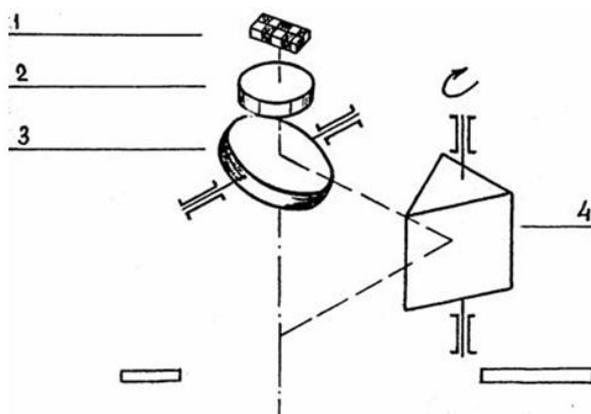


Рис. 5.5. Схема кругового сканирования с с зеркальной призмой [134]

Схема с зеркальной призмой (рис. 5.5) позволяет, помимо уменьшения скорости вращения сканирующего узла, повысить коэффициент полезного действия (КПД) развертки и получить некоторый выигрыш в чувствительности за счет снижения при этом требуемой полосы пропускания усилительного тракта.

С учетом максимальной простоты и технологичности схем, представленных на рис.5.4 и 5.5, для данной разработки выбран вариант с удвоением скорости движения визирного луча с однокомпонентным сканером, выполненным в виде двустороннего зеркала (рис.5.5).

5.2.3. Фотоприемное устройство

Основным узлом, определяющим возможность достижения основных технических характеристик аппаратуры – чувствительности и разрешающей способности, является фотоприемное устройство (ФПУ) (рис. 5.6).

Одновременный прием сигналов в четырех спектральных диапазонах возможен при одноканальной схеме построения оптической системы с единым сканирующим устройством и приемным объективом, но при этом приемные площадки фотоприемника должны быть конструктивно объединены в единый блок.

Для проверки технической возможности такой схемы построения аппаратуры был изготовлен макетный образец ФПУ и проведены его испытания в действующем образце сканирующего радиометра. Испытания подтвердили возможность реализации выбранного способа построения аппаратуры, при этом были уточнены требования к оптической системе в части обеспечения хроматических aberrаций и обеспечения требуемого качества изображения при фокусировке излучения на приемные площадки четырехспектрального ФПУ.

Четыре фоточувствительных элемента из материала КРТ размером $0,2 \times 0,2 \text{ мм}^2$, каждый с индивидуальным охлаждаемым светофильтром, размещаются в заливном криостате. Расстояние между центрами фоточувствительных элементов $2 \pm 0,1 \text{ мм}$, расположение элементов – квадрантное. Плоский угол зрения каждого элемента – не менее 45° . Светофильтры приклеиваются на охлаждаемую диафрагму. Входное окно ФПУ – просветленный германий на области $3\text{--}5 \text{ мкм}$ и $8\text{--}12 \text{ мкм}$. Конструкция ФПУ показана на рис. 5.6, 5.7.

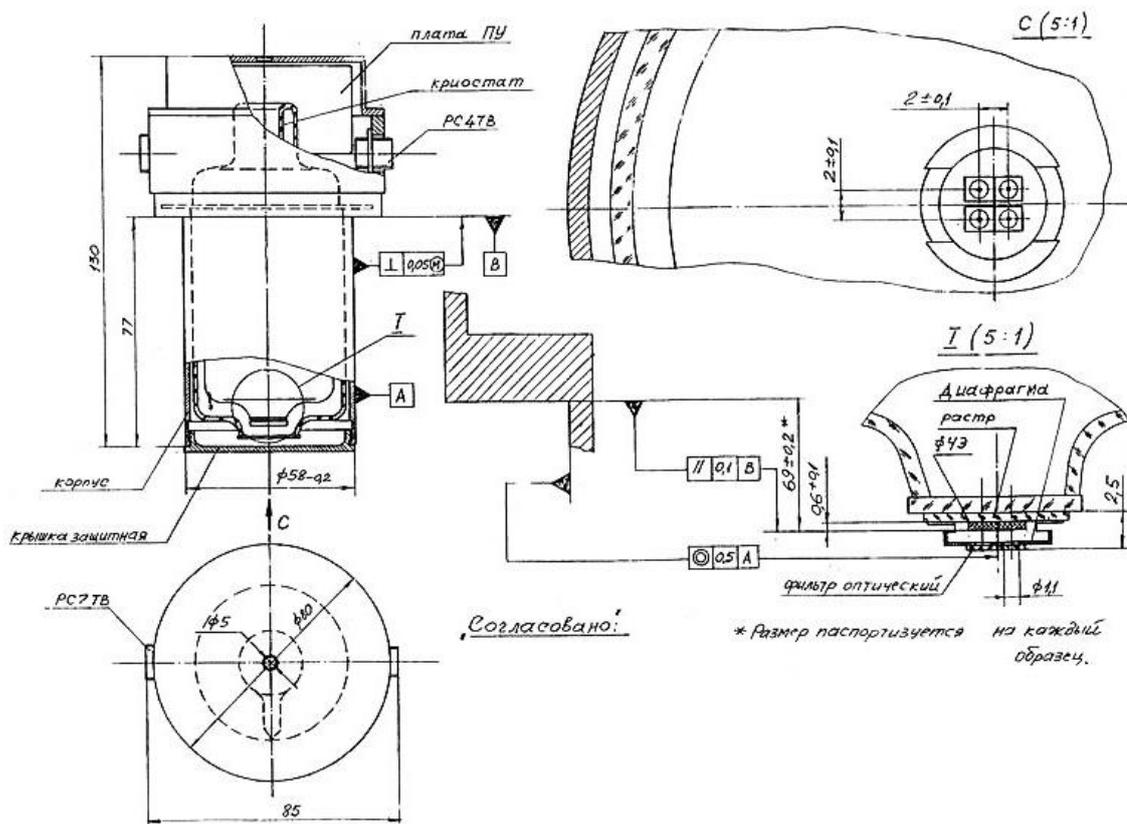


Рис. 5.6. Конструкция ФПУ

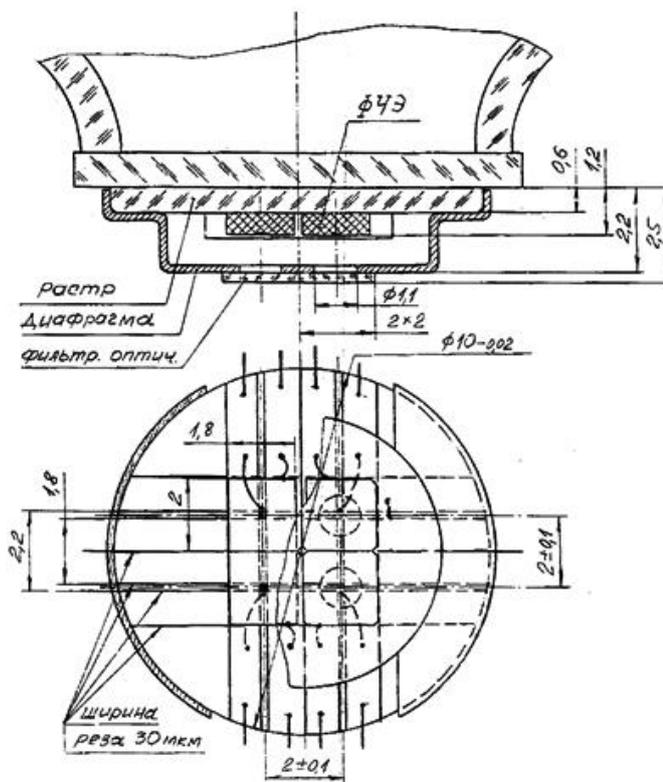


Рис. 5.7. ФПУ "Квартет". Расположение чувствительных элементов

Каждый чувствительный элемент подключается к индивидуальному предусилителю, расположенному в том же корпусе. Напряжение питания ФПУ составляет (12 ± 3) В, потребляемый ток – не более 20 мА, частотный диапазон ФПУ $0-5 \cdot 10^4$ Гц.

Для решения поставленных задач необходимо обеспечить следующие характеристики ФПУ по спектральным каналам:

- удельная обнаружительная способность ФПУ в максимуме спектральной чувствительности по каналам:
 - в спектральном диапазоне 3–4,5 мкм – $\Phi_{\text{пл}} \geq 3 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$;
 - в спектральном диапазоне 8–12,6 мкм – $\Phi_{\text{пл}} \geq 4 \times 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$;
 - в спектральном диапазоне 5,4–7,2 мкм – $\Phi_{\text{пл}} \geq 3,5 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$;
 - в спектральном диапазоне 4,6–4,9 мкм – $\Phi_{\text{пл}} \geq 3,5 \times 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$;
- вольтовая чувствительность по всем каналам – не менее $2 \cdot 10^7$ В/Вт;
- фотоприемник, охлаждаемый жидким азотом, время работы от одной заливки жидкого азота до другой – не менее трех часов.

Для обеспечения неограниченного по времени режима работы аппаратуры и устранения зависимости от наличия жидкого азота на борту носителя принят вариант исполнения ФПУ с охлаждением газовой криогенной машиной Сплит – Стирлинг (рис. 5.8).

Система (рис. 5.8) состоит из компрессора, холодного пальца и металлической капиллярной трубки, соединяющей компрессор и холодный палец. Компрессор приводится в действие электродвигателем, управление которым осуществляется от электронного блока. Питание электронного блока производится от источника постоянного тока 24 В, мощностью ≤ 25 Вт.

Газовая криогенная машина герметически уплотнена и заполнена сухим очищенным гелием высокой чистоты.



Рис. 5.8. Газовая криогенная машина Сплит-Стирлинг

Характеристики газовой машины Стирлинга:

- температура криостатирования 80°K ;
- холодопроизводительность 0,7 Вт;
- время выхода на режим криостатирования – 5 мин;
- температурах окружающей среды от -50° до $+50^\circ\text{C}$;
- масса газовой криогенной машины – 1,1 кг.

5.2.4. Измерительный канал

Важным элементом измерительного канала (элементы 1–4, 6, 8–12, см. рис. 5.2) является система самокалибровки, которая позволяет контролировать и поддерживать параметры измерительного канала в необходимых пределах.

Для прибора использованы специально разработанные и метрологически аттестованные источники опорного излучения. Для варианта с оптическим модулятором один источник размещается в оптической головке, второй – перед оптической головкой в поле обзора прибора.

Источники излучения изготавливаются из меди, поверхность их выполняется рифленой (специально рассчитанные треугольные канавки) для более высокого коэффициента излучения и покрываются специальной эмалью.

В корпусе источников излучения вмонтированы датчики температуры, с помощью которых осуществляется контроль их температуры.

Схема измерения температуры опорных источников излучения одинаковая для всех источников. Датчик температуры (АД-590, или термистор) включается в измерительную мостовую схему, которая предусматривает как аналоговый, так и цифровой выход. Для преобразования сигнала в цифровой код применяется десятиразрядный АЦП, что позволяет снимать данные о температуре опорных источников излучения с погрешностью не более $0,05^{\circ}\text{C}$ на один разряд. Калибровка схемы измерения осуществляется регулировкой коэффициента усиления измерительного моста.

Наличие в приборе источников опорного излучения позволяет при соответствующей калибровке оценить перепады потока по исследуемому объекту относительно источника опорного излучения.

Калибровка прибора проводится на земле с помощью источника опорного излучения, входящего в состав прибора и внешнего излучателя, температура которого дискретно меняется в заданном диапазоне. В результате измерений получаем калибровочную кривую зависимости напряжения от разности температур двух излучателей. После пересчета разности температур в разность потоков для каждого спектрального канала строится градуировочная кривая зависимости напряжения от разности потоков между источником опорного излучения, встроенного в прибор, и внешним излучателем. Эта зависимость вносится в память электронной вычислительной машины (ЭВМ).

При калибровке на земле по характеристикам источника опорного излучения (энергетическая яркость и т.д.) рассчитывается поток от него для заданного диапазона температур. Эти данные заносятся в память ЭВМ. Поэтому по температуре опорного источника, которая измеряется во время полета, определяется соответствующий ей поток в реальном масштабе времени.

Для определения потока от исследуемого объекта достаточно сложить значение потока, соответствующее температуре источника опорного излучения прибора, с полученными перепадами потоков по объекту.

Рассмотрим два варианта построения схемы измерительного канала.

В первом варианте схемы применяется внутренний источник опорного излучения, установленный внутри оптической головки. Его излучение попадает на

фотоприемник с помощью модулятора, размещенного в плоскости промежуточного изображения, и объектива.

Этот вариант предусмотрен на случай возможного нестабильного сигнала, связанного с изменением крутизны преобразования ФПУ, что обычно вызвано разной температурой криостатирования чувствительных элементов в основном при использовании охлаждения газовой холодильной машиной. При заливном варианте ФПУ крутизна преобразования ФПУ достаточно стабильна во время работы прибора.

Внешний источник опорного излучения размещен перед оптической головкой в поле обзора. Поток от внешнего источника попадает на фотоприемник так же как от внутреннего источника во время рабочего хода сканирующей системы.

Сигнал, соответствующий потоку от внутреннего источника, после усиления жестко привязывается к определенному потенциалу (в нашем случае к нулевому) с помощью схемы восстановления постоянной составляющей.

Сигнал, соответствующий потоку от внешнего источника, после усиления тем же усилителем и восстановления постоянной составляющей измеряется относительно нулевого потенциала (уровень внутреннего источника излучения). Полученная таким образом величина сигнала (постоянная составляющая) вычитается из сигнала, несущего информацию об исследуемом объекте и об опорных источниках. В результате сигнал, несущий информацию об объекте и опорных источниках, окажется привязанным к нулевому потенциалу в момент, когда фотоприемник принимает излучение от внешнего источника. Суммируя поток от внешнего опорного излучателя с потоком от перепадов по исследуемому объекту (с учетом знака), получаем значение распределение яркости по поверхности исследуемого объекта.

Второй вариант схемы применен в аппаратуре «Поиск-2» и «Крот» [134].

Упрощенный вариант схемы измерительного канала без модулятора и внутреннего источника опорного излучения применяется в случае использования ФПУ с постоянной крутизной преобразования принимаемого излучения в электрический сигнал (или с минимальными изменениями ее в пределах допустимой погрешности измерения принимаемого потока излучения). Внешний источник опорного излучения расположен так же, как и в 1-ом варианте.

Калибровка прибора проводится с использованием только внешнего излучателя. Данные по расчету величины потока от внешнего излучателя те же, что и в первом варианте.

Зависимости величин электрических сигналов от разности температур пересчитываются в зависимости величин электрических сигналов от разности потоков. Эти калибровочные кривые заносятся в память машины.

Процесс обработки данных для вычисления искомым потоков от исследуемых объектов мало чем отличается от первого варианта.

5.2.5. Устройство аналоговой обработки

Устройство аналоговой обработки (рис. 5.2) предназначено для приема сигналов четырех каналов от предусилителей, их привязки к опорному сигналу, усиления и коммутации, передачи в систему цифровой регистрации и отображения сигналов управления ключевыми схемами аналоговой обработки и выработки сигналов управления двигателем сканера синхронизирующей платы АЦП.

Восстановление постоянной составляющей сигнала (привязка уровня сигнала) [47, 25] происходит во время обратного хода сканирующей системы. В момент, когда в поле обзора фотоприемника (оптической системы) попадает внутренняя полость прибора, на ключ привязки со схемы синхронизации подается импульс, который открывает ключ, привязывая сигнал с фотоприемника к земле. Сигнал с выхода фотоприемника соответствует температуре внутренней полости прибора и зависит от излучательной способности поверхности этой полости. Для повышения излучательной способности полости прибора должна применяться эмаль или краска с коэффициентом теплового излучения ε , близким к единице.

На корпусе прибора устанавливается датчик температуры, который позволяет контролировать температуру прибора в процессе работы.

Структурная схема измерения температуры полости прибора приводится на рис. 5.9 [47].



Рис. 5.9. Структурная схема измерения температуры полости прибора

Бортовое напряжение +27 В преобразуется в ± 15 В. Для датчика температуры вырабатывается напряжение +5 В. Выходное напряжение с датчика температуры усиливается до величины, определяемой диапазоном АЦП в ЭВМ.

Электрическая схема измерения температуры приведена на рис. 5.10.

