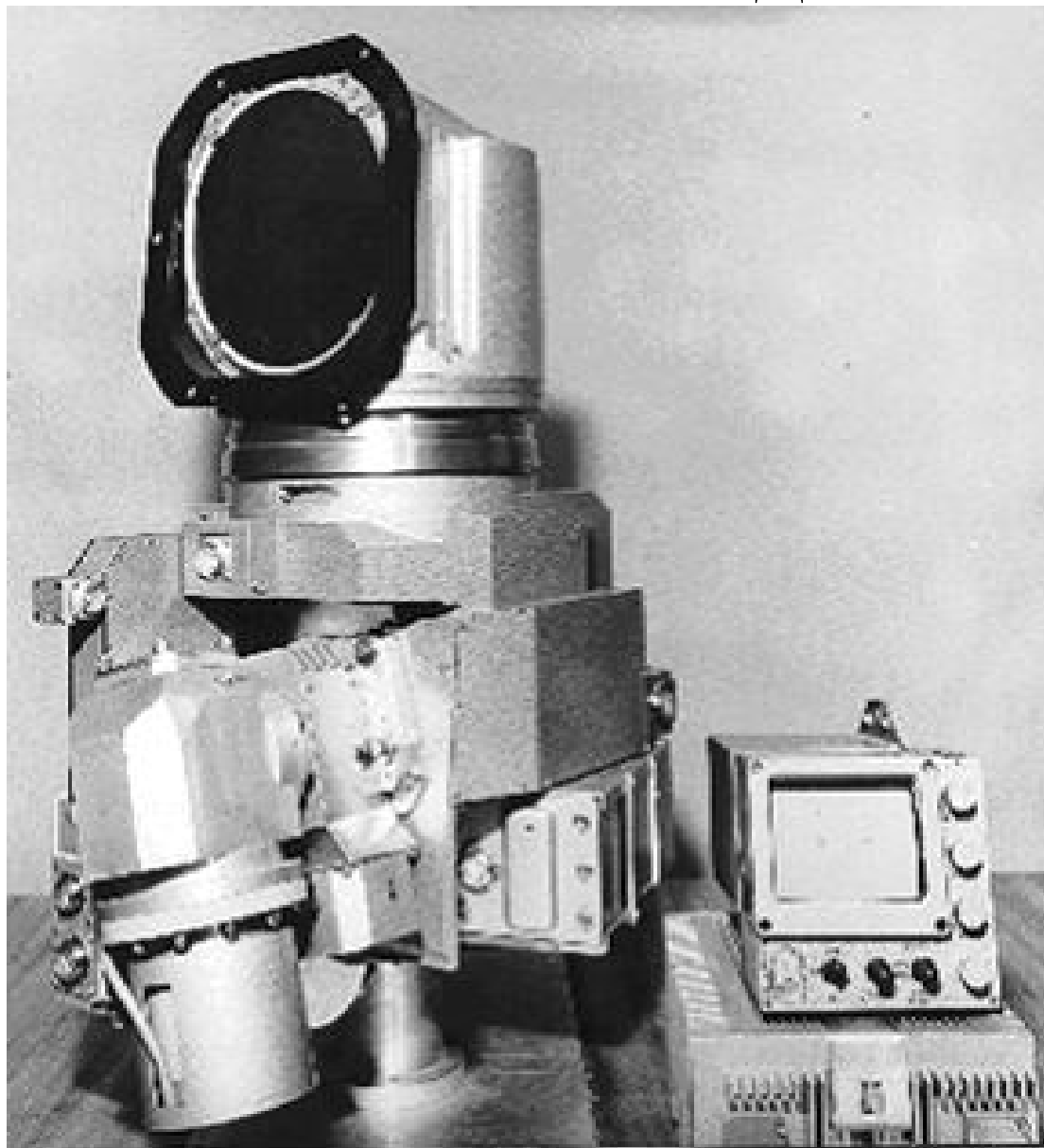


**В.В. Коротаев, Г.С. Мельников, С.В. Михеев**

# **ОСНОВЫ ТЕПЛОВИДЕНИЯ**



**Санкт-Петербург  
2012**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

b

**В.В. Коротаев, Г.С. Мельников,  
С.В. Михеев, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов**

## **ОСНОВЫ ТЕПЛОВИДЕНИЯ**

**Учебное пособие**



**Санкт-Петербург  
2012**

В. В. Коротаев, Г.С. Мельников, С. В. Михеев, В. М. Самков, Ю. И. Солдатов. Основы тепловидения – СПб: НИУ ИТМО, 2012 – 122 стр.

В учебном пособии излагаются основы тепловидения и принципы создания тепловизионных приборов. Кратко описаны все основные процессы, происходящие в системах тепловидения: принципы генерирования собственного теплового излучения нагретых тел, вклад в суммарное тепловое излучение, рассматриваются материалы, применяемые в ИК технике, приёмники излучения, методы и приёмы выделения ИК сигналов из шумов и основные принципы обработки формируемых тепловизорами изображений, особенности зрительного восприятия тепловизионных изображений и пути создания цветowych изображений, близких по восприятию к изображениям видимого диапазона спектра электромагнитных колебаний.

Учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению подготовки 200400 «ОпTOTехника» по магистерским программам 200200.68.01 «ОпTико-электронные методы и средства обработки видеоинформации» и д.р. программам.

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и опTOTехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 «ОпTOTехника» и магистерским программам 200200.68.15 протокол № \_\_\_\_\_ от «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2012 г.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012

© В.В. Коротаев, Г.С. Мельников 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ .....	3
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ .....	5
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1 Тепловидение .....	9
1.1 Термины и определения по ГОСТ Р 8.619-2006 .....	9
1.2 Общие положения .....	10
1.3 Применение тепловидения .....	12
1.3.1 Некоторые применения тепловизионных устройств в военном деле и промышленности.....	13
1.3.2 Тепловое излучение. Теоретические расчёты. ИК материалы .....	14
1.4 Прохождение излучения через атмосферу.....	17
1.4.1 Влияние гидрометеоров .....	19
1.4 – График затухания излучения в тумане и дожде .....	19
1.4.2 Концепция комплексирования тепловизионных каналов .....	21
1.5 ИК материалы.....	22
1.5.1 Основные положения .....	22
1.5.2 Выбор оптических материалов для приборов ракетной техники .....	25
1.5.3 Выбор оптических материалов для комплексированных систем ИК и ТГц каналов формирования изображений .....	28
1.6 ИК приёмники излучения .....	29
1.7 Общая оценка и расчёты .....	34
1.7.1 Расчёты коэффициента эффективности в зависимости от количества элементов приемников.....	38
1.7.2 Расчет чувствительности канала ТпВ .....	41
1.7.3 Выбор спектральных диапазонов в неблагоприятных условиях наблюдения.....	43
1.8 Анализ состояния с разработкой топологии болометрических приемников.....	45
2 Основы построения тепловизионных систем .....	52
2.1 Общий принцип устройства тепловизоров .....	52
2.2 Типовые схемы тепловизионных систем 0-го, 1-го и 2-го поколений .....	52
2.2.1 Системы сканирования для ИК радиометров-тепловизоров «замороженного» изображения.....	52
2.2.2 Тракты обработки сигналов тепловизоров первых поколений [27] .....	61
2.2.3 Системы восстановления постоянной составляющей сигнала .....	67
2.2.4 Системы цифровой регистрации и отображения информации.....	68
2.3 Тепловизоры 3-го поколения .....	71
2.3.1 Модульные блоки формирования сигналов ТпВ III-го поколения.....	72
2.3.2 Выбор микросхем согласования чувствительных элементов матричного QWIP с АЦП .....	73
3 Нанотехнологии в тепловидении .....	78

3.1 Квантовые структуры.....	78
3.2 Укладываем атомы .....	79
3.3 Квантовые ямы .....	80
3.4 Структуры с одномерным электронным газом (квантовые нити) .....	80
3.5 Структуры с нуль-мерным электронным газом (квантовые точки) .....	81
3.6 Сверхрешетки .....	83
3.7 Матричные QWIP. Последние разработки .....	85
4 Современное состояние развития тепловизионных систем.....	86
4.1 Матричные тепловизоры .....	89
4.1.1 Многоканальная тепловизионная система для сверхдального обнаружения фирмы FLIR .....	89
4.2 Перспективы развития и применения ТПС .....	91
4.2.1 Комплексированные системы совмещения ТпВ изображений.....	91
4.2.2 Комплексированная система совмещения ИК и ТГЦ изображений .....	96
4.2.3 Выбор матрицы чувствительных элементов для построения комплексированной системы ИК и субмиллиметрового видения .....	97
4.2.4 Обоснование построения нового класса тепловизионных систем .....	100
4.2.5 Выводы.....	102
5 Экспериментальные данные по фоно-целевым характеристикам в ИК области спектра .....	103
5.1 Реально наблюдаемые контрасты морских объектов.....	103
5.2 Наземные объекты наблюдения .....	104
5.3 Промышленные и жилые объекты .....	104
5.4 Воздушные объекты.....	105
5.5 Объекты типа «Танк».....	106
5.6 Цели типа «Ангары» .....	107
5.7 Неблагоприятные условия наблюдения.....	107
5.8 Основные задачи по подъёму тепловизионного приборостроения.....	108
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	109

## **СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ**

- BIB (Blocked-Impurity-Band) – блокированная примесная зона
- СТИА (capacitive transimpedance amplifier input circuit) – ёмкостной вход усилителя управляемый током
- FPA (Focal Plate Area) – фокально-плоскостной («одновременно смотрящий») приёмник излучения
- FLIR (Forward Looking Infrared) – «смотрящая» инфракрасная (система)
- SWIR (Short Wave Infrared) – Коротковолновое инфракрасное излучение
- MCT (Mercury Cadmium Telluride)– теллурид ртути кадмия
- MWIR (Middle Wave Infrared) – Средневолновое инфракрасное излучение
- NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – Температурная чувствительность
- LWIR (Long Wave Infrared) – Длинноволновое инфракрасное излучение
- VLWIR – сверхдлинноволновое инфракрасное излучение
- NEP (Noise-Equivalent Power) – мощность, эквивалентная шуму
- NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – разность температур, эквивалентная шуму
- QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector) – инфракрасный фотоприемник на основе структур с квантовыми ямами (колодцами)
- SPRITE (Signal Processing In The Element) – обработка сигнала в фоточувствительном элементе
- TED (Tom Elliot Detector) – фотоприемник Тома Эллиота
- ЭПР – эффективный показатель рассеяния
- АМБ – антенный микроболометр
- АЦП – аналого-цифровой преобразователь
- БОИ – блок отображения информации
- БПСР – блок преобразования стандартов разложения
- ВКУ – видеоконтрольное устройство
- ВП – военная приемка
- ВТ – военная техника
- ГКМ – газовая криогенная машина
- ГМО – германий монокристаллический для оптоэлектроники
- ГС – гетероструктура
- ГСН – головка самонаведения
- ЗУ – запоминающее устройство
- ИК – инфракрасный
- КА – космический аппарат
- КРС – квантово-размерная структура
- КРТ – твердый раствор кадмий-ртуть-теллур (Cd-Hg-Te)

КРЭ – квантово-размерный эффект  
 КЯ – квантовая яма  
 МБМ – микроболометрическая матрица  
 МБР – межконтинентальная баллистическая ракета  
 МДВ – метеорологическая дальность видимости  
 МКС – микрокриогенная система  
 МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия  
 МПИ – матричный приёмник излучения  
 МСКЯ – многослойная структура с квантовыми ямами  
 МФС – международная фотометрическая система  
 МЧС – министерство по чрезвычайным ситуациям  
 ОС – оптическая система  
 ОЭС – оптико-электронная система  
 ПЗС – прибор с зарядной связью  
 ПИ – приемник излучения  
 ППЗ – прибор с переносом заряда  
 ПРК – противоракетный комплекс  
 ПСИ – пачка синхронизирующих импульсов  
 СБИС – сверхбольшая интегральная система  
 СВЧ – сверхвысокая частота  
 СФ – согласованный фильтр  
 ТГц – терагерцовый  
 ТКЯ – толщина квантовой ямы  
 ТпВ – тепловизор  
 ТПС – тепловизонная система  
 ТПСл – толщина покрывающего слоя  
 ТЭО – термоэлектрический охладитель  
 УФ – ультрафиолетовый  
 ФПЗС – фоточувствительный прибор с зарядовой связью  
 ФППЗ – фоточувствительный прибор с переносом заряда  
 ФПУ – фотоприемное устройство  
 ФЦО – фоноцелевая обстановка  
 ФЧЭ – фоточувствительный элемент  
 ЧКЯ – число квантовых ям  
 ЭМК – электромагнитное колебание  
 ЧТ – черное тело  
 ЭОП – электронно-оптический преобразователь  
 $D_{\lambda}^*$  – удельная обнаружительная способность приемника  
 $n_{\text{пр}}$  – площадь приемника излучения  
 $\Delta f_{\text{ш}}$  – эквивалентная шумовая полоса усилительного тракта  
 $d_{\text{эф}}$  – эффективный диаметр входного зрачка оптической системы  
 $\delta$  – мгновенное угловое поле (в пространстве предметов)  
 $\gamma$  – уровень затухания

$\kappa_{\text{сл}}$  – уровень сложности решаемой задачи  
 $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$  – спектральный коэффициент пропускания атмосферы  
 $\sigma_{\lambda}$  – спектральный показатель ослабления на трассе  
 $\delta T_0$  – чувствительность ТпВ в целом  
 $P_{\text{пр}}$  – вероятность правильного обнаружения  
 $P_{\text{проп}}$  – вероятность пропуска сигнала  
 $P_{\text{лт}}$  – вероятность ложной тревоги  
 $\Phi_{n.e.\lambda} = I/D_{\lambda}^*$  – спектральный порог чувствительности приемника  
 излучения



## **ВВЕДЕНИЕ**

В учебном пособии излагаются основы тепловидения и принципы создания тепловизионных приборов. Кратко описаны все основные процессы, происходящие в системах тепловидения: принципы генерирования собственного теплового излучения нагретых тел, вклад в суммарное тепловое излучение отражённых составляющих окружающего фона и внутренних элементов конструкций объективов, рассматриваются материалы, применяемые в ИК технике, приёмники излучения, оптические и электронные модули, методы и приёмы выделения ИК сигналов из шумов и основные принципы обработки формируемых тепловизорами изображений, оцениваются особенности зрительного восприятия тепловизионных изображений и пути создания цветowych изображений, близких по восприятию к изображениям видимого диапазона спектра электромагнитных колебаний.

Учебное пособие предназначено для использования в качестве базового по дисциплине «Основы тепловидения».

Методическое пособие предназначено также для научных работников, инженеров и студентов различных специальностей, интересующихся методами и средствами разработки и исследования систем, сопрягаемых с тепловизорами, а также для лиц, использующих такие приборы.

## **1 Тепловидение**

### **1.1 Термины и определения по ГОСТ Р 8.619-2006**

В этом стандарте применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- тепловизионный измерительный прибор (тепловизор) – оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного/пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры [1] поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т.п.);

- эталонный (образцовый) излучатель – излучатель в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8.558, ГОСТ Р 8.566;

- эталонный (образцовый) протяженный излучатель – эталонный (образцовый) излучатель, угловые размеры которого в 10 и более раз превышают элементарное поле зрения тепловизора;

- тепловой тест-объект – устройство, предназначенное для создания картинной плоскости, содержащей теплоизлучающий объект с заданными пространственной частотой или формой, температурным контрастом на равномерно излучающем фоне с известным значением его температуры и излучательными способностями объекта и фона;

- термограмма – многоэлементное двумерное изображение, каждому элементу которого приписывается цвет, или градация одного цвета, или градация яркости экрана, определяемые в соответствии с условной температурной шкалой;

- количество чувствительных элементов (элементов разложения термограммы) – количество фоточувствительных элементов в фотоприемном устройстве тепловизора;

- угол поля зрения – пространственный угол, в пределах которого осуществляется формирование термограммы;

- элементарное поле зрения (мгновенный угол поля зрения) – пространственный угол, в пределах которого инфракрасное излучение воспринимается одним фоточувствительным элементом фотоприемного устройства;

- пространственное (угловое) разрешение – размер (угловой или в элементах разложения) щели в экране, установленном перед протяженным излучателем в поле зрения тепловизора, при котором отношение пикового приращения температуры щели над температурой экрана на термограмме к разности температур излучателя и экрана достигает заданного значения;

- порог температурной чувствительности (разность температур, эквивалентная шуму) – приращение температуры, равное среднему квадратическому значению шума в термограмме при наблюдении однородного фона с заданной температурой;
- неравномерность чувствительности тепловизора по полю – максимальное значение перепада температур фрагментов термограммы равноизлучающего по поверхности эталонного (образцового) протяженного излучателя.

## **1.2 Общие положения**

Энергетические соотношения в оптико-электронных приборах с использованием полупроводниковых приемников излучения и оптико-механического сканирования достаточно подробно изложены в ряде монографий, например в книге Дж. Ллойда [1]. В ней выполнены систематизация и анализ этих данных.

Могут быть рекомендованы и другие работы: [2], [31]; [3], и более поздние работы [4], [21], [11] и многие другие.

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

Тепловидение – это направление в технических измерениях, изучающее физические основы, методы и приборы, обеспечивающие возможность наблюдения слабонагретых объектов. Эти приборы называются тепловизорами (термографами).

В настоящее время разработано и активно используется большое количество ТпВ средневолнового и длинноволнового ИК поддиапазонов. Начинается активная разработка приборов ближнего и коротковолнового ИК поддиапазонов, однако широкого распространения они пока не получили.

В последние годы интенсивно развивается направление по созданию комбинированных и комплексированных приборов, сочетающих в своём составе несколько каналов приёма теплового излучения. Так, работы ведутся по построению ТпВ, чувствительных в ИК средневолновом окне прозрачности атмосферы (см. табл. 1.1) и в длинноволновом.

Особый интерес проявляется к разработке ТпВ, чувствительных как в длинноволновом окне прозрачности атмосферы, так и в терагерцовом (ТГц) диапазоне.

В системах безопасности в основном используются ТпВ длинноволнового ИК поддиапазона. Это связано с техническими особенностями (большинство тепловизоров MWIR – охлаждаемые) и физическими причинами (в LWIR находится максимум излучения тел при комнатной температуре). Первые тепловизионные системы были созданы в конце 30-х гг. XX в.

Таблица 1.1 – Диапазоны ИК излучения

Длина волн (мкм)	Название
0,76-1,5	Ближнее инфракрасное излучение
1,5-2,2	Коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR)
2,2-5,6	Средневолновое инфракрасное излучение (MWIR)
5,6-30	Длинноволновое инфракрасное излучение (LWIR)
30-300	Дальнее инфракрасное излучение (ТГц излучение)

Начало развития тепловизионной техники было положено в начале 60-х гг. XX столетия исследованиями и разработкой приборов по двум основным направлениям:

- с использованием дискретных приемников излучения совместно с системами сканирования (развертки) изображения;
- с использованием аппаратуры без механического сканирования на базе двумерных ИК приемников.

Сканирующие системы тепловидения используют различные типы сканирования: одноэлементное, параллельное и последовательное.

Сканирование может проводиться как в пространстве предметов (объектов), так и их изображений. Различаются типы сканирования по траекториям сканирования, закону сканирования и ряду других признаков.

ТпВ без механического сканирования («смотрящего» типа), первоначально названные FLIR (Forward Looking Infrared) системами, используют аналогию с органами зрения живых существ – многоэлементные матричные приёмники оптического излучения (focal plane array – FPA) [4].

Сегодня можно условно выделить четыре поколения развития такой техники [5, 6, 7]:

- нулевое поколение основано на применении единичных охлаждаемых приемников и двумерной (строчной и кадровой) развертки с помощью сканирующей оптико-механической системы;
- первое поколение – на применении строчных линеек приемников и упрощенной кадровой развертки;
- второе поколение – на использовании сгруппированных нескольких линеек (с временной задержкой и накоплением) и низкоскоростной системой развертки; ко второму поколению относят вакуумные приборы с электронным сканированием приемной мишени – пироконы;
- принципиально новое третье поколение основано на применении «одновременно смотрящих» – фокально-плоскостных (FPA – Focal Plate Area) и двумерных твердотельных многоэлементных (матричных) приемников излучения (МПИ), то есть без использования оптико-механических систем развертки.

Первоначально развитие тепловидения, как и большинства высоких технологий, было связано с вооружением и военной техникой. Однако

бурное развитие тепловидения и, особенно, неохлаждаемых приборов, его уникальные возможности открыли ему дорогу в гражданский сектор. Сегодня большинство тепловизионных систем (ТПС) по существу являются изделиями двойного назначения, т. е. могут использоваться как в военных, так и в гражданских целях. Для вооружения и военной техники до сих пор применяются как сканирующие ТПС, так и матричные ТпВ.

В последние годы развитие тепловизионной техники идет в основном по пути применения неохлаждаемых многоэлементных МПИ, физические характеристики которых весьма высоки и практически не уступают охлаждающим системам. Современные ТПС имеют малые массо-габаритные характеристики и энергопотребление, обеспечивают бесшумную работу и высокое качество тепловизионного изображения, широкий динамический диапазон при работе в режиме вещательного телевизионного стандарта, цифровую обработку в реальном масштабе времени, связь с ЭВМ и т.п. и делятся на два основных класса:

- наблюдательные (показывающие);
- измерительные, или радиометрические (термографы).

Структурно устройство современных матричных ТпВ не отличается от устройства телевизионных камер на ПЗС.

### **1.3 Применение тепловидения**

Тепловидение нашло применение во многих сферах человеческой деятельности. Например, ТпВ применяются в целях военной разведки и охраны объектов. В ручной тепловизионный ночной визир человека можно увидеть в полной темноте на расстоянии 300 м. Объекты обычной военной техники видны на расстоянии 2-3 км.

Тепловой контроль основан на измерении, мониторинге и анализе температуры контролируемых объектов. Основным условием применения теплового контроля является наличие в контролируемом объекте тепловых потоков. Процесс передачи тепловой энергии, выделение или поглощение тепла в объекте приводит к тому, что его температура изменяется относительно окружающей среды. Распределение температуры по поверхности объекта является основным параметром в тепловом контроле, так как несет информацию об особенностях процесса теплопередачи, режиме работы объекта, его внутренней структуре и наличии скрытых внутренних дефектов. Тепловые потоки в контролируемом объекте могут возникать по различным причинам.

Основной вклад в наблюдаемый тепловой контраст вносят собственные излучения наблюдаемого объекта и фона. Но в ряде ситуаций существенные изменения контрастов объектов обуславливаются не только собственным излучением тел, но и отраженными от объектов (по законам оптики) нагретыми слоями атмосферы при пригоризонтном наблюдении и холодными излучениями зенитных областей заатмосферных излучений при наблюдении объектов с авиационных и космических носителей. В ряде

тепловых измерений необходимо селектировать отраженные составляющие тепловых потоков от контролируемого объекта собственной температуры объектива наблюдательного прибора и даже собственной температуры приёмника излучения. Подобные ситуации учитываются в прецизионных измерениях, при использовании ТпВ в режиме радиометрических (термографических) исследований.

### **1.3.1 Некоторые применения тепловизионных устройств в военном деле и промышленности**

Армия и министерство по чрезвычайным ситуациям (МЧС): видеонаблюдение, рекогносцировка наземных подразделений, целеуказание, мониторинг и охрана особо важных объектов, охрана границ, поиск и спасение, выявление скрытых бункеров, выявление скрытых очагов пожаров.

Энергетика: состояние дымовых труб и газоходов, состояние статоров генераторов, проверка маслonaполненного оборудования, теплоизоляция турбин, паро- и трубопроводов, обнаружение мест присосов холодного воздуха, контроль состояния теплотрасс.

Нефтегазовый комплекс: проверка состояния электрооборудования, контроль технологических линий, поиск энергопотерь, обнаружение утечек из газопроводов, предотвращение пожаров.

Энергосбережение: диагностика ограждающих конструкций, обнаружение теплопотерь во внутренних помещениях и снаружи зданий и сооружений, определение теплоизоляционных свойств материалов.

Химическая промышленность: проверка герметичности и изоляции емкостей для хранения различных жидкостей и газов.

Машиностроение: контроль подшипников, зубчатых передач, валов, муфт и т.д., обнаружение несоосности оборудования, контроль температурных режимов сварки, термоэластический анализ напряжений.

Микроэлектроника: контроль качества сборки печатных плат.

Автомобильная промышленность: проектирование климатических систем автомобиля, контроль за ультразвуковой сваркой амортизаторов, разработка и проверка дисковых тормозов, контроль теплообменных процессов в радиаторах, двигателях и выхлопных системах.

Строительная промышленность: тепловизионная диагностика тепломеханического оборудования, выявление мест с повышенными теплопотерями, тепловизионный контроль дымовых труб, проверка эффективности при восстановлении теплоизоляции и реконструкции зданий.

Медицина: ранняя диагностика вирусных заболеваний, диагностика злокачественных и доброкачественных опухолей, выявление воспалительных и дистрофических поражений позвоночника и периферических суставов, диагностика заболеваний скелетных мышц, диагностика внутренних болезней (диабетическая ангиопатия,

атеросклероз, эндартериит сосудов конечностей, болезнь Рейно, гепатиты, нарушения вегетативной регуляции, миокардит, бронхит и др), диагностика в урологии (воспалительные заболевания почек, мочевого пузыря и др), как абсолютно безвредный прибор тепловизор эффективно применяется в акушерстве и педиатрии.

Фармакология: получение объективных данных о воздействии противовоспалительных и сосудорасширяющих лекарств и др.

### **1.3.2 Тепловое излучение. Теоретические расчёты. ИК материалы**

Каждый объект с температурой, отличной от абсолютного нуля, испускает излучение, которое называется тепловым. Нагретые тела (твёрдые и жидкие) характеризуются непрерывным распределением излучения по спектру длин волн с единственным максимумом, положение которого зависит от температуры источника. Такие источники называют тепловыми, а тела эти обычно находятся в состоянии термодинамического равновесия.

Тепловое излучение — электромагнитное излучение со сплошным спектром, испускаемое нагретыми телами за счёт их внутренней энергии. Это один из трёх элементарных видов переноса тепловой энергии (помимо теплопроводности и конвекции).

В физике для расчёта теплового излучения принята модель абсолютно чёрного тела (АЧТ), тепловое излучение которого описывается законом Стефана — Больцмана. Излучение же реальных тел подчиняется закону излучения Кирхгофа.

Излучение пламени или электрического разряда в газах не непрерывно по спектру, а сконцентрировано в узких интервалах — линиях и полосах. Такие источники называют селективными.

Примерами селективных излучателей являются факелы двигателей самолетов и ракет, а также слои в скачке уплотнения, окружающие возвращающийся в атмосферу космический аппарат (КА) и отделившиеся боеголовки межконтинентальных баллистических ракет (МБР).

Фундаментальным понятием при изучении теплового излучения является понятие об АЧТ, т. е. теле, поглощающем все падающее на него излучение любых длин волн. 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  $\nu$ :  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка.

Интенсивность излучения абсолютно чёрного тела в зависимости от температуры и частоты определяется законом Планка:

$$I(\nu) = \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (1.1)$$

где  $I(\nu)d\nu$  — мощность излучения на единицу площади излучающей поверхности в диапазоне частот от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$ ;  $\nu$  — частота излучения;  $T$  — температура излучающего тела;  $h$  — постоянная Планка ( $h = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ Вт} \cdot \text{с}^2$ );  $c$  — скорость света в вакууме ( $c = 2,9979 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$ ),  $k$  — постоянная Больцмана ( $k = 1,38054 \cdot 10^{-23} \text{ (Вт} \cdot \text{с)/К}$ );.

Это выражение эквивалентно,

$$u(\lambda) = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{h \cdot \nu / \lambda \cdot k \cdot T} - 1}, \quad (1.2)$$

где  $u(\lambda)d\lambda$  или  $W_\lambda(T, \lambda)$  — мощность излучения на единицу площади излучающей поверхности в диапазоне длин волн от  $\lambda$  до  $\lambda + d\lambda$ .

Интегрирование уравнения, описывающего закон Планка, дает закон Стефана – Больцмана, первоначально полученный экспериментально:

$$W(T) = \int_0^\infty W_\lambda(T, \lambda) d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4. \quad (1.3)$$

Продифференцировав уравнение Планка (1.1), получим закон смещения Вина:

$$u_\nu = C_1 \cdot \nu^3 \cdot e^{-C_2 \cdot \frac{\nu}{T}}, \quad (1.4)$$

где  $u_\nu$  — плотность энергии излучения;  $\nu$  — частота излучения;  $T$  — температура излучающего тела;  $C_1, C_2$  — константы.

Спектральная плотность излучения АЧТ в диапазоне температур от 3500 до 5500 К и от 280 до 320 К показана на рис. 1.1.

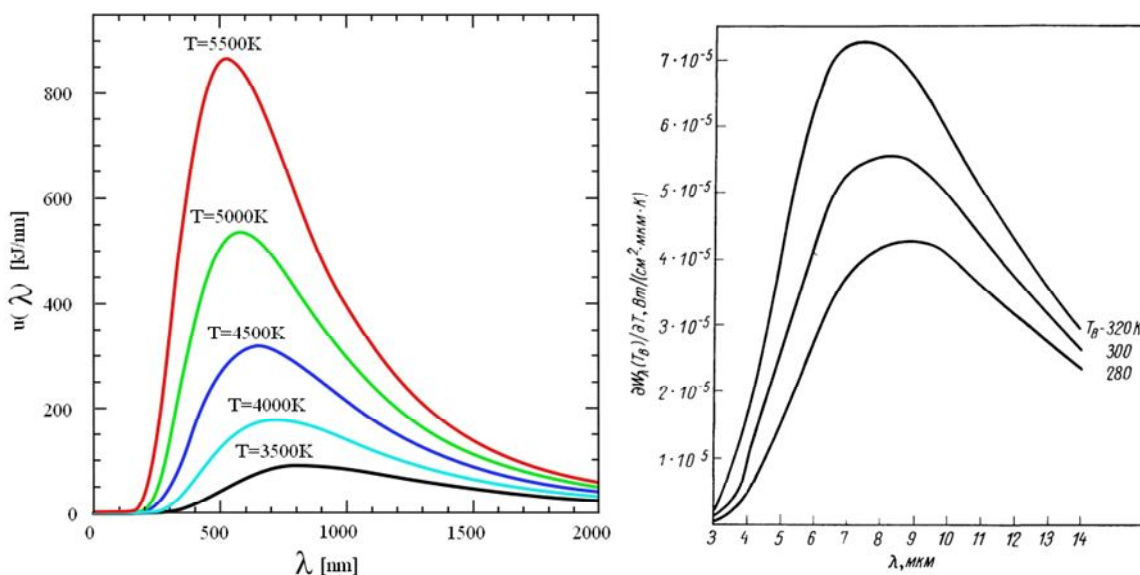
Из рис. 1.1 видно, что полный поток излучения АЧТ быстро возрастает с ростом температуры. При этом максимум СПЭС с увеличением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Т.о., по закону Кирхгофа функция частоты и температуры  $f(\nu, T)$  есть не что иное, как испускательная способность абсолютно черного тела ( $M^{\text{е.л}}(\nu, T)$ ).