Полученное напряжение с преобразователя +15 В обеспечивает питание стабилизатора ADR02 и усилителя OP177. Напряжение -15 В поступает на четвертую ножку усилителя OP 177. Датчик температуры для получения более точных показаний требует напряжения питания с хорошей стабильностью. Эту функцию выполняет схема ADR02. Данный стабилизатор напряжения при токе нагрузки до 10 мА позволяет поддерживать напряжение +5 В с погрешностью не более 5 мВ (0,1 %). Такая погрешность позволит пренебречь влиянием изменения напряжения питания датчика температуры в формуле для подсчета выходного напряжения датчика: $V_{out} = (V_{num}/5B) \cdot [1,375B + (22,5мВ / ^\circ C) \cdot T_A]$

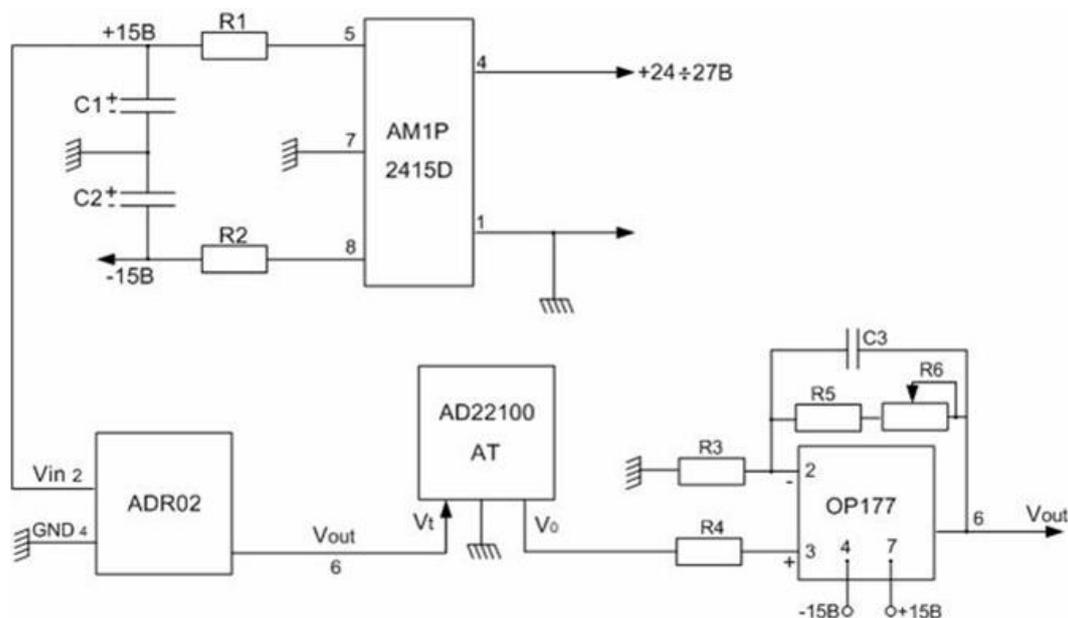


Рис. 5.10. Электрическая схема измерения температуры

5.2.6. Системы цифровой регистрации и отображения информации

При создании системы цифровой регистрации и отображения информации [47] возможны два пути: создание специализированного электронного устройства с жестким алгоритмом или создание системы на основе унифицированной ЭВМ с перепрограммируемыми алгоритмами.

На этапе разработки новой измерительной аппаратуры разработчик сталкивается со следующими сложностями:

- отсутствием отлаженных алгоритмов обработки измерительной информации;
- отсутствием отработанных тестовых программ;
- большой вероятностью появления нескольких неисправностей одновременно;
- наличием, кроме обычных неисправностей, связанных с дефектами электронных компонентов и монтажа, неисправностей, связанных с ошибками разработчиков;
- неопределенностью причины неисправности (отказы и сбои в аппаратуре или ошибки в программе).

Все эти причины делают задачи контроля прибора на этапе разработки наиболее сложными, а требования к квалификации персонала весьма высокими.

Построение тестовых программ и анализ результатов производятся разработчиком вручную на основании его представлений о принципах работы и структуре разрабатываемой аппаратуры.

Разрабатываемая аппаратура должна отвечать следующим требованиям:

- возможность разнообразных измерений, как цифровых (логических), так и аналоговых;
- разнообразие режимов работы и оперативность настройки на заданный режим;
- оперативность и наглядность представления результатов измерений;
- возможность работы как с аппаратурой, так и с программным обеспечением.

На этапе эксплуатации на первый план выдвигаются требования высокой производительности, полноты контроля и высокой автоматизации с целью снижения требований к квалификации обслуживающего персонала. Такие инструментальные средства, как правило, оснащаются программами автоматической диагностики.

Задачи контроля работоспособности аппаратуры в процессе эксплуатации значительно проще, чем на этапе разработки, по следующим причинам:

- вероятность одновременного появления двух и более неисправностей мала;
- как правило, требуется контроль правильности работы только при решении конкретных задач пользователя.

Поэтому наиболее удобным и универсальным устройством для съема, отображения и записи информации является второй путь, а именно, использование универсальной персональной ЭВМ с высоким быстродействием и отлаженных АЦП других фирм.

Основными датчиками измерительной информации для рассматриваемой ТПВ являются:

- каналы ИК радиометра; при этом надо обрабатывать четыре канала с частотой сканирования 25 Гц, длительностью строки 13,3 мс и 512 точками в строке;
- информация с системы определения координат (GPS)
- сигналы от опорной модели черного тела.

Вся эта информация записывается в файл для документирования, дальнейшей обработки и построения карт исследуемых трасс. Одновременно на экране монитора строится ИК изображение подстилающей поверхности, полученное после предварительной первичной обработки. На этапе предварительной обработки проводится аналоговая фильтрация сигнала и его оцифровка на АЦП. Период опроса составляет $13300 \text{ мкс} / (4 \times 512) = 6,5 \text{ мкс}$.

Используется 12-разрядный АЦП, имеющий динамический диапазон 4048 градаций. Общий объем записываемой информации будет составлять примерно: $[(4 \text{ канала} \times 512 \text{ точек}) \times 2 \text{ байта} + 80 \text{ байт (GPS)} + 2 \text{ байта (датчик черного тела)}] \times 25 = 104450 \text{ байт/с} \approx 104 \text{ Кбод}$.

Таким образом, за час работы прибора объем записанной несжатой информации будет составлять примерно 370 МБ. Такой сравнительно небольшой объем данных может храниться и обрабатываться практически на любом вычислительном устройстве.

5.2.7. Метрологическое обеспечение

При метрологической аттестации радиометра должны быть измерены:

1. энергетическая яркость внешнего опорного излучателя прибора (АЧТ протяженного типа);
2. качество изображения оптической системы;
3. относительные спектральные характеристики чувствительности всех приемно-регистрирующих каналов $(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r$ радиометра;

4. чувствительность каждого из каналов радиометра к энергетической яркости в рабочих интервалах длин волн;
5. значение коэффициента теплового излучения серого тела $\varepsilon_{r,i}$ каждого из каналов (коэффициента теплового излучения поверхности излучателя для i -го интервала длин волн).

Проверка по первому пункту проводилась в ГП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева». Излучатель в виде модели АЧТ протяженного типа, разработанный и изготовленный в ГОИ им. С.И. Вавилова, прокалиброван в соответствии с ГОСТ Р8.566-96 путем сличения его энергетической яркости с энергетической яркостью излучателя ИРЭ-220 рабочего эталона ВЭТ 48-2-85 по ГОСТ 8.106-80, принадлежащего ГП «ВНИИМ им Д.И. Менделеева».

Энергетическая яркость излучателя ГОИ при тепловом режиме, соответствующем $21,7^{\circ}\text{C}$ по показаниям измерительной системы излучателя, составляет $136,3 \text{ Вт/ср}\cdot\text{м}^2$. Измерения энергетической яркости проведены в направлении нормали к излучающей поверхности в пределах угла $\pm 2^{\circ}30'$. Граница погрешности результата измерений энергетической яркости излучателя ГОИ при доверительной вероятности 0,95 не превышает 3 %.

Качество изображения оптической системы радиометра оценивалось по результатам измерений ширины функции рассеяния линии (ФРЛ) в центре и на краях поля зрения, в меридиональном и сагиттальном сечениях, а также по результатам расчета коэффициентов передачи модуляции для пространственной частоты 5 л/мм.

Измерения проводились на оптической скамье ЮС 113, основными элементами которой являются:

- зеркальный коллиматор ($F'=2500 \text{ мм}$);
- керамический излучатель;
- оптико-акустический фотоприемник ОАП-5м1;
- коллиматорная щелевая диафрагма шириной 0,01 мм (ширина изображения);
- измерительная щелевая диафрагма шириной 0,033 мм;
- регистрирующая аппаратура;
- дисперсионный светофильтр с полушириной полосы пропускания 1,05 мкм.

ФРЛ, т.е. нормированное распределение освещенности в изображении бесконечно узкой светящейся линии, измерялось в соответствии с ОСТ В-3-4903-81 в центре и на краях поля зрения ($Y' = \pm 1,2 \text{ мм}$) в нескольких плоскостях установки, близких к фокальной, в меридиональном и сагиттальном сечениях. Ширина ФРЛ определялась по уровню 0,1 от максимума.

Учитывая, что в оптической системе радиометра фотоприемники располагаются только на краю поля зрения, единая плоскость наилучшего изображения определялась по минимальной ширине ФРЛ только на краях поля зрения.

По результатам измерений нескольких ФРЛ проведен расчет коэффициента передачи модуляции для пространственной частоты 5 л/мм по программе OTFLSN.

В результате проведенных измерений получено:

- меридиональная и сагиттальная кривизна поля зрения оптической системы (x_m, x_s) не превышает 0,1 мм;
- астигматическая разность ($x_m - x_s$) на краю поля зрения лежит в пределах погрешности измерений, не превышающей 0,05 л/мм;
- диаметр пятна рассеяния в единой плоскости наилучшего изображения, определенной для краев поля зрения, составляет менее 0,06 мм;
- коэффициент передачи модуляции для пространственной частоты 5 л/мм в плоскости наилучшего изображения составляет не менее 0,97.

Измерение относительного спектрального распределения чувствительности каналов радиометра осуществлялось с помощью ИК спектрометра ИКС-10, в котором имеется возможность вывода вонне монохроматического пучка излучения. Спектральное распределение выходящего из спектрометра потока в этом случае измеряется встроенным в прибор болометром. В радиометре отключают сканер в положении, при котором внешнее излучение проходит свободно от входа до фотоприемника, после емкости $C1$ подключается узкополосный усилитель с регулируемой резонансной частотой. Перед щелью спектрометра размещается модулятор-прерыватель, вращаемый синхронным двигателем. Частота прерываний должна быть в пределах 75–400 Гц. Узкополосный усилитель настраивается на частоту прерываний.

Обеспечивается такое размещение спектрометра и радиометра, чтобы на выходах фотоприемников наблюдались сигналы при «выборе» в спектрометре соответствующих длин волн. Ширина щели спектрометра устанавливается такой, чтобы спектральная частота выходящего из него излучения не превышала 0,01 мкм во всем спектральном диапазоне чувствительности фотоприемника. Последовательно осуществляется регистрация сигналов с выхода каждого из фотоприемников при изменении длины волны выходящего из спектрометра излучения с шагом не более 0,01 мкм в пределах полосы длин волн чувствительности.

Для контроля отсутствия чувствительности вне области длин волн, сформированных светофильтрами и самими фотоприемниками, для каждого из каналов проверяется отсутствие сигналов при облучении их излучением во всей области длин волн от 1,0 мкм до 14 мкм. Такая проверка допускается при непрерывном медленном изменении длины волны выходящего из спектрометра излучения вручную.

Спектральное распределение выходящего из спектрометра излучения регистрируется встроенным болометром.

Для интервалов длин волн, в которых наблюдались сигналы фотоприемников радиометра, находятся относительные значения сигналов болометра делением на максимальное значение сигнала болометра в пределах этих интервалов. Сигналы фотоприемников радиометра для совпадающих длин волн делятся на полученные относительные значения сигналов болометра, после чего для каждой из полос чувствительности находится относительное распределение чувствительности делением всех исправленных значений сигналов на максимальное значение исправленного сигнала в данной полосе.

Так как измерение спектральной характеристики чувствительности каждого из каналов радиометра выполнено, то для определения двух неизвестных R и ε , необходимо провести измерение двух приращений сигналов при наблюдении либо одного и того же излучателя с известным уровнем излучения – модели черного тела при двух различных температурах, либо двух разных имитаторов, имеющих разные температуры, причем желательнее при этих измерениях обеспечить неизменность температуры опорного (референтного) излучателя.

Измерения энергетических величин осуществляются с применением криовакуумной камеры при первичной калибровке прибора после изготовления.

В дальнейшем при эксплуатации радиометра проводились ежегодные проверки на лабораторном стенде ГОИ при комнатной температуре с использованием оптической скамьи и имитатора АЧТ фирмы AGA RS-10 с регулируемой температурой в диапазоне 16–100°C.

На расстоянии 0,7 м от сканирующего зеркала перпендикулярно оси сканирования размещается имитатор АЧТ, таким образом, чтобы при сканировании поле зрения набегало на него в зоне рабочего скана. Вокруг имитатора размещается черный экран такого размера, что на остальных частях пути сканирования поля зрения в его плоскости вписывались в его размер. Обеспечивается возможность изменения и измерения температуры имитатора черного тела и экрана.

Необходимый вакуум и температура в объеме камеры обеспечиваются штатными средствами криовакуумного стенда. Предусматривается возможность непрерывной регистрации показаний температурных датчиков, фиксирующих температуры корпуса радиометра, имитатора черного тела, экрана с привязкой по времени не хуже 5 сек.

Регистрация сигналов с выходов измерительных каналов радиометра и температуры излучающего элемента опорного (референтного) излучателя осуществляется штатными средствами радиометра.

5.2.8. Экспериментальные исследования фона

Возможность обнаружения объектов авиационным тепловизором определяется фоном земной поверхности в ИК диапазоне. Сведения о фоне были получены в летных исследованиях, выполненных ГОИ на самолете лаборатории АН-12 и вертолете МИ-8 с применением тепловизоров ТС-105, «Поиск» и ИК радиометров ТС-116, ТС-130 [139]. Линейное разрешение/чувствительность приборов составляла:

- тепловизоры ТС-105, «Поиск» – 0,5–2 м/0,03°К;
- ИК радиометр ТС-116 – 0,2–0,4 м/0,01°К;
- ИК радиометр ТС-130 – 10–20 м/0,02°К.

Обобщенные результаты приведены в табл. 5.1, 5.2, 5.3 примеры полученных изображений – на рис. 5.11, 5.12.

Эксперименты производились в Северо-Западном регионе в сентябре и октябре месяце в условиях сплошной облачности. Общим фоном был лесной массив. Измерения в диапазонах 7..14 мкм и 3...5 мкм производились не одновременно (в разных полетах самолета).

Таблица 5.1. Параметры фона

№ п/п	Фон, элементы фона	Протяженность (м)	Ср. знач. радиационной температуры (7-14мкм) /°С/	Среднее квадратичное значение флуктуаций радиационной температуры /°К/		Контраст радиационной температуры /°К/	
				7-14	3-5	7-14	3-5
				мкм		мкм	
1	Лес	-	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	0,6-1,2	0,2-0,4
2	Поляна в лесу	20-100	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	2-6	0,5-1,2
3	Дорога грунтовая в лесу	10	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	1,5-2	0,7-1,0
4	Дорога с покрытием в лесу	10-40	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	2-3	1,5
5	Дорога железная в лесу	15	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	5	-
6	Просека	20	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	-	1-1,5
7	Отдельные строения в лесу	10-80	11-13	0,1-0,2	0,03-0,06	2...7	0,7-1,2

В таблице 5.2 приведены результаты изменения радиационной температуры по поверхности отдельных объектов. Измерения производились на территории Ленинградской области в двух спектральных интервалах 3,5-5 мкм и 7,5-14 мкм. Значения радиационной температуры объектов приведены по результатам измерений в спектральном интервале 7,5-14 мкм. В экспериментах измерялось распределение температуры по объектам.

Были выделены зоны максимальных перепадов температуры. В таблице 5.2 приведены максимальные перепады температуры ΔT и расстояния ΔL , на которых они были обнаружены. Эксперимент показал практически полную идентичность результатов, полученных в разных спектральных интервалах 3,5...5 мкм и 7,5...14 мкм, за исключением результата на объекте «дорога».

Таблица 5.2. Изменения радиационной температуры отдельных объектов

Объекты	Радиационная температура (7,5-14 мкм) [град. С]	Максимальный перепад радиационной температуры на расстоянии ΔL			
		интервал 7,5-14 мкм		интервал 3,5-5 мкм	
		ΔT , К	ΔL , м	ΔT , К	ΔL , м
Дорога	2,0-5	1	5	1,2	5
Овраг	1-6,5	1	5	1	5
Пруд	0,5-2,4	2,6	100	2,6	100
Ручей	1-2,4	0,7	2	0,7	2
Лесополоса	1,8-4,5	0,6	10	0,6	10
Дом	1,5-6	2,0	5	2,0	5

В таблице 5.3 показаны результаты измерения контраста радиационной температуры на границах элементов ландшафта. Измерения производились на территории Крыма в осенний период в двух спектральных интервалах 3,5–5 мкм и 7,5–14 мкм [139].

Эксперимент показал практически полную идентичность результатов, полученных в разных спектральных интервалах 3,5–5 мкм и 7,5–14 мкм, за исключением результата на границе «степь/виноградники».

Полеты проводились поздней осенью в Ленинградской области, в Крыму, в Краснодарском крае на минимальной высоте 100–200 м днем в условиях отсутствия прямой солнечной засветки (облачность ~10 баллов).

Как показали результаты исследований (рис. 5.11, 5.12), даже в условиях низкой интенсивности теплообмена «земля – воздух» пространственные колебания радиационной температуры в спектральных интервалах 7–14 мкм и 3–5 мкм имеют величину порядка единиц градусов. Эти колебания определяются пространственной неоднородностью физических свойств грунта, влажности, геометрии поверхности и неоднородностью растительности.

Таблица 5.3. Контраст радиационной температуры границ ландшафтов

Границы элементов ландшафта	Радиационная температура (наибольшая) [град. С]	Максимальный контраст на границе (7,5...14мкм) ΔT , К	Максимальный контраст на границе (3,5...5мкм) ΔT , К
Степь/пашня	5,7/6,7	0,5	0,5
Степь/виноградники	4,5/5,2	1,0	1,2
Пашня/виноградники	6,5/7	0,2	0,2
Зеленое поле/строение	5,5/6,0	1,5	1,5
Зеленое поле/степь	5,7/6,0	0,3	0,3

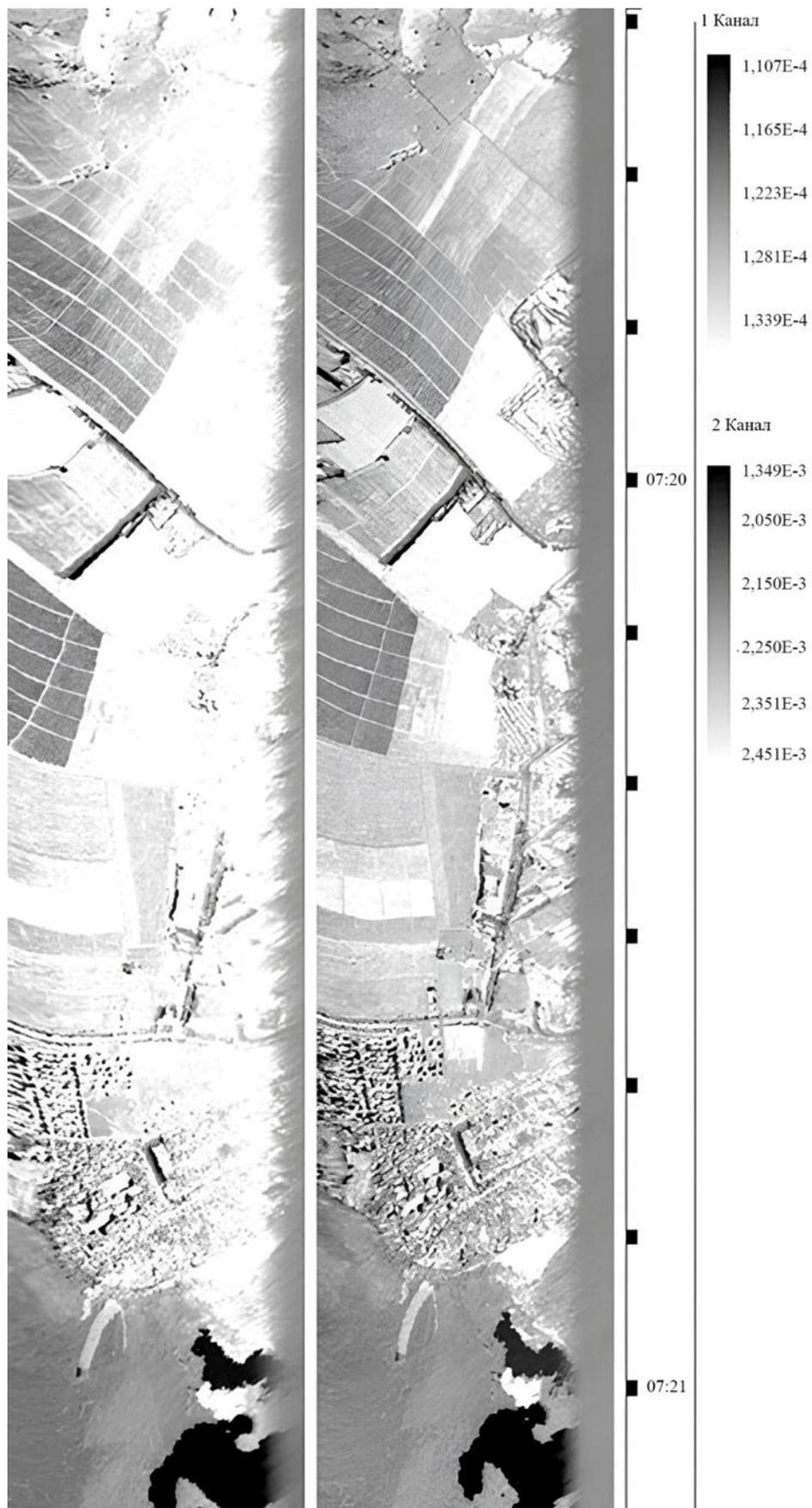


Рис. 5.11. Пример тепловизионного снимка (вертолет, Н=200 м, тепловизор «Поиск», 7–14 мкм, 3–5 мкм)

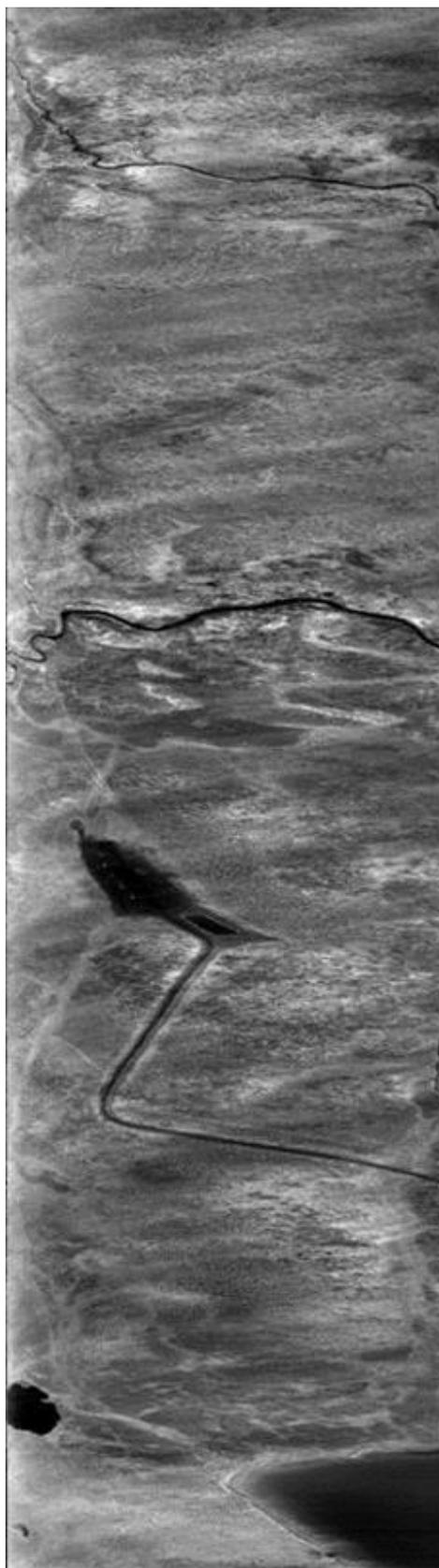


Рис. 5.12. Пример тепловизионного снимка (самолет АН-30, Н=200 м, тепловизор «Малахит», ГОИ)

5.3. Тепловизионные системы третьего поколения

Третье поколение тепловизоров использует матричные фотоприемники. Типовая схема матричных тепловизоров приведена на рис. 5.13 [47].

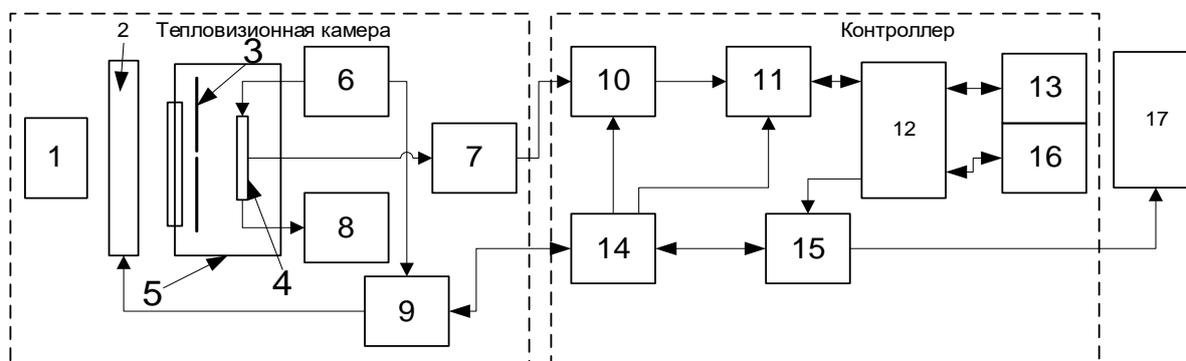


Рис. 5.13. Структурная схема тепловизионной камеры: 1 – объектив; 2 – устройство калибровки; 3 – холодная диафрагма; 4 – матричное ФПУ; 5 – вакуумный криостат с просветленным окном; 6 – генератор управляющих импульсных и постоянных напряжений; 7 – усилитель с дифференциальным выходом; 8 – измеритель температуры ФПУ и автомат включения напряжения смещения подложки из InAs; 9, 14 – блоки управления и синхронизации; 10 – АЦП; 11 – сумматор; 12 – диспетчер памяти; 13, 16 – банки памяти; 15 – блок связи с персональным компьютером; 17 – персональный компьютер

В техническом отношении одним из преимуществ таких тепловизоров является то, что они построены на основе матричного ИК фотоприемника. Это преимущество проявляется в сравнении с тепловизорами, использующими сканирующие системы, которых много еще на мировом рынке. В связи с использованием принципа накопления информационного сигнала матричные тепловизоры при прочих равных условиях выигрывают у сканирующих систем по совокупности таких параметров, как надежность, чувствительность, быстродействие и пространственное разрешение.

О принципах формирования ИК изображений можно судить из следующих положений. С учетом излучения Солнца и температурного режима естественных источников излучения на Земле в общем потоке радиации, воспринимаемой ОЭС, в диапазоне длин волн 3...3,5 мкм доминирует отраженное излучение – это так называемая подсветочная область спектра. В области более 7 мкм преобладает собственное излучение объектов и фонов. Участок длин волн 3–5 мкм – как бы переходный.

Обнаружение объекта производится по его демаскирующим признакам, которые делятся на три группы: видовые, признаки деятельности и расположения. К видовым демаскирующим признакам относятся физические свойства объекта (способность отражать излучение оптического и радиолокационного диапазонов волн, излучать энергию в тепловом диапазоне) и геометрические свойства

(форма и размер объекта и его отдельных деталей). Данные о фоно-целевой обстановке необходимы для решения следующих задач:

- создания моделей типовых объектов и алгоритмов обнаружения, распознавания и сопровождения, с разделением их по приоритетности;
- управления основными оптическими параметрами объекта для их оптимизации при создании малозаметных целей, например, по технологии, определяемой в зарубежной практике как “Стелс-технология”;
- имитации и моделирования различных режимов работы ОЭС на стадии отработки конструкции и, в том числе, в плане решения задачи снижения стоимости прибора;
- разработки системы идентификации объектов сложной конструкции в автоматическом режиме за счет фильтрации фона и корреляции путем сравнения характерных параметров принимаемого изображения и эталона цели.

Анализ видеоизображений объектов в ИК диапазоне позволяет сделать следующие выводы.

1. Качество изображений объектов наблюдения в ИК диапазоне, получаемых в благоприятных погодных условиях, по разработкам последних лет уже приближается к качеству изображений видимого диапазона. Видимое улучшение изображений достигается за счет применения дополнительной обработки изображений (внутреннее электронное сканирование) в реальном масштабе времени.

2. Особо высокое качество видеоизображений в ИК диапазоне достигается на тепловизионных системах, построенных на матричных фотоприемниках, использующих наноструктурные квантовые ямы (QWIP матрицы).

3. Качество тепловизионных изображений и дальность обнаружения объектов в ИК диапазоне значительно ухудшается в условиях тумана, дождя и задымленности.

4. Существенным шагом к решению задач обеспечения качественного наблюдения объектов наблюдения в неблагоприятных погодных условиях является создание комплексированных систем наблюдения в ИК, УФ, видимом и ТГц диапазонах спектра, за счет дополнительной информации, получаемой в этих диапазонах.

5. Перспективными направлениями являются исследования по комплексированию ИК, видимых и субмиллиметровых каналов.

5.4. Четырехспектральный сканирующий радиометр

В ОАО «Государственный Оптический Институт им. акад. С.И. Вавилова» создан модернизированный четырехспектральный сканирующий радиометр-тепловизор, входящий в состав бортового актинометрического комплекса АПК-3 и установлен на борт самолета-лаборатории ГУ "ГГО" им. А.И. Воейкова. Прототипами тепловизора являлись ранние разработки ГОИ [139].

Ранее был разработан, изготовлен и использовался для исследования водной поверхности двухспектральный сканирующий ИК радиометр ТС-105. Сначала были проведены испытания с экспериментальным образцом

односпектрального ИК радиометра. Проводились работы с вертолета МИ-8 по обнаружению и оконтуриванию скрытых очагов пожара (горение торфяников) под Екатеринбургом.

Был разработан и изготовлен четырехспектральный сканирующий ИК радиометр "Акваметр" для исследования состояния атмосферы. С борта высотного самолета были проведены измерения над территорией США. На рис. 5.14 показан прибор, его размещение на самолете и пример реализаций, полученных одновременно в четырех спектральных каналах.

Отладочный экземпляр 4КСРТ, разработанный для лаборатории космической динамики США [139], был доработан и модернизирован сотрудниками АО НПП «АМЭ» под задачи ГГО им А.И. Воейкова России.

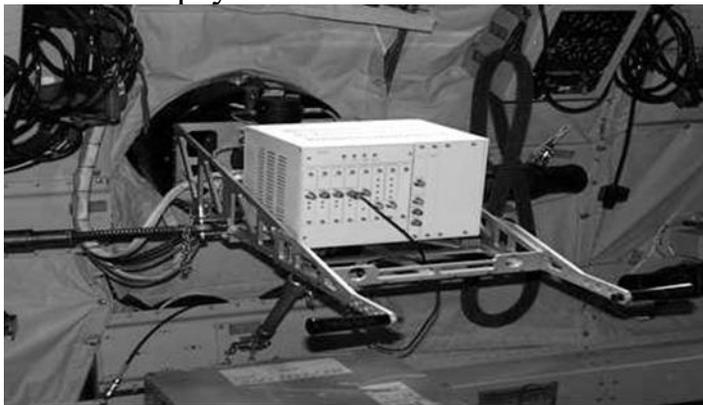
Радиометр предназначен для проведения измерений энергетической яркости атмосферы и подстилающих поверхностей в ИК области спектра с борта авиационного носителя. Конструктивно радиометр размещается на самолете по обе стороны одного из иллюминаторов, в котором стекло заменяется шарнирным устройством таким образом, что узел сканирования находится вне кабины в специальном пилоне с отверстием, приемно-регистрирующий блок – внутри кабины. В связи с этим, во время измерений в зависимости от сезона и времени суток, внешние элементы прибора, в частности, сканирующее зеркало, будет охлаждаться до температуры внешней среды, что на высоте 12–13 км составляет от -40°C до -70°C . Элементы, находящиеся в кабине, будут иметь температуру от 10°C до 20°C . Иллюминатор – некоторую промежуточную температуру. При включении аппаратуры во время стоянки на Земле, в зависимости от сезона, температура внутренних и наружных элементов прибора может составлять от 10°C до 40°C .

Радиометр представляет собой четырехканальный по спектру прибор с конической разверткой визирного луча вокруг направления в надир. Частота сканирования – 25 Гц.

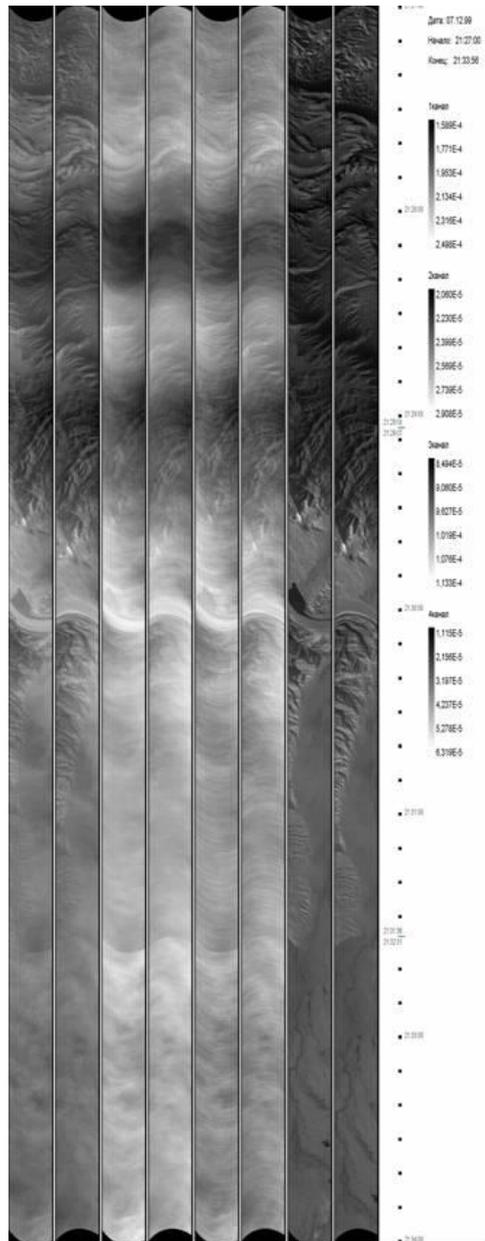
Для реализации возможности повышения чувствительности за счет применения последовательного накопления сигналов многоэлементного фотоприемника изображение фотоприемника в пространстве предметов должно в процессе сканирования сохранять неизменной свою ориентацию относительно траектории сканирования.