В 1860 г. Густав Кирхгоф доказал, что отношение испускательной и спектрального коэффициента поглощения (поглощательной способностей) тела не зависит от его природы, а является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты и температуры:

$$\begin{aligned} r/\alpha(\nu, T) &= f(\nu, T) \\ \text{или } (r/\alpha(\nu, T))_1 &= (r/\alpha(\nu, T))_2 = (r/\alpha(\nu, T))_n = f(\nu, T). \end{aligned}$$





А. Для высокотемпературных тел (3500K-5500K) [Wiki]      В. Для низкотемпературных тел (280K-320K)

Рисунок 1.1 – Зависимость мощности излучения чёрного тела от длины волны

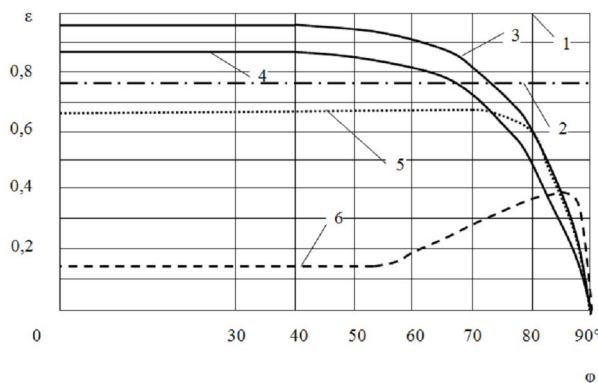
В 1879 г. Йозеф Стефан, основываясь на экспериментах, решил, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвертой степени температуры. Однако через несколько лет Больцман доказал, что это утверждение справедливо только для абсолютно черных тел. Найденная ими зависимость получила названия закона Стефана – Больцмана:

$$R_{\text{ч.т.}} = \int f(\nu, T) \cdot d\nu = \sigma \cdot T^4,$$

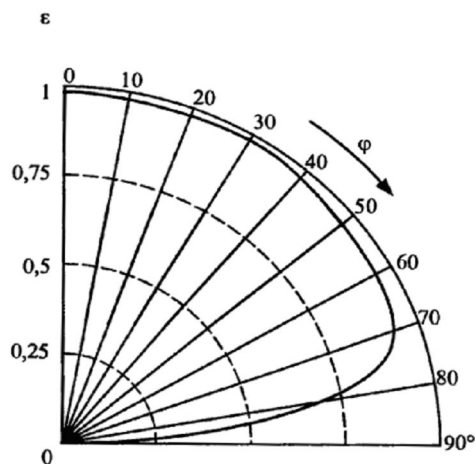
где  $\sigma$  – экспериментально найденная константа;  $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Из квантовой механики известно, что тепловое излучение есть поток квантов Бозевского газа – фотонов.

При интерпретации термограмм, получаемых в ТПС, необходимо учитывать условия наблюдения объектов и зависимости коэффициентов собственного излучения объектов и коэффициентов отражения от объектов собственного излучения фона. Чтобы сравнивать интегральные величины излучения чёрного тела и селективного излучателя, введено понятие радиационной температуры – температуры чёрного тела, имеющего такую же суммарную (по всему спектру) энергетическую светимость, что и данный селективный излучатель (объект).



Черное тело; 2. Серое тело (условное); 3...5. Диэлектрики с показателями преломления  $n=1,5; 2,0$  и  $4,0$  соответственно; 6. Металл



а). Зависимость коэффициента излучения  $\varepsilon$  от угла наблюдения  $\varphi$

б). Зависимость коэффициента излучения  $\varepsilon$  воды на длине волны  $\lambda=10$  мкм от угла

Рисунок 1.2 – Зависимости коэффициентов излучения различных материалов и воды от угла наблюдения при формировании термограмм [4]

#### 1.4 Прохождение излучения через атмосферу

При проектировании ИК системы любой разработчик решает задачу создания аппаратуры с учётом прохождения теплового излучения в поглощающих средах.

Почти всегда (за исключением случая "космос–космос") излучение от цели проходит сквозь слой земной атмосферы и либо ослабляется, либо вовсе затухает за счет рассеяния и поглощения молекулами водяного пара, углекислого газа и озона. Спектральное пропускание излучения атмосферой приведено на рисунке 1.3.

Озоновый слой на высоте около 80 км задерживает сверхкоротковолновое ультрафиолетовое излучение.

На рисунке 1.3: *a* – обычный ультрафиолет (от 0,2 до 0,4 мкм) и видимый диапазон – от 0,45 до 0,8 мкм; *б* – ближний ИК диапазон (0,76–1,5 мкм) и коротковолновый (1,5–2,8); *в* – средний ИК диапазон (2,8–5,6 мкм); *г* – длинноволновый ИК диапазон (5,6–29,0 мкм); *д* – дальний ИК, или ТГЦ диапазон (30–300 мкм).

В атмосфере имеются окна прозрачности, которые стандартизованы в международной фотометрической системе (МФС) через  $\lambda \pm \Delta\lambda$ :

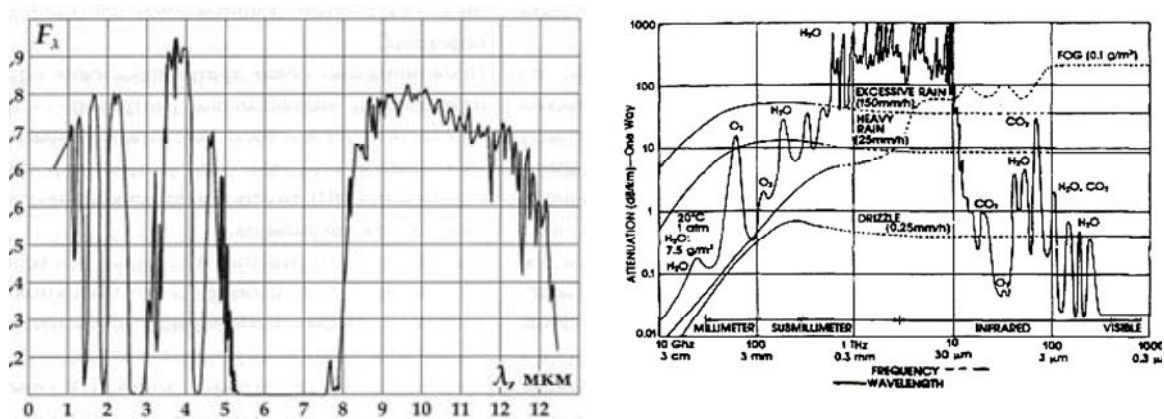
- в видимом и начале ближнего ИК диапазонов: *B*, *V*, *R*, *J* – до 1,2 мкм;
- Н-диапазон –  $(1,6 \pm 0,1)$  мкм;
- К-диапазон –  $(2,2 \pm 0,3)$  мкм;
- L-диапазон –  $(3,6 \pm 0,45)$  мкм;

- М-диапазон –  $(4,6 \pm 0,5)$  мкм;
- N-диапазон –  $(10,0 \pm 2,0)$  мкм;
- Q-диапазон –  $(20,0 \pm 0,4)$  мкм.

Между полосами прозрачности имеются полосы полного поглощения ИК-излучения атмосферой, в основном, углекислым газом  $\text{CO}_2$  (2,6–2,9 мкм; 4,2–4,4 мкм) и парами воды  $\text{H}_2\text{O}$  (5,0–8,0 мкм).

Аэрокосмические приемники изображения используют те или другие полосы пропускания или поглощения в зависимости от назначения.

ТПС в значительной степени зависят от состояния условий теплообмена между подстилающей поверхностью и воздушной средой. В равновесных условиях теплообмена ТпВ наблюдают только температурно-контрастные цели без привязки к окружающей местности, т.к. различия в температурах отдельных участков фона практически полностью нивелируются. Кроме того, значительное ослабление сигналов о собственном тепловом излучении целей и фона наблюдается в условиях густого тумана и мелкого дождя, размеры водных капель, в которых соизмеримы со средней длиной волны в диапазоне чувствительности наблюдательного прибора. В то же время, затухание ТГЦ излучения в указанных средах значительно меньше. Представление о степени поглощения (пропускании) излучения атмосферой в различных ИК (1) и ТГЦ диапазонах (2) можно составить по приводимым ниже (рис. 1.3) графикам.



а) Спектральный коэффициент пропускания атмосферы в ИК областях спектра  
 б) Спектральный коэффициент ослабления атмосферы от миллиметровой до УФ областей спектра

Рисунок 1.3 – Графики пропускания атмосферы в ИК и ТГЦ диапазонах

Интерес к ТГЦ излучению обусловлен следующими его свойствами:  
 - это неионизирующее излучение (энергия фотонов  $0,04 - 0,004$  эВ);

- это излучение хорошо проходит через мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ( $1/\lambda^4$ );

- это область вращательных спектров молекул, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков, колебаний твердотельной плазмы;

- это область водородных связей и вандерваальсовских сил межмолекулярного взаимодействия;

- энергия фотонов ТГц излучения лежит в области энергетической щели сверхпроводников [8].

Интегрирование 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.

#### 1.4.1 Влияние гидрометеоров

В литературе имеются обширные и в то же время неполные и не всегда согласующиеся друг с другом данные по влиянию гидрометеоров. Имея в виду задачу грубой сопоставительной оценки затухания волн миллиметрового и ИК диапазонов, обратимся к графику затухания излучения в тумане (метеорологическая дальность видимости (МДВ) – 100 м) и дожде от малой до средней интенсивности.

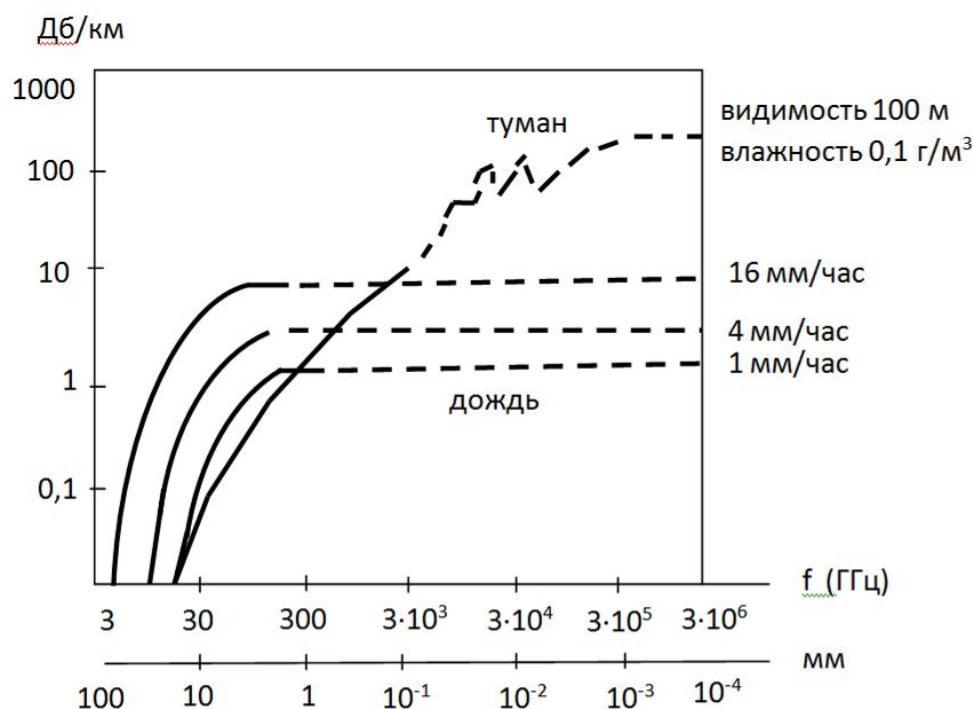


Рисунок 1.4 – График затухания излучения в тумане и дожде

Как видно из графика (рис. 1.4), затухание ИК излучения в таком тумане составляет 100 дБ/км и более, что делает канал неработоспособным. При  $\lambda > 1$  мм затухание  $\gamma < 1$  дБ/км, что говорит о приемлемых условиях распространения. По более жёстким оценкам  $\gamma < 1$  дБ/км при  $\lambda \approx 1$  мм и видимости не хуже 600 м или при  $\lambda \sim 3$  мм и видимости не хуже 300 м. Ниже, на рис. 1.5 представлены зависимости затухания от МДВ для четырёх длин волн.

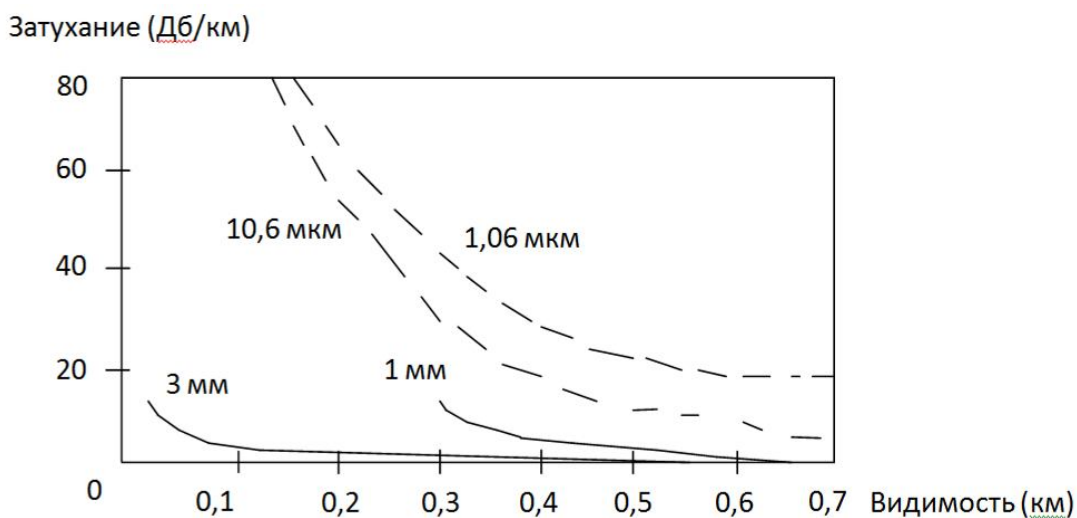


Рисунок 1.5 – Зависимость затухания излучения от МДВ

Сравнение ИК и радиодиапазонов приводит к выводу, что работоспособность в относительно густом тумане может обеспечиваться в диапазоне волн  $\lambda \geq 3$  мм. По величине затухания излучения в дожде ИК- и радиоканалы сопоставимы и сохраняют работоспособность (затухание не более 1 дБ/км) при относительно слабом дожде с интенсивностью около 1 мм/ч на трассе длиной около 1 км (распространение в одном направлении), либо при более сильном дожде на части трассы.

Затухание излучения в облаках зависит от их параметров (толщина, водность, концентрация и размеры капель) и для длин волн от 0,48 до 10,6 мкм лежит в пределах (50-650) дБ/км, мало меняясь в зависимости от длины волны. Данные по миллиметровому диапазону ограничены: в [1,5] приводятся значения затухания для  $\lambda=9$  мм в пределах от 0,647 до  $1,25 \frac{\text{дБ} \cdot \text{с}}{\text{км} \cdot \text{м}^3}$ . Там же отмечается пренебрежимо малое затухание, вносимое ледяными облаками. Следует отметить, что существенное значение при работе сквозь облака может иметь изменение затухания при движении носителя аппаратуры за счёт пространственной неоднородности параметров облаков.

Затухание СВЧ колебаний в сухом снеге значительно меньше, чем в дожде, а в мокром – примерно в 2,5 раза больше (при одинаковой интенсивности). О влиянии снегопада на затухание в ИК диапазоне

имеется мало сведений, Средней интенсивности снегопада соответствует затухание примерно 3,4 дБ/км, что, по-видимому, больше затухания миллиметровых волн в сухом снеге и меньше – в случае мокрого снега.

Сухой град не ослабляет излучение СВЧ, но покрытые плёнкой воды тающие частицы могут создавать значительное ослабление.

Таким образом, наиболее неблагоприятными для ТГц диапазона являются мокрый снег или тающий град.

Затухание оптических волн в дымке при МДВ около 1-2 км составляет 3,4 дБ/км для  $\lambda = 10,6$  мкм и 10 дБ/км для  $\lambda = 1$  мкм. Данные по затуханию в дымке и пыли недостаточны. По мнению зарубежных специалистов именно в этих условиях (наряду с туманом) волны миллиметрового диапазона обладают преимуществом по сравнению с оптическим (включая ИК область).

В целом приведённые данные свидетельствуют о целесообразности использования излучений в области  $\lambda \geq 3$  мм для решения задач обнаружения и, возможно, радионаблюдения в условиях действия тумана, дыма и пыли. При ограничениях на размер приёмной антенны и требовании максимального разрешения рабочий диапазон определяется окном прозрачности 2,6-4,2 мм с затуханием 0,3 дБ/км в чистой атмосфере и 1дБ/км при МДВ 100-300 м при  $\lambda \sim 3,2$  мм. Соответствующая средняя рабочая частота составляет 94 ГГц.

#### **1.4.2 Концепция комплексирования тепловизионных каналов**

Концепция построения комбинированных и комплексированных оптико-электронных систем наблюдения на сложном фоне в интересах военной техники (ВТ) впервые в нашей стране была разработана в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова в середине 80-х годов.

На первых этапах исследований комплексирование (объединение каналов видимого и теплового диапазонов с наблюдением через один общий объектив) и комбинирование (объединение каналов на одной платформе, но с отдельными объективами) показали существенную качественную и количественную выгоду в решении задач обнаружения, различения, распознавания, слежения и целеуказания при работе по объектам ВТ.

Комплексирование каналов только оптического диапазона спектра электромагнитных колебаний (ЭМК) обеспечивает повышение дальности обнаружения и распознавания объектов в 1,5-3 раза, формируя в пространстве предметов контрасты объектов относительно фона за счёт переотражения солнечной и звёздной радиации в видимом диапазоне 0,4...1,1 мкм и преимущественно за счёт собственного излучения объектов ВТ в тепловом диапазоне 3,2-14 мкм.

Однако уже в те годы высказывались предложения о необходимости дальнейшего расширения диапазонов наблюдения до ультрафиолетового

(УФ) (0,17-0,4 мкм) и были выполнены предварительные исследования по дальнейшему расширению теплового диапазона до 30-300 мкм (ТГц диапазон спектра ЭМК). При этом анализе необходимо учитывать три эффекта. Во-первых, при определённых длинах волн различные молекулы поглощают излучение, создавая атмосферные окна пропускания между этими полосами поглощения. Такие окна возникают вокруг частот 35 ГГц, 94 ГГц, 140 ГГц и 220 ГГц. Во-вторых, маленькие частицы и аэрозоли могут рассеивать радиацию. Величина рассеивания зависит от длины волны, от размера, формы и коэффициента преломления частиц. Это связано с диапазоном волн, в котором облака, туман и дым вызывают небольшое ослабление по сравнению с их влиянием в видимом и инфракрасном диапазонах. Наконец, в-третьих, когда размер частицы сопоставим или больше, чем длина волны, прохождение излучения затруднено из-за геометрического поперечного сечения частиц, типа дождя.

### **1.5 ИК материалы**

Основные принципы построения объективов и оптических систем ИК техники рассмотрены в базовых монографиях и статьях. При выборе оптических материалов для оптики ТПС расчёт приёмных систем предваряется энергетическим расчётом, учитывающим как условия работы приборов, ориентировочно выбранные габаритные характеристики объектива и характеристики выбранных приёмников излучения, так и условия формирования изображений (средняя температура фона, дисперсия температуры фона, минимальная и максимальная температура объекта и т.д.). Основная задача любого тепловизионного прибора заключается в визуализации теплового поля с пространственным периодом  $\psi$  в заданном телесном угле за определённое время формирования кадра  $t$  кадра с требуемым температурным разрешением  $\delta T$  для мгновенного поля зрения по горизонтали  $\Delta h$  и по вертикали  $\Delta v$  [9, 13]. Исходя из этих основных положений, далее можно рассматривать и вырабатывать требования к оптическим материалам приёмных систем ИК техники. В одной статье отобразить все детали процесса выбора материалов невозможно, но основные предпосылки доступны для краткого введения в поставленную задачу.

#### **1.5.1 Основные положения**

Приёмные системы тепловидения и интегрированных на их основе систем активно-пассивного наблюдения предназначены для передачи или преобразования света в различных участках спектрального диапазона. Исходя из этого, можно провести первую сводную классификацию применимых оптических материалов. На рис. 1.6 приводятся грубые оценки спектральных характеристик основных материалов ИК техники [10].



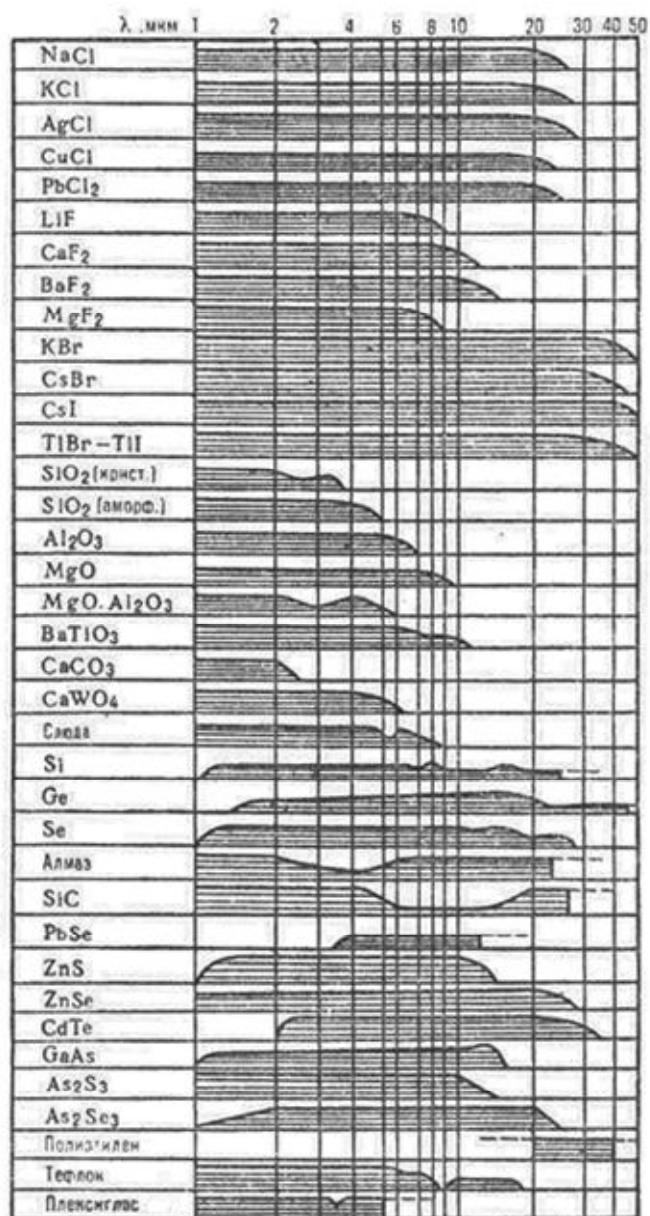


Рисунок 1.6 – Прозрачность оптических материалов в ИК области спектра ЭМК

Основными оптическими постоянными оптического стекла являются следующие параметры [10,11].

*Показатель преломления.* Показатель преломления  $n$  определяется как отношение скорости распространения электромагнитного излучения в воздухе к скорости его распространения в стекле. Показатель преломления зависит от длины волны излучения. В качестве основного показателя преломления оптического стекла конкретной марки в соответствии с ИСО 7944-84 установлен показатель преломления  $n_D$  для длины волны 546,97 нм спектральной линии ртути  $\delta$ . Эта линия расположена в зеленой части спектра света в области максимума чувствительности глаза человека.

*Средняя дисперсия.* Дисперсионные свойства стекла характеризуются величиной средней дисперсии, представляющей разность показателей преломления для двух относительно далеко отстоящих длин



волн. В качестве основной средней дисперсии принята разность показателей преломления  $n_f - n_c$  для длин волн 479,99 и 643,85 нм спектральных линий  $F$  и  $C$  кадмия, ограничивающих видимую часть спектра (ИСО 7944 - 84):

$$v = (n_f - 1) / (n_c - n_f).$$

где  $n_2$  и  $n_3$  - показатели преломления для длин волн, ограничивающих какой-либо диапазон спектра;  $n_1$  - показатель преломления для длины волны, расположенной внутри диапазона.

В качестве основного коэффициента дисперсии, называемого также числом Аббе (ИСО 7944-84), принят:

$$v_e = (n_e - 1) / (n_f - n_c).$$

Именно эти две характеристики позволяют провести дальнейшую классификацию и широко используются расчётчиками оптики при выборе материалов для сопрягаемых оптических элементов.

По мере увеличения номенклатуры выпускаемых стёкол и применения в качестве стеклообразующей основы наряду с кремнезёмом других веществ появилась необходимость разграничения стекол «флинт» и «крон» на типы, а внутри типов на марки.

Оптические бесцветные стекла классифицируют по типам в зависимости от значений показателя преломления и коэффициента дисперсии. Для удобства выбора типов и марок стекол строится диаграмма Аббе [10,12] в координатах  $n_e$ ,  $v_e$  (рис. 1.7). Стекла каждого типа располагаются на поле диаграммы на строго ограниченных участках, за исключением стекол типа ОФ и ОК, которые могут находиться на разных участках поля диаграммы.

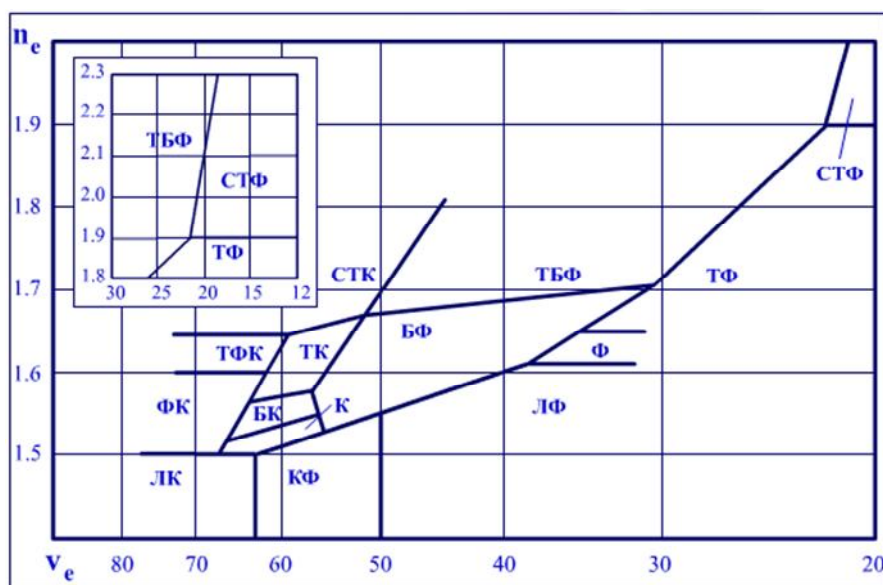


Рисунок 1.7 – Диаграмма Аббе в координатах  $n_e$ ,  $v_e$

### 1.5.2 Выбор оптических материалов для приборов ракетной техники

В оптическом приборостроении и ракетной технике в последние годы проводятся интенсивные разработки различных материалов, прозрачных в заданных диапазонах спектра ЭМК, а также термически и механически прочных. Среди большого числа материалов, пригодных для создания светофильтров и защитных окон-обтекателей в первую очередь могут быть названы ситаллы и различные керамики.

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) – неорганические материалы, получаемые направленной кристаллизацией различных стёкол при их термической обработке. Они состоят из одной или нескольких кристаллических фаз. В ситаллах мелкодисперсные кристаллы (до 2000 нм) равномерно распределены в стекловидной матрице. Количество кристаллических фаз в ситаллах может составлять 20-95% (по объёму). Изменяя состав стекла, тип инициатора кристаллизации (катализатора) и режим термической обработки, получают ситаллы с различными кристаллическими фазами и заданными свойствами (см. табл. 1.2). Впервые ситаллы были изготовлены в 50-х гг. XX в. Материалы, подобные ситаллам, за рубежом называются пирокерамом, девитрокерамом, стеклокерамом.

Таблица 1.2 – Свойства промышленных ситаллов

Свойство	Высокопрочный MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -4SiO <sub>2</sub>	Радиопрозрачный химически стойкий Li <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -4SiO <sub>2</sub>	Прозрачный термически стойкий Li <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -2SiO <sub>2</sub>	Износостойкий и химически стойкий CaO-MgO- -SiO <sub>2</sub>	Слюдоситалл MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -SiO <sub>2</sub> -K <sub>2</sub> O-F	Биоситалл CaO-MgO- -SiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ситалло-цемент PbO-ZnO- -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Шлакоситалл CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -SiO <sub>2</sub>
Главные кристаллич. фазы	Кордиерит	р-Сполумеп	р-Эвкриптит	Пироксен*	Фторфлогопит	Апатит, волластонит	Бораты свинца	Волластонит**
Плотн., кг/м <sup>3</sup>	2610	2420-2550	2228-2610	2970-3000	2520-2630	2600-2700	6300-4500	2650-2700
Прочность при изгибе, МПа	240-350	115-180	70-130	130-150	60-103	140-220	100-170	80-120
Модуль Юнга, ГПа	100-120	49,0-87,4	52,0-98,0	—	59,0-64,0	76,0-104,0	120-160	88-108
Микротвердость, МПа	6080-11000	5700-9300	5100-8750	8500-9200	2460	6400-6500	—	650-7500
Козф. линейного расширения (20-320 °С) К <sup>-1</sup>	(11-57) · 10 <sup>-7</sup>	(6,0-20,0) · 10 <sup>-7</sup>	(-50-6) · 10 <sup>-7</sup>	(76-85) · 10 <sup>-7</sup>	(63-97) · 10 <sup>-7</sup>	(85,0-90,0) · 10 <sup>-7</sup>	(40,0-120,0) · 10 <sup>-7</sup>	(80-85) · 10 <sup>-7</sup>
Макс. рабочая т-ра, °С	1250-1300	1200-1300	800-900	1000-1050	800-1000	—	—	850-900
Термич. стойкость, °С	800-900	750-850	1000-1200	200-350	—	—	—	150-200
Уд. электр. сопротивление, Igr (20°С, 1 МГц)	14-15	10-12	9-12	—	12	—	6,5-11,7 (250 °С)	10-15
tg δ (25°С, 1 МГц)	(15-30) · 10 <sup>-4</sup>	(26-90) · 10 <sup>-4</sup>	(60-200) · 10 <sup>-4</sup>	—	(6-30) · 10 <sup>-4</sup>	—	(10-20) · 10 <sup>-4</sup> (10 <sup>5</sup> Гц)	280 · 10 <sup>-4</sup> (50 Гц)
Хим. стойкость, мг/см <sup>2</sup> кипячение в 5%-ном р-ре HCl	10-30	0,01-2,00	0,5	0,1-0,2	56-87	30-35	—	—
кипячение в 5%-ном р-ре NaOH	0,01-0,10	0,00-6,0	3	—	3,6-8,5	—	—	—

\* Истираемость 0,001 г/см<sup>2</sup>. \*\* Истираемость 0,015-0,030 г/см<sup>2</sup>, водостойкость 99,9%, кислотостойкость 99,3%, щелочестойкость 80-85%.

О механических свойствах и обобщённых показателях прозрачности можно судить по данным, приводимым в таблице 1.3.

Оптически прозрачные термостойкие и радиопрозрачные химически стойкие ситаллы получают на основе стекол системы Li<sub>2</sub>O - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiO<sub>2</sub> (сподумено-эвкриптитовые составы); инициатор кристаллизации – TiO<sub>2</sub>. В

оптически прозрачных ситаллах размер кристаллов не превышает длины полуволны видимого света. Ситаллы, содержащие в качестве основных кристаллических фаз эвкрипит ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ) или сподумен ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_4 \cdot 4\text{SiO}_2$ ), имеют, кроме того, температурные коэффициенты расширения, близкие к нулю, а иногда даже отрицательные – до  $-5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Области применения – космическая и лазерная техника, астрооптика, ракетостроение [13]. Как уже отмечалось, в ракетостроении для обтекателей-светофильтров головок самонаведения используются ситаллы и керамики на основе полудрагоценных и драгоценных кристаллов.

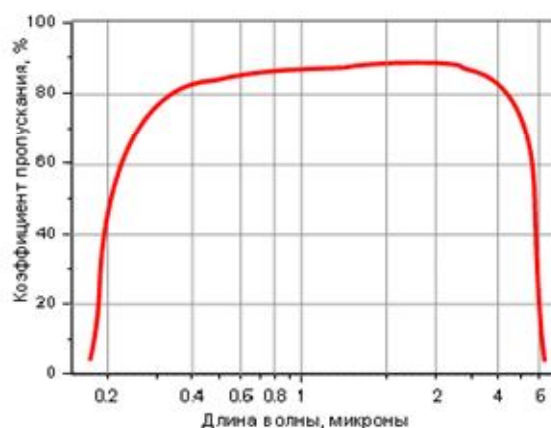


Рисунок 1.8 – Спектр пропускания отечественного сапфирового окна толщиной 2 мм

В настоящее время в головках самонаведения (ГСН) современных противоракетных комплексов (ПРК) используются защитные обтекатели-светофильтры на основе сапфиров.

Как уже отмечалось, головка самонаведения американского мобильного ПРК дальнего перехвата THAAD (Theater High Altitude Area Defense) имеет ИК прозрачное сапфировое неохлаждаемое окно.

Характеристики сапфира (корунда) можно рассмотреть по данным, приводимым Санкт-Петербургским малым частным предприятием ЗАО «TYDEX» [14], созданным группой исследователей, несколькими учёными из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Сапфир (корунд) является анизотропным одноосным кристаллом. Это один из наиболее твёрдых и прочных синтетических материалов. Он обладает химической инертностью и низким коэффициентом трения. Износостойкость корунда в 8 раз выше, чем у стали. Являясь диэлектриком и термически стабильным материалом вплоть до  $1600^\circ\text{C}$ , отечественный синтетический корунд обладает также отличными оптическими свойствами – прозрачностью от 0,17 до 5,5 микрон.

Перечисленные качества корунда делают его незаменимым материалом для работы в жёстких условиях: при высокой температуре и/или давлении, в кислотном или щелочном окружении, когда требуется

химическая стойкость, а также при высоких механических нагрузках. Даже в этих тяжелых условиях корунд не теряет своих оптических свойств.

Таблица 1.3 – Физические свойства сапфира

Химическая формула	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Тип кристаллической структуры	гексагональная, 3ш
класс симметрии	
Параметры решетки	a = 4,758; c = 12,991
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,98
Твердость по Моосу	9
Диапазон оптической прозрачности, мкм	0,17-5,5
Показатель преломления (на длине волны 0,532 мкм)	n <sub>0</sub> = 1,7717; n <sub>e</sub> = 1,76355
Влагопоглощение	отсутствует
Модуль Юнга, ГПа	345
Модуль сдвига, ГПа	145
Модуль объемной упругости, ГПа	240
Предел упругости, МПа	275
Модуль разрыва, МПа	420 при 20 °C; 280 при 500 °C; 420 при 1000 °C
Коэффициенты упругости	C <sub>11</sub> = 496; C <sub>12</sub> = 164; C <sub>13</sub> = 115; C <sub>33</sub> = 498; C <sub>44</sub> = 148
Коэффициент Пуассона	0,25-0,3
Коэффициент трения	0,15 на стали; 0,1 на сапфире

Однако, следует особо указать, что тенденция развития принципов построения ГСН в зарубежных разработках сводится к комбинированию каналов оптического и радиодиапазонов.

Спектральные характеристики американских сапфиров приведены на рисунке 1.9.

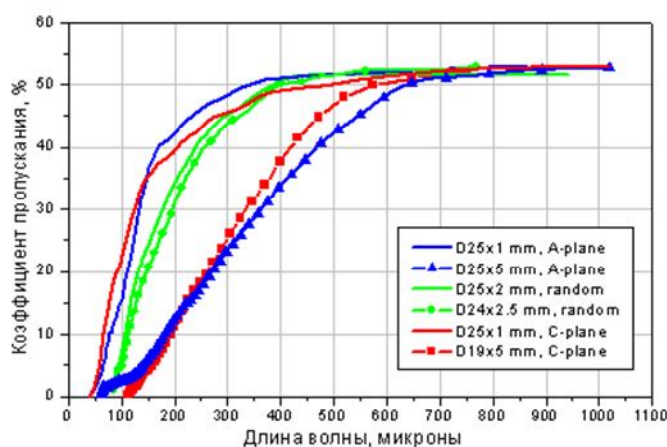


Рисунок 1.9 – Пропускание сапфировых образцов (USA) различной толщины и кристаллографической ориентации

### 1.5.3 Выбор оптических материалов для комплексированных систем ИК и ТГц каналов формирования изображений

В [14] отражены исследования сотрудников отдела субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН [14].

Как показали экспериментальные исследования сотрудников ФГУП «НПК ГОИ им. С.И. Вавилова» использование единого, целикомого защитного окна на ТГц и ИК каналы не совсем целесообразно, т.к. защитные окна из сапфиров либо будут иметь ухудшенные показатели пропускания в ИК канале (сапфиры USA), либо в длинноволновом - ТГц канале. Представление о пропускании различных материалов в ИК и ТГц диапазонах можно составить по таблице 1.4.

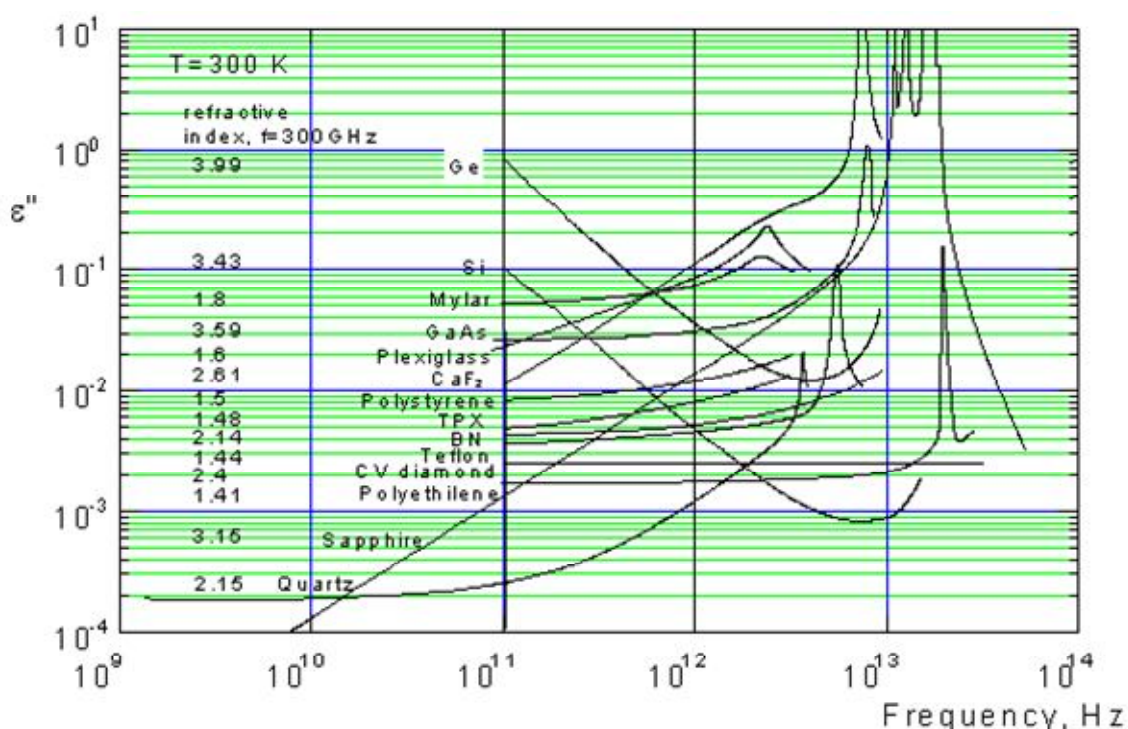
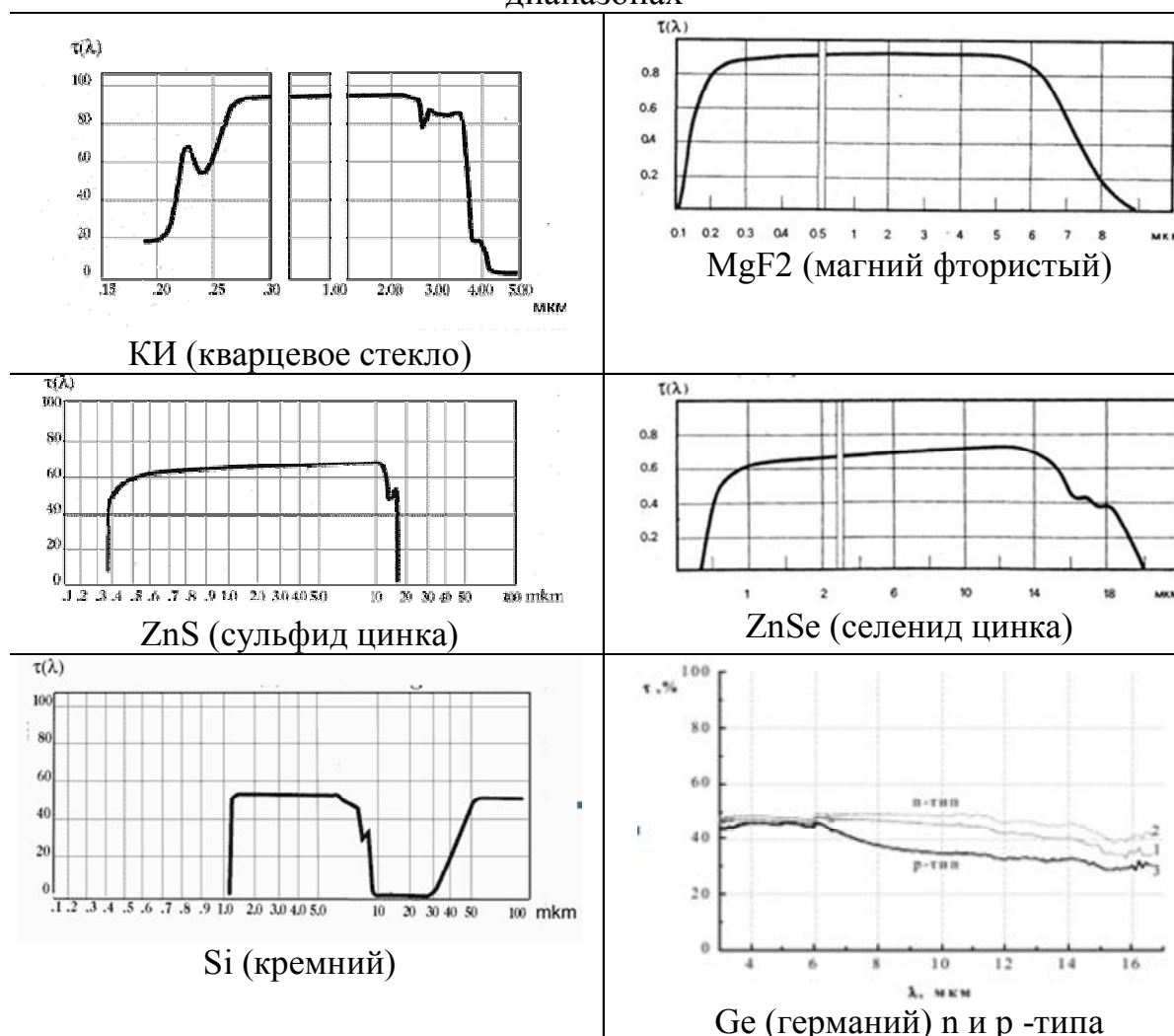


Рисунок 1.10 – Сравнительные данные дисперсии  $\epsilon'$  и поглощения  $\epsilon''$  для ММ - СБММ прозрачных материалов при комнатной температуре - кристаллических диэлектриков, полупроводников, полимеров. На частотах 1010-1013 ГГц  $\epsilon'$  не зависит от частоты. В полупроводниках и полимерах  $\epsilon''$  частично зависит от образца

Использование в качестве защитных окон полупрозрачных светофильтров из сапфиров и керамик, хорошо пропускающих ТГц излучение и полупрозрачных для ИК канала, возможно только до определённой границы ослабления. При этом допустимое ослабление в ИК канале не должно превышать 2 раз.

Таблица 1.4 – Пропускание различных материалов в ИК и ТГЦ диапазонах



Общий вывод:

если не ставить перед собой задачу увеличения разрешения в ТГЦ канале, можно строить систему ИК и ТГЦ каналов с общим входным окном и светофильтрами с использованием кремниевых стёкол;

если задаваться задачами максимального использования возможностей от совмещения ИК и ТГЦ изображений, необходимо применять принцип разделения потоков: для ИК канала выбирать материал окон и светофильтров из Ge, ZnSe (селенида цинка) или ZnS (сульфида цинка), а для ТГЦ канала использовать кремниевую керамику с ограничением её чувствительности в ИК диапазоне.

### 1.6 ИК приёмники излучения

В тепловизионных приборах в настоящее время находят применение самые разнообразные приёмные устройства. На сегодня достаточно отчётливо определились следующие классы приёмных устройств: фотонные и тепловые.



Фотонные приёмники излучения обеспечивают преобразование падающего потока фотонов в электрический сигнал за счет непосредственного взаимодействия фотонов с электронной подсистемой материала приёмника.

Тепловые приёмники, поглощая поток фотонов, изменяют температуру чувствительного элемента, которая, в свою очередь, вызывает вторичные изменения в приёмнике: изменяется с температурой электропроводность материала или его поляризация. В каждом классе приёмников существуют многочисленные группы, различающиеся типом материала, конфигурацией и общим числом элементов, рабочей температурой и типом охладителя и т.д. Описанию типов приёмников и их характеристик посвящено значительное число работ и справочной литературы [1, 15, 16], сложилась общепринятая физически корректная система описания свойств и характеристик чувствительных элементов приёмников, позволяющая разработчикам ИК систем проводить расчёт и моделирование приборов.

При выборе и обосновании материала приёмников излучения и выборе матриц приёмников излучения для построения ТпВ в расчётах используются известные из литературных источников [17] данные. Так, для выбора материала приёмников при разработке трёхспектральных приёмников излучения с возможностью решения задачи спектральной селекции ориентироваться можно на публикации [15, 18] (таблица 1.5, рис. 1.11).

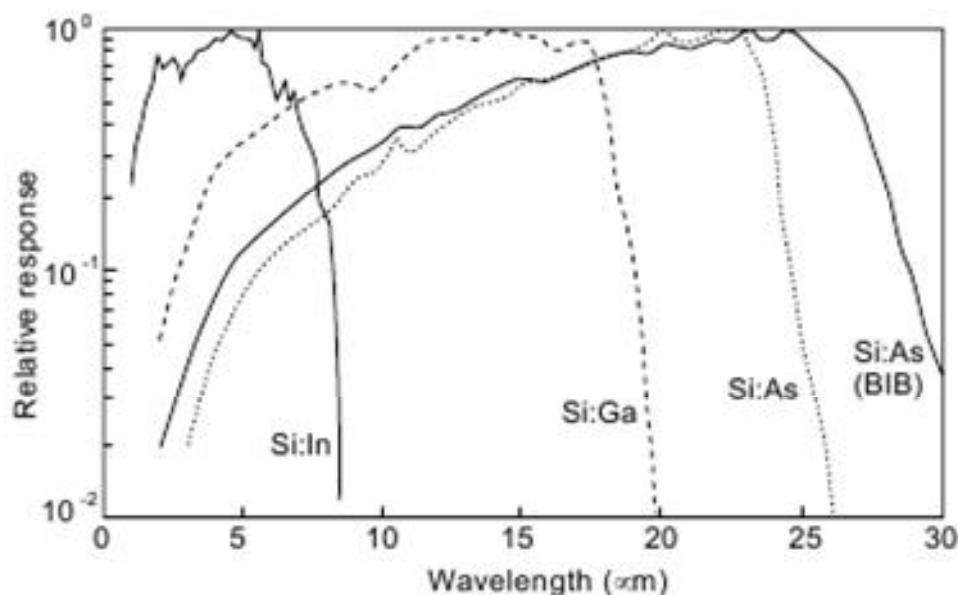


Рисунок 1.11 – Примеры спектральных характеристик ИК детекторов с внешним фотоэффектом. Показаны Si:In, Si:Ga и Si:As и Si:As (с BIB – структурой) [16, 18]

Таблица 1.5 – Основные ИК материалы

Detector	(DE)opt (meV)	$\lambda_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c(T)$ ( $\mu\text{m}$ )(K)	$\eta(\lambda_p)$ (%)	$\Phi_B$ ( $\text{ph cm}^{-2}\text{as}^{-1}$ )	NEP ( $\text{WHz}^{-1/2}$ )	$\lambda(\mu\text{m}); T(\text{K});$ $f(\text{Hz})$
Si:As	53,76	23	24-24,5 (5)	50(T) 20(L)	$9 \times 10^6$ $6.4 \times 10^7$	$0,88 \times 10^{-17}$ $4,0 \times 10^{-17}$	(19;6;1,6) (23;5;5)
Si:P	45,59	24/26,5	28,29 (5)	$\sim 30$ (T)	$2.5 \times 10^8$	$7,5 \times 10^{-17}$	(28;4,2;10)
Si:Sb	42,74	28,8	31 (5)	58(T) 13(L)	$1.2 \times 10^8$ $1.2 \times 10^8$	$5,6 \times 10^{-17}$ $5,5 \times 10^{-17}$	(28,8;5;5) (28,8;5;5)
Si:Ga	74,05	15,0	18,4 (5)	47(T)	$6.6 \times 10$	$1,4 \times 10^{-17}$	(15;5;5)
Si:Bi	70,98	17,5	18,5 (27)	34(L)	$< 1.7 \times 10^8$	$3 \times 10^{-17}$	113;11;-)
Ge:Li	9,98		125 (calc)		$8 \times 10^8$	$1,2 \times 10^{-17}$	(120;2;13)
Gc:Cu	43,21	23	29,5 (4,2)	50	$5 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{-17}$	(12;4,2;1)
Gc:Be <sup>b</sup>	24,81	39	50,5 (4,2)	100 <sup>b</sup>	$1.9 \times 10^{10}$	$1,8 \times 10^{-17}$	(43;3,8;20)
Ge:Ga	11,32	94	114(3)	34	$6.1 \times 10^9$	$5,0 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Gc:Ga <sup>b</sup>	11,32	94	114(3)	$-10^b$	$5.1 \times 10^9$	$2,4 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga <sup>b(a)c</sup>	$\sim 6$	150	193 (2)	73 <sup>b</sup>	$2.2 \times 10^{10}$	$5,7 \times 10^{-17}$	(150;2;150)

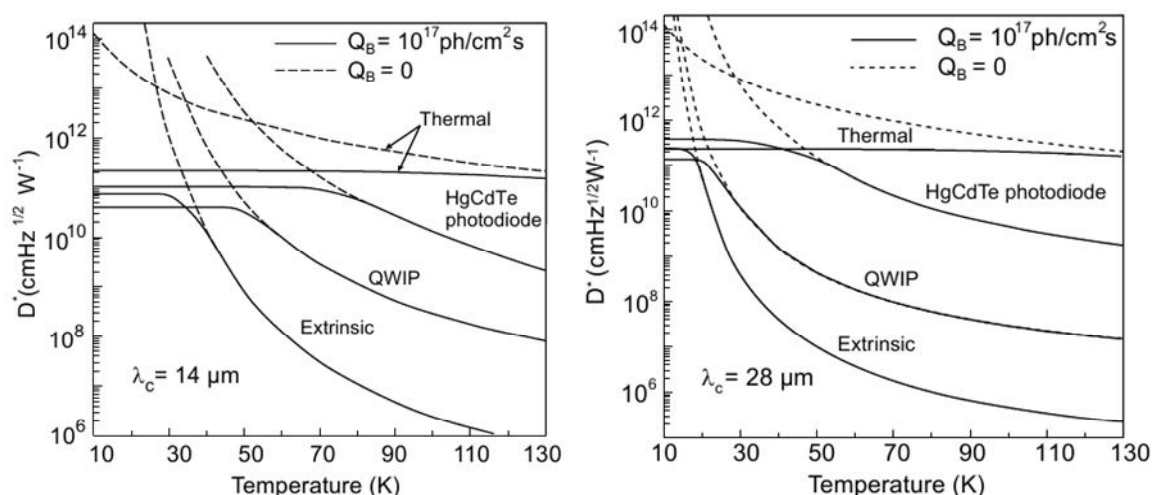


Рисунок 1.12 – Зависимость (теоретический предел, ограничивающий достижения)  $D^*$  для фотонных и тепловых детекторов LWIR и VLWIR на длинах волн  $\lambda_c = 14$  мкм и  $\lambda_c = 28$  мкм, соответственно, при нулевом фоне и фоне  $10^{17}$  фотонов  $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  от температуры приёмника [19].

Теоретическое значение обнаружительной способности для тепловых детекторов, имеют гораздо меньшую температурную зависимость, чем для фотонных детекторов. При температуре ниже 50 К и нулевом фоне тепловые детекторы LWIR характеризуются более низкими значениями  $D^*$ , чем фотонные. Тем не менее, при температурах выше 60 К пределы показывают преимущества тепловых детекторов. При комнатной температуре обнаружительная способность тепловых детекторов гораздо лучше, чем у фотонных детекторов LWIR. Интересно отметить, что теоретические кривые  $D^*$  для фотонных и тепловых детекторов показывают, что аналогичные основные ограничения наблюдаются при



низких температурах. Подобные соображения были проведены для детекторов сверхдлинноволнового инфракрасного излучения (VLWIR), работающих в дальнем спектральном диапазоне. Результаты расчётов показывают, что детекторы, работающие в этом диапазоне, – это криогенные Si и Ge с внешней фотопроводимостью и криогенные тепловые детекторы, т.е. обычные болометры.

Детализацию знаний о достигнутых результатах по предельной чувствительности FPA ИК излучения из HgCdTe при заданной температуре охлаждения матрицы FPA можно составить по данным из обзора [16] и работ [19, 20]. Данные приведены на рисунке 1.13.

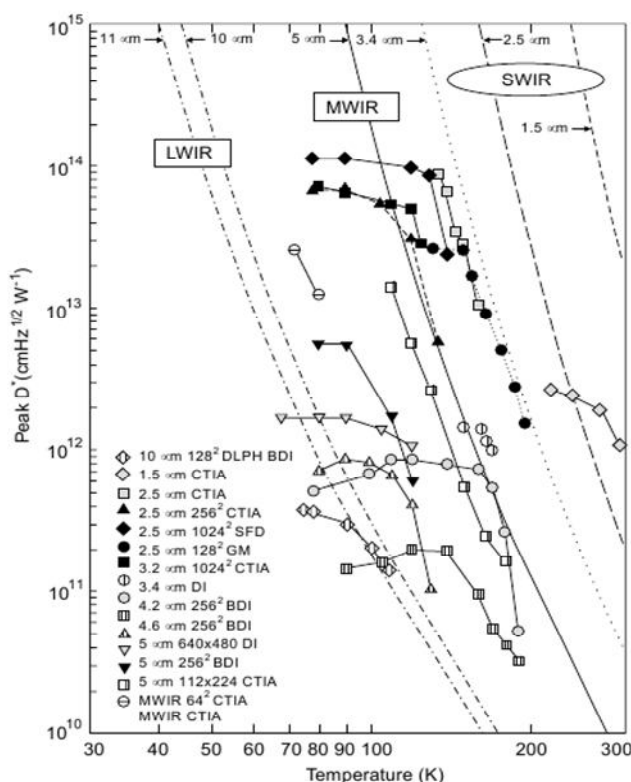


Рисунок 1.13 – Обнаружительная способность FPA из HgCdTe в зависимости от температуры [20]

Объяснение высоких значений пиковой обнаружительной способности  $D^*$  для MWIR на фотодиодах FPA из HgCdTe проясняются из рассмотрения графика (рис. 1.14) спектральной зависимости коэффициента адсорбции для приёмников, чувствительных в диапазонах MWIR и LWIR. Как видно из графика, заимствованного из работ [16, 21], приёмники из InSb и Hg<sub>0,73</sub>Cd<sub>0,27</sub>Te имеют близкие спектральные характеристики в области MWIR как при температуре приёмников 300 К, так и при температуре 77 К, а приёмники на фотодиодах со структурой Hg<sub>0,79</sub>Cd<sub>0,21</sub>Te простирают свою чувствительность в область LWIR. При этом дальняя граница чувствительности приёмников существенно зависит от температуры охлаждения приёмников.

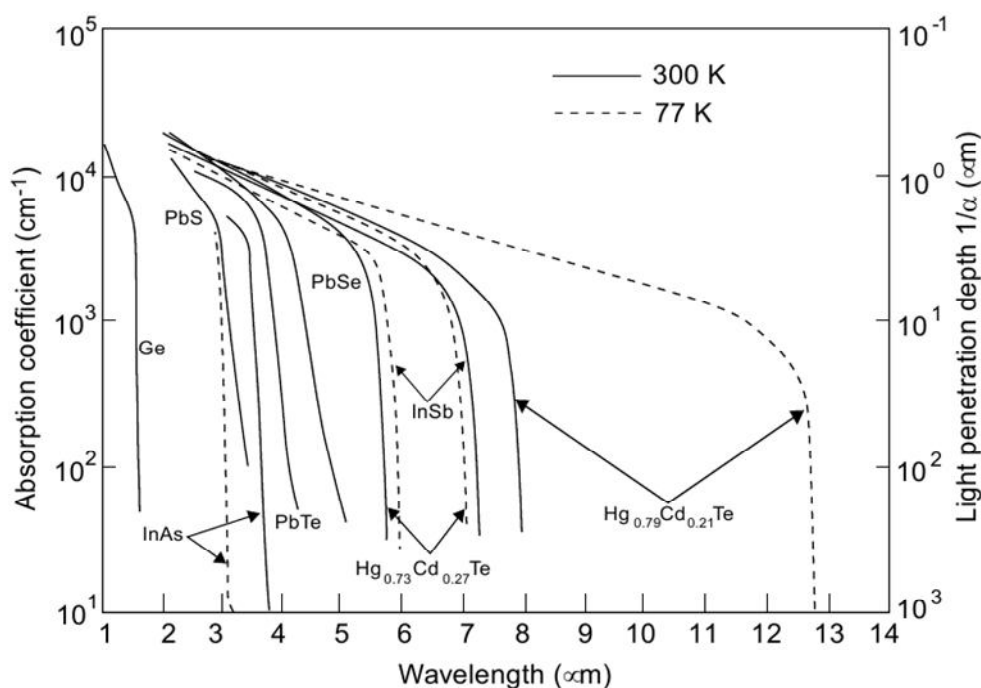


Рисунок 1.14 – Коэффициент поглощения для различных материалов фотоприёмников в спектральном диапазоне 1-14 мм

Выбор ФПУ для работы в условиях наблюдения на этапе выхода из плотных слоёв атмосферы носит сложный и противоречивый характер. С одной стороны, безусловными выводами являются следующие теоретические и экспериментальные данные:

Матрицы на основе силицида платины PtSi являются наиболее однородными с характерной неоднородностью элементов от 0,5% до 1%. Для InSb эта неоднородность в настоящее время составляет от 5% до 10%, а для КРТ от 10% до 20%. Неоднородности, получаемые после изготовления матрицы, могут быть скомпенсированы электрическим путём, путём накопления информации о неоднородностях в то время, когда матрица «смотрит» на однородный фон, с последующим вычитанием этих неоднородностей поэтапно по отношению к случаю, когда матрица «смотрит» на реальную среду.

В лабораторных условиях при этом было достигнуто десятикратное уменьшение геометрического шума. В натуральных условиях компенсация неоднородностей может оказаться более трудной задачей, т.к. распределение неоднородностей может зависеть от температуры. По результатам модельных расчётов и лабораторных испытаний неоднородности могут быть выровнены до 0,05%. В этом случае матрица из КРТ имеет явное преимущество перед PtSi. Если достигнуть указанной компенсации для матрицы из InSb, она будет особенно эффективна для диапазона 3,2-5,2 мкм.

Потеря эффективности матриц из PtSi при низких температурных контрастах обусловлена к тому же ее низкой квантовой эффективностью

на более длинных волнах. Однако достигнутый к настоящему времени более высокий уровень развития матриц из PtSi оставляют их достаточно конкурентоспособными.

### **1.7 Общая оценка и расчёты**

Общую оценку теоретически достижимых и достигнутых (по данным на 2003 г. [16]) характеристик наиболее значимых приёмников ИК излучения при выбранных температурах охлаждения элементов можно составить из анализа рис. 1.15.

Однако, как показано в [17], при оценке тепловизионных приборов не целесообразно проводить сравнение приёмников по предельно достижимой обнаружительной способности  $D^*$ . По этой причине выбор критериев сравнения и оценки приёмников ТпВ в [17] проводится по интегральным параметрам коэффициента эффективности, определяемого в зависимости от необходимого количества приёмников с исследуемым типом материала FPA (методика И.М. Фроимсона, см. 1.7.1).

В последние годы за рубежом активно ведутся разработки как активных, так и пассивных систем обнаружения и получения изображения в длинноволновом диапазоне на основе антенных микроболометров (АМБ). В этой области спектра они превосходят по характеристикам диоды Шоттки.

В период 1990-98 гг. в ГОИ совместно с ФТИ и ЛЭТИ были разработаны чувствительные элементы антенных высокотемпературных сверхпроводниковых микроболометров с  $NEP \approx 1,5 \cdot 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при постоянной времени около 150 нс, что находилось на уровне зарубежных образцов.

В связи с этим задача создания комплексированных приборов на область спектра 8-14 мкм, имеющих дополнительные каналы в субмиллиметровом диапазоне (30-300 мкм), является актуальной и требующей разработки двухканальных ФПУ на указанные диапазоны.

Эти задачи были поставлены в США с 1990 года в исследовательской программе Adaptive Focal Plane Array (AFPA) program at DARPA since 1990.

Менеджер этой программы Mr. Raymond Balcerak [22] кратко характеризует методологию программы в документе [98]: полная цель - адаптивные фокальные матрицы (AFPA); программа должна создать высокоэффективные фокальные матрицы (FPA), которые являются широко настраиваемыми по всему диапазону волн в инфракрасном спектре (IR) (включая короткие инфракрасные волны (SWIR), средние инфракрасные волны (MWIR), длинные инфракрасные волны (LWIR) и волны ТГц диапазона, что позволяет создавать полноформатные многоспектральные изображения.

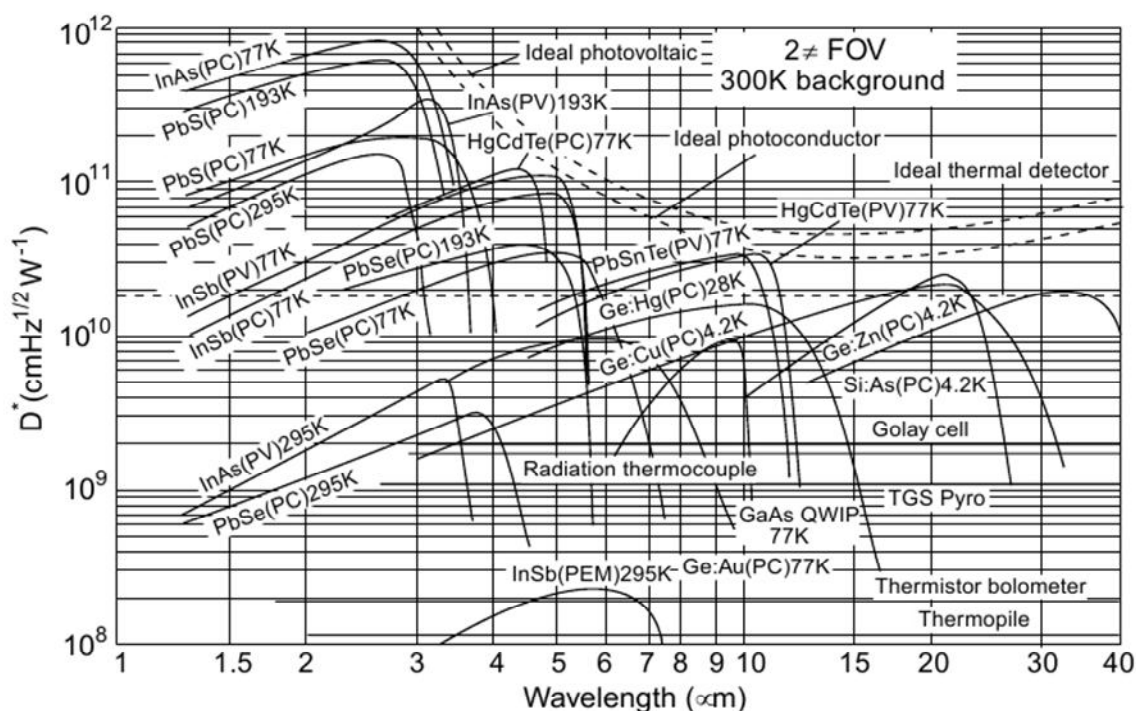


Рисунок 1.15 – Сравнение обнаружительной способности  $D^*$  различных коммерчески доступных инфракрасных детекторов и их спектральной чувствительности при указанной температуре. Рабочая частота – 1000 Гц для всех детекторов, кроме термобатареи (10 Гц), термопары (10 Гц), термистора (болометра) (10 Гц), ячейки Галлея (10 Гц) и пироэлектрика (10 Гц). Пунктирными линиями показаны теоретические кривые, ограничивающие предельные значения  $D^*$  для идеальных фотопроводящих, фотоэлектрических детекторов и тепловых детекторов.