а) Внешний вид ОСГ, установленной на борту самолета Боинг-747



б) Установка оптической головки на борту самолета Боинг-747



в) Примеры реализаций, полученных с помощью четырех-спектрального радиометра

Рис. 5.14. Примеры реализации четырехспектрального ИК радиометра-тепловизора

Необходимо обеспечить максимальный коэффициент использования развертки, равный отношению длительности рабочего хода развертки к периоду сканирования. При заданной частоте сканирования, рассчитанной из условия беспрерывного обзора, относительное увеличение длительности рабочего хода приводит к возрастанию минимальной длительности сигнала от элемента разложения и пропорциональному сужению требуемой полосы пропускания и, как следствие этого, к увеличению пороговой чувствительности.

Так как контраст регистрируемых неоднородностей поля яркостной температуры морской поверхности зависит от угла наблюдения (визирования),

необходимо, чтобы схема сканирования позволяла производить установку этого угла в зависимости от конкретных условий приема сигналов.

Непосредственно за иллюминатором располагается основной объектив радиометра (рис. 5.15), формирующий изображение наблюдаемой сцены в своей фокальной плоскости. С осевой фокальной точкой объектива совмещена плоскость наклонного вращающегося модулятора-прерывателя с набором вырезов. Вращение модулятора синхронизовано с вращением сканирующего зеркала, а вырезы в теле модулятора размещены таким образом, чтобы имелась возможность пропуска излучения к фотоприемнику с двух участков конуса сканирования, соответствующих переднему (по направлению полета) рабочему участку скана и заднему рабочему участку, и, кроме того, пропуска к фотоприемнику излучения внешнего излучателя, когда он попадает в поле зрения. В остальные интервалы времени излучение, выходящее из основного объектива, перекрывается непрозрачными участками модулятора.

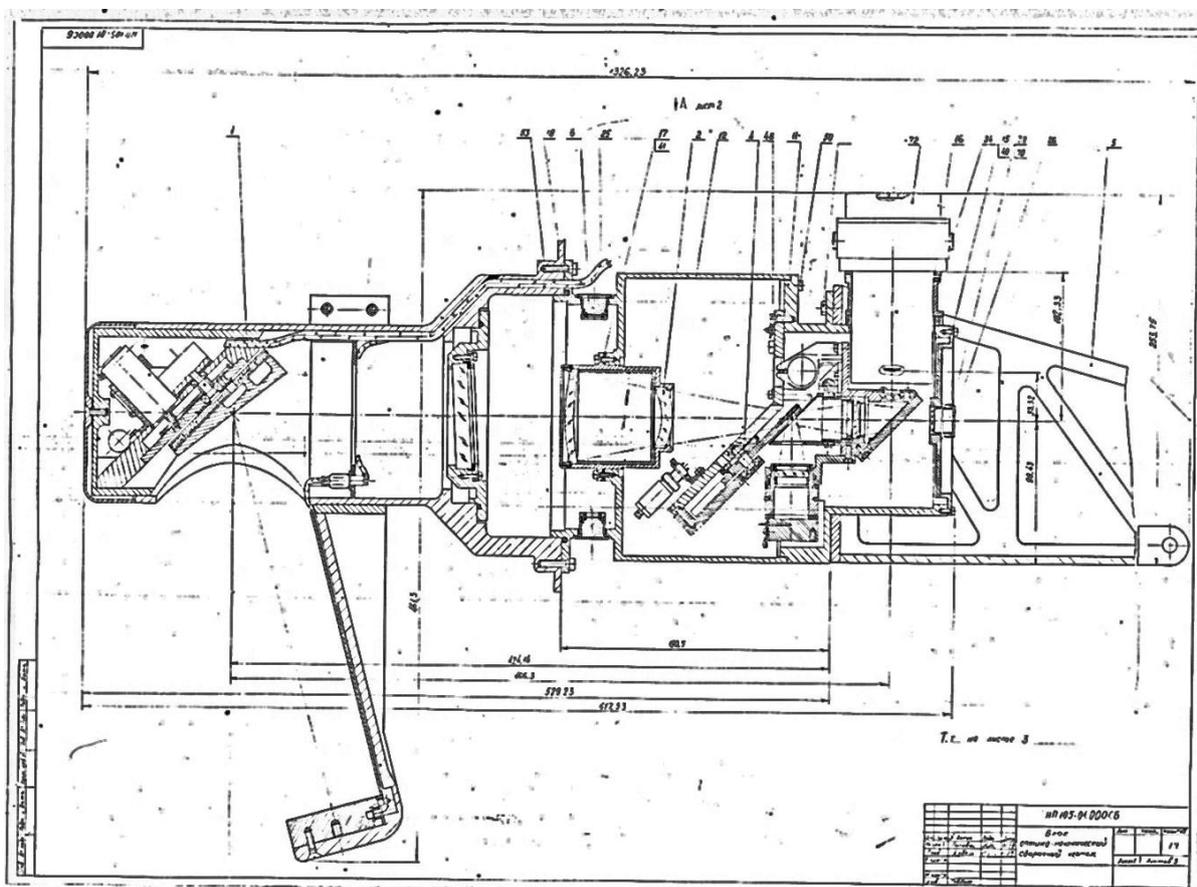


Рис. 5.15. Оптическая головка четырехспектрального ИК радиометра-тепловизора

Промодулированное излучение фокусируется вторичным объективом на чувствительных элементах фотоприемника. В те интервалы времени, когда внешнее излучение перекрыто, на ФПУ попадает излучение от внутреннего опорного источника. Четыре фоточувствительных элемента, с различными спектральными характеристиками с установленными перед ними малоразмерными

полосовыми спектральными фильтрами, размещаются на общей плате в едином корпусе и охлаждаются жидким азотом. Вблизи отверстия наружного пилона на специальном держателе закреплен внешний излучатель – черный металлический диск с рифленой поверхностью, экранирующий часть конуса сканирования, служащий для формирования в радиометре референтного сигнала. Предусмотрена возможность изменения температуры диска. Регистрация сигналов со всех приемных элементов осуществляется одновременно и параллельно по независимым каналам, так что в техническом плане прибор представляет собой четыре одновременно работающих радиометра с общими объективом и системой сканирования.

Схема доработанного экспериментального образца четырехканального радиометра с пространственным сканированием (тепловизора) – 4СР(Т) приведена на рис. 5.16.

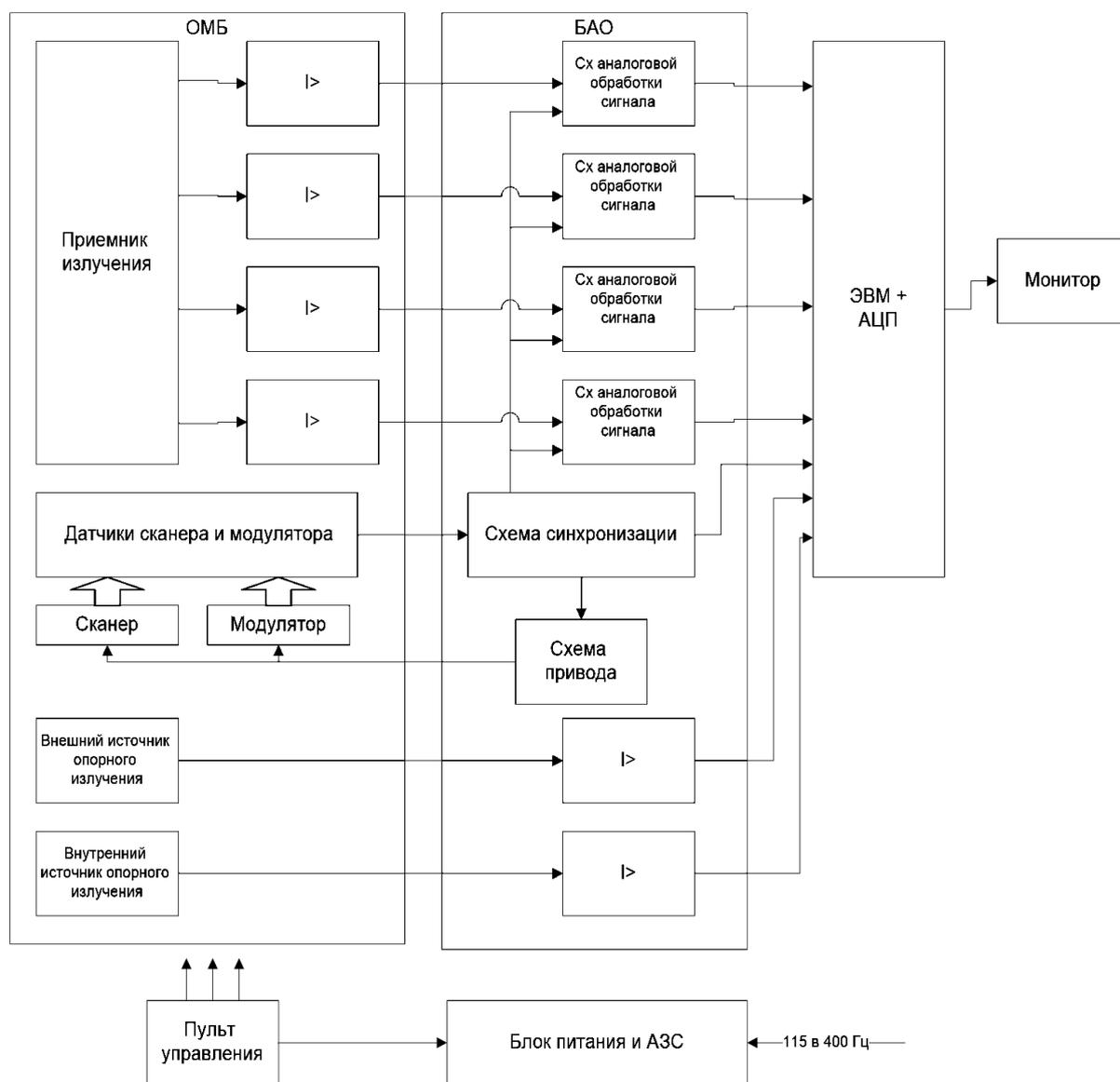


Рисунок 5.16. Схема экспериментального образца четырехспектрального радиометра с пространственным сканированием

Для получения высокой чувствительности и независимости результата измерений от распределения температур по элементам радиометра и, по крайней мере, медленных изменений этого распределения в электронной схеме радиометра обеспечена привязка сигналов к двум уровням, реализуемым с помощью опорного излучателя, модулятора и референтного излучателя (рис. 5.17).

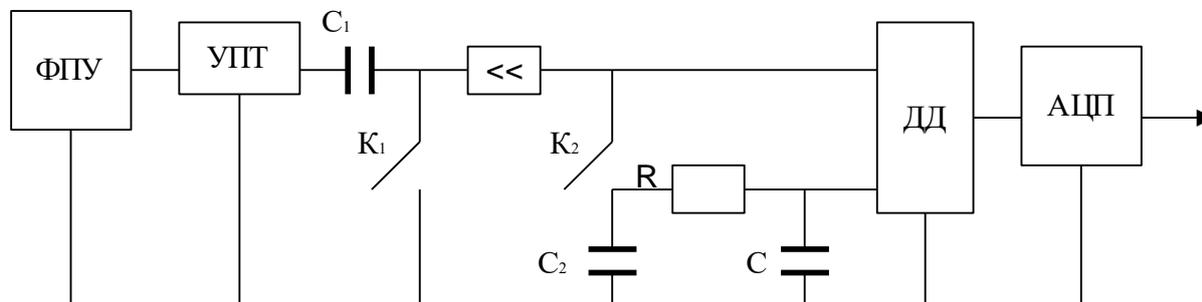


Рисунок 5.17. Схема привязки сигналов радиометров к двум уровням

За время полного оборота сканирующего зеркала и модулятора каждый фотоприемник последовательно облучается излучением:

- наблюдаемой сцены в рабочем секторе сканирования и собственным аппаратным излучением в интервале времени Δt_1 ;
- опорного источника излучения в интервале времени Δt_2 ;
- референтного источника излучения и собственным излучением прибора в интервале времени Δt_3 .

В интервал времени Δt_2 потенциал емкости C_1 ключом K_1 приводится к уровню, определяемому излучением опорного источника излучения, в интервале времени Δt_3 с помощью ключа K_2 заряжается емкость C_2 , а за несколько оборотов зеркала и модулятора – и емкость C до потенциала, определяемого излучением референтного источника излучения. С учетом этого для каждого из интервалов времени можно написать выражения для сигналов на выходе предусилителей.

Как показано в [139],

$$U_i(\Delta t_1) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (L_{0\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_1) A \quad (5.1)$$

здесь S_{im} – максимальная спектральная чувствительность i -го фотоприемника, В/Вт; $(S\tau)_{\lambda_{\max i}}$ – величина произведения $S_i(\lambda)\tau_i(\lambda)$ значения относительной спектральной чувствительности i -го фотоприемника, спектрального пропускания оптического тракта и светофильтра, выделяющего i -ю рабочую область длин волн, на длине волны, на которой это произведение максимально, соответственно,

$$L_{0\Delta\lambda i} = \int_0^{\infty} L_0(\lambda)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda \quad (5.2)$$

– действующее значение энергетической яркости наблюдаемого объекта или элемента сцены в i -ой полосе длин волн Вт/см² ср; $(S_i(\lambda)\tau(\lambda))_r$ – спектральное распределение чувствительности приемно-регистрирующего тракта для i -го канала, приведенное к единице в максимуме этого распределения;

$$L_{in\Delta\lambda i} = \int_0^{\infty} L_{in}(\lambda)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda \quad (5.3)$$

– действующее значение энергетической яркости элементов оптической схемы и элементов конструкции, находящихся в поле зрения фотоприемника, приведенное к заднему апертурному углу оптической системы u' ; $K(\Delta t_1)$ – коэффициент усиления предусилителя в интервале времени Δt_1 ; A – площадь фоточувствительного элемента фотоприемника, $см^2$.

$$U_i(\Delta t_2) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{max i}}(L_{s\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_2) A \quad (5.4)$$

$$U_i(\Delta t_3) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{max i}}(L_{0\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_3) A, \quad (5.5)$$

$$U_i(\Delta t_4) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{max i}}(L_{s\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_4) A, \quad (5.6)$$

$$U_i(\Delta t_5) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{max i}}(L_{r\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_5) A, \quad (5.7)$$

$$U_i(\Delta t_6) = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{max i}}(L_{s\Delta\lambda i}) \sin^2 u' K(\Delta t_6) A, \quad (5.8)$$

где

$$L_{s\Delta\lambda i} = \int_0^{\infty} L_s(\lambda)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda \quad (5.9)$$

– действующее значение энергетической яркости встроенного автоколлимационного опорного источника излучения;

$$L_{r\Delta\lambda i} = \int_0^{\infty} L_r(\lambda)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda \quad (5.10)$$

– действующее значение энергетической яркости референтного источника излучения в i -й рабочей полосе длин волн в интервале времени Δt_5 .

Такое представление сигналов, вообще говоря, возможно только в том случае, если выполняются следующие предположения:

- чувствительность фотоприемника S_{im} неизменна во времени, причем не только в пределах длительности скана, но и в существенно больших интервалах времени, например, за время всего эксперимента; в противном случае необходимо обеспечивать периодический текущий контроль постоянства этой величины;
- в электронной схеме предусмотрены все необходимые меры для того, чтобы спадом сигнала от начала рабочего скана до его конца, обусловленным разрядом емкости C_1 через сопротивления утечек и входное сопротивление предусилителя, можно было пренебречь;
- верхняя частота частотной характеристики электронного тракта выбрана достаточной для того, чтобы можно было пренебречь вариациями длительности сигналов, соответствующих одному элементу разрешения, обусловленными вариациями скорости бега проекции чувствительного элемента фотоприемника по Земле при развертке поля наклонным плоским зеркалом;
- характеристика тракта линейна во всем диапазоне изменения входных яркостей, изменений температуры окружающей среды и т.д.

Было установлено, что изменения коэффициента усиления предусилителя, обусловленные изменением температуры электронных блоков при изменении

окружающей температуры и возможными колебаниями напряжения питания, пренебрежимо малы. В результате для разностных сигналов на входе усилителя переменного тока за емкостью C_1 можно написать, обозначив коэффициент усиления через K :

$$\Delta U_{i61} = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (L_{0\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i} - L_{s\Delta\lambda i})(\sin^2 u')KA, \quad (5.11)$$

$$\Delta U_{i23} = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (L_{0\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i} - L_{s\Delta\lambda i})(\sin^2 u')KA, \quad (5.12)$$

$$\Delta U_{i45} = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (L_{r\Delta\lambda i} + L_{in\Delta\lambda i} - L_{s\Delta\lambda i})(\sin^2 u')KA. \quad (5.13)$$

В установившемся режиме на выходе дифференциального детектора для сигналов, вырабатываемых на рабочих сканах, получаем разностные сигналы

$$\Delta U_{0i} = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (L_{0\Delta\lambda i} - L_{r\Delta\lambda i})(\sin^2 u')KA. \quad (5.14)$$

Отсюда следует основная фотометрическая формула радиометра:

$$L_{0\Delta\lambda i} = \frac{\Delta U_{0i}}{R_i} + L_{r\Delta\lambda i}, \quad (5.15)$$

где

$$R_i = \pi \cdot S_{im}(S\tau)_{\lambda_{\max i}} (\sin^2 u')KA, \quad (5.16)$$

причем здесь в K включен и коэффициент усиления усилителя переменного тока.