РС – фотопроводящие детекторы; PV – фотоэлектрические датчики;  
РЕМ – фотоэлектромагнитные детекторы

Обработка матриц велась и ведётся по пути расширения диапазона чувствительности ее элементов и совершенствования параметров чувствительности по ряду технологических направлений, о которых можно составить представление по обзорным публикациям. В настоящее время, судя по публикациям и материалам конференций, за рубежом активно ведутся разработки приборов и систем как пассивного, так и активного наблюдения и получения изображения в интересах таможенного досмотра и охраны границ, биомедицинских и космических исследований. Для астрономических наблюдений разрабатываются более чувствительные приемные системы на основе АМБ, охлаждаемые жидким гелием (4,2 К) для космических приборов. Сообщалось о  $NEP = 1,4 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Плёночное исполнение позволяет изготавливать линейки и двухмерные матрицы.

В силу сказанного комплексирование аппаратур, работающих в разных диапазонах, является одной из основных тенденций при разработке

различных обнаруживающих и распознающих систем гражданского и военного назначения.

В статьях представлены краткие обзоры состояния работ по мультиспектральным системам, приведены характеристики базовых двухспектральных систем, перечислены проблемы и указаны перспективные направления исследований в этой области.

Отмечается, что в последние годы:

разработан унифицированный ряд многооконных модулей, предназначенных для использования в оптико-электронных системах (ОЭС) различного назначения;

созданы макетные образцы модулей матричных двухоконных фотоприёмных устройств (ФПУ) на 3–5 и 8–12 мкм на основе структур с квантовыми ямами (КЯ) и матричных микроболометрических приёмников излучения.

В наибольшей степени требованиям на разработку многооконных систем удовлетворяют фотоприёмники на основе квантово-размерных эффектов (КРЭ), физические структуры которых могут быть получены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющей формировать на подложке монокристаллические полупроводниковые слои с необходимыми свойствами вплоть до моноатомной толщины. В качестве технологического обеспечения для указанных работ могут быть использованы, например, результаты разработки гетеро-эпитаксиальных структур GaAs/AlGaAs и GaAs/CdHgTe методом МЛЭ. Такие структуры были названы матричными ИК приёмниками на квантово-размерных колодцах – матричными QWIP.

В матричном QWIP каждый слой представляет собой так называемый квантовый колодец, способный удерживать в плену электроны до тех пор, пока они не будут освобождены фотоном строго определённой частоты. Тогда этот электрон улавливается и направляется во внешнюю цепь считывающим слоем, формирующим изображение.

Именно технология, позволившая создать последовательно более 100 квантовых колодцев, обеспечила матричному QWIP широкий диапазон восприятия внутри инфракрасной области спектра, а в последующем и в области субмиллиметрового диапазона.

В 90-е годы XX века появились ТпВ на матричных QWIP с высокой технологичностью, воспроизводимостью, однородностью параметров по элементам. Типичный размер матриц: 256×256, 320×240, 320×256, 640×512 и 1024×1024 элемента. Чувствительность QWIP матриц довольно высока: у лучших приборов Noise equivalent temperature difference (NETD) даже ниже 10 мК, типовых – 20 мК, средних – 35 мК. В будущем есть возможность перейти от гибридных структур фокальных матриц к монолитным.

Промышленно-реализованные матричные QWIP иллюстрируются материалами спецификации фирмы FLIR (США) опубликованными ее подразделением INDIGO.

Таблица 1.6 – Материалы спецификации на QWIP матрицу 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	17,7x16,8	мм

Расширение области чувствительности этих фокальных фотоприемных матриц, первоначально названных оптоэлектронными приборами с QD (наноструктуры с так называемыми квантовыми точками – quantum dots) и получивших впоследствии название матричных QWIP, осуществлялось постепенно.

Принципы расширения чувствительности матричных QWIP были описаны в статьях российских исследователей и в исследовании зарубежных специалистов и заключаются в том, что варьированием размеров двух квантовых колодцев, расположенных на нанометровых расстояниях друг от друга, и управлением электрических смещений в каждом из колодцев, можно добиться взаимодействия удерживаемых электронов с фотонами разных областей спектра. На рисунке 1.16 показано области чувствительности двухспектрального матричного QWIP по патенту USP 20050258415.

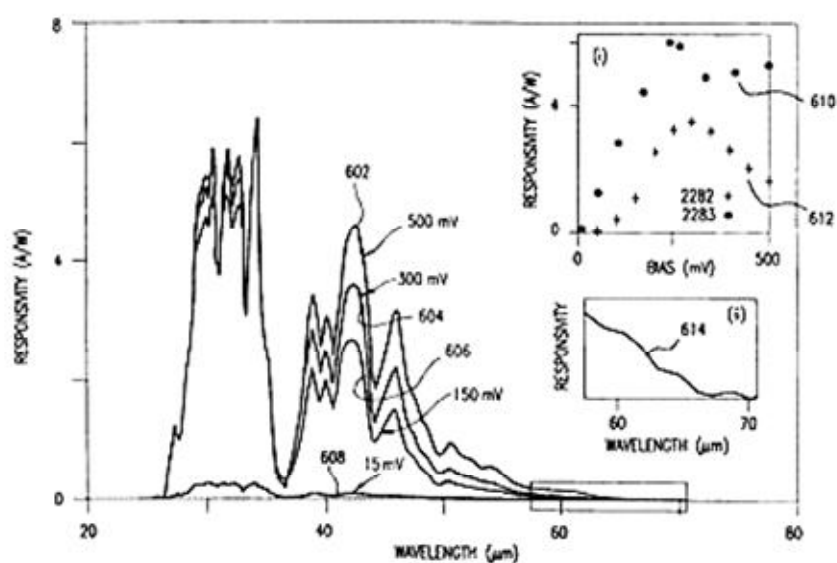


Рисунок 1.16 – Области чувствительности двухспектрального матричного QWIP по патенту USP 20050258415, 24 ноября, 2005 [54]

В результате последних разработок в ГОИ подошли к построению тепловизионных систем третьего поколения и выработали технологические и конструктивные решения по построению комплексированных систем широкой области спектра.

### 1.7.1 Расчёты коэффициента эффективности в зависимости от количества элементов приемников

В настоящем разделе рассматриваются результаты расчёта сравнительных графиков зависимости коэффициента эффективности от количества элементов приёмников на материалах GeHg, CdHgTe, PbSe, матричных QWIP и матричных микроболометров, а также сравнительных графиков зависимости количества необходимых пикселей от требуемого разрешения (пространственной частоты).

В каждом классе приёмников существуют многочисленные группы, различающиеся типом материала, конфигурацией и общим числом элементов, рабочей температурой и типом охладителя и т.д. Описанию типов приёмников и их характеристик посвящено значительное число работ и справочной литературы [15,16], сложилась общепринятая физически корректная система описания свойств и характеристик чувствительных элементов приёмников, позволяющая разработчикам ИК систем проводить расчёт и моделирование приборов. Вместе с тем, в классификации собственно ИК приборов, особенно тепловизионных, такая устойчивая система до настоящего времени отсутствует. На основе статьи [17] Д.И. Тодоровым была разработана программа расчета для проведения анализа материалов ИК приемников, наиболее предпочтительных для решения задач технического задания.

В результате исследований получены следующие данные, характеризующие целесообразность использования определённого типа приёмника. Пусть необходимо создать ТпВ со следующими параметрами: мгновенные поля зрения по вертикали и горизонтали  $\Delta_h = \Delta_v = 1 \cdot 10^{-4}$  рад; NETD = 0,1 К; минимальный наблюдаемый пространственный период  $2 \cdot 10^{-4}$  рад; угловое поле зрения  $\omega = 3 \times 3$  угл. град<sup>2</sup>; угловая скорость панорамирования (ведётся только по горизонтали)  $\beta = 0.1$  рад/с; время формирования кадра  $\tau_{\text{кадра}} = 30 \cdot 10^{-3}$  с;  $\left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \mu_{\text{онм}} \approx 1$ ; рабочая область спектра – в окне прозрачности атмосферы 7-15 мкм. Тогда, пользуясь формулами из статьи И.М. Фроимсона, можно найти соответствующий этим параметрам коэффициент эффективности приёмника:

$$\Phi = \frac{\frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi}\right)} \cdot \sqrt{S}}{\text{NETD} \cdot \sqrt{\Delta_h \cdot \Delta_v} \cdot \sqrt{\tau_{\text{кадра}}}} \approx 47485, K^{-1} \cdot c^{-1/2}, \quad (1.5)$$

Зная параметры приёмника, можно рассчитать число элементов его матрицы, необходимое для получения заданных параметров:

$$\sqrt{m \cdot n} = \Phi \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{1 + \tau_i^2 \cdot \left( \frac{2\pi\beta}{\Psi} \right)^2}}{A \cdot \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{d}{dT} \left( \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \right) \cdot D^*(\lambda) d\lambda} \quad (1.6)$$

Если взять в качестве приёмного устройства матрицу из GeHg с размером элемента  $\sqrt{A} = 0,004 \text{ см}$ , постоянной времени  $\tau_i = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$  и диапазоном  $\lambda = 7 \dots 15 \mu\text{м}$  при температуре наблюдаемых объектов 300 К, то получим, что необходимое число пикселей равно  $18 \times 18$ . Для матричного QWIP с такой же площадью элемента,  $\tau_i = 10 \cdot 10^{-6} \text{ с}$  и  $\lambda = 7 \dots 11 \text{ мкм}$  понадобится  $61 \times 61$  пикселей. Для КРТ приёмников ( $\tau_i = 100 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ ), в зависимости от размера чувствительного элемента, понадобится  $15 \times 15$  ( $\sqrt{S} = 0.004 \text{ мкм}$ ,  $\lambda = 5 \dots 15 \text{ мкм}$ ), или  $18 \times 18$  ( $\sqrt{S} = 0.0035 \text{ мкм}$ ,  $\lambda = 8 \dots 10,5 \text{ мкм}$ ), или  $21 \times 21$  ( $\sqrt{S} = 0.003 \text{ мкм}$ ,  $\lambda = 8 \dots 10,5 \text{ мкм}$ ) пикселей. Постановка этих исследований базируется на статье [17]. Обнаружительные способности приёмников на GeHg, QWIP и КРТ взяты из графиков на рисунках 1.15 и 1.17.

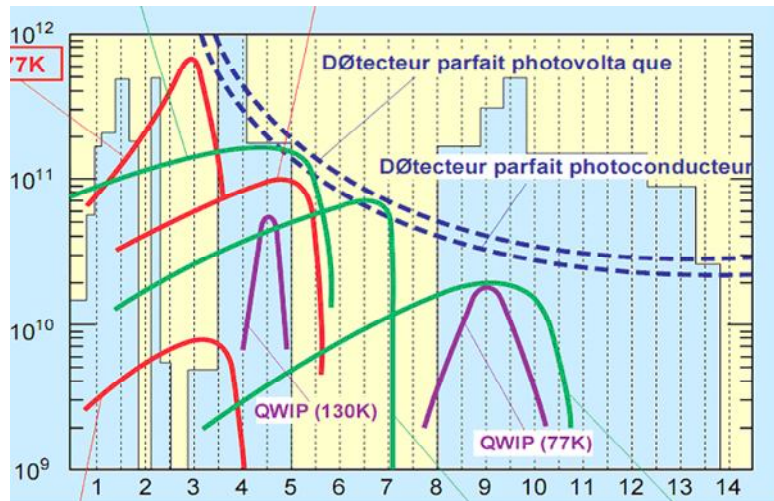


Рисунок 1.17 – Обнаружительные способности приёмников на GeHg, QWIP и КРТ

Графики зависимости количества пикселей от пространственной частоты при  $\Delta_h = \Delta_v = \frac{1}{2} \Psi = \frac{1}{2\theta}$  (в обратных радианах) с добавлением данных для приёмников из PbSe и микроболометрических приёмников, взятых из статьи И.М. Фроимсона [17], выглядят так (графики разбиты на



три пары, в каждой сравниваются все указанные типы приёмников с одним из КРТ при малых частотах и все, кроме болометра – при больших ):

Графики зависимости количества пикселей от пространственной частоты для приёмника на основе твёрдого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с площадью в  $0,004 \text{ см}^2$  приведено на рисунке 1.18.

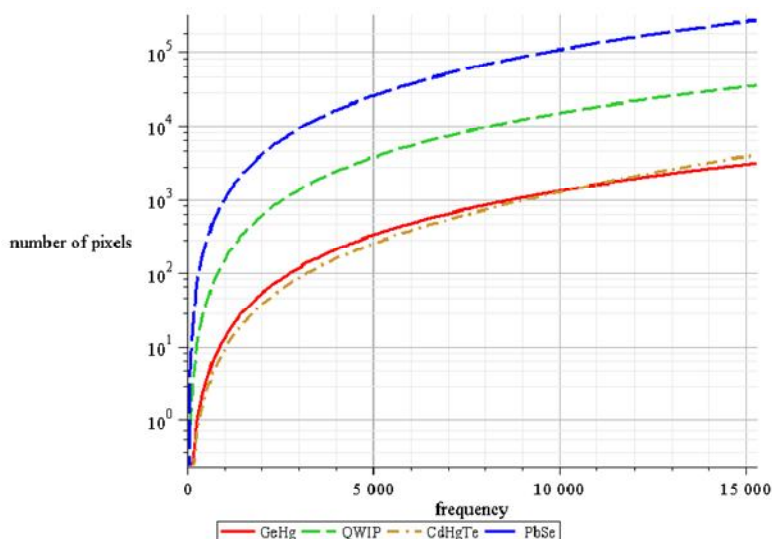


Рисунок 1.18 – Графики зависимости количества необходимых пикселей от пространственной частоты

Таким образом, на разных промежутках пространственных частот наиболее экономичными в смысле числа элементов оказываются разные типы приёмников.

Так выглядят графики зависимости коэффициента эффективности от количества элементов.

Графики зависимости коэффициента эффективности от количества элементов для приёмника КРТ с площадью в  $0,004 \text{ см}^2$  приведено на рисунке 1.19.

Подход к классификации приёмников излучения и ТпВ на их основе, предложенный автором статьи [17], является более объективным и практически полезным для выбора материалов приёмников ИК излучения, поскольку отражает реальные физические ограничения, присущие тому или иному типу приёмных устройств, а также позволяет оценить экономическую сторону решения технической задачи по созданию ТпВ требуемого уровня эффективности.

Анализируя полученные результаты расчёта, можно прийти к следующим выводам.

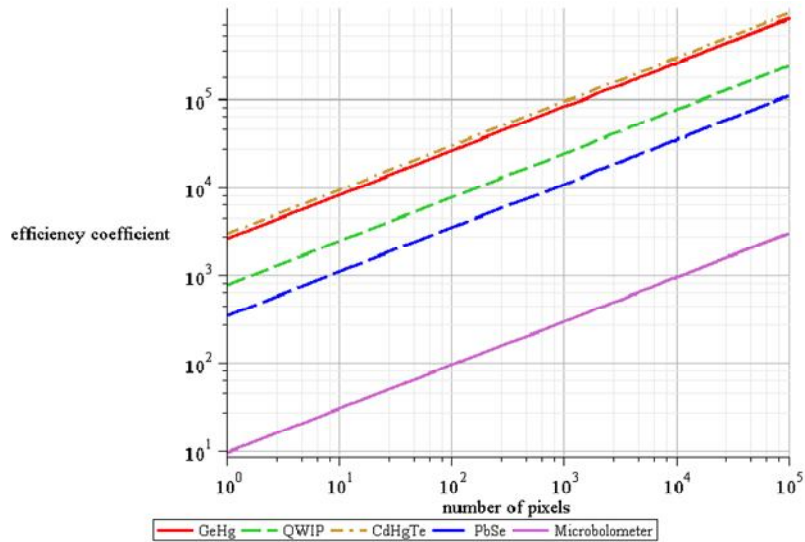


Рисунок 1.19 – Графики зависимости коэффициента эффективности от количества элементов

Среди охлаждаемых ИК приёмников излучения наиболее предпочтительными оказываются приёмники на основе GeHg и КРТ (CdHgTe). Однако для приёмников из GeHg требуется охлаждение до 27 К, в то время как приёмники на КРТ требуют охлаждения до 77 К.

### 1.7.2 Расчёт чувствительности канала ТпВ

Расчет чувствительности ТпВ – канала выполняется по формуле:

$$\Delta T = \frac{\rho \Phi_{n.e.l} \sqrt{A_{np} \Delta f_{ш}}}{4,625 \cdot 10^{-12} T^3 d_{эф} \delta^2 \ln \Delta \lambda_{эф} \sqrt{n}}, \quad (1.7)$$

где  $\rho$  – отношение сигнал/шум;  $\Phi_{п.е.л} = 1/D_{\lambda}^*$  – спектральный порог чувствительности приёмника излучения, Вт·см·1·Гц·1/2;  $D_{\lambda}^*$  – удельная обнаружительная способность приёмника излучения в максимуме его спектральной характеристики, определённая на электрической частоте, при которой спектр напряжения шума приведён к единице, см·Гц·1/2·Вт·1;  $A_{np}$  – площадь приемника излучения, у которого размеры по горизонтали и вертикали равны, см<sup>2</sup>;  $\Delta f_{ш}$  – эквивалентная шумовая полоса усилительного тракта, Гц;  $T$  – температура фона, К;  $d_{эф}$  – эффективный диаметр входного зрачка оптической системы, см;  $\delta$  – мгновенный угол поля зрения ТпВ, рад;  $n$  – количество приёмников, работающих в режиме задержки и накопления (ВЗН);  $\lambda_{эф}$  – эффективная относительная спектральная полоса пропускания приёмников;

$$\Delta \ln \lambda_{эф} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) S_{отн}(\lambda) \tau_{атм}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) d\lambda / \lambda ; \quad (1.8)$$

$\phi(\lambda)$  – относительная спектральная характеристика потока излучения объекта (например, водной поверхности);  $S_{отн}(\lambda)$  – относительная спектральная характеристика чувствительности приёмника излучения;

Для измерения  $\Delta T$  в лабораторных условиях используется четырехштриховая мира, образующая квадрат. Отношение длины штриха к его ширине (формат) – 7 : 1. Вводится также некоторый показатель  $\kappa_{сл}$  – уровень сложности решаемой задачи.

Если цель отлична по формату от миры (7 : 1), то для коррекции по формату вводится множитель  $\sqrt{\varepsilon/7}$ , где  $\varepsilon$  – отношение длины к ширине отдельно разрешаемых штрихов эквивалентной миры, которая замещает цель в пределах прямоугольного контура. Для решения задачи обнаружения показатель  $\kappa_{сл}$  принимается равным 1, при опознавании  $\kappa_{сл}=4$ .

Разность температур  $\Delta T$  между целью и фоном (кажущаяся разность температур) будет меньше из-за ослабления излучения в атмосфере  $\Delta T \cdot \tau_{атм}$ .

Регистрируемая ТпВ разность температур может быть аппроксимирована в виде  $\delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-\beta_{сист} k_{сл}}$ , где  $\beta_{сист}$  – коэффициент приборного ослабления;  $\nu$  - пространственная частота, период/мрад;  $\delta T_0$  – точка пересечения кривой спада облучения с осью  $y$  (характеризует чувствительность прибора в целом). При отношении сигнал/шум = 1 (50% вероятность решения задачи) дальность действия системы:

$$R = \frac{\ln \frac{\Delta T \sqrt{\varepsilon/7}}{\delta T_0}}{\beta_{атм} + \frac{k_{сл}}{S} \beta_{сист}}, \quad (1.9)$$

где  $S$  – размер цели, м;  $\beta_{атм}$  – коэффициент ослабления атмосферой;  
 $\nu = \frac{k_{н\bar{e}}}{S} R$ .

Таким образом, для расчёта дальности действия используются следующие характеристики:

характеристики ТпВ;

показатель уровня сложности задачи с числом пар линий, укладываемых на минимальный размер объекта;

параметры целей;

атмосферные условия.

Уточнённая дальность действия с учётом вероятности обнаружения:

$$R_s = \frac{\ln \left[ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta T \sqrt{\varepsilon/7}}{\delta T} \right]}{\beta_{атм} + \frac{k_{сл}}{S} \beta_{сист}}. \quad (1.10)$$

В соответствии с приведёнными соотношениями построена функция обнаружения ТпВ для нахождения дальности по тепловому контрасту квадратных объектов.

Результаты расчёта для МДВ = 20 км,  $\mu = 1$ ,  $\rho = 3,2$ ,  $A_1 = 0,1 \text{ м}^2$ ,  $A_2 = 1 \text{ м}^2$ ,  $A_3 = 10 \text{ м}^2$ ,  $A_4 = 100 \text{ м}^2$  приведены на рис. 1.20.

Как видно из приведённых графиков, возможность обнаружения объектов на дистанции, равной МДВ, по ИК каналу ТпВ для целей с различными площадями достигается при различных превышениях температуры объектов  $\Delta T$  над окружающим фоном.

Так, при МДВ = 20 км:

- для целей  $A_4$  с площадью  $100 \text{ м}^2$   $\Delta T = 1,78 \text{ К}$ ;
- для целей  $A_3$  с площадью  $10 \text{ м}^2$   $\Delta T = 17,8 \text{ К}$ ;
- для целей  $A_2$  с площадью  $1 \text{ м}^2$   $\Delta T = 178 \text{ К}$ .

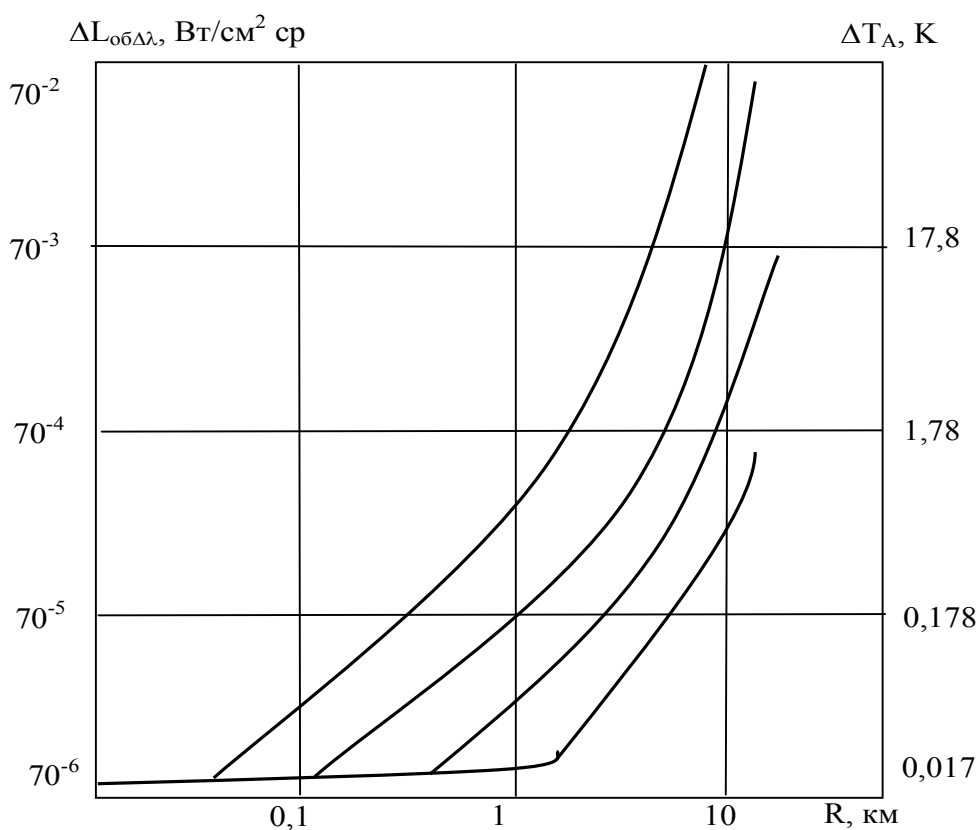


Рисунок 1.20 – Функция обнаружения ТпВ для нахождения дальности по тепловому контрасту квадратных объектов

### 1.7.3 Выбор спектральных диапазонов в неблагоприятных условиях наблюдения

Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения приведены в таблице 1.7.

Таблица 1.7 – Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения

Видимый свет	3 ÷ 5 мкм	8 ÷ 12 мкм
1,0 (без тумана)	1,0	1,0
0,5 (в тумане)	0,67	0,97
0,1	0,36	0,56
0,01	0,01	0,22

Примечание Материалы семинара по методам и средствам морской разведки, состоявшегося в Лондоне 23 - 25 февраля 1998г

Таким образом, когда атмосфера пропускает только 1% видимого света, количество пропускаемого ИК излучения в диапазоне 8-12мкм составляет 22%.

В процессе морских испытаний тепловизионного канала, установленного на платформе прицеливания 9LV – 200 – Швеция (фирмы Philips – Швеция, Филипс USFA Голландия, Mullarg LTD – Великобритания (приёмник)) при  $МДВ \geq 20$  км получена дальность обнаружения цели (имитатор – чёрный сосуд диаметром 40 см, заполненный водой, с нагревателем и датчиком температуры, расположенный на буксируемой платформе на высоте 3 м)–7км. Даже при плохой метеовидимости ( $МДВ \approx 2-3$  км) при  $\Delta T = 30$  К цель обнаруживалась на дальности  $L > 4$  км.

Исходя из приведённых соображений, надо полагать, что наиболее приемлемым диапазоном в телевизионном канале является окно прозрачности 8-12 мкм. Использование указанного диапазона вместо диапазона 3-5 мкм диктуется также тем, что в нем примерно в 10 раз меньше помехи от излучения неоднородностей небосвода, переотраженного от взволнованной морской поверхности. Это особенно важно при захвате и сопровождении низколетящих целей

Перспективы повышения эффективности современных систем наблюдения связаны с обеспечением их работоспособности с учётом требований всепогодности, помехозащищённости, независимости от условий естественного освещения и других факторов. Одним из путей решения этой задачи является создание многоканальных комплексированных систем, работающих в широком спектральном диапазоне.

В частности, эффективному применению ТПС 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.

Интегрирование 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.

### 1.8 Анализ состояния с разработкой топологии болометрических приёмников

В настоящее время разработкой микроболометрических матриц (МБМ) и тепловизионных устройств на их основе занимаются ведущие фирмы США, Европы, Японии, Кореи, Австралии. МБМ непрерывно совершенствуются [23, 24, 25, 26]. Данные, приведённые в табл. 1.5 и 1.6, иллюстрируют прогресс, который был достигнут за последние год-полтора. В табл. 1.5 и 1.6 даны примеры зарубежных разработок МБМ и модулей на их основе по состоянию на апрель 2008 г.

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 ведущейся разработке матрицы с числом элементов разложения 640×480).

Таблица 1.8 – Зарубежные микроболометрические матрицы (модули)

Тип	Разработчик	Формат	Материал	Шаг, мкм	NETD(f/1), мК
AE-189	Raytheon (США)	320×240	VOx	50	<90
SB-151				50	<20
SB-212				25	<50
U4000	Boeing (США)	320×240	VOx	50	~30
В разработке	Lockheed Martin (США)	640×480	VOx(?)	28	~(60-100)
—		15×31		48	<100
В разработке		120×160			<100 (оценка)
—	LETI LIR (Франция)	256×64	$\alpha$ -Si	47	<50
—	FOA (Швеция) — DSTO (Австралия)	320×240	$\alpha$ -Si:N	40	<100 (оценка)
—	Advanced Tech. R&DC (Япония)	320×240	Si (p-n-диоды)	40	200
В разработке	Daewoo (Корея)	256×256	Ti		
—	Honeywell (США)	240×336	VOx	50	<50
—	Lockheed Martin (США)	327×245	VOx(?)	46	<100
U3000	Boeing (США)	320×240	VOx	50	~30
—	LETI LIR (Франция)	256×64	$\alpha$ -Si	47	90
—	Japan Defense Agency (Япония)	256×256	VO2	50	150

Расширяется география разработчиков. При этом большинство производителей 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. ИК преобразователь в этом случае полностью базируется на кремниевой технологии — основной технологии современной микроэлектроники. Большой интерес представляет сообщение японских разработчиков из 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. Это в принципе позволяет в несколько раз повысить чувствительность МБМ за счёт большей величины температурного коэффициента отклика микроболометрического элемента (до  $7 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ ).

Таблица 1.9 – Основные параметры фокальных ИК матриц для тепловизионных приборов российского производства

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра,	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура,	Темп. чувствит. (NETD) мК
РФ, ГУП “НПО “Орион”	KPT	8-10,5	128×128	35×35	80	
РФ, ГУП “НПО “Орион”	KPT	8-10,5	384×288	35×35	80	
РФ, ЗАО “Матричные технологии”	PtSi	3-5	128×128 256×256 512×512	27×27 25×25 14×14	80	30
РФ, ГУП НПО “Орион”	InSb	3-5	128×128	50×50	80	
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbS	1,5-4	128×128	60×60	80	20
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSe	2-6	256×256	60×60	80	30
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSnTe	6-14	256×256	60×60	25	5

Общая сравнительная таблица по матричным приёмникам отечественного и зарубежного производства приводится ниже (таблица 1.10).

Для ТПС со средними и большими дальностями обнаружения, предназначенных для военных целей и задач охраны особо важных объектов, как правило, применяются фотоприёмные системы с охлаждением рабочего тела приёмников излучения, а также отдельных элементов оптического тракта (диафрагмы, светофильтры, градуированные элементы) до соответствующих температур. Наибольшее распространение в последние годы получили системы, работающие по циклу Стирлинга. В таблицах 1.11 и 1.12 приведены параметры систем охлаждения.

Таблица 1.10 – Основные параметры матричных приёмников отечественного и зарубежного производства

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура, К	Темпер. чувствит. (NETD), мК
США, Raytheon	QWIP	8-12	256×256	28×28	70	15
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	QWIP	8-10	640×512	24×24	70	25
США, Raytheon	QWIP	8-12	640×486	18×18	70	30
США, JPL's Infrared Focal Plane Array Technology Group, Indigo Systems Corporation, NASA	QWIP	8-10	640×512	24×24	-208 °C	40
США, Center for Space Microelectronics Technology, Jet Propulsion Laboratory, NASA	QWIP	10-15,4	1024×1024	23×23	35	55
США, Jet Propulsion Laboratory, Indigo Systems Corporation, NASA	QWIP	3,5-6 8,5-10 10-2 13-15	640×512	23×23	48	40
Франция, LIR	KPT	3-5	640×480	23×23	77	14
Германия, AEG Infrared Module GmbH	KPT	8-10	256×256	40×40	77	20
США, Rockwell	KPT	8-12	256×256	40×40	77	
США, Hughes, SBRS	KPT	8,5-11	256×256	30×30	80	65
США, Hughes, SBRS	KPT	3-4,5	128×128	40×40	300	50
США, Hughes, SBRS	KPT	3-4,5	256×256	30×30	300	65
РФ, ГУП "НПО "Орион"	KPT	8-10,5	128×128	35×35	80	
РФ, ГУП "НПО "Орион"	KPT	8-10,5	384×288	35×35	80	
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3-5	256×256	24×24	75	75



США, Hughes	PtSi	3-5	256×256	30×30	40	
США, Boeing Comp.	PtSi	1-5	324×240	30×30	75	60
США, Boeing Comp.	PtSi	1-5	486×640	24×24	75	70
РФ, ЗАО “Матричные технологии”	PtSi	3-5	128×128 256×256 512×512	27×27 25×25 14×14	80	30
США, Cincinnati Electronics Corp.	InSb	3-5	256×256	30×30	77	40
США, SBRC	InSb	3-5	256×256	30×30	50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	128×128	40×40	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	256×256	30×30	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	480×640	20×20	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	512×512	27×27	35	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	1024×1024	27×27	30 – 50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	2048×2048	27×27	30 – 50	
США, FLIR Systems	InSb	3.4-5.1	640×512	15×15	Замкнутый цикл Стерлинга	< 25
РФ, ГУП НПО “Орион”	InSb	3-5	128×128	50×50	80	
Франция, LIR	Si:Ga	5-17	128×192	75×75	10	
Япония, Mitsubishi Electric Co.	Ge:Si/Si (барьер Шоттки)	8-12	512×512	34×34	43	80
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbS	1,5-4	128×128	60×60	80	20
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSe	2-6	256×256	60×60	80	30
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSnTe	6-14	256×256	60×60	25	5
Франция, LIR	МБ	8-14	256×64	47×47	300	50
США, Raytheon	МБ	8-14	320×236	50×50	300	100
США, Indigo Systems Corp.	МБ	8-14	320×240	50×50	300	28
США, Lockheed Techsystems	МБ	8-12	640×480	28×28	300	100
США, Lockheed Techsystems	МБ	8-14	320×240	48×48	300	50
США, Lockheed Martin IR Imaging Systems	МБ	8-14	327×245	25×25	300	100
США, Raytheon	МБ	8-14	320×240	50×50	300	20
Великобритания, MES	ППИ	8-12	384×288	40×40	300	130
Великобритания, MES	ППИ	8-12	256×128	56×56	300	90

Примечание: ППИ – пироэлектрический приемник излучения, МБ – микроболометр

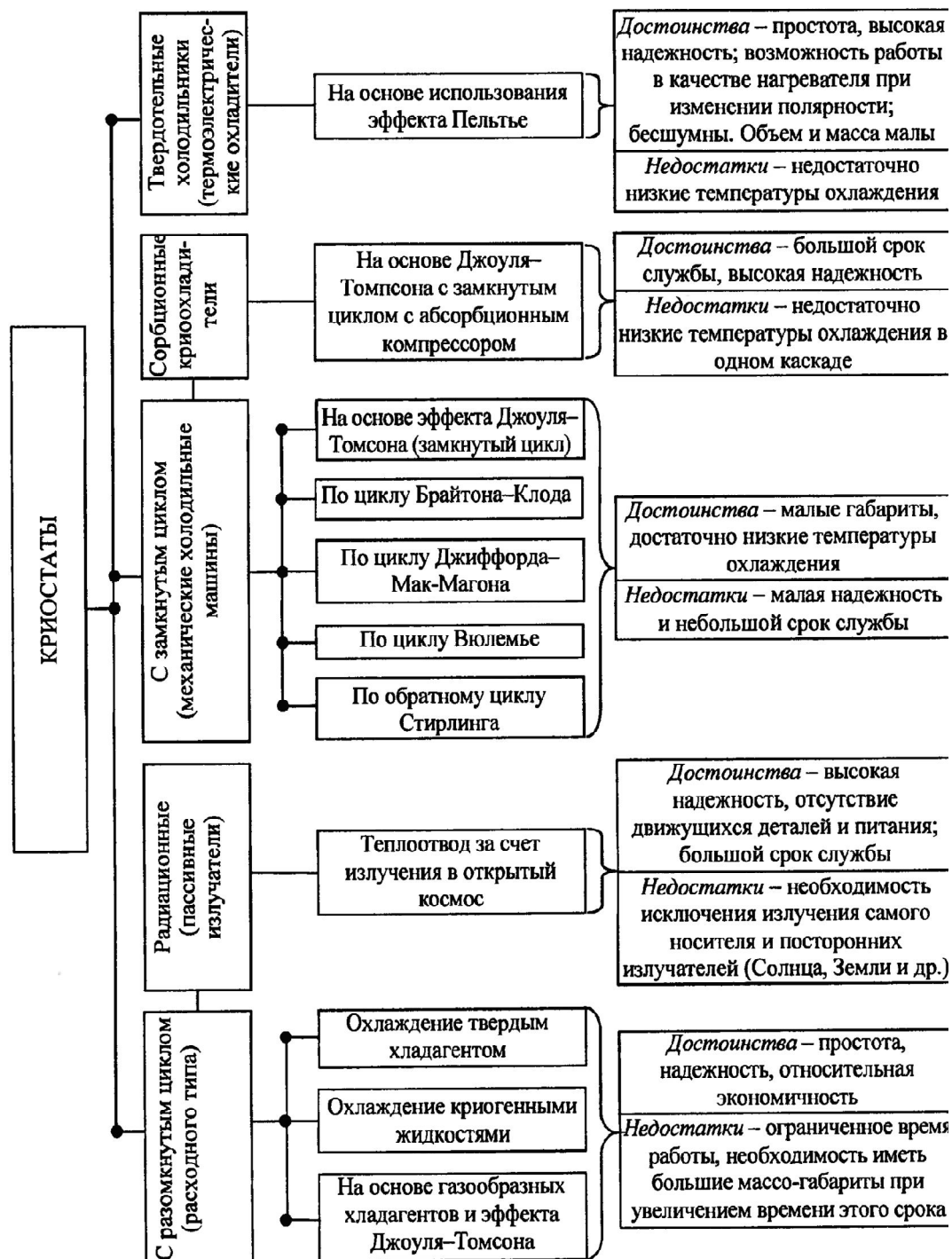


Рисунок 1.21 – Общая классификация систем охлаждения приёмников излучения [4]

Таблица 1.11 – Характеристики систем охлаждения [4]

№ п/п	Наименование модели, тип криостата	Фирма-производитель	Холодопроизводительность, Вт, при достижении 77К для температуры окружающей среды 23 °С	Время выхода на режим (от 300 до 77 К), мин	Тепловая масса при охлаждении от 300 до 77 К (80 К)
1	НМ 7060-196, Сплит-Стирлинг, линейный привод	«Raytheon»	0,45	<6,0	250
2	НМ 7050-196, Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	0,60	<3,0	250
3	НМ 7050-514, Сплит-Стирлинг, линейный привод	-II-	1,50	<10	1440
4	НМ 7052-260S, Сплит-Стирлинг, линейный привод	-II-	0,90	<2,5	250
5	SL020, IDDCA**	«AEG Infrarot Module GmbH»	0,2	<4,0	
6	SL 100, Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,5	12,0	1440
7	SL200 Сплит-Стирлинг, линейный привод	-II-	2,5	7,0	1700
8	B500C Сплит-Стирлинг, линейный привод	«CMC Electronics Cincinnati»	0,15...0,5	<5,0	250
9	B 1000 Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,0	<10,0	1440
10	B 5000 Сплит-Стирлинг, линейный привод	-II-	5,0	<4,0	1440
				<14,0	8000
11	P/N: 327105 Сплит-Стирлинг, линейный привод	«Litton Life Support»	0,6	<10,0	450
12	P/N:3271047 Сплит-Стирлинг, линейный привод	Та же	1,0	<13,0	1440

Примечание:

\* А – низкий уровень вибрации; В – низкий акустический шум; С – предусмотрена возможность регулирования; F – наличие фильтров от радиочастотных и электромагнитных помех.

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

Таблица 1.12 – Характеристики систем охлаждения работающих по замкнутому циклу Стирлинга

Потребляемая мощность, Вт	Масса, кг	Выходная вибрация	Минимальная наработка на отказ, ч	Диапазон температур окружающей среды, °С	Примечание
<18	0,5	<0,123	>4000	-40...+60	Напряжение питания $11,0 \pm 0,5$ В постоянного тока, Л, В, С, Е*
60	1,2	<0,205	>4000	-54...+71	То же
60	1,3	<0,205	>4000	-54...+71	Напряжение питания $11,0 \pm 0,5$ В постоянного тока, А, В, С, Е*
60	1,2	<0,205	>5000	-54...+71	Напряжение питания $3,1 \pm 0,5$ В постоянного тока, А, В, С, D*
15	0,6 компрессора		>6000	– ...+71	Напряжение питания 17-32 В переменного тока; А, В, С, F*
55	2,1		>6000	– ...+71	Напряжение питания 17-32 В переменного тока; А, В, D, F*
80	3,5		>6000	– ...+71	Напряжение питания 17-32 В переменного тока; А, В, E, F*
22	0,45	0,08	>4000	-54...+71	
60	1,64	0,205	>4000	-54...+71	
120	4,1	0,307	>4000		
35	1,0	<0,123	>4000	-40...+71	Напряжение питания 17-32 В переменного тока, нестабилизированного; А, В, D/E, F*
60	1,8	<0,205	>4000	-54...+71	Напряжение питания 17-32 В переменного тока, нестабилизированного; А, В, D, F*

Примечание:

\* А – низкий уровень вибрации; В – низкий акустический шум; С – предусмотрена возможность регулирования; F – наличие фильтров от радиочастотных и электромагнитных помех.

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

температуры; D и E- торцевое и боковое подключения соединительной трубки к корпусу компрессора;

## **2 Основы построения тепловизионных систем**

### **2.1 Общий принцип устройства тепловизоров**

Инфракрасное излучение концентрируется системой специальных линз и попадает на фотоприёмник, который избирательно чувствителен к определённой длине волны инфракрасного спектра. Попадающее на него излучение приводит к изменению электрических свойств фотоприёмника, что регистрируется и усиливается электронной схемой. Полученный сигнал подвергается цифровой обработке, и это значение передаётся на блок отображения информации. Блок отображения информации имеет цветовую палитру, в которой каждому значению сигнала присваивается определённый цвет. После этого на мониторе появляется точка, цвет которой соответствует численному значению инфракрасного излучения, которое попало на фотоприёмник. Сканирующая система (зеркала или полупроводниковая матрица) проводит последовательный обход всех точек в пределах поля зрения прибора, и в результате получается видимая картина инфракрасного излучения объекта. Таким образом, на мониторе ТпВ мы видим значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения ТпВ, отображённые согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

### **2.2 Типовые схемы тепловизионных систем 0-го, 1-го и 2-го поколений**

Как уже отмечалось, ТПС от нулевого до 2-го поколения являются сканирующими системами.

Сканирующие системы тепловидения используют различные типы сканирования:

- одноэлементное,
- параллельное,
- последовательное.

Сканирование может проводиться как в пространстве предметов (объектов), так и их изображений. Различаются типы сканирования по траекториям сканирования, закону сканирования и ряду других признаков.

#### **2.2.1 Системы сканирования для ИК радиометров-тепловизоров «замороженного» изображения**

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

При выборе схемы кругового сканирования с построчной круговой разверткой визирного луча в сканирующем ИК радиометре, предназначенном для получения карт распределения поля яркостной

температуры, следует учитывать ряд требований, которые могут быть сформулированы следующим образом.

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

Как указывалось выше, для реализации возможности повышения чувствительности за счет применения последовательного накопления сигналов многоэлементного приемника излучения, изображение приемника в пространстве предметов должно в процессе сканирования сохранять неизменной свою ориентацию относительно траектории сканирования.

Обозначения на рис. 3.1:  $\delta$  - мгновенный угол поля зрения;  $\varphi$  - угол визирования;  $\psi$  - 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;  $F$  - частота сканирования;  $K$  - коэффициент наложения строк по кадру (при  $K = 1$  – беспропускной обзор);  $n_x$  - число элементов разложения в строке;  $\tau_{min}$  - минимальная длительность импульса от элемента разложения;  $f_v$  - верхняя граничная частота требуемой полосы пропускания;  $W$  - скорость полёта носителя;  $H$  - высота полёта носителя;

$$F = K \frac{W \cos^2 \varphi}{H \delta}, \quad a_x = \frac{H \delta}{\cos \varphi}, \quad a_y = \frac{H \delta}{\cos \varphi}, \quad n_x = \frac{\psi}{\delta} \sin \varphi$$

$$\tau_{min} = \frac{1}{F} = \frac{\delta}{F 2 \pi \sin \varphi}, \quad f_s = \frac{\pi F}{\delta} \sin \varphi;$$

Необходимо обеспечить максимальный коэффициент использования развёртки, равный отношению длительности рабочего хода развёртки 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 морской 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 конструкции приёмного устройства ТпВ на носителе. Применение синхронного фильтра в усилительном тракте позволяет отказаться от условия непрерывности визирования морской

поверхности и допустить возможность пересечения визирным лучом элементов конструкции приёмного устройства во время нерабочего участка цикла сканирования. Это существенно расширяет выбор возможных схем и упрощает задачу конструирования приёмного устройства и размещения его на носителе.

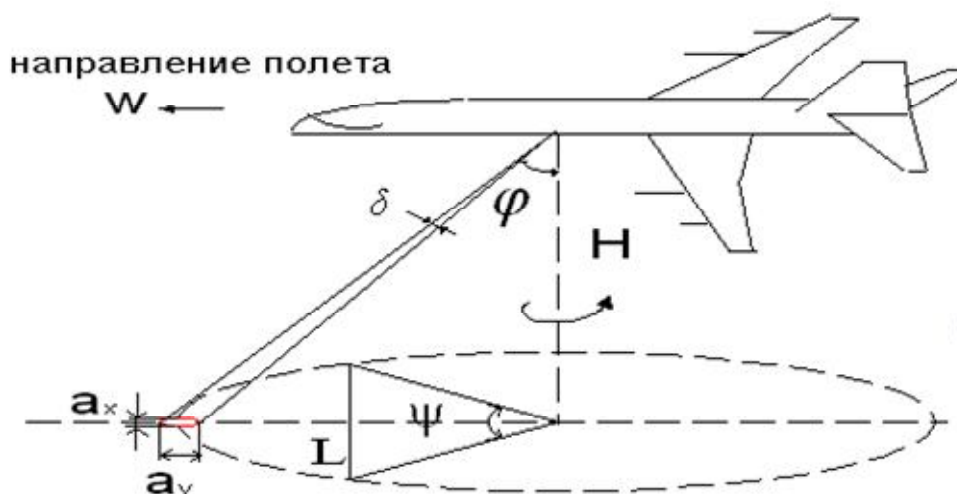


Рисунок 2.1 – Принцип действия и основные соотношения параметров радиометра кругового сканирования

Рассмотрим некоторые возможные варианты схем, обеспечивающих круговое сканирование.

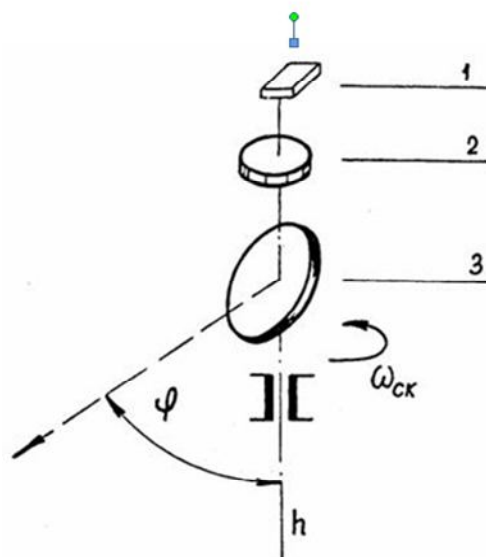


Рисунок 2.2 – Однозеркальная схема кругового сканирования

Однозеркальная схема кругового сканирования изображена на рис. 2.2 В данной схеме одноплощадочный приёмник излучения 1 проектируется объективом 2 через наклонное зеркало 3 на исследуемую поверхность. Проекция приёмника излучения совершает 2 оборота вокруг

своего центра за каждый цикл сканирования, осуществляемого при вращении зеркала вокруг оси, совмещённой с оптической осью объектива. На рис. 2.3 показаны дискретные положения эллипса проекции апертуры приёмного объектива на поверхность без учёта движения самолёта.

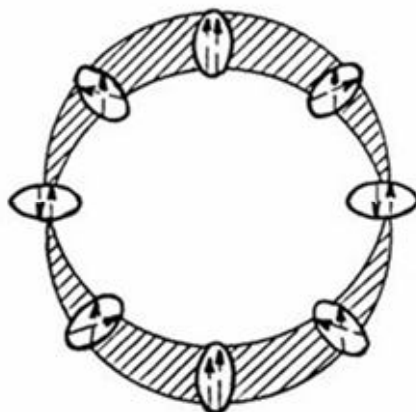


Рисунок 2.3 – Положение проекции визирного луча в плоскости предметов

Стрелкой показано положение проекции приёмника излучения. Проекция приёмника излучения в процессе сканирования деформируется, сжимаясь и растягиваясь по вертикальной и горизонтальной осям.

При повторении закона развёртки в системе записи, в случае применения одноэлементного приёмника излучения, искажения формы и вращение не играют роли, однако, применение многоэлементного приёмника в этой схеме затруднено из-за сложности обработки сигналов с учётом наложения строк. При сравнительно высоких скоростях сканирования (примерно 1500 об/мин) данная схема практически не позволяет реализовать возможность оперативного изменения угла визирования, так как любое изменение положения сканирующего зеркала приведёт к динамической разбалансировке сканирующего узла. Это является существенным недостатком схемы. Конструирование сканирующей системы, выполненной по однозеркальной схеме, существенно упрощается при введении синхронной фильтрации сигналов в усилительном тракте, так как в этом случае появляется возможность установки сканирующего зеркала на нижнюю опору. Габариты и вес приёмного устройства при использовании данной схемы получаются сравнительно небольшими (при диаметре входного зрачка 100 мм и скорости сканирования 1500 об/мин – около 25-30 кг).

Одним из недостатков однозеркальной схемы сканирования является необходимость сравнительно большого люка в корпусе самолёта. Размеры люка определяются расстоянием от вершины конуса визирных лучей до среза люка (контура фюзеляжа), а также величиной требуемого угла прокачки стабилизированной платформы, на которой установлено



приёмное устройство. Вершина конуса визирных лучей расположена в центре сканирующего зеркала. Для устранения влияния набегающего потока воздуха при движении самолёта приёмное устройство "утапливается" в корпусе самолёта. При этом вершина конуса визирных лучей поднимается, что и приводит к увеличению требуемых размеров люка.

Двухзеркальная схема кругового сканирования изображена на рис. 2.4. В этой схеме визирный луч разворачивается по окружности с помощью зеркал 3. Поскольку элементы оптической головки в этой схеме расположены выше вершины конуса визирных лучей, требуемый размер люка получится значительно меньшим. При двухзеркальной схеме сканирования изображение приёмника излучения на плоскости сканирования не вращается и остаётся при сканировании параллельным самому себе (пунктирная стрелка на рис. 3.3.), но при этом, также как в однозеркальной схеме, деформируется.

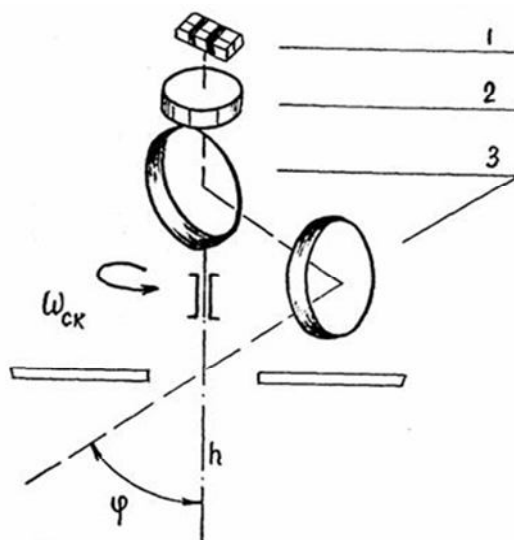


Рисунок 2.4 – Двухзеркальная схема кругового сканирования

Поскольку вращение изображения не происходит, возможно, применение приёмника с небольшим количеством площадок. В этом случае, при допустимых искажениях сигналов при работе в угле обзора до  $120^\circ$ , возможно использование мозаичного приёмника с количеством элементов  $2 \times 6 = 12$ .

Недостатком рассматриваемой схемы является практическая невозможность изменения угла визирования, а также сравнительно большой вес и габариты устройства (при диаметре входного зрачка 100 мм и скорости сканирования 1500 об/мин вес головки достигает 60-80 кг).

Двухзеркальная схема сканирования имеет модификацию, позволяющую производить изменение угла визирования в процессе

сканирования. Схема сканирования, обеспечивающая возможность наклона второго зеркала, представлена на рис. 2.5.

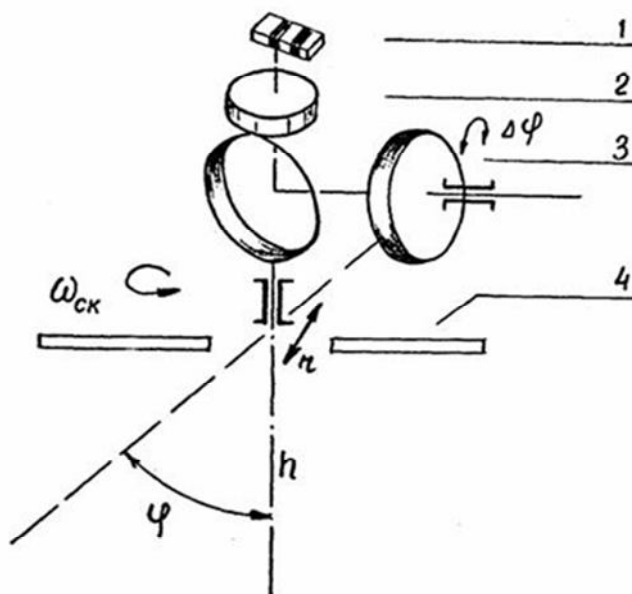


Рисунок 2.5 – Двухзеркальная схема кругового сканирования с переменным углом визирования

Здесь визирный луч от приёмника излучения 1 и объектива 2 попадает на двухзеркальный узел сканирования 3, вращающийся вокруг оси, совпадающей с оптической осью приёмного объектива. Второе зеркало имеет возможность качания вокруг экваториальной оси сканера. Плоскость второго зеркала может быть установлена под углом  $45^\circ$  к вертикали, при этом угол визирования будет равен 0 (режим "блока"). С поворотом второго зеркала на угол  $\varphi$  от этого положения, появляется наклон визирного луча на тот же угол к исследуемой поверхности. При этом визирный луч лежит в плоскости, нормальной по отношению к плоскости, по которой ведётся сканирование. При вращении системы зеркал, на коническое движение визирного луча накладывается перемещение конуса визирных лучей параллельно самому себе по окружности с радиусом, равным расстоянию между зеркалами. Поскольку этот радиус значительно меньше высоты полёта и меньше предела линейного разрешения на местности, добавочным перемещением конуса визирных лучей можно пренебречь. Недостатком схемы является трудность осуществления динамической балансировки вращающегося узла из-за наличия подвижного зеркала, а также необходимость передачи сигнала управления поворотом второго зеркала на вращающийся узел сканирования.

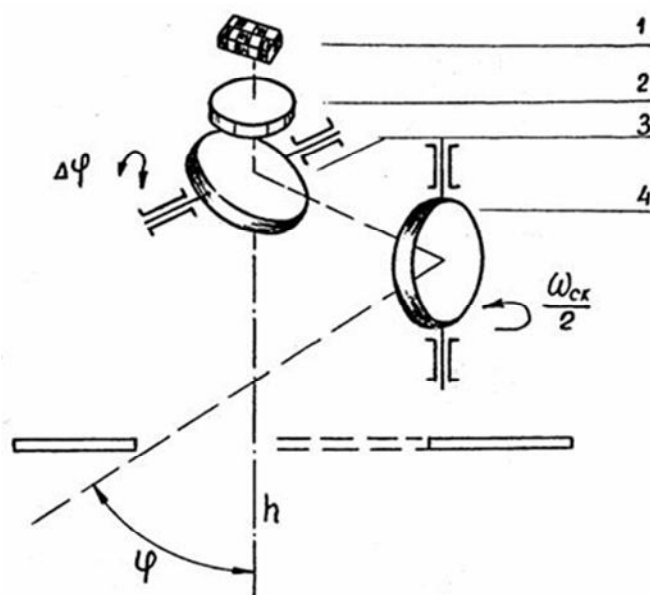


Рисунок 2.6 – Схема кругового сканирования с удвоением скорости визирного луча

Другая схема кругового сканирования изображена на рис. 2.6. Отличие от двухзеркальной схемы, показанной на рис. 2.4, состоит во введении зеркального аналога призмы Дове 3 между приёмным объективом 2 и сканирующим двухзеркальным узлом 4. При вращении аналога призмы Дове в ту же сторону, что и сканирующего узла, но с половинной скоростью, изображение приёмника излучения на местности ориентировано радиально и неподвижно относительно осей эллипса проекции апертуры на рис. 2.3, т.е. сохраняет в процессе сканирования ориентацию по отношению к траектории сканирования. Это позволяет использовать многоэлементный приёмник излучения и реализовать метод последовательного сканирования с накоплением сигнала. Недостатки схемы заключаются в сложности изменения угла визирования и больших весе и габаритах устройства.

Рассмотренные схемы обеспечивают выполнение условия непрерывности визирования исследуемой поверхности во время всего цикла развертки и, таким образом, не используют в полной мере преимуществ, которые появляются при введении синхронной фильтрации в усилительный тракт.

Перейдем к рассмотрению схем, которые могут быть реализованы только при использовании метода синхронной фильтрации сигналов, т.е. при снятии требований непрерывности визирования.

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 по сравнению со схемами рис. 2.4, 2.5 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. 2.7).

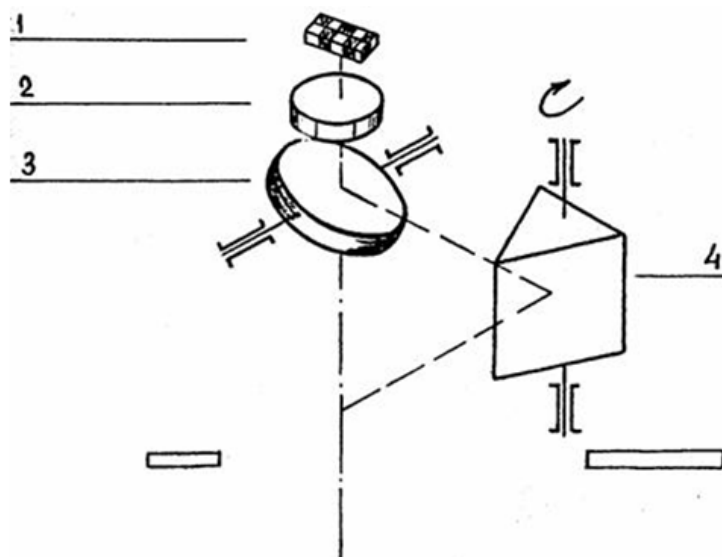


Рисунок 2.7 – Схема кругового сканирования с зеркальной призмой

Схема с зеркальной призмой позволяет, помимо уменьшения скорости вращения сканирующего узла, повысить КПД развёртки и получить некоторый выигрыш в чувствительности за счёт снижения при этом требуемой полосы пропускания усилительного тракта.

Сканирующие устройства, выполненные по схемам рис. 2.6-2.7, в наибольшей степени удовлетворяют требованиям, изложенным в начале данного пункта. Следует использовать вариант с удвоением скорости движения визирного луча с однокомпонентным сканером, выполненным в виде двустороннего зеркала (рис 2.7).

В ГОИ им С.И. Вавилова под научным руководством члена-корреспондента РАН М.М. Мирошникова [5] с 60-х годов прошлого столетия проводились последовательные разработки всех типов сканирующих тепловизоров. В результате этих разработок для применения в народном хозяйстве и медицине в промышленность были внедрены ТпВ «Янтарь-МТ», «Статор-1», «Вулкан», «Тайга-2», «Рубин-1» («Рубин-МТ»), «Радуга-2», «Радуга-МТ» [27]

Ниже приводятся отдельные сканирующие системы из цитированного сайта [27] и сайта ФГУП НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова» [28].

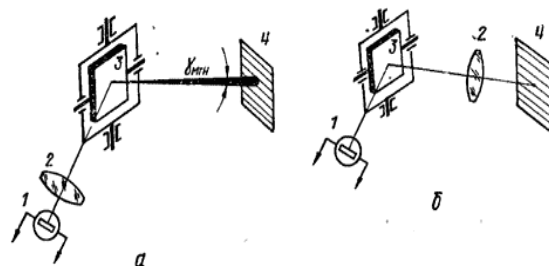
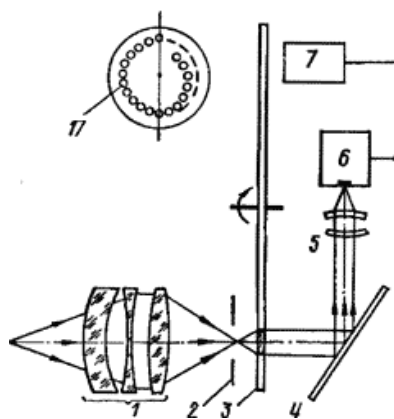
Для получения видимого изображения теплоизлучающего объекта в ТпВ с оптико-механическим сканированием осуществляют разложение

(развёртку) объекта на некоторое число элементарных площадок. Каждая такая площадка, называемая элементом разложения, является наименьшей деталью, которую может воспроизвести данная система.

В оптико-механических сканирующих устройствах сканирование производится путём изменения направления оптической оси прибора. При этом общее поле обзора последовательно анализируется мгновенным полем зрения оптической системы прибора.

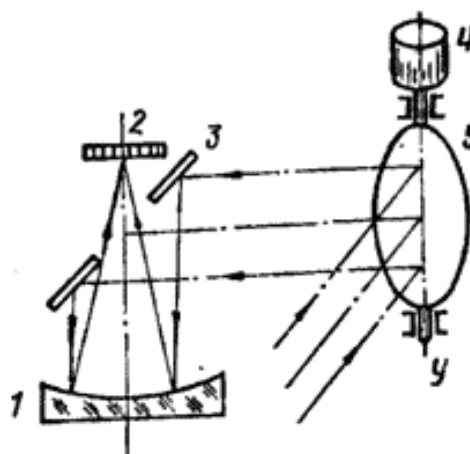
Траектории сканирования могут быть самыми разнообразными (спиральная, розеточная, прямоугольная, циклоидальная и др.). В таблице 2.1 приведены некоторые схемы сканирования визирных лучей тепловизоров отечественной и зарубежных разработок.

Таблица 2.1 – Характеристики систем охлаждения работающих по замкнутому циклу Стирлинга



Первые ТпВ, в которых для развёртки изображения использовался диск Нипкова из 45 линз, расположенных по спирали Архимеда. Из них 40 использовались собственно для сканирования, а 5 — для уменьшения скачка видеосигнала во время обратного хода сканирования и возмущающих переходных процессов в тракте видеосигнала. В первых образцах ТпВ использовался одноэлементный заливной приёмник излучения, и число строк удваивалось с 40 до 80 зеркалом 4, колеблющимся по кадру на шаг одной строки с частотой 25 Гц. Впоследствии был использован двухэлементный (0,7×0,7 мм) приёмник из InSb, качание зеркала исключено, и удвоение числа строк получалось поочередным опросом площадок и воспроизведением двух подкадров,

Сканирующие устройства с колеблющимся зеркалом, размещенным в параллельном (а) или в сходящемся (б) пучке лучей: 1 – приёмник излучения; 2 – объектив; 3 – сканирующее зеркало; 4 – поле обзора.



образующих полные кадры, на ЭЛТ с частотой следования 12,5 Гц.

1 – объектив; 2 – полевая диафрагма; 3 – диск с 45 телескопическими линзами; 4 – зеркало; 5 – конденсор; 6 – приёмник излучения; 7 – оптронный датчик кадров и строчной синхронизации.