Коэффициент R_i (В/Вт/см²ср) имеет смысл чувствительности радиометра к энергетической яркости в i -й рабочей полосе длин волн, или точнее – коэффициента преобразования энергетической яркости в рабочей полосе длин волн выходного сигнала радиометра. Если выходной сигнал квантуется по уровню, то разностный сигнал на выходе АЦП – дискретен.

Из приведенных упрощенных формул, вообще говоря, не следует необходимость применения модуляции излучения и привязки сигналов к уровню сигнала опорного источника. Однако из опыта осуществления электронных схем для работы со слабыми сигналами фотоприемников известно, что модуляция позволяет повысить отношение сигнала к шуму, а привязка к некоторому постоянному уровню позволяет повысить метрологические свойства этих схем, прежде всего, за счет исключения влияния низкочастотного дрейфа потенциалов во входных цепях.

В формуле (5.15) второе слагаемое предполагается полностью известным, так как оно описывает яркость встроенного в систему устройства – референтного излучателя, которому “поручается” роль эталона. В реальной конструкции радиометра невозможно обеспечить постоянства характеристик, прежде всего температуры и, следовательно, яркости излучения внешнего излучателя. Максимум возможного – это изготовить излучатель так, чтобы его можно было считать серым излучателем, измерять его текущую радиационную температуру T_r и вычислять для заданных моментов времени его яркость по формуле

$$L_{r\Delta\lambda i} = \varepsilon_{ri} \int_0^{\infty} l(\lambda, T_r)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda = \varepsilon_{ri} l_{ri}, \quad (5.17)$$

где ε_{ri} – коэффициент теплового излучения поверхности излучателя для i -го интервала длин волн; $l(\lambda, T)$, Вт/см²ср мкм – функция спектрального распределения энергетической яркости АЧТ для радиационной температуры T_r :

$$\ell(\lambda, T) = \frac{1.191 \times 10^4}{\lambda^5 \left(e^{\frac{1.4388 \times 10^4}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (5.18)$$

Из вышесказанного следует, что при метрологической аттестации радиометра должны быть измерены:

- относительные спектральные распределения чувствительности всех приемно-регистрирующих каналов $(S_i(\lambda) \tau_i(\lambda))_r$ радиометра,
- чувствительность каждого из каналов радиометра к энергетической яркости в рабочих интервалах длин волн R_i ,
- значения коэффициента теплового излучения ε_{ri} для каждого из каналов.

При этом попутно требуется:

- определить диапазоны изменения входных воздействий (уровней энергетической яркости) для каждого из каналов, в пределах которых их регистрация осуществляется без искажений;
- подтвердить, что эти диапазоны перекрывают ожидаемые диапазоны изменения уровней входных воздействий, указанные в техническом задании (ТЗ), и что в пределах этих диапазонов “световые” характеристики каналов линейны;
- определить порог чувствительности для каждого из каналов при различных уровнях энергетической яркости;
- подтвердить, что измерительная схема радиометра нечувствительна к изменению теплового режима приемно-регистрирующего блока в заданных пределах его изменения;
- определить наименьшее значение температуры референтного излучателя, начиная с которого выполняется основная фотометрическая формула радиометра;
- подтвердить отсутствие паразитных связей сигналов разных каналов.

Будем считать, что измерение спектрального распределения чувствительности каждого из каналов радиометра выполнено. Тогда из основного уравнения следует, что для определения двух неизвестных R и ε_r необходимо произвести измерение двух приращений сигналов при наблюдении либо одного и того же излучателя с известным уровнем излучения имитатора АЧТ при двух различных температурах, либо двух разных имитаторов, имеющих разные температуры; причем желательно при этих измерениях обеспечить неизменность температуры референтного излучателя.

При этом получим:

$$L_{1i} = \frac{\Delta U_{1i}}{R_i} + \varepsilon_{ri} l_{ri}, \quad L_{2i} = \frac{\Delta U_{2i}}{R_i} + \varepsilon_{ri} l_{ri}, \quad (5.19)$$

откуда найдем

$$R_i = \frac{\Delta U_{2i} - \Delta U_{1i}}{L_{2i} - L_{1i}}, \quad \varepsilon_{ri} = \frac{L_{1i} \Delta U_{2i} - L_{2i} \Delta U_{1i}}{l_{ri} (\Delta U_{2i} - \Delta U_{1i})}, \quad (5.20)$$

где

$$L_{1i} = \varepsilon_{1i} \int_0^{\infty} \ell(\lambda, T_1)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda = \varepsilon_{1i} l_{1i}, \quad (5.21)$$

$$L_{2i} = \varepsilon_{2i} \int_0^{\infty} \ell(\lambda, T_2)(S_i(\lambda)\tau_i(\lambda))_r d\lambda = \varepsilon_{2i} l_{2i}. \quad (5.22)$$

Здесь L_{1i} – действующее значение энергетической яркости имитатора АЧТ при первой заданной температуре; L_{2i} – действующее значение энергетической яркости имитатора АЧТ при второй заданной температуре; ΔU_{1i} – разностный сигнал между имитатором АЧТ (при температуре T_1) и референтным (опорным) излучателем радиометра; ΔU_{2i} – разностный сигнал между имитатором АЧТ (при температуре T_2) и референтным (опорным) излучателем радиометра; R_i – чувствительность i -го канала радиометра; ε_{ri} – коэффициент излучательной способности поверхности референтного излучателя для i -го интервала длин волн (i -го канала); l_{ri} (Вт/см²ср·мкм) – функция Планка спектрального распределения энергетической яркости референтного излучателя для температуры, (которая поддерживается неизменной при измерениях); l_{1i} и l_{2i} – то же, для имитатора АЧТ при температурах T_1 и T_2 ; ε_{1i} и ε_{2i} – коэффициенты излучательной способности имитаторов абсолютно черного тела, либо измеренные при их аттестации, либо, в крайнем случае, рассчитанные с учетом конструкций излучателей по известным методикам.

Указанные алгоритмы реализованы в программно-аппаратном комплексе, основные характеристики которого указаны в табл. 5.4, и доработанном с целью:

- создания перспективной самолетной системы для получения прокалиброванных в единицах спектральной яркости или радиационной температуры изображений подстилающей поверхности, атмосферы и облачности;
- мониторинга состояния подстилающей поверхности (излучательная способность, альbedo, температура) и его изменений под действием естественных и техногенных факторов, параметров облачности и атмосферы.

При этом сканирующая головка может выполнять измерения, будучи направленной в надир, зенит или параллельно горизонту.

Анализируемые среды:

- подстилающая поверхность, радиационная температура – от 230 K до 350 K;
- атмосфера или облачность радиационная температура – от 220 K до 300 K.

Уточненные значения границ фильтров соответствующих каналов: № 1 (3,80–4,16) мкм, № 2 (8,1–9,3) мкм, № 3 (10,2–12,1) мкм, № 4 (5,4–7,2) мкм.

Для оперативного анализа и оценки помех, воздействующих на прибор, разработана программа построения спектра двумерного изображения, полученного по результатам испытаний. Для расчета берется изображение размером 141×512 пикселей и, используя быстрое преобразование Фурье, строится спектр (сумма квадратов действительной и мнимой частей) 512×512 пикселей (недостающие точки по оси X дополняются нулями). Имеется возможность производить

операцию взвешивания, т.е. умножение исходного изображения на функцию $\frac{1}{2}(1-\cos(2\pi n/N))$ по обеим осям, а также «разрезов» спектра по осям X и Y. Спектр изображается в цветном или «сером» виде с отсечками на выбранных уровнях.

Таблица 5.4. Характеристики разработанного программно-аппаратного комплекса [139]

Порог чувствительности к энергетической яркости в рабочих полосах спектральных диапазонов	- не хуже 3×10^{-7} Вт/см ² ср.
Абсолютная радиометрическая погрешность	- не хуже 10%
Динамический диапазон измеряемых сигналов	- не менее 1000
Фотоприемник	- КРТ
Охлаждение фотоприемника	- жидкий азот
Количество спектральных диапазонов	- 4
Ширина спектральных каналов, мкм: - канал 1 - канал 2 - канал 3 - канал 4	3,8–4,16; 8,1–9,3; 10,2–12,1; 5,4–7,2
Крутизна фронтов спектральных диапазонов	- не хуже 3%
Пропускание в пределах рабочей полосы спектральных диапазонов	- не менее 80%
Мгновенное поле зрения радиометра	- 3 мрад
Высота полета носителя	- от 1 до 14 км
Скорость полета носителя	- до 800 км/час
Траектория визирования исследуемой поверхности.	- близка к образующей конуса
Угол визирования поверхности	- 15°
Углы обзора относительно курса самолета при размещении радиометра на правом борту). переднем секторе обзора заднем секторе обзора	 от минус 30° до +60°; и от +120° до минус 150°
Частота сканирования	- 50 Гц
Диаметр входного зрачка объектива	- 50 мм
Рабочая температура для оптико-механического блока	- температура наружного воздуха (от 50°С до -70°С)
Время непрерывной работы	- неограниченное (при условии заправки ФПУ жидким азотом через каждые 2 часа)
Питание прибора	от сети переменного тока 115 В 400 Гц
Потребляемая мощность	- не более 250 ВА
Количество блоков	- 5.
Индикация изображения	- монитор компьютера
Регистрация информации	- жесткий диск компьютера

В разработанной программе имеется возможность фильтрации полученных изображений с целью улучшения их качества. Подбор фильтров, как и работа со всей программой, осуществляется в интерактивном режиме. После применения фильтра строится новое изображение, которое можно использовать для

оценки нового спектра и дальнейшего подбора фильтра. Спектр рассчитывается после выделения постоянной составляющей по всему кадру, после фильтрации постоянная составляющая восстанавливается.

После подбора фильтров по всем четырем каналам производится фильтрация файлов с исходной информацией, полученной в летных экспериментах. На момент начала исследований, в начале 2000-х годов, время на обработку файлов занимали минуты, сейчас вычислительная техника позволяет проводить обработку снимков в реальном времени.

6. УМЕНЬШЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

6.1. Малогабаритные тепловизионные системы зарубежного производства

Большое количество разработок выпускает на мировой рынок американская фирма Teledyne FLIR, все модели ТПВС этой фирмы выполнены на основе фокальных плоскостных матриц FPA различных конструкций.

Тепловизионный модуль ThermoVision Photon [140] выпускается для служб охраны, наблюдения, разведки, а также для создания систем машинного зрения. В соответствии с традициями выпуска компанией FLIR миниатюрных ИК камер с неохлаждаемыми фотоприемниками серии Indigo камера Photon имеет компактный корпус, причем его объем составляет приблизительно 7,5 куб. дюймов (51,4×49,8×45,0 мм). Масса камеры равняется 97 г без учета задней крышки и объектива. Существует несколько вариантов объективов, включая объективы 14 мм/1,3 (поле зрения 50°), 19 мм/1,4 (поле зрения 36°), 35 мм/1,4 (поле зрения 20°) и 50 мм (поле зрения 14°). Осуществляется выпуск дополнительных объективов. В установленном режиме работы потребление составляет порядка 1,5 Вт. Установленная в фокальной плоскости матрица – неохлаждаемый микроболометр на основе оксида ванадия (VO_x), которая позволяет получить изображение размером 324×256 пикселей (размер пикселя 38 мкм). Такая матрица обеспечивает прекрасный динамический диапазон в пределах широкого интервала рабочих температур, получение изображений превосходной однородности и отличного качества при высокой чувствительности к температурным перепадам, составляющей NETD < 85 мК при оптике с числом $F/1,6$. В пересчете к оптической системе $F/1$ это эквивалентно чувствительности NETD < 35 мК. Спектральный диапазон работы камеры составляет 7,5–13,5 мкм. Имеющееся двукратное цифровое увеличение позволяет увеличивать изображение и осуществлять электронное панорамирование. Выходной видеосигнал поддерживает стандарт NTSC (система аналогового цветного телевидения, разработанная в США), дополнительно – стандарт PAL. Частота кадров – 30 Гц.

Тепловизор ThermoVision Micron [109, 141], известный также под названием A10, является прочной, очень компактной и дешевой камерой, предназначенной как для автономного применения, так и для использования в составе комплексного оборудования с ограничениями на габаритные размеры, массу и/или потребляемую мощность электропитания, в то время как высокие рабочие характеристики должны иметь решающее значение. Она является идеальной для контроля технологических процессов, обнаружения и предотвращения возникновения пожара, для использования в робототехнике и в средствах машинного зрения, а также для служб обеспечения безопасности и сбора данных.

Камера ThermoVision Micron в момент начала выпуска являлась одной из самых маленьких в мире ИК камер, тем не менее, она имеет технические характеристики и функции, которые, как правило, присущи лишь более крупным и

гораздо более дорогостоящим инфракрасным системам. В камере ThermoVision Micron проблема решается путем гибкой модульной архитектуры, которая поддерживает широкий диапазон функций, вариантов и аксессуаров. Это позволяет пользователю задавать камере конфигурацию в соответствии с конкретным применением.

При использовании стандартного объектива с $F/1.6$ камера имеет NETD <25 мК. В комплекте имеются три объектива: $F = 11$ мм ($40 \times 30^\circ$), $F = 18$ мм ($25 \times 19^\circ$) и $F = 30$ мм ($15 \times 11^\circ$).

ThermoVision Micron обеспечивает получение изображений с высоким динамическим диапазоном (14 бит), частотой кадров 30 Гц (для сигналов, удовлетворяющих требованиям стандарта RS-170) или 25 Гц (для сигналов, удовлетворяющих требованиям стандарта МККР). Камера снабжена схемами обработки сигналов от располагающейся в фокальной плоскости матрицы на основе оксида ванадия (VO_x) размером 160×128 пикселей. Рабочий спектральный диапазон – от 7,5 до 13,5 мкм. В камере ThermoVision Micron используется система оптимизации изображения, в которой осуществляется предварительная обработка данных изображения; она устраняет необходимость в температурной стабилизации матрицы фотоприемников. Это позволяет камере ThermoVision Micron работать в широком температурном диапазоне без использования сложного и потребляющего энергию термоэлектрического холодильника. Отсутствие такого холодильника приводит к быстрому включению, что может иметь решающее значение для применений, связанных с необходимостью быстрого приведения в действие камеры. При этом интервал времени с момента включения до получения изображения максимум 2 с. В стандартной комплектации электропитание составляет 3,5 до 9,0 В постоянного тока, энергопотребление – менее 1,5 Вт (номинальное значение). Выходной аналоговый видеосигнал поддерживает стандарт МККР (дополнительно – сигнал в стандарте RS-170A и цифровой видеосигнал). Масса камеры – менее 120 г (зависит от типа объектива), габаритные размеры $35 \times 37 \times 49$ мм (без объектива).

Тепловизоры фирмы BAE Systems Avionics. Фирма BAE Systems Avionics (Великобритания) предлагает семейство тепловизионных камер для широкого круга задач, не только в коммерческих целях. Один из таких продуктов – тепловизионный модуль AthenaTM 1920 (рис. 6.1) [142]. В конструкции модуля использована микроболометрическая матрица формата 1920×1200 пикселей, размер пикселя 12 мкм, работающая в диапазоне спектра 7,5–13,5 мкм. NETD составляет менее 50 мК, типа матрицы – неохлаждаемый VO_x болометр.

В модуль встроена цифровая обработка сигнала: управление контрастностью, автоматическое выравнивание гистограммы распределения яркости, встроенный 16 битный АЦП. Модуль работает в диапазоне температур от -40 до 65°C и имеет вес 70 грамм.

Модуль AthenaTM 1920 может использоваться в системах охраны и видеонаблюдения, для высококласных систем наведения, а также для систем с широким полем зрения.



Рис. 6.1. Вид тепловизионного модуля Athena™ 1920
фирмы Avionics BAE Systems

Тепловизоры фирмы Wuhan Guide Infrared Technology Co., Ltd. Фирма Wuhan Guide Infrared Technology Co., Ltd выпускает достаточно широкий ряд инфракрасных матричных фотоприемников: GST1212M, GST612W и т.д. [143]. Кроме неохлаждаемых матричных детекторов, выпускаются модули, как неохлаждаемые, так и охлаждаемые.

Неохлаждаемое фотоприемное устройство GST1212M (рис. 6.2) использует в качестве чувствительного элемента микроболометрическую матрицу высокой чувствительности с разрешением 1280×1024 . Их отличает высокая чувствительность, $NETD < 50$ мкм, встроенный термоэлектрический охладитель для стабильной температуры чувствительного элемента и встроенный 14-битный АЦП. Спектральный диапазон – 8–14 мкм, размер элемента – 12×12 мкм, время отклика – 12 мс.



Рис. 6.2. Внешний вид матричного фотоприемного устройства GST212W

Матрицы позволяют создавать тепловизионные системы любой категории сложности. Рабочая температура – от -40°C до $+85^\circ\text{C}$. Матричный фотоприемник упакован в металлический корпус.

Матричное фотоприемное устройство GST612W выполнено на основе неохлаждаемой микроболометрической матрицы 640×512 пикселей с размером элемента 12×12 мкм и чувствительностью менее $0,04^\circ\text{C}$, работающей в спектральном диапазоне 8–14 мкм, рабочая температура составляет от -40°C до $+85^\circ\text{C}$, вес – 2 г.