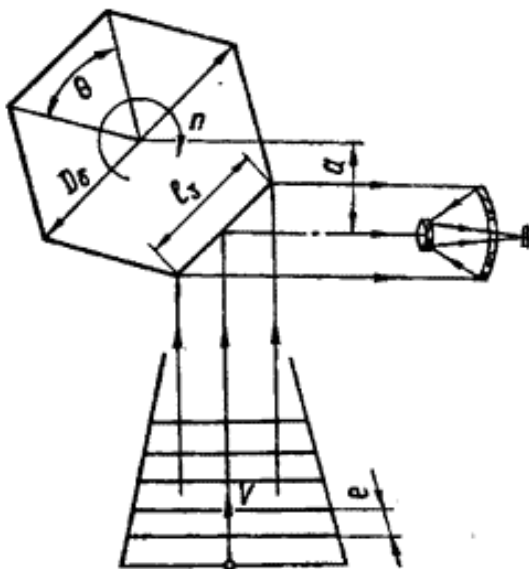
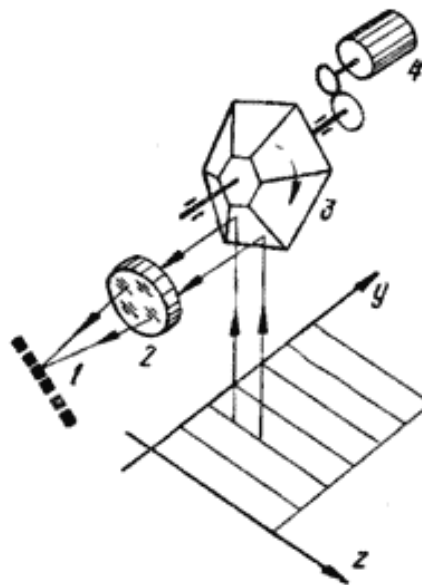


Схема сканирующего устройства с вращающимся зеркальным барабаном

Сканирующее устройство с многоэлементным приёмником излучения и расположением сканирующего зеркала в параллельном пучке лучей: 1 – объектив; 2 – приёмник излучения; 3 – отражательное зеркало; 4 – электромагнит; 5 – сканирующее плоское зеркало.



Сканирующее устройство с вращающейся усеченной зеркальной пирамидой: 1 – многоэлементный (линейный) приёмник излучения; 2 – объектив; 3 – зеркальная пирамида; 4 – двигатель, вращающий пирамиду.

## 2.2.2 Тракты обработки сигналов тепловизоров первых поколений [27]

Одним из первых в нашей стране был выпущен опытной партией ТпВ «Филин», где в качестве приёмника излучения использовался неохлаждаемый болометр. Время развёртки по кадру исчислялось минутами, и регистрация термограммы велась на фотоплёнку. Функциональная схема, используемая в этом ТпВ, была применена и при создании последующей модели, получившей наименование «Рубин-МТ». Первоначально этот тепловизор имел функциональную схему, изображённую на рисунке 2.8.

Конструктивно он был выполнен из двух блоков: оптической головки, устанавливаемой на штативе, и электронного блока на радиолампах, где устанавливался и электрохимический регистратор, работающий с бумагой ЭХБ-4 шириной 120 мм. ИК излучение через

сканирующее зеркало 16 и объектив 13 подавали через бленду 10 на приёмник излучения 6, откуда сигнал поступал на предусилитель 1.

От синхронного электродвигателя сканирование кадра по строке осуществлялось по пилообразному закону с помощью кулачкового механизма при соотношении длительности прямого и обратного ходов 3/1. Для переноса спектра сигнала из области низкочастотных шумов приёмника в более высокочастотную ( $1360 \pm 300$  Гц) использовался симметричный четырехлопастный модулятор 11, вращающийся от синхронного привода 7 с частотой  $20400 \text{ мин}^{-1}$  и создающий значительный уровень акустического шума. От лопастей модулятора 11 работал и оптоэлектронный датчик 12 опорного напряжения, подключаемый к формирователю опорного напряжения 8, который вырабатывал прямоугольные импульсы для ключей в синхронном детекторе 4 схемы вычитания среднего уровня видеосигнала и в предусилителе 1 переменного напряжения. Изменяя амплитуду прямоугольных импульсов, подаваемых на вычитающий вход предусилителя, можно было менять так называемый «уровень компенсации», впоследствии названный «уровнем отсчета регистрируемых температур». Изменением усиления в основном усилителе 3 изменялся диапазон регистрируемых температур. Полосовой фильтр 2 пропускал видеосигнал в полосе  $1360 \pm 360$  Гц, выделяемый далее в синхронном детекторе 4 с трехступенчатой регулировкой постоянной времени.

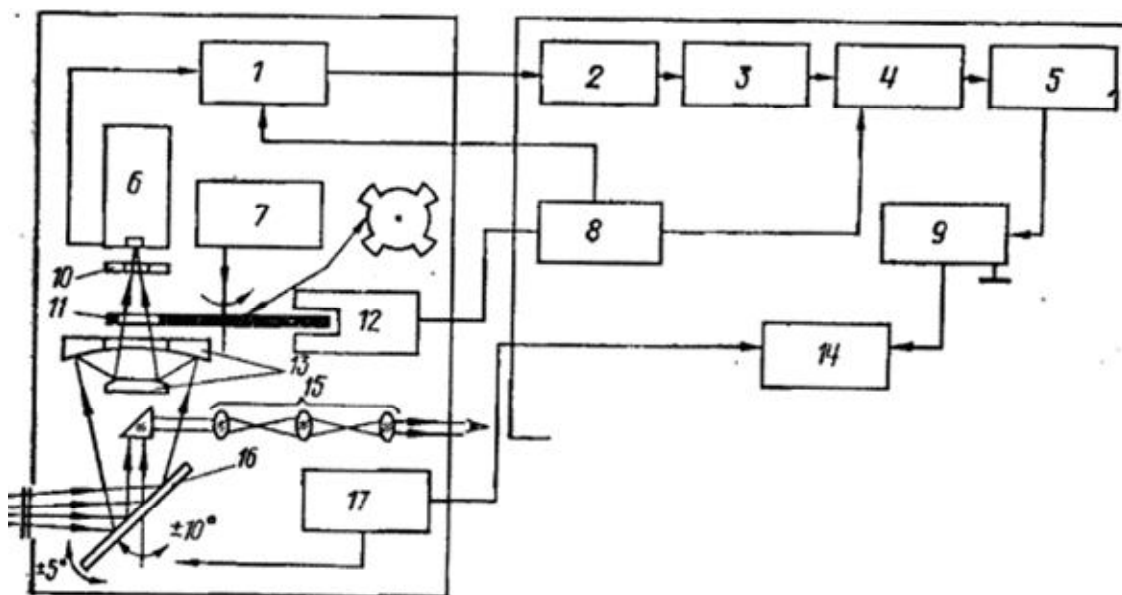


Рисунок 2.8 – Схема кругового сканирования с зеркальной призмой

Для подавления паразитного сигнала, обусловленного отсутствием симметричности модулятора, к выходу синхронного детектора подключался низкочастотный фильтр-пробка 5, настроенный на частоту  $f_{fn} = f_m / N = 1360 / 4 = 340$  Гц, где  $f_m$  — частота модуляции;  $N$  — число

лопастей модулятора. Видеосигнал с выхода синхронного детектора через фильтр-пробку подавался на усилитель записи 9. Последний представлял собой ламповый усилитель постоянного тока с коррекцией передаточного коэффициента за счёт вольт-амперных характеристик диодов, включаемых в цепь обратной связи.

Электромеханический блок регистрации 14 синхронизируется со сканирующим зеркалом 16 с помощью датчика фазирования 17. Последний выдаёт сигнал на запуск вращения пишущего барабана, который осуществляет развёртку изображения с линейной скоростью 0,3 м/с, что на применяемой бумаге ЭХБ-4 позволяет получить термограммы с большим перепадом плотностей почернения. Визир 15 предназначен для наблюдения местоположения мгновенного угла зрения и его ориентировочных границ, более точно наблюдаемых через рамочный видоискатель. Наводку на резкость выполняли по шкале расстояний рукояткой фокусировки и более точно устанавливали методом проб, как и оптимальный подбор положений переключателей «Компенсация» и «Ослабление», влияющих на уровень и размах видеосигнала, подаваемого на строчный индикатор.

С появлением в тепловидении требований к количественным измерениям радиационных температур в последующей модели «Рубин-3» («Факел») были приняты меры по созданию информационно-измерительного канала ТпВ, улучшению его основных параметров и функциональных возможностей. В результате было уменьшено время сканирования по кадру при одновременном увеличении числа строк; снижен и нормирован дрейф сигнала, что позволило реализовать возможность прямых измерений радиационных температур; обеспечена переориентация направления угла зрения в любую точку пространства; повышена точность наводки на резкость; увеличен верхний предел регистрируемых температур. На термограмму стали наносить в виде цифр четыре параметра термографирования: уровень отсчета и диапазон регистрируемых температур, ширину изотермы, номер кадра, а также вертикальный термопрофиль и линию его выборки, изотермические зоны, шкалу полутонов, что позволило по виду термограммы определять температуру в любой ее точке.

Тепловизор «Рубин-3» («Факел») состоит из оптической головки и блока питания, укрепленных на качающемся коромысле и штативе. В блок электроники вмонтирован электронно-лучевой индикатор, в блоке электрохимической регистрации получают термограммы на бумаге типа ЭХБ-4. Функциональная схема показана на рис. 2.9.

Инфракрасное излучение от сканирующего зеркала 1 через объектив 3, зеркало 2 и конденсор 4 попадает на приёмник 5, откуда видеосигнал поступает на предусилитель 7, ко второму входу которого через интегрирующую цепь R1C1 подключён следящий усилитель 8. На выходе



предусилителя 7 среднее значение напряжения за время строки близко к нулю, так как второй вход следящего усилителя 8 имеет нулевой потенциал.

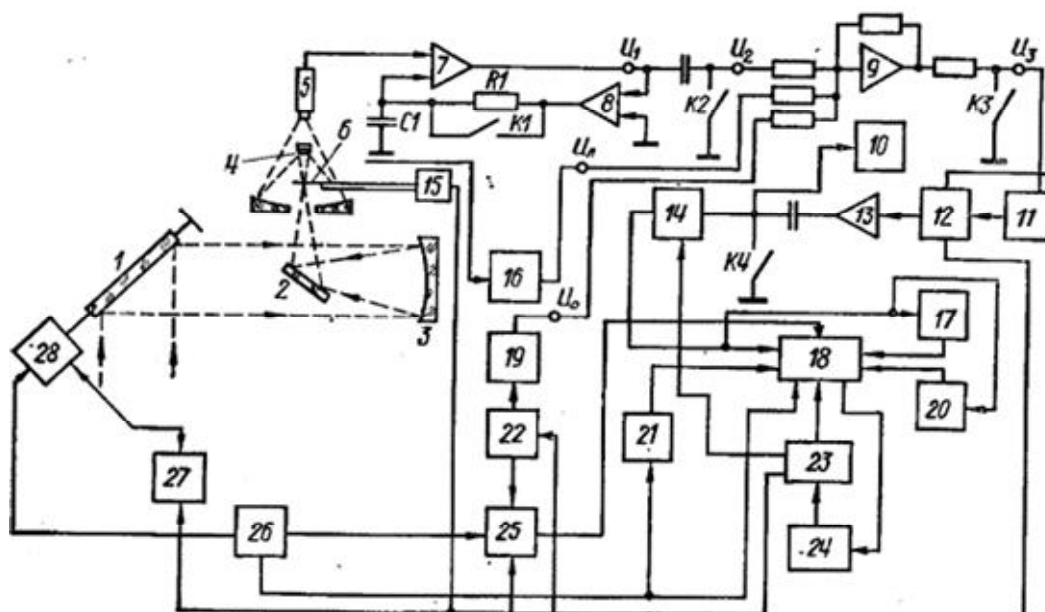


Рисунок 2.9 – Функциональная схема тепловизора «Рубин-3»

В следующей модели быстродействующего ТпВ «Алмаз» поэлементное формирование изображения теплового поля обеспечивается вращающимся с частотой 25 с-1 двенадцатигранным барабаном 2 (рис.2.10) с разнонаклонными гранями и последующим опросом 11-элементного приёмника 5, на котором излучение фокусируется объективом 3.

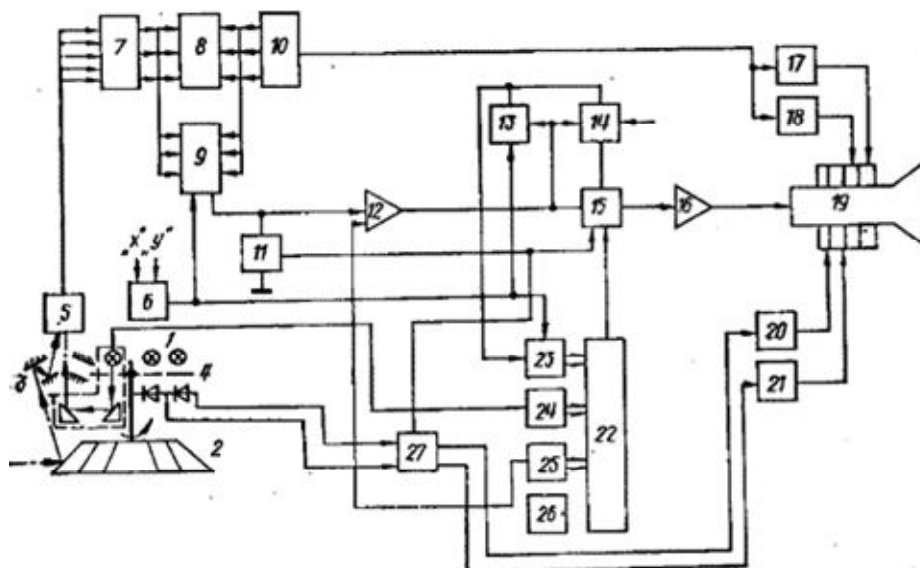


Рисунок 2.10 – Схема кругового сканирования с зеркальной призмой

Порядок установки граней выполнен не по мере нарастания их наклона, а с чередованием чётных и нечётных граней, приводящих к черезподкадровому сканированию для облегчения динамической балансировки сканера. На экране кинескопа формируется кадр, состоящий из 12 подкадров (по числу граней), образованных из вертикальных строчек, количество которых определяет число элементов разложения, равное 140. В кадре  $12 \times 11 = 132$  горизонтальные строки. Видеосигналы от приёмника излучения 5 через предусилитель 7 поступают последовательно во времени через ключи аналоговых коммутаторов 8 и 9 на вход основного усилителя 12 с управлением от аттенюатора усиления 25 и далее через компаратор 15 и оконечный видеосуилитель 16 — на катод кинескопа 19.

Для получения привязки в видеосигнале уровня чёрного имеется регулируемый с помощью переключателя 24 встроенный источник опорного излучения (лампа накаливания ТРШ 1500-2300), калибруемый в диапазоне  $-35...50$  °С первоначально по выносным излучателям. Излучение от этой лампы поступает через оптический опорный канал в моменты обратного хода сканера через отверстия в синхронизирующем диске 4 одновременно с излучением от двух навесных излучателей 1 со стабилизированной температурой. Последние предотвращают попадание постороннего излучения в моменты привязки уровня видеосигнала конденсаторами и ключом 11, переключающимся с подкадровой частотой  $25 \times 11 = 275$  Гц. Быстродействующий коммутатор 8, управляемый от распределителя импульсов 10, обеспечивает формирование видеосигнала, а измерительный коммутатор 9 подключается один раз в кадр к одному из выбранных каналов предусилителей 7. Рассматриваемая в данный момент точка объекта отмечается на экране перекрестием маркера, формируемого в генераторе меток 10.

Устройство выборки и хранения 18 запоминает амплитуду видеосигнала, преобразуемую во времяимпульсном АЦП 23 в цифровой код с усреднением результатов по десяти отсчётам. Усиление тракта калибруется по выносным источникам излучения, причём каждому значению коэффициента усиления соответствует своё значение диапазона регистрируемых температур, набираемого кодовыми переключателями 25. Данные об уровнях отсчёта, диапазоне температур, порядковом номере кадра, амплитуде видеосигнала в обозначаемой маркером точке считываются в двоично-десятичном коде с переключателей 24, 25 и 26, выходов АЦП 23 и знакогенераторов 22. Синхронизатором 27 они вводятся в видеосигнал через коммутатор 15, отображаясь в свободной от изображения зоне на экране. В синхронизирующем диске 4 имеются отверстия для формирования синхронизирующих импульсов, определяющих начало и конец развёрток, моменты ввода опорного излучения, включения знакогенератора, опроса генератора полутоновой шкалы.

Для фотографирования быстро меняющихся тепловых полей предусмотрен режим воспроизведения одиночного кадра. Имеются блоки строчной 17, кадровой 20, подкадровой 21 и дополнительной 18 развёрток, обеспечивающие заслон вертикальных строк для коррекции геометрических искажений сканера. В ТпВ имеется также формирователь изотерм 14, уровень которых совпадает с уровнем видеосигнала в момент генерации перекрестия маркера 6.

ТпВ «Алмаз» и его оптико-механическая головка послужили базой для следующей модели цифрового ТпВ «Радуга-МТ» (рис. 2.11).

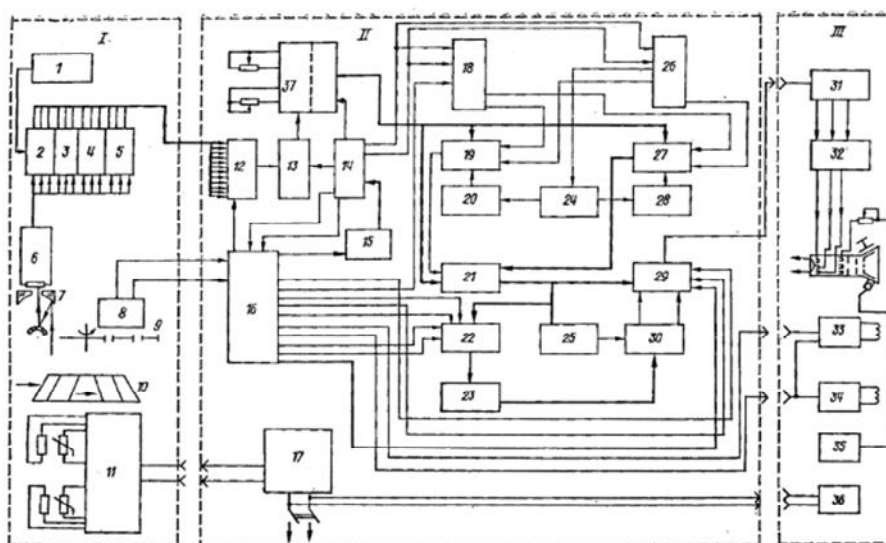


Рисунок 2.11 – Функциональная схема тепловизора «Радуга-МТ»

Этот ТпВ состоит из оптической головки, блока преобразования стандартов разложения (БПСР), блока отображения информации (БОИ), двухплощадочного выносного ИК излучателя, фотоприставки, штатива, тележки, диапроектора, сосуда Дьюара.

Оптическая головка I в «Радуге-МТ» отличается от ТпВ «Алмаз» отсутствием оптического опорного канала и тем, что грани сканера 10 установлены в порядке увеличения их наклона. При вращении каждая грань сканера обеспечивает развёртку изображения по горизонтали, что приводит к поочередному опросу 11 элементов приёмника 6 по вертикали и одновременной записи информации в цифровые запоминающие устройства 19 и 27. В БПСР II при считывании из запоминающих устройств учитывается закон сканирования и, в итоге, с выхода запоминающих устройств цифровой видеосигнал подаётся в построочный растр с коррекцией геометрических искажений сканера, приводящих к наклону вертикальных линий изображения на краях поля зрения. На одной оси со сканером 10 закреплён кодовый синхронизирующий диск 9 с отверстиями для оптронных датчиков формирователя синхронизирующих импульсов 8. Один ряд отверстий служит для формирования пачки

синхронизирующих импульсов (ПСИ), содержащих информацию о началах и концах полей зрения, ввода опорных излучений; в другом ряду имеется лишь одно отверстие для опознавания начала кадра. По сторонам от входного окна ТпВ для получения опорного потока расположены два навесных излучателя с температурой, стабилизированной терморегулятором 11. Фокусировка объектива 7 осуществляется от исполнительного двигателя постоянного тока. Приёмник 6 подключён к 11-канальному блоку предусилителей 2-5, откуда сигналы поступают на БПСР. Питается приёмник 6 от стабилизатора 1.

### 2.2.3 Системы восстановления постоянной составляющей сигнала

Восстановление постоянной составляющей сигнала (привязка уровня сигнала) происходит во время обратного хода сканирующей системы. В момент, когда в поле обзора приёмника (оптической системы) попадает внутренняя полость прибора, на ключ привязки со схемы синхронизации подаётся импульс, который открывает ключ, привязывая сигнал с приёмника к нулю. Сигнал с выхода приёмника соответствует температуре внутренней полости прибора и зависит от спектральной плотности энергетической светимости поверхности этой полости. Для повышения спектральной плотности энергетической светимости полости прибора должна применяться эмаль или краска с коэффициентом излучения  $\epsilon$ , близким к единице.

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

Функциональная схема измерения температуры полости прибора приводится ниже на рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Функциональная схема измерения температуры полости прибора

Бортовое напряжение +27 В преобразуется в  $\pm 15$  В. Для датчика температуры вырабатывается напряжение +5 В. Выходное напряжение с датчика температуры усиливается до величины, определяемой диапазоном аналого-цифрового преобразователя (АЦП) в компьютере.

Электрическая схема измерения температуры приведена на рис. 2.13.

Полученное напряжение с преобразователя +15В обеспечивает питание стабилизатора АDR02 и усилителя OP177. Напряжение -15В

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 точностью до 5 мВ (точность 0,1%). Такая точность позволит пренебречь влиянием напряжения питания датчика температуры в формуле для подсчёта выходного напряжения датчика.

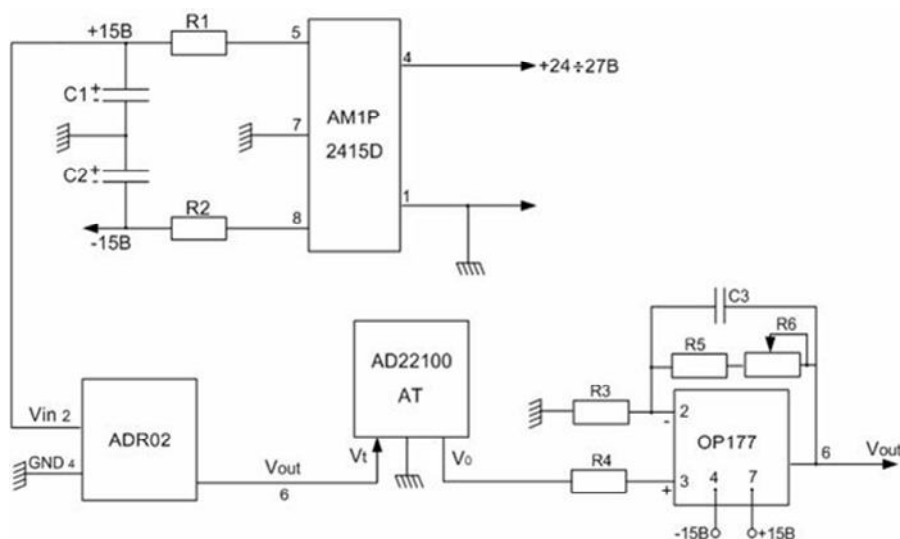


Рисунок 2.13 – Электрическая схема измерения температуры

## 2.2.4 Системы цифровой регистрации и отображения информации

При создании системы цифровой регистрации и отображения информации возможны два пути:

1-й - создание специализированного электронного устройства с жёстким алгоритмом;

2-й - 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;
- неопределённостью 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 появления двух и более неисправностей одновременно весьма мала;
- как правило, требуется контроль правильности работы только при решении конкретных задач пользователя.

Поэтому, наиболее удобным и универсальным устройством для съёма, 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 в нашем случае являются:

- каналы ИК радиометра; при этом надо обрабатывать 4 канала с частотой сканирования 25 Гц, длительностью строки 13,3 мс и 512 точками в строке;
- информация с системы определения координат (GPS);
- сигналы от опорного чёрного 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:

$$[(4 \text{ канала} \times 512 \text{ точек}) \times 2 \text{ байта} + 80 \text{ байт(GPS)} + 2 \text{ байта (датчик чёрного тела)}] \times 25 = 104450 \text{ байт/с} \approx 104 \text{ Кбод}.$$

Таким образом, за час работы прибора объем записанной информации будет составлять всего  $\approx 370$  МБ.

Из приведённых выше расчётов видно, что система цифровой регистрации и отображения информации может быть создана на основе персональной ЭВМ, тип которой выбран на основе габаритных и весовых параметров, а также условий работы.

Вершиной разработки сканирующих ТпВ в нашей стране, до сих пор не превзойдённой, явилась разработка ТпВ широкого применения серии «Прогресс» (ГОИ им. С.И. Вавилова). Основные параметры и внешний вид ТпВ приведены на рис. 2.14 и в таблице 2.2.

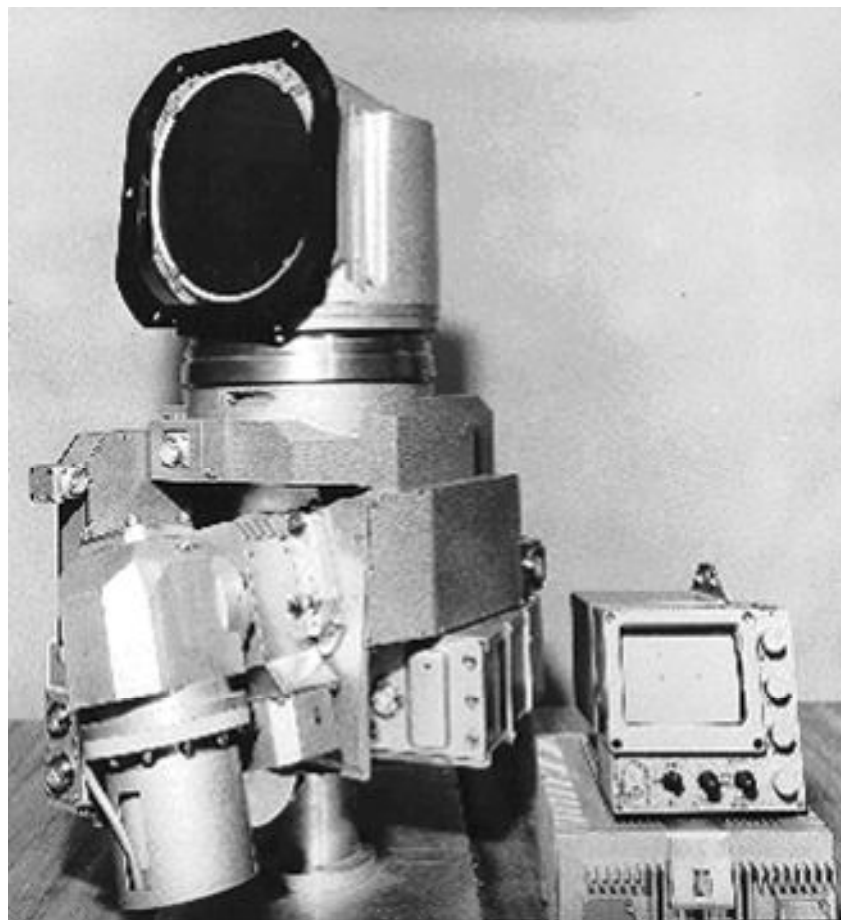


Рисунок 2.14 – Тепловизор «Прогресс 2М»

Таблица 2.2 – Основные параметры тепловизор «Прогресс 2М»

Спектральный диапазон	8-13мкм
Число элементов разложения	500×384
Тип индикатора	телевизионный
Поле зрения сканирующего модуля	40°×30°
Кратность телескопических насадок	10× и 3×
Температурная чувствительность	не хуже 0,1 К
ФПУ- на основе	GeHg; линейка 48×2
Выходной сигнал	ТВ сигнал
Вес базовой комплектации	70 кг
Электропитание	=27 В, 3,0 А

Тепловизор широкого применения с механическим сканированием линеек приёмников (проверенный срок службы – не менее 25 лет)

### 2.3 Тепловизоры 3-го поколения

Типовая блок-схема матричных тепловизоров приведена на рисунке 2.15.

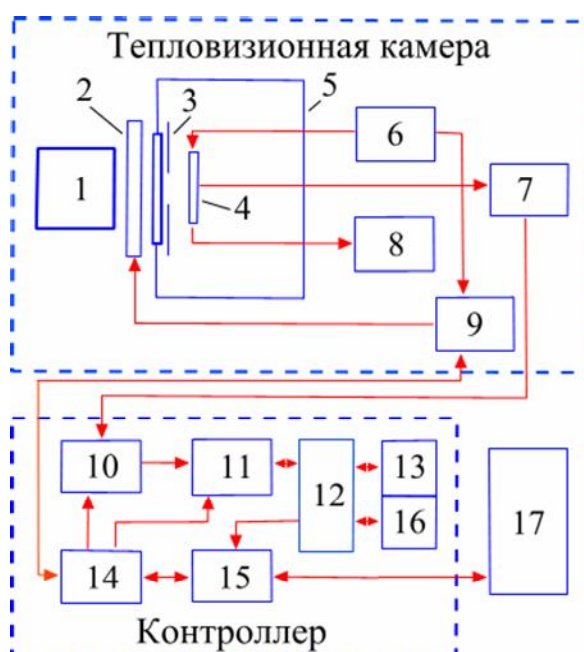


Рисунок 2.15 – Блок-схема тепловизионной камеры: 1 – объектив; 2 - устройство калибровки; 3 - холодная диафрагма; 4 - матричное ФПУ; 5 - вакуумный криостат с просветленным окном; 6 - генератор управляющих импульсных и постоянных напряжений; 7 - усилитель с дифференциальным выходом; 8 - измеритель температуры 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 ТпВ является то, что они построены на основе матричного ИК детектора. Это преимущество проявляется в сравнении с ТпВ, использующими сканирующие системы, и которых много ещё на мировом рынке. В связи с использованием принципа накопления информационного сигнала матричные ТпВ при прочих равных условиях выигрывают у сканирующих систем по совокупности таких параметров, как надёжность, чувствительность, быстродействие и пространственное разрешение. О принципах формирования ИК изображений можно судить из следующих положений. С учётом 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 отражённое излучение - это так называемая подсветочная область спектра. В области длин волн, больших 7 мкм, преобладает собственное излучение объектов и фонов. Участок длин волн 3-5 мкм – как бы переходный [29].

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 фоноцелевой обстановке (ФЦО) 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 счёт фильтрации фона и корреляции путём сравнения характерных параметров принимаемого изображения и эталона цели.

При разработке этих систем нового поколения следует ориентироваться на промышленно достигнутые результаты по построению матричных приёмников излучения и модульных блоков электронной обработки сигналов.

### **2.3.1 Модульные блоки формирования сигналов ТпВ III-го поколения**

В современных ТпВ, построенных на матричных дискретных приёмниках излучения, функциональные задачи каждого выбранного

элемента можно выявить по структурной схеме, приведённой в монографии [4]. Структурная схема приведена на рисунке 2.16.

Преобразование сигналов в матричных ТпВ характеризуется следующими тремя основными процессами:

размытием изображения (аналогового сигнала) до его выборки, которое обусловлено дифракцией и аберрациями в оптической системе, возможными вибрациями изображения, конечностью размеров и формы чувствительного элемента приёмника излучения, осуществляющего выборку и осреднение сигнала;

выборкой изображения, т.е. представлением его конечным числом функций (совокупностью дискретных амплитуд сигнала в отдельных точках размытого изображения) и получением изображения в цифровой форме; при этом в спектре сигнала могут появиться побочные гармоники (спектры), приводящие к «ложным» изображениям;

реконструкцией цифрового сигнала в аналоговую форму с помощью электронного фильтра, системы отображения (дисплея) и зрительного аппарата человека-наблюдателя [4].