Рис. 6.3. Внешний вид матричного фотоприемного устройства GST612W

ИК модуль EYAS1212 предлагается как для производства тепловизоров, так и для специальных инфракрасных систем – авиационных и танковых прицелов, гиросtabilизированных подвесок для авиации и т.п. В соответствии с рекламой фирмы [143], установка фотоприемного модуля в корпус и подсоединение необходимого объектива дает возможность получить специализированный тепловизор высокого разрешения для промышленного применения.

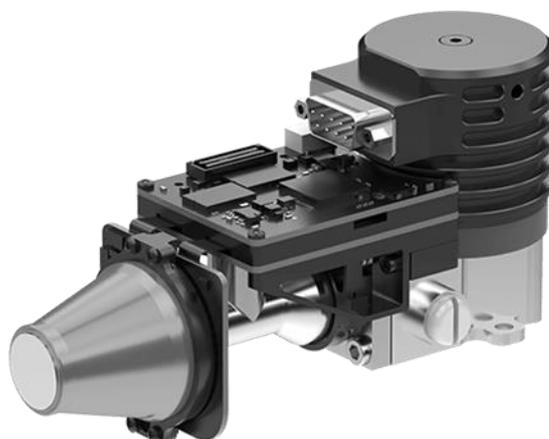


Рис. 6.4. Мегапиксельный фотоприемный модуль EYAS1212

Фотоприемный модуль EYAS1212 использует в качестве чувствительного элемента неохлаждаемую микроболومترическую матрицу размером 1280×1024 пикселей высокой чувствительности. Модуль имеет встроенный цифровой блок обработки сигнала, что обеспечивают EYAS1212 широкое применение для решения разнообразных задач. Прямая и быстрая передача как входных, так и выходных данных позволяет перенастраивать модуль под конкретные требования. Спектральный диапазон составляет 8–14 мкм, размер элемента – 12×12 мкм, чувствительность – менее 0.1°C , частота ИК кадров – до 100 Гц. Питание 5–24 В постоянного тока, энергопотребление – 9 Вт., вес фотоприемного модуля – 680 г.

Тепловизор JH640-280 Miniature Airborne MWIR Cooled Thermal Camera (рис. 6.5) – небольшой тепловизор с максимальным фокусным расстоянием 280 мм, предназначенный для удаленного наблюдения [144]. Тепловизор позволяет эффективно распознавать различные цели, такие как человек, транспортное средство или судно на большом расстоянии. Технические характеристики тепловизора представлены в табл. 6.1.



Рис. 6.5. ТПВС JN640-280 Miniature Airborne MWIR Cooled Thermal Camera

Таблица 6.1. Технические параметры тепловизора JN640-280

ФОТОПРИЕМНИК	
Материал фотоприемника	КРТ
Число элементов матрицы	640×512
Спектральный диапазон	3,7 мкм ... 4,8 мкм
Размер пикселя	15 мкм
NETD	≤23мК при температуре 25 °С
Тип охлаждения	Охлаждение цикла Стирлинга
ОПТИКА	
Фокусное расстояние	15–280 мм (зум), F : 5,5
Угловое поле (В) x (Ш)	1,97×1,58 ~ 36,5×29,2
ПАРАМЕТРЫ ВИДЕОСИГНАЛА И ИНТЕРФЕЙС ТЕПЛОВИЗОРА	
Частота кадров, Гц	30 (50 по индивидуальному заказу)
Аналоговое видео	PAL
Интерфейс управления связью	RS232 / RS422 (альтернатива)
Калибровка затвора	Ручной / автоматический
Фоновая калибровка	да
Полярность	Ч/Б
Электронный зум	×2 / ×4
Отображение перекрестных курсоров	Вкл/выкл
Усиление изображения	регулируемый
Яркость изображения	регулируемый
Улучшение изображения	регулируемый
Источник питания	DC 24-36В
потребление	≤ 10 Вт при 25 °С
УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ И ХРАНЕНИЯ	
Рабочая температура, °С	-32 ~ + 60 С
Температура хранения, °С	-40 С ~ + 70 С
Вибрация и защита от ударов	GJB150.16-86 / MIL-STD-810F-514.5
Температурные испытания	GJB150.3-86 / MIL-STD-810F-514.5
РАЗМЕРЫ	
Масса, кг	≤ 1,6
Габариты, мм	≤218×98×89

6.2. Малогабаритные тепловизионные системы отечественного производства

В России к числу разработчиков и изготовителей малогабаритных тепловизионных наблюдательных приборов относятся в первую очередь НИИИИ МНПО «Спектр» (Москва), ОАО ЦНИИ «Циклон» (Москва), НПП «СИЛАР» (г. Санкт-Петербург), КБ «ВИТА» (г. Новгород).

НИИИИ МНПО «Спектр» [145] выпускает ряд ТПВ приборов на основе твердотельных многоэлементных неохлаждаемых фокально-плоскостных матриц. К ним, в частности, относятся малогабаритные тепловизоры серии «Катран» и «Спрут», предназначенные для работы на относительно небольших дистанциях. Их характеристики представлены в табл. 6.2, где одновременно для сравнения приведены параметры американского портативного тепловизора X-200XP. Эта аппаратура предназначена для использования правоохранительными и силовыми структурами, государственными органами безопасности и охраны правопорядка, частными охранными предприятиями, подразделениями МЧС и другими пользователями, кому необходимо эффективное всепогодное круглосуточное наблюдение [146].

Таблица 6.2. Характеристики тепловизоров НИИИИ МНПО «Спектр» [146]

	Катран_1	Катран_2	Катран_3	Спрут	ThermalEye X-200XP
Формат матрицы, элементов	160×120	160×120	320×240	320×240	160×120
Угол поля зрения, град.	17×2	11×8 17×12	12×9	12×9	11×8
ЭШРТ, °С, град.	0,1	0,06	0,05	0,05	0,05
Спектральный диапазон, мкм	7–14	7–14	7–14	7–14	7–14
Дальность обнаружения/распознавания, м.					
человек	300/170	500/250 300/170	1000/500	1000/500	500/250
автомобиль	500/300	1200/500 500/300	2000/900	2000/900	1200/500
Габаритные размеры, мм	170×120×70	120×98×52	170×120×70	180×140×71	134×114×51
Масса, кг	0,9	0,6	1	1,2	0,38
Время непрерывной работы, ч	5	2	7	7	3-7

ОАО ЦНИИ «Циклон» [147] выпускает серию малогабаритных тепловизоров (табл. 6.3).

Таблица 6.3. Характеристики тепловизоров ОАО ЦНИИ «Циклон»

	«Сыч-4»	«Скопа-3»	«ТВМ-640»
ФПУ	Микроболометр α -Si/VO _x	Микроболометр	Микроболометр
Формат, пикселей	384 × 288 (опция - 640 × 480)	160×120	640x480
Размер пикселя, мкм	25	-	25
Спектральный диапазон, мкм	7–14	8–12	8–12
МРТ, mK	< 70	< 100	80
Время выхода на рабочий режим 25°C, с	< 30	< 30	5
Дальность обнару- жения человека, м	2200/3000	<550	400/1000/1600/-
Поле зрения, °	5,5° × 4,1° /4,2°×3,2°	9,1× 6,8	25x20/ 13,5x10,2/8,1x6
Фокусное расстоя- ние объектива, мм	100/130	35	-
Минимальное рас- стояние наблюде- ния, м	< 50	< 2	<5
Выходной сигнал/ ОСИД	ГОСТ 7845-92	ГОСТ 7845-92	ГОСТ 7845-92
Напряжение пита- ния, В	7,2/ 12 (от внеш- него источника)	7,2	7 - 9
Рабочая темпера- тура, °С	от -20 до +50	от -20 до +50	от -40..+80

Тепловизоры «Сыч-4» и «Скопа-3» – неохлаждаемые миниатюрные тепловизионные камеры полностью российской разработки и производства. Они предназначены для круглосуточного поиска и наблюдения объектов в любых

сложных метеоусловиях и в условиях искусственных помех, в том числе при проведении специальных операций, поисково-спасательных работ, при выявлении очагов возгорания на объектах и др. Применение высококачественной германиевой оптики обеспечивает максимально эффективное использование возможностей микроболометров. Возможность подключения внешнего источника питания и монитора позволяет использовать «Сыч-4» в стационарном или мобильном варианте.

Портативный тепловизор спасателя также позволяет вести наблюдение при запылении и задымлении во время проведения поисково-спасательных работ, выявлении очагов возгорания и др. Он может использоваться как самостоятельно, так и крепиться на каске спасателя. Информация с тепловизора может передаваться по радиоканалу руководству спасательной операцией.

Системы и приборы, разработанные ЦНИИ «Циклон», сертифицированы, лицензированы и поставляются в МО, ФСБ, МВД, МЧС РФ.

6.3. Камеры, работающие в видимом и SWIR диапазонах

Камеры, работающие в расширенном диапазоне длин волн, в видимом, ближнем и коротковолновом инфракрасном диапазоне, позволяют при минимальных размерах и относительно небольшой сложности получить преимущества тепловизоров.

Камера HEVA400 [148] (рис. 6.6, а) имеет следующие характеристики:

- Матрица – комплементарный металл-оксидный полупроводник (КМОП), с обратной засветкой;
- Максимальный размер изображения – 2048×2048 пикселей;
- Частота кадров – 23 Гц;
- Размер пикселя – 11×11 мкм;
- Затвор – строковый.

Камера VS320-BCL [149] (рис. 6.6, б) имеет следующие характеристики:

- Матрица – InGaAs SWIR;
- Максимальный размер изображения – 320–256 пикс;
- Частота кадров – 369 Гц (при максимальном разрешении);
- Размер пикселя – 30–30 мкм;
- Затвор – кадровый;
- Спектральная чувствительность – 900–1700 нм;
- Чувствительность – $5 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \sqrt{\text{Гц/Вт}}$;
- Квантовая эффективность – 70 %;
- Динамический диапазон – 72 дБ;
- Программное обеспечение – SDK.

Камера VS640-BCL [149] (рис. 6.6, в) имеет следующие характеристики:

- Матрица – InGaAs SWIR
- Модель сенсора – FPA
- Разрешение, пикселей – 640×512

- Размер пикселя, мкм – 15×15
- Частота кадров – 30 Гц (до 360 Гц)
- Глубина потенциальной ямы – до $3,5 \text{ Me}^-$



Рис. 6.6. Камеры, работающие в видимом и SWIR диапазонах:
 а – NEBA400, б – VS320-BCL, в – VS640-BCL

6.4. Камеры, работающие в LWIR диапазоне

Данные камеры работают в спектральном диапазоне 8–14 мкм, отсутствие охлаждения расширяет сферу применения данных камер (тепловизоров) в системах охраны, специальных задачах, вспомогательных системах автономной навигации и т.п., где требуется работа без постоянного обслуживания камер.

Камеры, работающие в LWIR диапазоне, представлены на рис. 6.7. Они широко применяются:

- в высокоуровневых системах видеонаблюдения, охраны границ и стратегических объектов, системах ночного вождения, противопожарных системах (обнаружение очагов возгорания, наблюдения в условиях задымленности);
- в промышленности и машинном зрении (визуализация и контроль распределения температуры, наполняемость тары, ранняя диагностика перегрева электропроводки и механизмов);
- при обнаружении утечек тепла в зданиях;
- в зоологии (наблюдение за животными, подсчет популяции); во время охоты;

- при осуществлении охраны правопорядка;
- в медицине;
- в мультиспектральных системах.

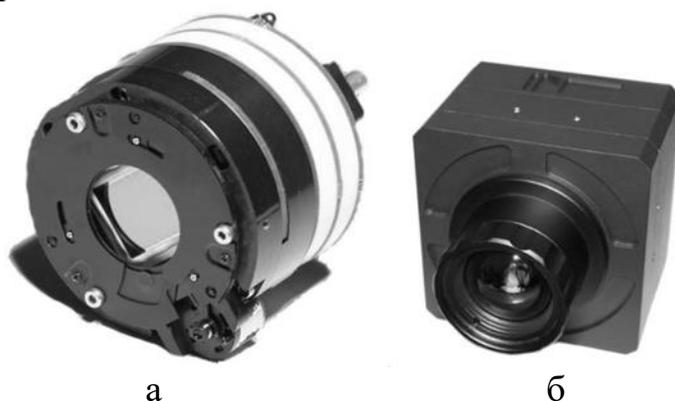


Рис. 6.7. Камеры, работающие в LWIR диапазоне:
а – FLM 640, б – VL640-20-PAL/SDI

Камера FLM 640 [150] (рис. 6.7, а) имеет следующие характеристики:

- Тип матрицы – VOx;
- Разрешение – 640x512;
- Спектральный диапазон – 8–14 мкм;
- Тип затвора – механический;
- Частота кадров – 50 Гц;
- Интерфейс – CameraLink / PAL/SDI;
- Бренд – КБ «Вита»;
- Охлаждение – не требуется;
- Цвет изображения – черно-белое;
- Масса – 100 г.

Камера VL640-20-PAL/SDI [151] (рис. 6.7, б) имеет следующие характеристики:

- Тип матрицы – VOx;
- Разрешение – 640×512;
- Размер пикселя – 20×20;
- Спектральный диапазон – 8–14 мкм;
- Тип затвора – механический;
- Интерфейс – PAL/SDI.

7. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

7.1. Анализ методов цифровой обработки изображений с учетом фоно-целевой обстановки

С конца 70-х годов прошлого века как в России, так и за рубежом интенсивно велись работы по созданию бортовых вычислительных устройств обработки сигналов ОЭС, формирующих как полноформатный ТВ стандарт изображения, так и видеосигналы от матричных фотоприемников повышенного формата (до 4000×4000 пикселей). Основная трудность состояла в том, что обработка этих сигналов должна была производиться в реальном времени, т.е. в процессе формирования полного кадра или полукадра.

К бортовым вычислительным комплексам предъявлялись следующие требования:

- улучшение качества изображения (выравнивание контрастов и чувствительности матричных элементов ФПУ);
- параллельная или параллельно-последовательная обработка сигналов от матричных чувствительных элементов для целей структурного, морфологического анализов, анализа скорости цели и медианной фильтрации, что позволяло подойти к созданию автоматического обнаружения целей с заданными свойствами из всей совокупности формируемых видеокладов на экранах ОЭС. При этом учитывалась природа формируемых сигналов: ТВ сигналы видимого диапазона, ТВ стандарт от приемных сигналов ОЭС ближнего и дальнего ИК диапазонов;
- совместное предъявление изображений от различных спектральных и спектрально-анализируемых каналов комбинированных и комплексированных систем (через кадровое предъявление формирования псевдостереопар, одновременное предъявление со встроенными друг в друга разномасштабными изображениями каналов);
- встраивание в предъявляемые изображения дополнительной аналоговой и цифровой информации;
- цветное селектирование сигналов заданной амплитуды (обусловленной величиной и контрастом сигналов собственного и отраженного излучения целей и фонов в формируемых тепловизионных, телевизионных и сканарных ТПВК видимого и теплового диапазона).

В США применяется система EFCS (Electronic Filmless Camera System) фирмы Harris [152]. Фирма выпустила специальный шлюз с мощной системой обнаружения и исправления ошибок, позволяющий осуществить обмен данными и изображениями, полученными от систем типа EFCS, между различными локальными сетями и удаленными ЭВМ с помощью стандартных радиостанций защищенной связи. Кроме того, фирма предлагает портативный вариант своей системы цифровой передачи изображений DVITS (Digital Video Imaging Transmission System), смонтированной в жестком чемоданчике, в которой

применены протоколы связи, рассчитанные на передачу сигнала по узкополосным каналам связи. В системе применяются пакетная передача, адаптивная прямая коррекция погрешностей и процедура селективного автоматического запроса повторной передачи, позволяющая максимизировать пропускную способность каналов с ухудшенными характеристиками.

Перечисленные выше требования вызывали существенные трудности построения аппаратных блоков и систем из-за несовершенной элементной базы электроники того времени.

Разработанные в те годы бортовые вычислительные комплексы представляли собою блоки и стойки обработки сигналов с внушительными массо-габаритными характеристиками. Активно над такими системами работали НПО «Орион» и ГОИ им. С.И. Вавилова. Система позволяла обнаружить малоразмерный объект на сложном фоне в реальном времени, с одновременным выводом на экран телевизионное и тепловизионное изображение с координатами объекта.

В последние годы успехи по созданию таких вычислительных комплексов сопутствовали ряду зарубежных фирм, создающих бортовую аппаратуру для задач картографирования оптико-электронными системами и средствами подстилающей поверхности Земли. К решению этих задач удалось подойти благодаря внедрению ведущими космическими державами систем спутниковой топографической привязки GPS (США) и ГЛОНАСС (РФ).

Активные приборные комплексы РЛС и лидарные комплексы, формирующие, дополнительно к видеокадрам, еще и информацию стробирующих импульсов по каждому элементу изображения, позволили подойти к построению изображений с полным восстановлением рельефа исследуемой местности. В зарубежной литературе это направление развития цифровых устройств обработки сигналов получило название Airborne Topographic Mapper. Наряду с дополнительной информацией о частотной селекции в видимом диапазоне спектра и амплитудной селекцией в ИК диапазоне с созданием цветowego и псевдо-цветowego раскрашивания изображений, последние позволили создавать многоинформативные данные 3D изображений местности, легко воспринимаемые зрительным аппаратом операторов, принимающих решение на конечном этапе в задачах целеуказания и наведения оружия в системах специального назначения.

7.2. Обработка тепловизионных изображений методом микросканирования

Совместная обработка двух потоков видеоинформации может быть использована для решения следующих задач:

- 1 изучение качества изображения на одном мониторе;
- 2 повышение помехозащищенности, например, селекции ложных тепловых целей;
- 3 повышение характеристик комплексной системы и расширение границ применения тепловизора в условиях изменения неконтролируемых гидрометеопараметров в широких пределах.

При решении задач второй и третьей групп необходимо четко определить приоритетность каждого канала либо использовать некоторую мажоритарную схему, для управления которой необходима информация о изменении гидрометеопараметров и прогноз характера целей.

Наиболее распространенная схема подавления помех естественного характера типа «шума» моря, солнечных дорожек и т.п. строится на основе компенсационной схемы. Один из каналов является приоритетным, а другой – компенсационным. Если помеха имеет большую корреляцию в обоих спектральных диапазонах, а отношение сигнал/помеха в одном из них (основном) больше по сравнению со вторым (компенсационным), то использование схем вычитания может привести к существенному уменьшению помех, следовательно, к результирующему увеличению отношения сигнал/помеха (рис. 7.1).



Рис. 7.1. Изображение, обработанное методом микросканирования

Если ввести понятие коэффициента подавления помех r как отношение среднего квадратического значения (СКЗ) помех в основном канале к среднему квадратическому значению помех на выходе, то при выборе коэффициента усиления в компенсационном канале $K_2=K_{2opt}$ имеем:

$$r = (1 - r_{1,2}^2)^{-1/2}, \quad (7.1)$$

где $r_{1,2}$ – коэффициент взаимной корреляции помех в обоих каналах.

Если m_1, m_2 – отношение сигнал/помеха в основном и компенсационном канале соответственно, то на выходе имеем:

$$m_{max} = m_1 / r. \quad (7.2)$$

При решении задач обнаружения и сопровождения, что является специфической задачей рассматриваемой схемы ТВП, необходимо четко определить границы «полезного» комплексирования, когда комплексная система дает выигрыш, и «вредного», когда один из каналов вносит лишь помеху. Наиболее эффективным является сочетание каналов, работающих на различных принципах или в различных спектральных диапазонах. Это увеличивает эффективность системы, особенно в условиях использования маскировки целей и активного противодействия оптико-электронным средствам, так как создать помехи в широкой области спектра и обеспечить эффективную маскировку крайне сложно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие тепловизионной техники прошло через нескольких этапов и на настоящий момент представляет удобные инструменты с разноплановым применением. Но на этом развитие не останавливается, и можно выделить следующие направления совершенствования:

I Разработка и создание комплексированных и комбинированных приборов, работающих в терагерцовом, инфракрасном, видимом и ультрафиолетовом диапазонах спектра электромагнитных волн.

II Разработка и создание тепловизионных систем и систем ТГц визуализации с лазерным подсветом в диапазонах 3–5 мкм, 10,6 мкм, 2,9 ТГц, 3,1 ТГц, 108–116 мкм.

III Разработка и создание многоспектральных сканирующих измерительных радиометров, работающих в ИК и видимом диапазонах спектра оптического излучения.

IV. Разработка и создание линейных ИК сканеров.

А. для решения таких задач, как:

- управление процессами формирования структуры и текстуры проката для обеспечения оптимальных температур конца прокатки и смотки, подачи охлаждающей жидкости по ширине и длине полосы;
- дистанционный контроль степени заливки различных продуктов нефтегазового комплекса по линии движения цистерн относительно контрольного пункта, в котором устанавливается сканирующая оптико-электронная аппаратура.

Б. для решения таких задач, как:

- контроль производства в цементной промышленности;
- контроль утечек тепла в промышленных и жилых зданиях;
- тепловой контроль трубопроводных систем нефтегазовых и энергетических отраслей РФ.

V. Разработка матричных измерительных тепловизоров для ветеринарных служб и медицинских диагностических лабораторий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: учебное пособие. 3-е изд., испр. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 704 с. ISBN 978-5-8114-1036-1.
2. ГОСТ Р 58568-2019. Оптика и фотоника. Фотоника. Термины и определения.
3. Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. ИК системы смотрящего типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
4. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд., доп. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. 544с.
5. Rogalski A. Next decade in infrared detectors. October 2017. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications*. DOI:10.1117/12.2300779.
6. Фомин Ф.В. Современное состояние и перспективы развития зарубежных ИК-систем. Под ред. Н.Н. Вилковой. М. : ЗАО «МНИТИ», 2018. 35 с.
7. Handbook of Optics (in 5 vol.) // Ed.-in-Chief M. Bass. 3rd ed. New York [etc.]: McGraw-Hill, (2010). Vol. 2: Design, Fabrication, and Testing; Sources and Detectors; Radiometry and Photometry // J. H. Altman [etc.]; ed.: M. Bass, V. N. Mahajan, E. V. Stryland .— [2010] .— XXIV, 4075, [4] p.: il. ISBN 978-0-07-163600-1.— ISBN 978-0-07-149890-6.
8. Valery V. Korotaev, Anton A. Maraev. Sources and detectors of optical radiation. –Saint Petersburg: ITMO University, 2017. 104 p.
9. Rouvié, O. Huet, S. Hamard, JP. Truffer, M. Pozzi, J. Decobert, E. Costard, M. Zécari, P. Maillart, Y. Reibel, A. Pécheur; High Performance SWIR Imaging Cameras [Электронный ресурс] URL: <https://www.raptorphotronics.com/wp-content/uploads/2015/10/Ninox-White-Paper-Final.pdf> (дата обращения 12.03.2021)].
10. Хадсон Р. Инфракрасные системы. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 536 с.
11. Смук С., Кочанов Ю., Петрошенко М., Соломицкий Д. Инфракрасные датчики длинноволнового диапазона на квантовых ямах. Компоненты и технологии, № 1, 2014. С. 152.
12. Ллойд Д. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 414 с.
13. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов. Казань: Отечество, 2006. 595 с.
14. Cracknell A.P. The Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). London: Taylor & Francis, 1997. 534 p.
15. Jacobs P.A. Thermal infrared characterization of ground targets and background. US, Bellingham, Washington: SPIE press, 2006. 212 p.
16. Маркин В.А. Пределы температурной чувствительности тепловизоров третьего поколения // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 2. С. 51–58.
17. Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Особенности выбора основных параметров объективов современных тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 35–40.

18. Ovsyannikov V.A. and Filippov V.L. How to select the main parameters of the lenses of modern thermal viewers. *Journal of Optical Technology*. 84(3), 185-189 (2017). <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000185>
19. Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л. Влияние атмосферной дымки на эффективность широкопольных телекамер воздушного базирования при наблюдении наземных объектов. *Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 3. С. 28–34.
20. Ovsyannikov V.A., Ovsyannikov Ya.V., and Filippov V.L. How atmospheric haze affects the efficiency of wide-angle airborne television cameras when ground objects are being observed. *Journal of Optical Technology*. 84(3), 179-184 (2017). <https://doi.org/10.1364/JOT.84.000179>
21. Овсянников В.А., Овсянников Я.В. Оценка контрастной силы излучения воздушных объектов для наземной телевизионной аппаратуры. *Авиакосмическое приборостроение*. 2022. № 2. С. 3–12. <http://doi.org/10.25791/aviakosmos.2.2022.1263>.
22. Овсянников В.А., Овсянников Я.В. Оценка теплового контраста низкотемпературных наземных объектов. *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 10. С. 5–12. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-05-12>
23. Овсянников В.А., Овсянников Я.В. О пороговой чувствительности не-сканирующих тепловизионных приборов, работающих по наклонным атмосферным трассам. *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 10. С. 13–25. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-10-13-25>
24. Волков В.Г. Вертолетные оптико-электронные системы наблюдения и разведки. *Специальная техника*, №3, 2001 г. URL: http://st.ess.ru/publications/3_2001/volkov/volkov.htm
25. Волков В.Г. Тепловизионные приборы средней дальности действия. *Специальная техника*, 2005, №4.
26. Rogalski A. InAs/GaSb type-II superlattices versus HgCdTe ternary alloys: future prospect. *Proc. SPIE 10433, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV*, 104330U (6 October 2017); doi: 10.1117/12.2279572
27. Madejczyk P., Gawron W., Kębłowski A., et al. Higher Operating Temperature IR Detectors of the MOCVD Grown HgCdTe Heterostructures. *Journal of Electronic Materials*, 2020. DOI 10.1007/s11664-020-08369-3
28. Pirogov Yu.A., Gladun V.V., Chzhen S.F., Tischenko D.A., Timanovskiy A.L. Radio Thermal Images of Natural Objects in 8-mm and 3-mm Ranges. *Proc.SPIE*, Vol.3703, 2002.
29. Pirogov Yu.A., Gladun V.V., Shlemin I.V., et al. Superresolution and coherent phenomena in mul-tisensor systems of millimeter-wave radio imaging. *Proc. SPIE*, v.5077, 2003.
30. Патент США US7170442B2 Video rate passive millimeter wave imaging system United States Patent 7170442 Заявл. 23.12.2004, Опубл. 01.30.2007.
31. Зинченко И.И. Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия. М, 2003. 641с.

32. Rogalski A. *Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition)*. NY. CRC Press of Taylor & Francis Group. 2019. 1043 p.
33. Волков В.Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения. *Специальная техника*, №2, 2001. URL: http://st.ess.ru/publications/2_2001/volkov/volkov.htm
34. Певцев Е., Чернокнижин В. Матричные ИК приемники для малогабаритных тепловизионных камер. *Электронные компоненты*. 2001, № 1, с. 32–36, 2001, № 2, с. 30 – 34, 2001, № 3, с. 12 – 20.
35. Sundaram M., Wang S.C.. 2-Color QWIP FPAs. *Proc. of SPIE, vol.4028, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays Technology and Applications VI*, ed. E.Dereniak, R.Sampson. Apr. 2000.
36. Кульчицкий В.Н., Наумов А.В., Старцев В.В. Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Ч. 1. *Фотоника*. 2020; 14(3). 234–244. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.3.234.244
37. Кульчицкий В.Н., Наумов А.В., Старцев В.В. Матричные фотоприемные устройства ИК диапазона: «постпандемические» тенденции развития. Часть 2. *Фотоника*. 2020; 14(4): 320–330. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2020.14.4.320.330
38. Grossman N., Miller A.J. Active Millimeter-wave Imaging for Concealed Weapons Detection. *Proc. SPIE, vol. 5077*, pp. 62–70.
39. Luukanen A., Miller A. J. and Grossman E. N. Active millimeter-wave video rate imaging with a staring 120-element microbolometer array. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. vol. 5410 pp. 195-201 2004*
40. Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., и др. Способ создания семейства комплексированных систем наблюдения распознавания и прицеливания, на основе семейства универсальных объективов и комплексированная система для его реализации. Патент РФ ОАО «ТКС-Оптика», Патент РФ №2273036 по Заявке № 2003125383, Приоритет изобретения 18 августа 2003 г.
41. Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., и др. Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в УФ, видимой и ИК областях спектра. Патент РФ №2305393 ОАО «ТКС-Оптика по Заявке № 2005126502, Приоритет изобретения 22 августа 2005 г.
42. Васильев Б.И. Инфракрасные лидары для экологического мониторинга атмосферы: учеб. пособие для студентов вузов по направлению "Прикладные математика и физика". Моск. физико-техн. ин-т (гос. ун-т). М., 2005. 70 с. ISBN 5-7417-0128-0. – EDN QKEXSD.
43. Кузнецов А.П. Внутрिलाзерный прием оптического излучения и разработка двухканального лазерного интерферометра на его основе. Дисс. к.ф.-м.н. М., 2000.
44. Волков В.Г, Ковалев А.В, Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения. *Специальная техника*, №6, 2001 г. URL: http://st.ess.ru/publications/6_2001/volkov/volkov.htm

45. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона – современное состояние и тенденции развития. *Нано- и микросистемная техника*. 2018. Т. 20, № 10. С. 613–624. – DOI 10.17587/nmst.20.613-624. – EDN YLTOOT
46. Мельников Г.С., Клишо Н.А., Самков В.М., и др. О возможности реализации режима сверхразрешения при комплексировании субмиллиметрового и ИК-диапазонов с регистрацией сигналов на двух диапазонных QWIP матрицах. *Известия ВУЗов, Серия Приборостроение №9*, 2008.
47. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. *Основы тепловидения*. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 122 стр.
48. Таубкин И.И., Трищенко М.А. Предельные значения чувствительности тепловизоров и информативности систем технического зрения. *Прикладная физика*, 2001, № 6, с. 48-60.
49. Lettington H., Blankson I., Attia M.M. and Dunn D. Review of imaging architecture. *Proc. SPIE*. V. 4719, pp. 327–340. 2002.
50. Веретенников И. Применение сверхвысококачественного радиотеплового метода наблюдения в системе безопасности. URL: https://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/rms.html
51. Студитский А.С., Бражников Д.В., Пономарев М.А., и др. Многоспектральные оптические средства контроля для решения антитеррористических задач. Выставка и конференция «Неразрушающий контроль», 2005.
52. Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., и др. Комплексирование изображений в двухдиапазонной сканирующей оптико-электронной системе поиска и обнаружения браконьерского промысла. *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 6. С. 57–65. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-06-57-65>
53. Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., и др. Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла. *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-36-48>
54. Beuville E., Belding M., Costello A., et al. A High Performance Low-noise 128-Channel Readout Integrated Circuit for In-strumentation and X-ray Applications. *IEEE Nuclear Science Symp. Conf. Rec. Vol. 1* P.142–146 (2004).
55. Albota M.A., Richard H.M., et al. Three-dimensional imaging laser radar with a photon-counting avalanche photodiode array and microchip laser. *Applied Optics*, Vol. 41, No. 36, 20 December 2002.
56. Imaging with Covert Active Infrared (IR) Illumination. Сайт компании Sensors Unlimited, Inc, США. URL: <https://www.sensorsinc.com/applications/military/covert-illumination> (дата обращения 17.12.2022г.)"
57. Оружие и технологии России. Энциклопедия. XXI век. Том 11. *Оптико-электронные системы и лазерная техника*. М.: ИД "Оружие и технологии", 2005. 720 с.
58. Лебедько Е.Г. Системы импульсной оптической локации: Учебное пособие. СПб: Издательство «Лань», 2014. 368 с.:ил. ISBN 978-5-8114-1588-5

59. Трифонов К.В. Исследование характеристик импульсных координаторов цели: специальность 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Дис. канд. техн. наук. Университет ИТМО. Санкт-Петербург, 2016. 196 с.
60. Криксунов Л.З., Падалко Г.А. Тепловизоры: справочник. К.: Техника, 1987. 16 с.
61. Алимагадов К.А. Исследование влияния фильтрации шумов в области дискретного вейвлет-преобразования на качество распознавания цифровых изображений. Микроэлектроника и информатика-2023 : Материалы научно-технической конференции, Зеленоград, 20–21 апреля 2023 года. – Москва: Национальный исследовательский университет "Московский институт электронной техники", 2023. – С. 22-28.
62. Бехтин Ю.С., Титов Д.В. Вейвлет-обработка ИК-изображений для компенсации дрейфа вольтовой чувствительности элементов фотоэлектронных модулей. Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 2
63. Нгуен В.Ш. Выделение объекта в потоке изображений с помощью вейвлет-преобразования. Известия ТулГУ. Технические науки. 2018. Вып.2.
64. Белехов Я.С. Вейвлет-обработка изображений, полученных от фотоприемного устройства инфракрасной области спектра. Электромагнитные волны и электронные системы. 2013, №1, стр. 23–27.
65. Zhigang Ren, Guoquan Ren, and Din Hai Wu "Pixellevel visible image and infrared image fusion based on wavelet transform", Proc. SPIE 12553, Fourth International Conference on Optoelectronic Science and Materials (ICOSM 2022), 1255312 (6 March 2023); <https://doi.org/10.1117/12.2667734>
66. A.N. Wilson, K.A. Gupta, V. H. Koduru, et al. Recent Advances in Thermal Imaging and its Applications Using Machine Learning: A Review. IEEE Sensors Journal, vol. 23, no. 4, pp. 3395-3407, 15 Feb.15, 2023, doi: 10.1109/JSEN.2023.3234335
67. Chandra S. et al. Deep Learning Based Infrared Thermal Image Analysis of Complex Pavement Defect Conditions Considering Seasonal Effect. Sensors 2022, 22(23), 9365; <https://doi.org/10.3390/s22239365>
68. Видеть невидимое. Поляризация в дальнем инфракрасном диапазоне (8 – 12 мкм). НПК «Фотоника». 16 апреля 2020. <https://npk-photonica.ru/info/reading/19572/>
69. Зарипова А.Д., Зарипов Д.К., Усачев А.Е. Визуализация дефектов высоковольтных изоляторов на инфракрасных изображениях с помощью методов компьютерного зрения. Научная визуализация, 2019, том 11, номер 2, страницы 88 - 98, DOI: 10.26583/sv.11.2.07
70. Грибова Е.В., Иванов В.В., Новиков А.Н. Алгоритмы обработки инфракрасных изображений для оперативного контроля теплофизических свойств нетканых материалов. Костюмология. 2021. Т. 6. №4. URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/21TLKL421.pdf>