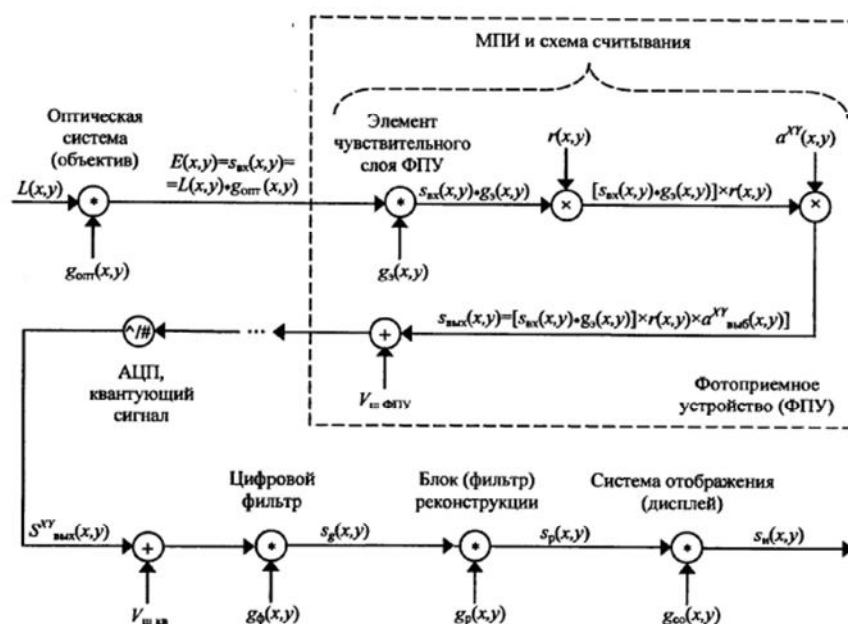


Рисунок 2.16 – Структурная схема модулей ТпВ III-го поколения с цифровой обработкой изображения

### 2.3.2 Выбор микросхем согласования чувствительных элементов матричного QWIP с АЦП

Для выравнивания чувствительности элементов матрицы и коррекции искажений при согласовании ее с АЦП обычно используют следующие элементы (рис. 2.15). Представление о внутренних схемах можно составить по следующим рисункам 2.18 – 2.23.

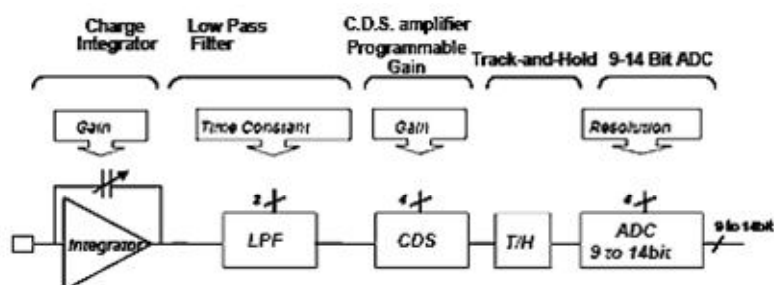


Рисунок 2.17 – Структурная схема блока выравнивания чувствительности элементов матрицы и коррекции искажений при согласовании ее с АЦП

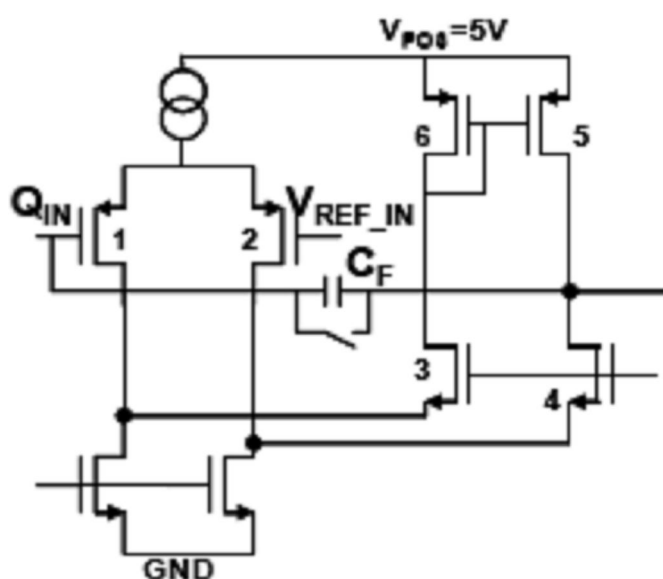


Рисунок 2.18 – Свёрнутая каскадная архитектура СТИА

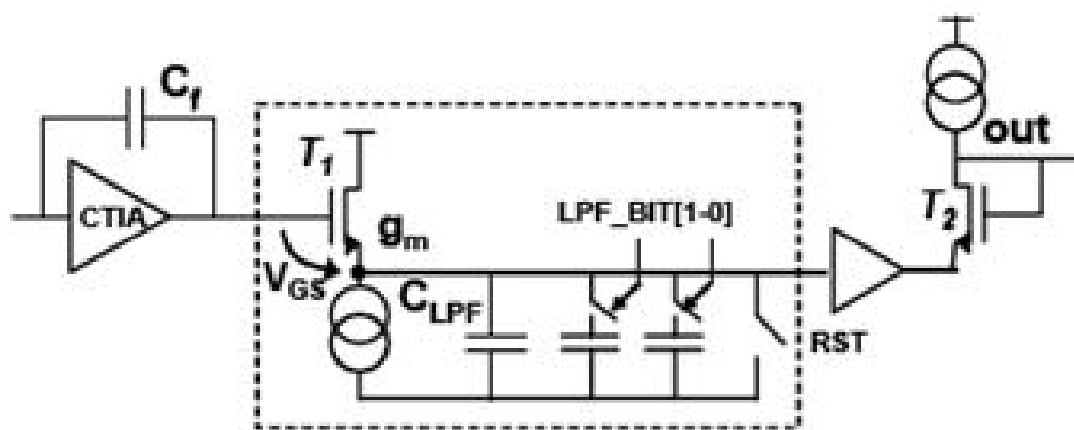


Рисунок 2.19 – Архитектура низкочастотного фильтра прохода (LPF)

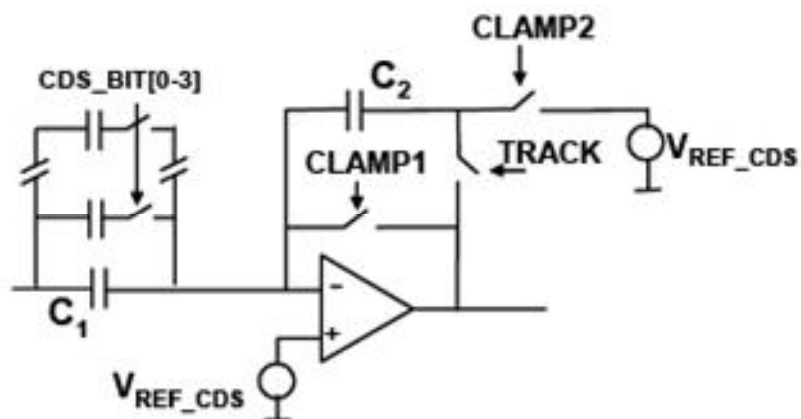


Рисунок 2.20 – Коррелированный двойной усилитель осуществления выборки (CD)

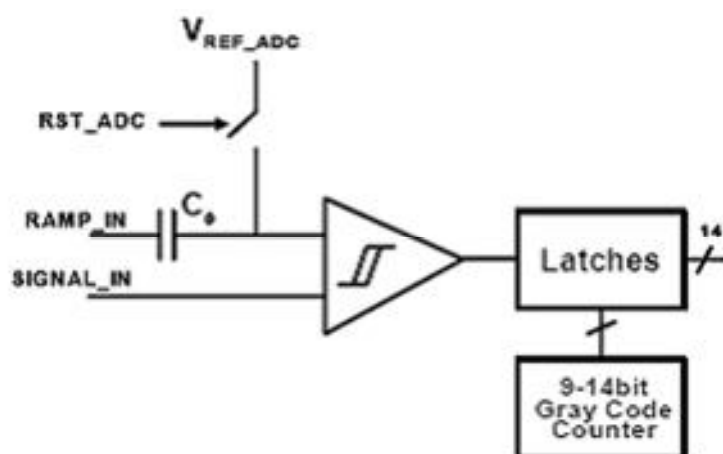


Рисунок 2.21 – Коррелированный двойной усилитель осуществления выборки (модификация) (CD)

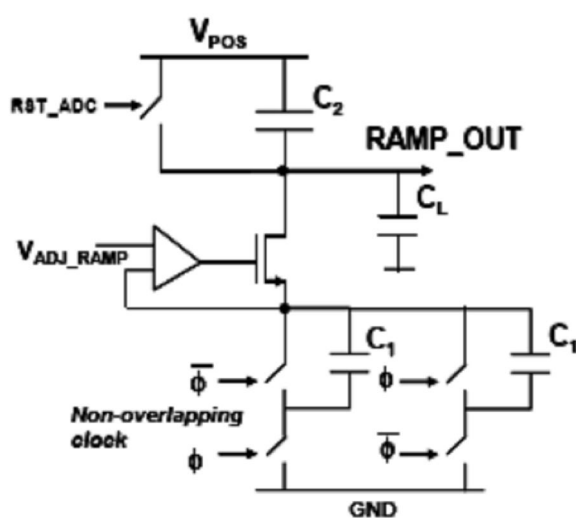


Рисунок 2.22 – Модуль (чип) генератора ската напряжения для наклонного аналого-цифрового преобразователя (ADC)

Рисунок 2.23 Структурная схема микросхемы считывания сигнала с  
однорядовой линейки ISC9717

[illegible]

9 5 1 JSC0007

Dealing with the  $\mathcal{H}_\infty$  norm



Рисунок 2.24 – Временная диаграмма управляющих сигналов считывания стандартных микросхем считывания компании INDIGO SYSTEMS[28]

Таблица 2.3 – Параметры стандартах микросхем считывания компании INDIGO SYSTEMS[30]

Параметры	ISC9801 Opt. 1-2	ISC9806 Opt. 1-2	ISC9705	ISC9803 Opt. 1-2	ISC9901 Opt. 1-2	ISC9809	ISC9802 (linear array)
Размеры матрицы	128x128	128x128	320x256	640x512	640x512	320x256	512x1(256x1,128x1)
Входная цепь	Прямая инжекция					CTIA	CTIA
Тип накопления	Режим фиксирования мгновенного состояния						
Регулируемое время накопления	>5 ms			>9,6 ms	> 100 ms	>0,5 ms	>0,2 ms
Режимы накопления	Накопление при чтении. Накопление, затем чтение				Накопление, затем чтение	Накопление при чтении. Накопление, затем чтение. Неразрушающее считывание. Непрерывное накопление с многократным считыванием	Накопление при чтении. Накопление, затем чтение
Регулирование коэффициента усиления	2 бит (x1;x1,3; x2; x3,8)	2 бит (x1; x1,3; x2; x3,8)	2 бит (x1; x1,3; x2; x4)	2 бит (x1, x1,3, x2, x4)	2 бит (x1; x1,3; x2; x4)	1 бит (x1; x20)	3 бит - емкость накопления; 2 бит - усиление CDS (x1; x1,3; x2; x4)
Эксплуатационные режимы	Без оператора – типовой. Конфигурируемый пользователем						
Способность управления окнами	Динамическое управление окнами. Положение и размер окон.						Отсутствует
Режимы считывания	Инвертирование [ряды]. Реверсирование [колонки]. Инверсия [ряды-колонки]. Режим повтора строк.			Инвертирование [ряды]. Реверсирование [колонки]. Инверсия [ряды-колонки]. Режим повтора строк. Смешанный режим.		Инвертирование [ряды]. Реверсирование [колонки]. Инверсия [ряды. колонки]. Режим повтора строк	Мультиплексированный формат выхода двунаправленного многократного считывания

Параметры	ISC9801 Opt. 1-2	ISC9806 Opt. 1-2	ISC9705	ISC9803 Opt. 1-2	ISC9901 Opt. 1-2	ISC9809	ISC9802 (linear array)
Вычитание фона	Беглый просмотр сигнала (“скимминг”)						
Температурный датчик	Буферный температурный выход						
Смещение датчика, бит	7					внешнее	внешнее
Регулирование питания, бит	2					2	2
Регулирование основного смещения, бит	3					3	
Смещение СПА						3	
Диапазон СПА						2	2
Количество выходов	Выборочно 1, 2 или 4. Эталонный выход						1 или 2. Эталонный выход
Применение датчика	р-на-п					р-на-п или п-на-р	р-на-п или п-на-р

### 3 Нанотехнологии в тепловидении

Нанотехнология — это технология синтеза композитных материалов, наноразмерных (пространственных и пространственно-временных) структур, взаимодействующих с электромагнитными и гравитационными полями на уровнях ниже дифракционного предела.

#### 3.1 Квантовые структуры

Для разъяснения понятия НАНОТЕХНОЛОГИЯ обратимся к истории развития нового направления технологий, основанных на квантово-размерных эффектах (КРЭ) и 3D-синтезированных квантово-размерных структурах (КРС). Названные структуры изучаются новой отраслью химической науки — надмолекулярная химией (междисциплинарная область науки, включающая химические, физические и биологические аспекты рассмотрения более сложных, чем молекулы, химических систем, связанных в единое целое посредством межмолекулярных (нековалентных) взаимодействий). Предметами исследований этой отрасли являются межмолекулярные взаимодействия, особые взаимодействия между фрагментами супермолекулярных (очень больших) структур, природа связи в ансамблях наночастиц и т.п.

Квантовые структуры могут быть получены посредством следующих технологических процессов:

нанопроизводством на сканирующих зондовых установках;

коллоидными химическими средствами;  
управляемым затвердеванием в процессе эпитаксиального роста;  
флуктуацией размеров в условиях формирования квантовых колодцев.

### 3.2 Укладывая атомы

Физики уже накопили большой опыт в разработке приборов, действие которых основано на квантово-механических принципах. Укладывая атомы с точностью до одного-двух слоёв, можно создавать искусственные кристаллы, молекулы и атомы с заданными свойствами. Такие полупроводниковые структуры имеют размеры порядка нескольких нанометров. Можно выделить несколько основных типов микроструктур: квантовые ямы, нити, точки, сверхрешётки. Пример графического представления квантовой точки на рисунке 3.2.



Рисунок 3.1 – Растворы квантовых точек разных размеров

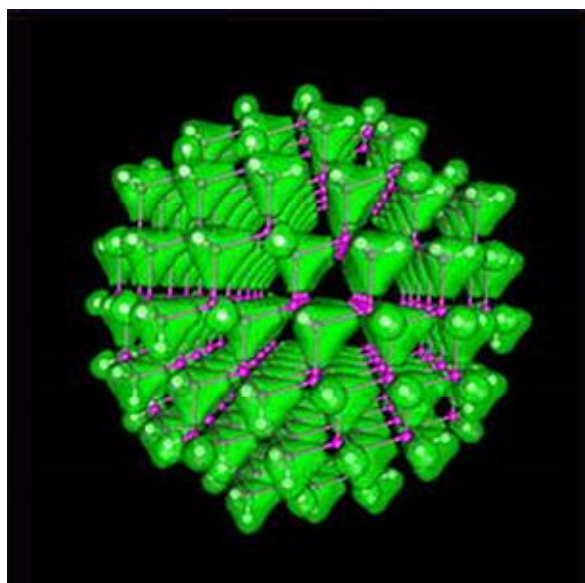


Рисунок 3.2 – Квантовая точка



Член-корреспондент РАН Я.Е. Покровский (ИРЭ РАН) так характеризует квантово-размерные структуры (конденсированные среды) [31]: «...при рассмотрении электронных процессов в конденсированных средах наиболее существенна квантовая размерность электронной системы. Критерием здесь является соотношение между де-бройлевской длиной волны электрона  $L$  и размерами исследуемого объекта  $D$ . Если  $L < D$  в двух направлениях, объект становится одномерным (1D), а плотность состояний — разрывной функцией энергии. Наконец, при  $L > D$  во всех трёх направлениях система становится нуль-мерной (0D) с дискретным электронным спектром. Размерность системы может изменяться в зависимости от температуры, магнитного поля и т. д.»

Простейшая квантовая структура, в которой движение электрона ограничено в одном направлении, — это тонкая плёнка или просто достаточно тонкий слой полупроводника. Именно на тонких плёнках полуметалла висмута и полупроводника InSb впервые наблюдались эффекты размерного квантования.

В настоящее время квантовые эффекты наблюдают на гетероструктурах (контакты между полупроводниками с различной шириной запрещённой зоны). На таком контакте края энергетических зон испытывают скачки, ограничивающие движение носителей и играющие роль стенок квантовой ямы или квантовой точки.

### **3.3 Квантовые ямы**

Квантовые ямы создают, помещая тонкий слой полупроводника с узкой запрещённой зоной между двумя слоями материала с более широкой запрещённой зоной. В результате электрон оказывается запертым в одном направлении, что и приводит к квантованию энергии поперечного движения. В то же время в двух других направлениях движение электронов будет свободным, поэтому можно сказать, что электронный газ в квантовой яме становится двумерным. Таким же образом можно приготовить и структуру, содержащую квантовый барьер, для чего следует поместить тонкий слой полупроводника с широкой запрещённой зоной между двумя полупроводниками с узкой запрещённой зоной.

### **3.4 Структуры с одномерным электронным газом (квантовые нити)**

В такой структуре два направления ( $y$  и  $z$ ) очень малы, а следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой

$$E_n = \hbar^2 n^2 / 8m \cdot a^2,$$

где  $a$  — толщина плёнки в данном направлении;  $\hbar$  — постоянная Планка;  $n$  — уровень квантования;  $m$  — эффективная масса электрона. В этом направлении образуется потенциальная яма. В оставшемся направлении ( $x$ ) электроны могут передвигаться свободно. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, следовательно,  $E_n$  должны быть

малы по сравнению с действительной глубиной ямы  $\Phi$ . Данное условие приводит к толщине нити в несколько нанометров. Полная энергия носителей в квантово-размерной нити, аналогично тонким плёнкам, носит смешанный дискретно-непрерывный спектр:

$$E = E_{nm} + p_x^2/2m,$$

где  $E_{nm}$  – энергия в поперечном сечении (плоскость  $yz$ );  $p_x$  – компонента импульса в направлении нити ( $x$ ).

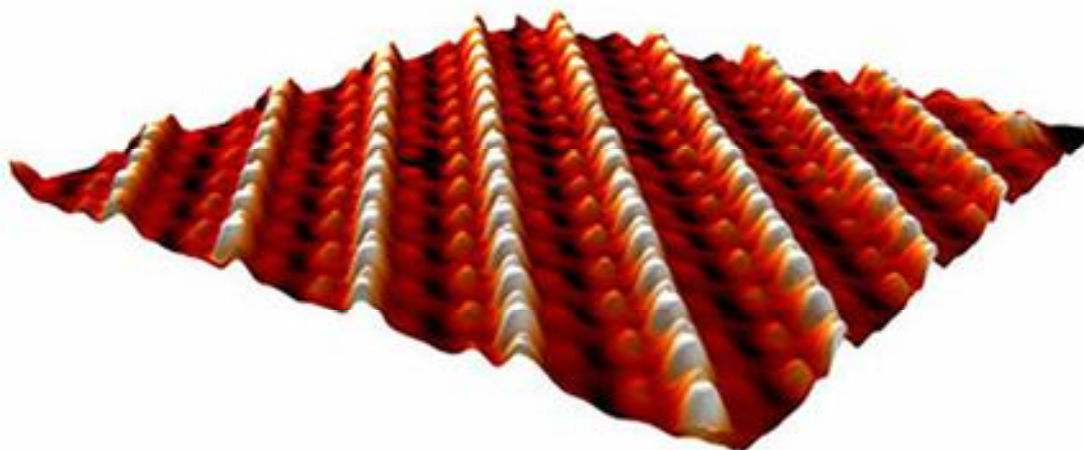


Рисунок 3.3 – Квантовые нити

### 3.5 Структуры с нуль-мерным электронным газом (квантовые точки)

В такой структуре все направления ( $x, y$  и  $z$ ) очень малы, а следовательно, энергетический спектр в каждом направлении можно описать формулой

$$E_n = (\hbar n/a)^2/8m.$$

При синтезе потенциальных ям методом управляемого затвердевания пленки материала А, выращенного на субстрате, созданном из материала В, можно производить острова А, т. к. разница между атомными размерами А и В достаточно велика. Примеры А/В пар включают InAs/GaAs и InP/GaInP.

Если остановить металлоорганическое химическое выпаривание или молекулярно-лучевой эпитаксический рост сразу перед объединением островов, можно получить удивительно универсальный набор точек материала А. Образованную потенциальную яму надо считать бесконечно глубокой, а следовательно,  $E_n$  должны быть малы по сравнению с действительной глубиной ямы  $\Phi$ . Данное условие приводит к размеру точки в несколько нанометров. Полная энергия носителей квантовой точки также имеет смешанный дискретно-непрерывный спектр:  $E = E_{nml}$ . Такие структуры особенно интересны тем, что их свойства аналогичны свойствам дискретного атома, поэтому их иногда называют искусственными атомами.

Ещё в 1968 г. Предсказывалось [32]: «Размерное квантование может также приводить к заметному увеличению ширины запрещённой зоны в полупроводниках и к переходу полуметалла в диэлектрик, к появлению резонансного поглощения света в плёнках, к осцилляционной зависимости сопротивления плёнки от продольного электрического поля и т. д.».

Кроме того, более 10 лет назад на основе численного решения нестационарного уравнения Шредингера показана возможность исследования генерации гармоник в туннельно-связанных квантовых ямах. При этом резонансный туннельный диод — это первое реальное устройство с квантовой ямой и барьерами. Он был создан Лео Эсаки и Чангом в 1974 году. Идея прибора была предложена раньше. Это сделал Л. Иогансен в 1963 году.

Квантово-размерные структуры на основе гетероструктур (ГС)  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$  характеризуются числом квантовых ям (ЧКЯ), толщиной квантовой ямы (ТКЯ), толщиной барьерного слоя (ТБС) и толщиной покрывающего слоя (ТПСл). Уже в 90-е годы XX века появились тепловизионные приборы на матричных QWIP с форматом 256x256, 320x240, 320x256, 640x512 и др. Чувствительность их довольно высока: у лучших приборов NETD даже ниже 10 мК, типовых — 20 мК, средних — 35 мК. QWIP есть возможность управлять спектральной.

На рисунке 3.4 приведены тепловизионные изображения — автомобиль с открытым капотом, кошка, только что закипевший электрочайник [33].



Рисунок 3.4 – Примеры тепловизионных изображений

Разработка матриц ведётся по пути расширения диапазона чувствительности ее элементов и совершенствования параметров чувствительности по ряду технологических направлений. Создание комплексированных систем расширенного диапазона ИК и терагерцового видения сталкивается с проблемной задачей совмещения изображений двух поддиапазонов, дифракционные пределы которых отличаются на порядок. Существует алгоритм и принцип построения комплексированных систем, в которых за счёт разделения потоков излучения инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов удаётся реализовать получение совмещённых изображений, формируемых в двух областях чувствительности матричного квантового приёмника излучения, с

реализацией режима сверхразрешения в дальнем субмиллиметровом диапазоне.

### 3.6 Сверхрешетки

О возможности построения матричных фотоприёмников, чувствительных как в ИК, так и в терагерцовом диапазонах спектра ЭМК, писали как зарубежные, так и российские исследователи в девяностых годах XX века. Первоначально наибольший интерес вызывали сверхрешетки — многослойные периодические гетероструктуры с чередующимися слоями полупроводников толщиной 1–10 нм.

Наиболее простой и совершенной структурой остаются сверхрешетки GaAs/AlGaAs, хотя создание сверхрешеток на основе других комбинаций полупроводников  $A_3B_5$ ,  $A_2B_6$  и напряжённых слоёв Ge-Si достаточно хорошо освоено. В таких структурах потенциал с периодом сверхрешетки  $d$  приводит к размерному квантованию электронного спектра и возникновению узких мини-зон в электронной и дырочной зонах, соответственно. Фотоприёмники на основе КРЭ, по сравнению с другими аналогичными устройствами, обладают таким уникальным свойством, как возможность варьирования области их спектральной чувствительности путём изменения ширины квантовой ямы (которая определяется толщиной слоя узкозонного полупроводника и выступает в качестве параметра размерности) и ее глубины, зависящей от величины разрыва краев зоны проводимости широкозонного и узкозонного полупроводниковых материалов. На рисунке 3.5 представлен трёхмерный вид сверхрешётки.

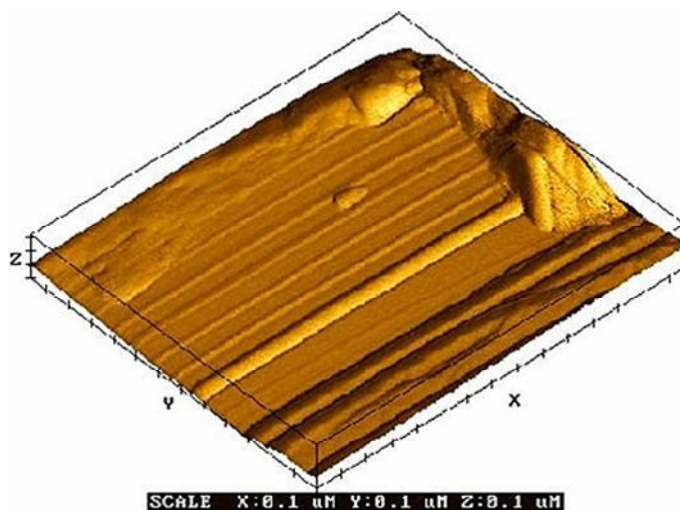


Рисунок 3.5 – Сверхрешетка

Это свойство открывает возможность в рамках единого процесса на основе двух пар полупроводниковых материалов с различной шириной запрещённой зоны получать монолитные матрицы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) по крайней мере с двумя различными окнами (областями

спектральной чувствительности). При этом выбор пар материалов не имеет принципиального значения.

Важным направлением формирования таких технологий при создании гетероэпитаксиальных структур является разработка принципов создания квантовых точек и квантовых колодцев с управляемым наноразмерным синтезом самих точек в общей структуре решеточной конструкции. Флуктуация размеров в квантовых ямах нарушает периодичность в двух расширенных направлениях, и таким образом создаются образования точек с отличными друг от друга спектральными свойствами. Управление формой и размером достаточно сложно, но затраты оправдываются, т.к. этим достигаются чрезвычайно точные спектроскопические черты. Методом МЛЭ (на рисунке 3.6 представлен вид системы МЛЭ), самым низкотемпературным из существующих методов эпитаксии, на основе гетеропары GaAs-AlAs удастся получить резкие границы гетеропереходов, локализацию легирующей примеси в заданных активных слоях, почти идеальное согласование параметров решёток и, как следствие, относительно высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоёв КРС

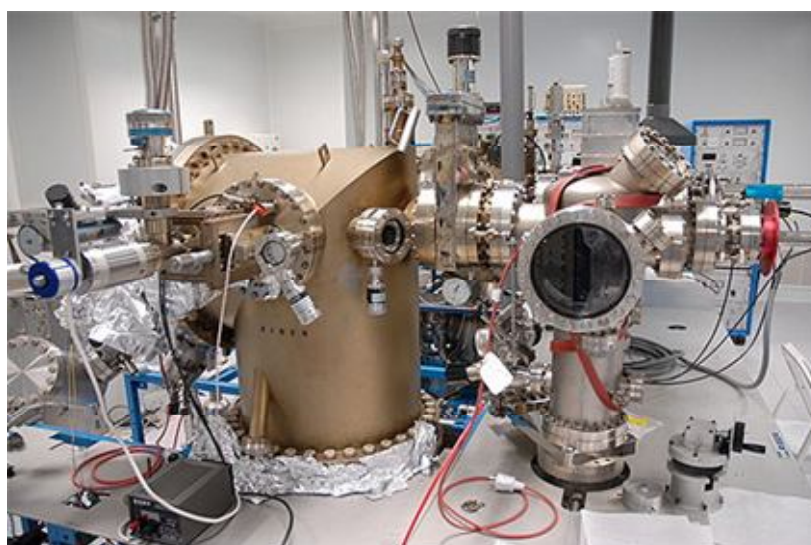


Рисунок 3.6 – Система МЛЭ

Фотопроводимость в КРС определяется переходами носителей заряда (электронов и дырок, находящихся на дне КЯ) в возбуждённое состояние (когда они находятся над верхом ямы, над барьером) с последующим их дрейфом во внешнем электрическом поле. При таком возбуждении поглощается фотон падающего излучения. Коэффициент поглощения в КРС для относительно глубоких квантовых ям может в 100 раз превосходить поглощение, наблюдаемое в примесных полупроводниках. Наличие потенциальных барьеров в КРС препятствует протеканию сквозного темнового тока и позволяет варьировать



концентрацию легирующей примеси в широких пределах, достигая значений, соответствующих металлической проводимости.

### **3.7 Матричные QWIP. Последние разработки**

Характерно, что для квантовых приёмников, какими являются матричные QWIP, обычные принципы взаимодействия падающего излучения с ФЧЭ кардинально отличаются от хорошо известных тепловых приёмников излучения. Взаимодействие излучения происходит не на волновом принципе, а на принципе взаимодействия с фотонами (вплоть до единичных). Квант излучения выбивает из экситона квантовой ямы электроны, которые далее транспортируются по полосам проводимости на схемы считывания. По этой причине для повышения фоточувствительности матрицы излучение принимается не по нормали падения, а оно заводится через подложку. Технологически добиваются решения такой задачи путём нанесения призматических дифракционных решёток по разделяющим линиям между квантовыми колодцами.

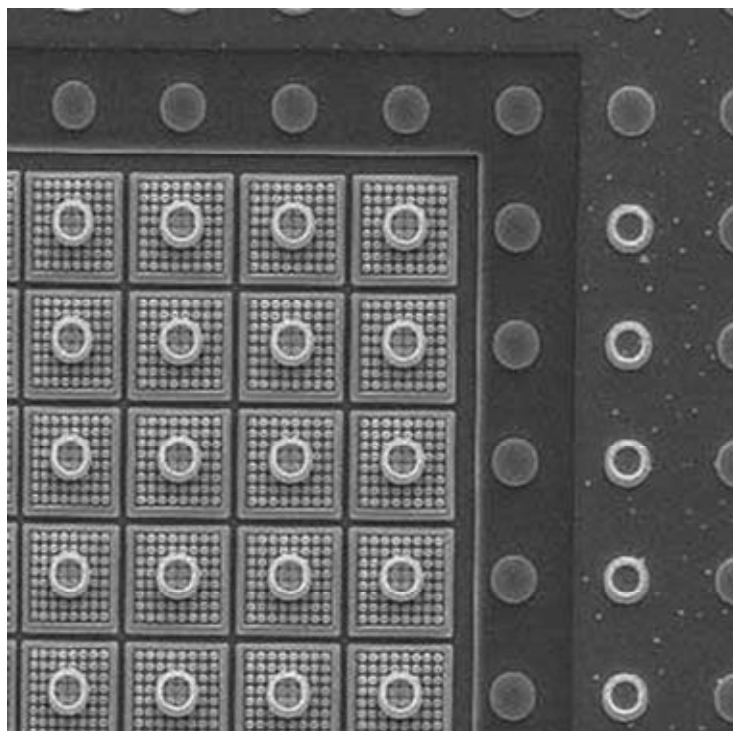


Рисунок 3.7 – Фрагмент матричного QWIP со стандартным шагом между элементами, равным 25 мкм [33]

КРС в последние годы и годы прошедшего десятилетия производятся интенсивно. Более того, имеются даже коммерческие предложения по интегральным матричным фотоприёмным модулям на основе многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) GaAs/AlGaAs со столбами In разработки Института физики полупроводников СО РАН. Размер матрицы — 320×256 элементов. Однако настоящего промышленного выхода добились западные и

межконтинентальные фирмы и корпорации, среди которых наибольших успехов достигла корпорация FLIR System.

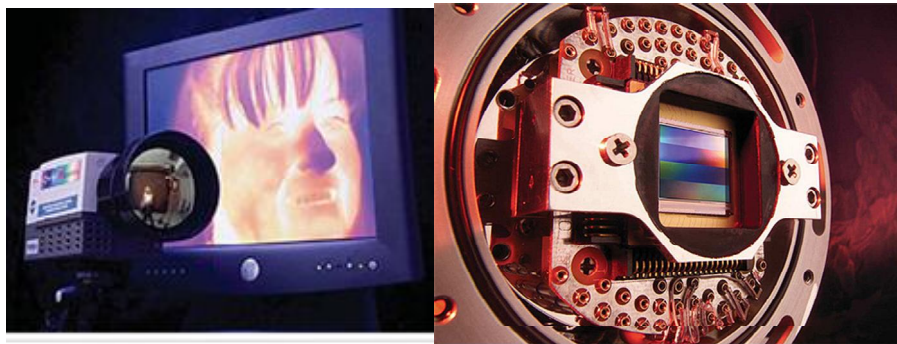


Рисунок 3.8 – Корпорация Indigo. ТпВ на QWIP и цветное изображение двух спектрального диапазона (3–5  $\mu\text{m}$  and 8–20  $\mu\text{m}$ ).