71. Ящук А.М., Яцутин С.В. Способы обработки ИК-изображений, имеющих искажения и шумы. Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016, №4(15).
72. Binbin Y. An improved infrared image processing method based on adaptive threshold denoising. J Image Video Proc. 2019, 5 (2019). <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0401-8>
73. Малашин Р.О., Кадыков А.Б. Исследование обобщающих способностей сверточных нейронных сетей при формировании признаков, инвариантных к вращению. Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 8. С. 24–32.
74. Малашин Р.О. Извлечение информации об иерархии объектов из обученных нейронных сетей глубокого обучения с помощью анализа матрицы неточностей. Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 24–30.
75. Бойко А.А., Малашин Р.О. Single frame Noise2Noise: метод обучения нейронных сетей без использования эталонных данных в задаче улучшения изображения видеопоследовательности. Оптический журнал. 2020. Т. 87. № 10. С. 5–14. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-10-05-14>
76. Титаренко М.А., Малашин Р.О. Исследование способностей нейронных сетей к извлечению и использованию семантической информации при обучении восстановлению зашумленных изображений. Оптический журнал. 2022. Т. 89. №2. С. 25–35. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-02-25-35>
77. Малашин Р.О., Бойко А.А. Обучение динамически конфигурируемого классификатора с использованием глубокого Q-обучения. Оптический журнал. 2022. Т. 89. № 8. С. 8–23. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-08-08-23>
78. Ермаченкова М.К., Малашин Р.О., Бойко А.А. Обучение нейронных сетей для классификации тепловизионных изображений на основе изображений видимого спектра // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 10. С. 48–66. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-10-48-66>
79. Кульчицкий В. Н., Наумов А. В., Старцев В. В. Охлаждаемые фотоприемные устройства ИК-диапазона на «квантовых ямах» – состояние и перспективы развития. 2022; 16(1): 22–36. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2022.16.1.22.36
80. Gunapala, Sarath D. et al. Multi-quantum-well detector for low-background applications USP 20020074542, June 20, 2002.
81. Gunapala S.D. et al. Recent Development and Applications of Quantum Well Infrared Photodetector Focal Plane Arrays. – Proc. of SPIE vol.4028, Infrared Detectors and Focal Plane Arrays Technology and Applications VI, ed. E.Dereniak, R.Sampson.Apr. 2000.
82. Овсяк В.Н. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона /– Новосибирск: Наука, 2001, с.243.
83. Селяков А.Ю. ИК-матрицы с большим временем накопления фотосигнала на основе трапецеидальных d-легированных сверхрешеток с собственным поглощением излучения, Прикладная физика, 2002, № 4, с. 118-133 URL: <http://www.vimi.ru/applphys/2002/4/f4-13.htm>

84. Дмитриев Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания. «Электроника» Наука, Технология, Бизнес, 8/2005.
85. Gunning W.J., Johnson J.L., and DeNatale J.F. LWIR/MWIR adaptive focal plane array. Proc. SPIE 5612, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, (6 December 2004); <https://doi.org/10.1117/12.578610>
86. Солодовник М.С., Черненко Н.Е., Балакирев С.В., Еременко М.М., Агеев О.А. Фотодетектор ближнего инфракрасного диапазона на основе поверхностного плазмонного резонанса. Патент RU 195 508 U1. Дата подачи заявки: 30.10.2019 Опубликовано: 30.01.2020 Бюл. № 4.
87. Tong J., Suo F., Ma J., et al. Surface plasmon enhanced infrared photodetection Opto-Electronic Advances Review 2019, Vol. 2, No. 1 180026-1, 2019. DOI: 10.29026/oea.2019.180026
88. Fedirko V.A., Fetisov E.A., Khafizov R.Z., et al. Thermopile IR Sensor Arrays. Proceedings of the Scientific-Practical Conference “Research and Development - 2016”, URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62870-7_5
89. Mouzali S., Lefebvre S., Rommeluère S. et al. Estimation of Thickness and Cadmium Composition Distributions in HgCdTe Focal Plane Arrays. J. Electron. Mater. 45, 4607–4611 (2016). URL: <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4586-2>
90. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Тенденции развития матричных фотоприемных устройств ИК диапазона. Нано- и микросистемная техника. 2020. Т. 22, № 9. С. 500-510. DOI 10.17587/nmst.22.500-510.
91. Haran T. L., James J. Ch., and Cincotta T. E. Relative performance analysis of IR FPA technologies from the perspective of system level performance, Infrared Physics & Technology 84, 7–20 (2017).
92. Ting D.Z., Soibel A., Khoshakhlagh A., et al. Antimonide type-II superlattice barrier infrared detectors, Proc. SPIE 10177, 101770N-1-10 (2017).
93. Войцеховский А.В., Дзядух С.М., Горн Д.И., и др. Униполярные барьерные структуры на основе n-HgCdTe со сверхрешетками в качестве барьера. Обзор // Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 6–22. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-6-22>
94. Ружевич М.С., Мынбаев К.Д., Баженов Н.Л., и др. Оптические свойства и разупорядочение пленок HgCdTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 23–33. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-23-33>
95. Гензе И.Ю., Аксенов М.С, Парамонова М.А., и др. Влияние условий формирования и отжига на параметры Pt/InAlAs барьеров Шоттки. Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 34–39. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-34-39>
96. Стучинский В.А., Вишняков А.В., Васильев В.В. Частотно-контрастная характеристика и эффективная длина диффузии фотогенерированных носителей заряда в фотоприемных матрицах на основе материала кадмий-ртуть-теллур с разными значениями геометрических параметров. Оптический

- журнал. 2024. Т. 91. № 2. С. 59–66. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-02-59-66>
97. Rogalski A. Next decade in infrared detectors. Proc.SPIE10433. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIV. V.104330L. 9–10 October 2017. doi: 10.1117 / 12.2300779.
 98. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М. : Логос, 2004.
 99. Preissner J. The influence of the atmosphere on passive radiometric measurements. AGARD Conference on Millimeter and Submillimeter Wave Propagation and Circuits, vol. 245 (1978).
 100. Gurtler A., Meijer A.S., van der Zande W.J. Imaging of terahertz radiation using a Rydberg atom photocathode. Appl. Phys. Letters, 2003, v.83, p.222.
 101. Минин И.В., Минин О.В. Детекторы миллиметрового и терагерцового излучения. Вестник СГУГиТ 2021. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/detektory-millimetrovogo-i-teragertsovogo-izlucheniya> (дата обращения: 22.03.2024).
 102. Князев Б.А., Черкасский В.С. Терагерцовое излучение: публикации последнего десятилетия. Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера. 2002.
 103. Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., и др. Способ создания семейства комплексированных систем наблюдения распознавания и прицеливания, на основе семейства универсальных объективов и комплексированная система для его реализации. Патент РФ ОАО «ТКС-Оптика», Патент РФ №2273036 по Заявке № 2003125383, Приоритет изобретения 18 августа 2003 г.
 104. Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в УФ, видимой и ИК областях спектра. Патент РФ №2305303 ОАО «ТКС-Оптика по Заявке № 2005126502, Приоритет изобретения 22 августа 2005 г.
 105. Rouvié A., Huet O., Hamard S., et al. SWIR InGaAs focal plane arrays in France. Proc. SPIE 8704, Infrared Technology and Applications XXXIX, 870403 (11 June 2013); doi: 10.1117/12.2015355 URL: <https://www.spiedigitallibrary.org/> (дата обращения 12.03.2021).
 106. Hansen M., Malchow D. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. SPIE Defense and Security Symposium, 2008, Orlando, Florida, United States. Proceedings. Volume 6939, Thermosense XXX; 69390I (2008). <https://doi.org/10.1117/12.777776>
 107. Martin G. High Performance SWIR Imaging Cameras [Электронный ресурс] URL: <https://www.raptorphotonics.com/wp-content/uploads/2015/10/Ninox-White-Paper-Final.pdf> (дата обращения 12.03.2021).
 108. Bhowmik M.K., Saha K., Majumder S., et al. Thermal Infrared Face Recognition – A Biometric Identification Technique for Robust Security system. Reviews, Refinements and New Ideas in Face Recognition. Edited by Peter M. Corcoran. 2011. DOI: 10.5772/18986

109. ThermoVision™ 2000/3000: Thermal imaging cameras for long range surveillance applications. Каталог фирмы FLIR, 2008 [Электронный ресурс]. – URL: https://diaworld.ru/catalog/thermovision_2000_3000.pdf
110. FLIR SC7000 Series. State-of-the-art infrared technology for R&D / Science. 2014. http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/RND_017/RND_017_US.pdf
111. Andresen B.F., Fulop G.F., Hanson C.M., et al. Infrared Technology and Applications XLIII, edited by, Proc. of SPIE Vol. 10177, 1017701© 2017 SPIE CCC code: 0277-786X/17/\$18 doi: 10.1117/12.2280471
112. Насыров А.Р. Методы атермализации оптических систем тепловизионных приборов. Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 3. С. 57–59.
113. Балащенко О.Н., Архипова Л.Н. Термонерасстраиваемые тепловизионные оптические системы. Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 9. С. 3–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-09-03-13>
114. Васильев В.Н., Дмитриев И.Ю., Муравьев В.А. и др. Оптическая система инфракрасного диапазона с функцией активной фокусировки. Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62. № 2. С. 136–141. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2019-62-2-136-141>
115. Грейсух Г.И., Левин И.А., Ежов Е.Г. Сверхсветосильный тепловизионный триплет с градиентной линзой: этапы моделирования композитного градиентного материала и потенциальные возможности оптической схемы. Оптический журнал. 2024. Т. 91. № 3. С. 5–13. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2024-91-03-5-13>
116. Гаршин А.С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приемниками. Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 4. С. 38–43
117. Agranat M.B., Chefonov O. ., Ovchinnikov A.V., et al. Damage in a Thin Metal Film by High-Power Terahertz Radiation Phys. Rev. Lett. 120, 085704. Published 23 February 2018
118. Mickan S.P., Zhang X.-C. T-ray sensing and imaging, Internat. Journ. of High Speed Electronics and Systems, 2003, v.13, p.601
119. Bolotin V.P., Vinokurov N.A., Kayran D.A. et al. Status of the Novosibirsk terahertz FEL, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, v.A543, p.81, 2005
120. Nishizawa J., Suto K., Sasaki T. et al. Spectral measurement of terahertz vibrations of biomolecules using a GaP terahertz-wave generator with automatic scanning control, J. Phys. D, 2003, v.36, p.2958
121. Naseem Y. Aziz, Robert F. Cannata, Glenn T. Kincaid, Randal J. Hansen, Jeffery L. Heath, William J. Parrish, Susan M. Petronio, and James T. Woolaway II "Standardized high-performance 640 x 512 readout integrated circuit for infrared applications", Proc. SPIE 3698, Infrared Technology and Applications XXV, (26 Ju-ly 1999); <https://doi.org/10.1117/12.354577>
122. ITT Industries and Raytheon to Develop Night-Vision Sensor Fusion Technology. Febr. 2002.

https://www.photonics.com/Articles/ITT_Industries_and_Raytheon_to_Develop/a11973?__ya_mt_enable_static_translations=1

123. Технология IR-Fusion. ООО "МЕТРОЛСИС", 2024. <http://www.flk.ru/about/>
124. Смелков В.М. Малокадровое устройство формирования сигнала изображения. Б.И. – 1996 - №22. Патент РФ №2065257. МКИ H04N 5/ 225.
125. Куликовская Н.И. Поташина Т.В. Ган М.А. и др. Optical design for image comparison \RF Patent (19) RU (11) 2018170 (13) C1 (51) 5 G02B27 / 00.
126. Набоко В., Набоко С., Пенчев С., и др. Лидарная система с мощным лазерным диодом и охлаждаемым фотоприемником. Химия твердого тела и современные микро- и нанотехнологии. V Международная конференция. Кисловодск-Ставрополь, СевКав ГТУ, 2005, 368 с. URL: http://nostalgia.ncstu.ru/content/_docs/pdf/conf/past/2005/nano/03/19.pdf
127. ALTM Galaxy T1000 Airborne Lidar Terrain Mapper. Проспект фирмы Teledyne Optech <https://www.teledyneoptech.com/download/b59e2863-1828-46b4-804d-2e83d4099e97/>
128. Севастьянова М.Н., Серебряков С.А. Методическое пособие по курсу «Техника и технология аэрокосмической съемки» Раздел «Цифровые аэрофотосъемочные системы» М.: Изд. МИИГАиК, 2015. 58 с
129. ALS50 Airborne Laser Scanner/ Leica Geosystems, техническое описание URL: <https://doczz.net/doc/899994/als50-brochure>
130. Оптическая разведка преодолела дифракционный предел. Сетевое издание «CNews» («СиНьюс») 14.08.2006 URL: https://www.cnews.ru/news/top/opticheskaya_razvedka_preodolela_difraktsionnyj_1
131. Васильев Б.И., Маннун У.М. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды. Квантовая электроника, 2006, том 36, № 9, С. 801–820.
132. Мобильная лазерная система (ЛИДАР) дистанционного экологического мониторинга воздушных бассейнов. <http://nppgamma.com/lidar.htm>
133. Тепловизоры авиационные сканирующие ИКАР. 67748-17: Описание типа СИ. <https://all-pribors.ru/opisanie/67748-17-ikar-77280>
134. ИК системы АО «ГОИ им. С. И. Вавилов». Ведомости «Русского оптического общества». 2020. №5. С. 56–67.
135. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Геолидар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 230 с.
136. Renslow M., Gross S.B. Emerging Technologies in Photogrammetry and Remote Sensing. March 29, 2005 <http://web.archive.org/web/20090806050134/http://www.sbgmaps.com/pdf/Emerging%20Technologies%20in%20Photog-RS.pdf>
137. Тымкул В.М., Тымкул Л.В. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета. Новосибирск: СГГА, 2005. 215 с
138. Волков В.Г. Вертолетные оптико-электронные системы наблюдения и разведки. Специальная техника. 2001. №3. С. 2–10.

139. Захаренков В.Ф., Писарев В.Н., Самков В.М., Соловьев В.И. Самолетный эксперимент "Акватметр" по измерению яркости фона в полосе поглощения водяного пара. Радиэлектроника 2002. Т. 2. № 2.
140. FLIR Systems Photon 320 cctv camera with thermal sensitivity. Technical Specification. <https://www.sourcesecurity.com/flir-systems-photon-320-cctv-camera-technical-details.html>
141. Волков В.Г. Тепловизионные приборы для спецтехники. Спецтехника и связь, № 1, 2011.
142. Athena™ 1920. Full high-definition thermal camera core. 2021. URL: <https://www.baesystems.com/en-media/upload-File/20230525132016/1434628459234.pdf>
143. MegaPixels 1280×1024 EYAS1212 Cooled AD Module Технические характеристики. Каталог фирмы Wuhan Guide Infrared Co., Ltd. URL: <https://www.gst-ir.net/products/cooled-thermal-modules/eyas-series-cooled-ad-modules/eyas1212.htm>
144. Каталог фирмы WUHAN JOHO TECHNOLOGY CO., LTD. Модуль Small Size MWIR Cooled MCT Thermal Security Camera [Электронный ресурс] <https://www.eo-irsystems.com/sale-8664368-jh640-280-small-size-mwir-cooled-mct-thermal-security-camera.html> (дата обращения 12.03.2024)
145. Интернет-сайт НИИИИ МНПО «Спектр», Россия, 2008. [Электронный ресурс] URL: <http://www.niirin.ru/> (дата обращения 12.03.2021)
146. Ковалев А.А., Ковалев А.В. Возможности тепловизионного метода неразрушающего контроля в решении антитеррористических задач. URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=868&lvl=02>. (дата обращения 17.12.2022г.).
147. Волков В.Г. Портативные тепловизионные приборы наблюдения. Спецтехника и связь. 2013. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/portativnyue-terplovizionnyue-pribory-nablyudeniya> (дата обращения: 20.03.2024).
148. Астрономическая камера с охлаждением НЕВА400 TVISB1. Технические характеристики. НПК Фотоника. URL: <https://www.npkphotonica.ru/product/18338/>
149. Каталог компании «НПК Фотоника» URL: https://www.npkphotonica.ru/katalog-po-kameram_17-11-15-pdf113648.pdf
150. Технические характеристики FLM640-ВТ.656 (LWIR). Сайт компании НПК Фотоника. URL: <https://www.npk-photonica.ru/product/18244/> (дата обращения 05.12.2022г.).
151. Технические характеристики камеры VL640-PAL/SDI. Сайт компании КБ «ВиТА» (подразделение НПК «Фотоника».) URL: http://kbvita.ru/products/pal_sdi_ahd/vl640-pal-sdi/
152. Средства связи и передачи информации спецназа США, International Defense Review. 1995 , №5, Р. 41–52.

Мельников Геннадий Семенович
Михеев Сергей Васильевич
Карузин Александр Юрьевич
Коротаев Валерий Викторович
Тупиков Владимир Алексеевич
Самков Владимир Михайлович

ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова
Художественный редактор Н.А. Потехина
Подписано к печати 24.10.2024
Заказ № 4778
Тираж 200 экз.
Отпечатано на ризографе

ISBN 978-5-7577-0716-7



9 785757 707167

**Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит, А