Рисунок 3.9 – Корпорация Indigo. Четырехцветный матричный QWIP формата 640×512 и 640×128 элементов

В настоящее время производственные мощности компании FLIR Systems сосредоточены на четырёх предприятиях — в США они располагаются в Портленде, Бостоне и Санта-Барбаре, четвертый завод — в Стокгольме (Швеция). В 2003 году в состав FLIR Systems вошла компания Indigo Systems — ведущий разработчик и поставщик широкого спектра компонентов систем тепловидения, включая охлаждаемые и неохлаждаемые детекторы, базовые компоненты камер и готовые камеры.

#### **4 Современное состояние развития тепловизионных систем**

Условно тепловизионные приборы в зависимости от их дальности действия можно разбить на три группы:

тепловизионные приборы малой дальности действия: до 0,7–1 км по ростовой фигуре человека и до 1,5–2 км по автомашине;

тепловизионные приборы средней дальности действия: соответственно 1,2–1,5 и 2–4 км, а также до 8 км по самолету;

тепловизионные приборы повышенной дальности действия, превышающей значения, указанные для второй группы.

К тепловизионным приборам первой группы относятся тепловизионные приборы для легкого стрелкового оружия, наголовные и удерживаемые в руках тепловизионные приборы наблюдения.

К тепловизионным приборам второй группы относятся тепловизионные прицелы для переносных ракетных комплексов, удерживаемые в руках и переносные тепловизионные приборы наблюдения.

К тепловизионным приборам третьей группы относятся возимые, а также корабельные и авиационные приборы наблюдения и прицеливания. В данной главе рассматриваются тепловизионные приборы второй группы.

Выпускаемые в настоящее время тепловизионные приборы относятся ко II и III поколениям. Тепловизионные приборы II поколения имеют ФПУ, выполненное на базе многоэлементных линеек фоточувствительных ИК детекторов. Эти приборы содержат сканирующую систему, обеспечивающую развёртку изображения. В случае применения одной линейки развёртка осуществляется плоским зеркалом либо зеркальным уголковым отражателем. Различают последовательный, параллельный и последовательно-параллельный способы развёртки изображения. При последовательном сканировании каждая точка изображения сканируется каждым элементарным детектором при их линейном расположении. Линия задержки обеспечивает фазовое интегрирование сигналов всех детекторов линейки ФПУ.

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

Конструктивное расположение элементов в таких ТпВ можно рассмотреть на рисунке 4.1.



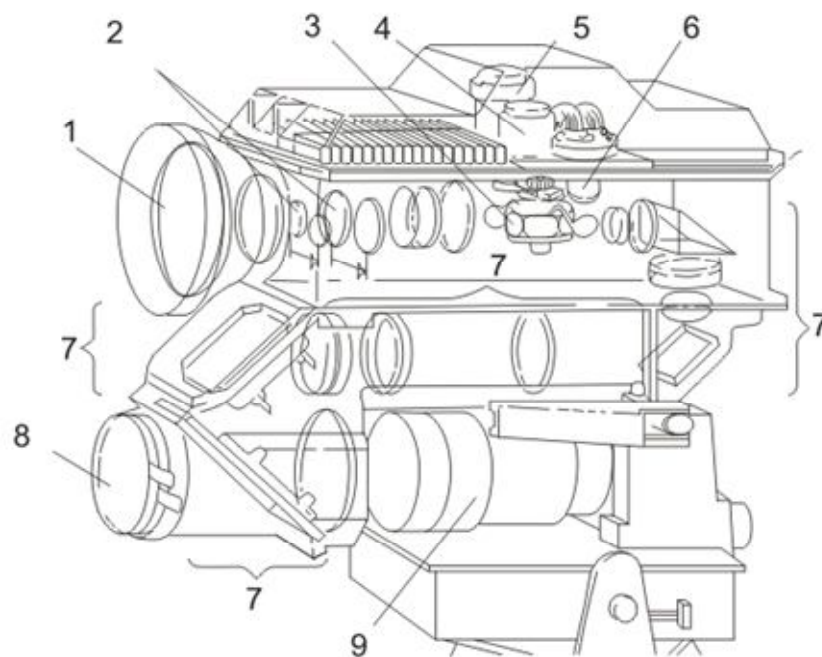


Рисунок 4.1 – Схема тепловизионного прицела Bill Night Sight (BNS):

- 1 – ИКобъектив; 2 – его сменные компоненты;
- 3 – сканирующий зеркальный барабан; 4 – ФПУ; 5 – блок его охлаждения;
- 6 – светодиодный индикатор; 7 – проекционная система; 8 – фильтр;
- 9 – электронно-оптический преобразователь (ЭОП) с окуляром [10]

Дальнейшее развитие метод последовательно-параллельной развёртки получил в связи с разработкой фотоприёмника SPRITE (Signal Processing In The Element). Иногда его называют по имени изобретателя – TED (Tom Elliot Detector). В ФПУ на приёмнике SPRITE задержка и суммирование принимаемых сигналов происходит внутри самого чувствительного элемента. Это исключает необходимость в электронных схемах, обычно применяемых в линейных системах ФПУ, и упрощает процесс обработки сигналов. По сравнению с традиционными, ФПУ на приемнике SPRITE имеет малое количество проводников на входе и выходе. Это упрощает систему охлаждения. Кроме того, приёмник SPRITE характеризуется упрощённой схемой задержки и суммирования сигналов. Однако он требует специфического блока развёртки изображения. В нем используется сканирующая зеркальная призма, грани которой выполнены под определённым углом к оси её вращения. Погрешность углового положения, замеряемого непрерывно, вводится в корректирующее электронное устройство. Горизонтальная развёртка осуществляется зеркалами, расположенными через равные промежутки. Например, если их отношение составляет 6:1, то это создаёт 120 строк ИК изображения. Вертикальная развёртка осуществляется зеркалом. Сигнал от блока развёртки поступает на светодиодный индикатор. При этом для воспроизведения сигнала используется грань призмы, смещённая на 120°.

Это позволяет устранить необходимость в точном определении положения призмы и синхронизации ее вращения, а также даёт возможность свести к минимуму геометрические искажения.

Модули тепловизионных 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 развёртки ФПУ, предусилители, оконечные преобразователи, электронные блоки управления и обработки сигналов, светодиодные индикаторы, преобразователь напряжения и элементы блока охлаждения. В типовом тепловизионном приборе используются 4–5 базовых модулей и блоки оригинальной конструкции, обеспечивающие пригодность прибора для конкретного применения.

Модули тепловизионных приборов второго класса (приборы косвенного видения) предназначались для систем со средней дальностью действия в переносном или возимом исполнении. В них использовался телевизионный индикатор, который мог быть удалён от прибора. При создании таких приборов использовались 12 модулей: ИК объектив, сменные афокальные насадки, блок развёртки, блок управления его работой, ФПУ, блок предусилителей, элементы системы охлаждения, блок электронной обработки сигналов, блок управления и регулировки, преобразователь сигналов в телевизионный стандарт, телевизионный индикатор, преобразователь напряжения. Особенность тепловизионных приборов второго класса состоит в автоматическом регулировании чувствительности и уровня серого, а также выравнивании усиления различных каналов [11].

#### **4.1 Матричные тепловизоры**

##### **4.1.1 Многоканальная тепловизионная система для сверхдальнего обнаружения фирмы FLIR**

ТПС ThermoVision 2000/3000MS – это мощная многоканальная система видеонаблюдения на скоростном и точном поворотном устройстве с тепловизионным каналом, видеоканалом и дополнительным лазерным дальномером.

Системы ThermoVision 2000/3000MS установлены на более чем 700 мобильных и стационарных постах по всему миру, выполняя важные многоцелевые задачи, совмещающие обеспечение военной безопасности объектов, наблюдение и тактическую разведку. Благодаря защищённому исполнению, кристально четкому изображению и широким коммуникационным возможностям, системы ThermoVision круглосуточно обеспечивают безопасность особо важных объектов и границ государств. На рисунке 4.2 и в таблице 4.1 приведены характеристики многоканальная система видеонаблюдения ThermoVision 2000/3000MS [34].



Рисунок 4.2 – Внешний вид ТПС ThermoVision 2000/3000MS

Таблица 4.1 – Основные параметры системы видеонаблюдения  
ThermoVision 2000/3000MS

Параметр	ThermoVision 2000	ThermoVision 3000MS
Число полей зрения	3	3
Широкое поле зрения	25°× 19°	25°×19°
Среднее поле зрения	6°×4,5°	7,8°×5,8°
Узкое поле зрения	0,99°×0,74°	1,3°×0,96°
Широкое мгновенное поле зрения	1,37 мрад	0,9 мрад
Среднее мгновенное поле зрения	0,33 мрад	0,21 мрад
Узкое мгновенное поле зрения	0,054 мрад	0,035 мрад
ИК детектор	технология QWIP с FPA матрицей; 320×240 пикселей	технология QWIP с FPA матрицей; 640×480 пикселей
Температурная чувствительность	0,03 °C	0,03 °C
Спектральный диапазон	8,2-9,2 мкм	8,2-9,2 мкм
Электронное увеличение	2× и 4×	2× и 4×
Дальность обнаружения	более 17 км (танк)	более 20 км (танк)
Видеокамера дневного наблюдения	Тип	Sony, серия FCB-EX780
	Увеличение	25×; цифровое увеличение – 12×
	Последовательный выход	VISCA протокол (TTL / CMOS)
	Видеовыход	PAL/NTSC
	Чувствительность	3 люкса; с функцией ИК фильтра – 0,02 люкса
Лазерный дальномер	Тип	LP-16; на эрбиевом стекле; 80-20500 м
	Диапазон действия	(типовой); класс А
	Защита глаз	
Эксплуатационные характеристики: класс защиты – IP65; диапазон температур -32°С ... +55°С; масса – 25 кг		

Titanium – новое поколение высокочувствительных охлаждаемых камер французской компании CEDIP Infrared Systems [15, 35], дальнейшая эволюция популярной серии Jade, см. рисунок 4.3.



Рисунок 4.3 – Внешний вид камер серии Titanium

Таблица 4.2 – Основные параметры камер серии Titanium

Тип сенсора	InSb, MCT или QWIP
Рабочий диапазон	3–5 мкм 8–12 мкм (дополнительно 1,5 - 5 мкм)
Разрешение	320 x 256 или 640 x 512, разрядность сигнала 14 бит
Размер камеры (LxWxH)	253x130x168 мм
Размер пикселя	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 площадки	От 42°x34° (12 мм) до 2.7°x2° (200 мм)
Интерфейсы передачи данных	USB2 / CAMLINK / GigE
Диапазон температур	От -20 °C до 3000 °C
Точность измерения температуры	±1 °C или ±1 %

## 4.2 Перспективы развития и применения ТПС

### 4.2.1 Комплексированные системы совмещения ТпВ изображений

В рамках программы AFPA, суть которой рассмотрена в разделе 2 настоящего пособия, по результатам патентного поиска найден базовый патент по построению комбинированных и комплексированных систем ИК диапазона. В качестве патента US, близко примыкающего к задачам комплексированных систем ИК и ТГц диапазонов, можно указать патент

United States Patent 6909539 (June 21, 2005), описывающий принципы построения самолётных многоспектральных ИК приборов формирования изображений. В таблице сведены основные варианты построения оптических узлов комплексированных систем (в оригинале использована отличная от принятой в РФ терминология).

Общее представление по патентному поиску данных о комплексированных системах ИК диапазона можно составить из приводимой ниже таблицы 4.4.

Таблица 4.3 – Патенты по оптическим узлам комплексированных систем

USP 6,909,539 G02B 13/16 (20060101); G02B 17/08 (20060101); G02B 13/14 (20060101); G02B 23/12 (20060101); G02B 23/00 (20060101); G02B 023/00 ()	Korniski; Ronald James (Thousand Oaks, CA), Dyer; William Henry (Shelton, CT), it.c/ Science Applications International Corporation (San Diego, CA)	System and method for combining multiple energy bands to improve scene viewing
---	---	---

Таблица 4.4 – Комплексированные оптико-электронные системы

USP 5,274,235, USP 5,091,646	Taylor; William H.	Интегрированная изображающая система (Integrated imaging system)
USP 20050270220	Baharav; Izhak et al.	Оптически-увеличивающая микроволновая система формирования изображений и метод (Optically-augmented microwave imaging system and method) Система отображения включает оптические каналы (видимый свет или ближнее ИК излучение) отображения и системы отображения микроволнового диапазона
Патент РФ №2273036 G02B 23/06 (2006.01) G02B 17/08 (2006.01)	Мельников Г.С., Донцов Г.А. и др. Патент РФ ОАО «ТКС- Оптика», по заявке № 2003125383, приоритет изобретения – 18 августа 2003 г.	«Способ создания семейства комплексированных систем наблюдения, распознавания и прицеливания на основе семейства универсальных объективов и комплексированная система для его реализации»
Патент РФ №2305393 G02B 23/06 (2006.01) G02B 17/08 (2006.01)	Мельников Г.С., Донцов Г.А. и др. Патент РФ ОАО «ТКС- Оптика», по заявке № 2005126502, приоритет изобретения – 22 августа 2005 г.	Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в УФ, видимой и ИК областях спектра

Некоторые компоновки построения комбинированных и комплексированных систем в ИК диапазоне спектра ЭМК приведены на рисунках 4.4, 4.5, 4.6 (патент United States, 6909539, June 21, 2005).

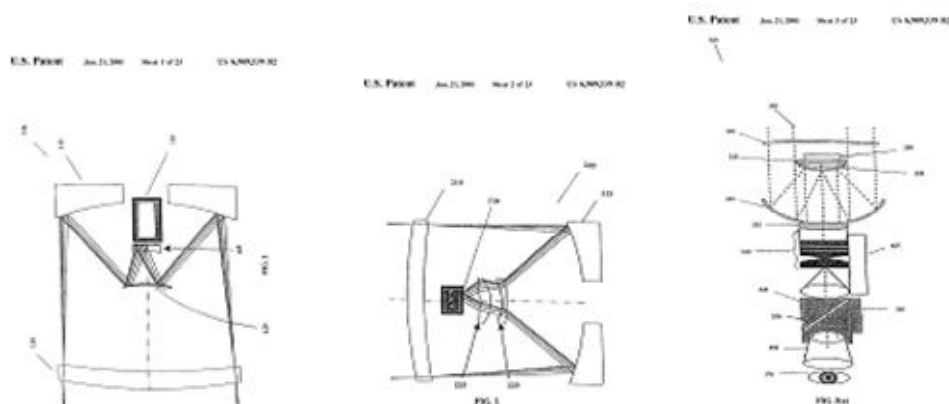


Рисунок 4.4 – Построение зеркальных комплексированных систем с использованием FPA-матриц

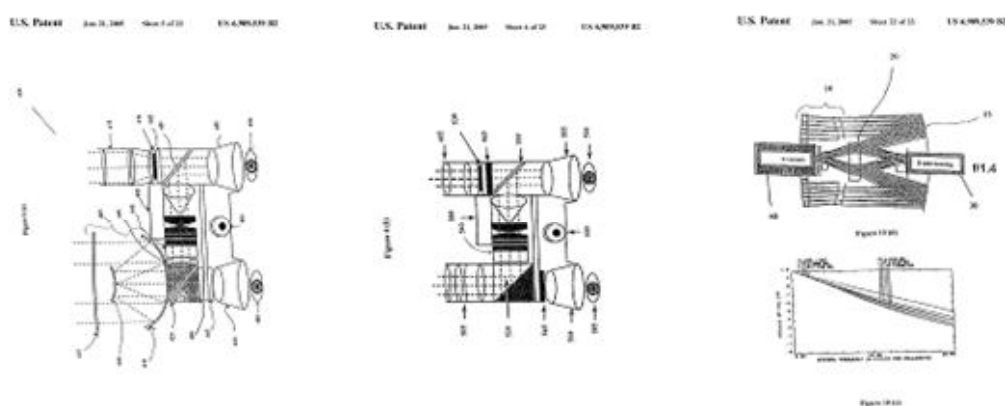


Рисунок 4.5 – Построение комбинированных систем с отдельными объективами по каналам

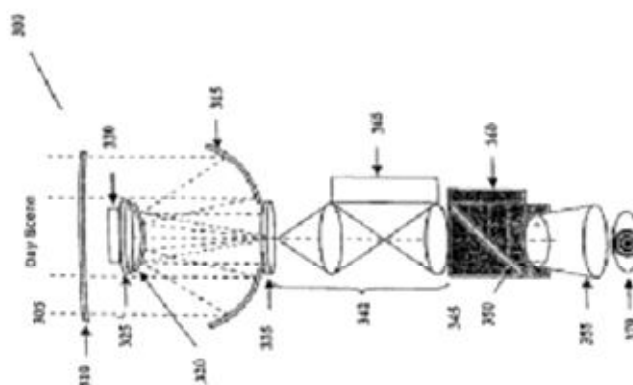


Рисунок 4.6 – Построение комбинированных систем с отдельными объективами по каналам

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 шум.

С позиции теории статистического обнаружения это выглядит так. Если для приоритетного канала вводится порог обнаружения  $C_0$  (критерий Неймана-Пирсона) сигнала  $S_0$  (однократный отсчёт) при заданном уровне помех (ложных тревог)  $P_{лт} \leq \varepsilon_0$  и при включении дополнительного канала с сигналом  $S_1$  и уровнем помех  $P_{лт}$ , то в целом вероятность правильного обнаружения возрастает на величину  $\Delta P_{пр}$ . Одновременно уровень ложных тревог возрастает, и, чтобы выполнить условие  $P_{лт} \leq \varepsilon_0$ , необходимо увеличить порог до величины  $C_1$ .

В общем случае структура комплексного канала должна соответствовать минимуму функционала

$$J_{проп} = P_{проп} + \lambda P_{лт} = \min ,$$

где  $P_{проп}$  – вероятность пропуска полезного сигнала;  $\lambda$  - вариационный множитель.

Если плотность вероятности суммарного сигнала  $W_n(Z)$ , то

$$D_{\text{опр}} = \int_{-\infty}^{\tilde{N}_1} W_i [Z - (S_0 + S_1)] dZ , \quad (4.1)$$

$$D_{\text{ёо}} = \int_0^{\infty} W_i (Z) dZ \quad (4.2)$$

Из условия  $\frac{\partial J}{\partial Z} = 0$

$$\lambda = \frac{W_i [Z - (S_0 + S_1)]}{W_i (Z)} , \quad C_1 \leq Z \leq \infty , \quad C_1 \leq \infty . \quad (4.3)$$

В теории обнаружения отношение (4.1) называется отношением правдоподобия, причём  $\ln \Lambda_1$  определяет структуру оптимального обнаружителя. Если на входе каналов помеха может интерпретироваться нормальным процессом с дисперсией  $\sigma_i^2$  и  $\sigma_1^2$ , то

$$\ln \Lambda_1 = \frac{S_0 Z \alpha}{(\sigma_0 \beta)^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(S_0 \alpha)^2}{(\sigma_0 \beta)^2} , \quad (4.4)$$

$$\text{где } \alpha = 1 + S_1/S_2; \quad \beta = \left( 1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_i^2} \right)^{1/2} . \quad (4.5)$$

Сравнивая (4.4) с известным выражением для одноканального обнаружителя, можно выносить решение о “полезности” или “вредности” комплексирования каналов, что и производит блок отождествления каналов:





коэффициентов, характеризующих потери и шумы в канале преобразователя и в атмосфере.

По результатам анализа отечественных разработок можно привести ссылку на патенты РФ по схеме построения комплексированных систем коллектива авторов ОАО "ТКС-оптика" и завода «КМЗ», в состав которого входит и один из авторов настоящего пособия.

На рисунке 5.8 приведены схемы построения таких комплексированных систем. Для реализации комплексирования изображений оптического теплового диапазона и диапазона СВЧ необходима либо разработка матричного многоэлементного приёмника с болометрическими чувствительными элементами, работающими в каждом из этих диапазонов, либо создание на основе патента устройства сканирования сборки зеркального объектива с разработанной в ГОИ линейкой болометров в режиме линейного или кругового сканирования.



Рисунок 4.8 – Схемы построения комплексированных систем по патенту [36]

#### 4.2.2 Комплексированная система совмещения ИК и ТГц изображений

В качестве дальнейшего развития возможности создания комплексированных систем ИК и ТГц диапазонов авторами методического пособия опубликована статья [37] и подготовлена заявка на патент РФ [38], в котором сочетаются преимущества патентов [36,39] и возможности восстановления (электронного масштабирования) изображения, формируемого на едином матричном QWIP по схеме, приведённой на рисунке 5.9.

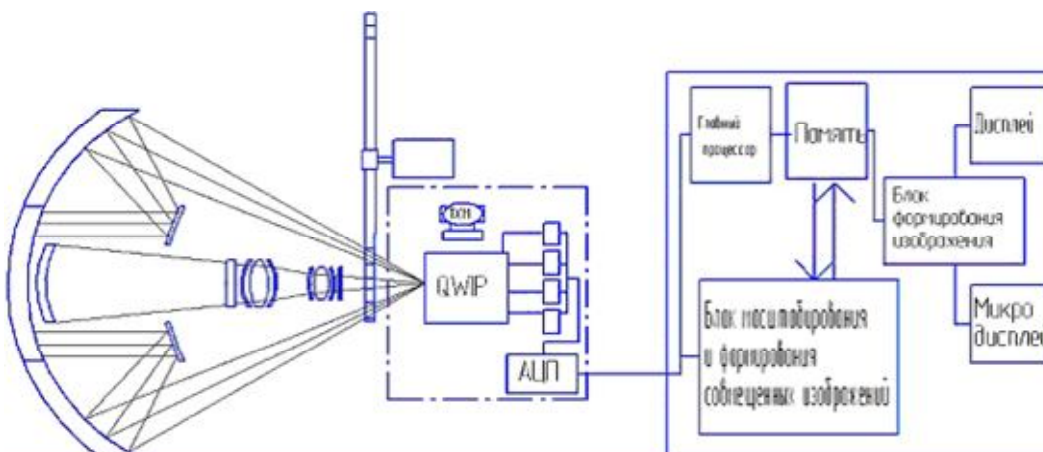


Рисунок 4.9 – Функциональная схема построения комплексированной системы на матричном QWIP, в которой реализуется алгоритм сверхразрешения по оригинальной методике авторов

Здесь в ИК изображения размерами  $4^\circ \times 5^\circ$ ,  $8^\circ \times 10^\circ$  и  $16^\circ \times 20^\circ$ , формируемые германиевым панкратическим объективом на матричном QWIP, с помощью блока обработки изображений с полукадровой сменой изображения в центральную часть совмещенного изображения встраивается изображение ТГЦ диапазона, формируемого на том же матричном QWIP внешним зеркальным объективом с полем зрения  $1,5^\circ \times 1,9^\circ$ .

Предлагаемое решение базируется на способе создания комплексированных систем по патенту РФ №2273036 (заявка № 2003125383, приоритет изобретения – 18 августа 2003 г.) [8] и заключается в том, что изображение одного из каналов комплексированных систем формируется узкопольным двухзеркальным объективом высокого разрешения с относительным отверстием 1:0,8; второй канал комплексированной системы в качестве объектива использует панкратический объектив или объектив с переменным фокусным расстоянием, который размещается внутри зеркального объектива без виньетирования его лучей.

Отличительной особенностью предлагаемого решения является появившаяся возможность одновременного формирования изображений в ИК и в субмиллиметровой области спектра на одной матрице чувствительных элементов – матричном QWIP.

#### **4.2.3 Выбор матрицы чувствительных элементов для построения комплексированной системы ИК и субмиллиметрового видения**

По анализу таблицы 2.3 главы 2.2.3 и анализу Web-сайта фирмы Indigo Systems [40] были отобраны как наиболее близкие по решаемым задачам двухдиапазонные матрицы ISC9803.

Принципиальная схема  $\frac{1}{4}$  матрицы ISC9803 [41] приведена на рисунке 4.10.

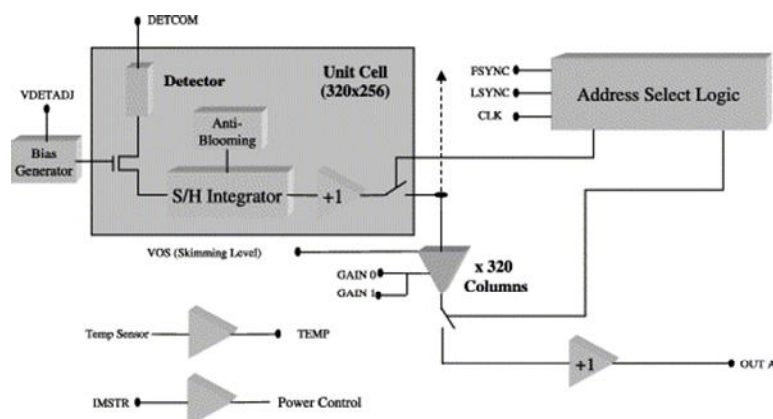


Рисунок 4.10 – Принципиальная схема 1/4 дюймовой матрицы ISC9803

Схема полноформатного варианта матрицы приведена на рисунке 4.11.

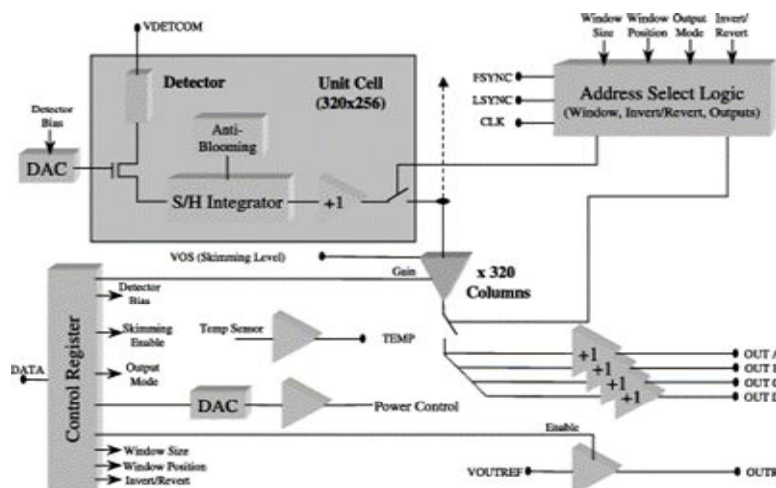


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема полноформатной матрицы ISC9803

Принцип образования полноформатной матрицы можно представить из рисунка 4.12.

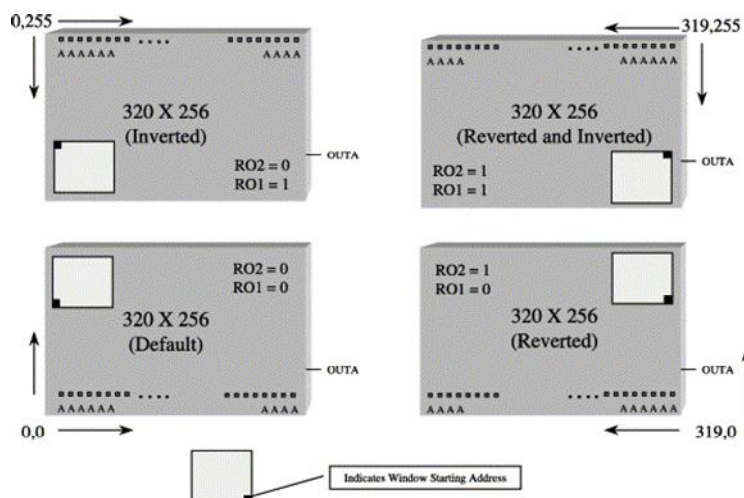


Рисунок 4.12 – Принцип стандартного опроса полноформатной матрицы

Основные данные по матрице сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – 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

Для реализации возможности получения изображений в субмиллиметровой области спектра со сверхразрешением, кардинально устраняющей главный недостаток систем радиовидения – дифракционный предел с большим пятном рассеяния излучения, определяемым выражением

$$\varnothing = \frac{2,44\lambda_{\max}}{D/F},$$

в предлагаемом решении найден чрезвычайно простой и оригинальный способ.

Изображение в области субмиллиметрового диапазона чувствительности матричного QWIP формируется зеркальным объективом, для чего защитное окно универсального объектива делается сферической формы и составным: из кольцевой зоны – для двухзеркального объектива с областью прозрачности субмиллиметрового диапазона и центральной круговой зоны – для панкратического объектива ( $\Delta\lambda = 7,5-14$  мкм) с тремя полями зрения, согласованными со стандартом матрицы (640×512) 4°×5°; 8°×10°; 16°×20°.

В этом случае изображение ТГц диапазона с полукадровой сменой изображения (50 Гц) формируется опрашиваемым матричным QWIP в последовательно-параллельном режиме в постоянном поле наблюдения зеркального объектива 1,5°×1,9°.

Изображение в ИК области спектра, в другом полукадре, формируется матричным QWIP также в последовательно-параллельном режиме опроса.

При этом процессорный блок обработки и формирования изображений формирует основную площадь изображения в соответствующих полях зрения панкратического объектива. А изображение, формируемое при параллельном опросе в субмиллиметровом диапазоне, встраивается блоком обработки в область центральной части общего изображения в поле зрения 1,5°×1,9° со сбором «размытого» изображения в пикселах с центральными максимумами в исходном

изображении и обнулениями соседних пикселей в формируемом масштабируемом изображении.

Так как на каждом опросе как в ИК, так и в ТГЦ диапазоне матрицей формируется один и тот же стандарт разложения (в используемой матрице -  $640 \times 512$ ), последнее обстоятельство обеспечивает возможность объединения, соответственно,  $7 \times 7$  элементов (при поле  $4^\circ \times 5^\circ$ );  $13 \times 13$  элементов при поле  $8^\circ \times 10^\circ$  и  $25 \times 25$  элементов (при поле  $16^\circ \times 20^\circ$ ) с весовыми коэффициентами на объединяемые по периферии элементы, выбранными в соответствии с функцией рассеяния точки в зеркальном объективе, измеряемой предварительно на стендовой установке.

Таким образом, в поле зрения  $16^\circ \times 20^\circ$  центральная (замененная) зона изображения при масштабировании с весовыми коэффициентами обеспечивает режим сверхразрешения в ТГЦ диапазоне по сравнению с областью изображения ИК диапазона.

В поле зрения  $8^\circ \times 10^\circ$  изображения зоны ИК и зоны ТГЦ изображений будут иметь равные абберрационные характеристики их элементов и лишь при поле зрения  $4^\circ \times 5^\circ$  абберрационные характеристики ТГЦ зоны в 1,2-1,4 раза превышают значения абберрационного кружка рассеяния (в сравнении с зоной формирования ИК изображения).

#### **4.2.4 Обоснование построения нового класса тепловизионных систем**

Для решения этой задачи должны быть разработана концепция построения ТпВ с квазицветовым представлением изображений, проведены сравнительные исследования с измерительными ТпВ с «псевдоцветовым» представлением изображений, проведены экспериментальные исследования по построению элементов системы контроля военной техники и гражданских объектов, а также окружающей обстановки в цветном тепловизионном варианте. При этом необходимы: выбор и обоснование схем цветного ТпВ, обеспечивающего изображение на цветном экране объектов и фонов в соответствии со спектрами их излучения в диапазонах  $\Delta\lambda_1 = 2,2\text{-}2,8$  мкм,  $\Delta\lambda_2 = 3,2\text{-}5,6$  мкм,  $\Delta\lambda_3 = 8\text{-}12,5$  мкм.

Обнаружение объектов, а также поверхностных и подповерхностных неоднородностей на различных ландшафтах и сложных фонах с оценкой критериев эффективности представления изображений в режиме «квазицвет» в сравнении с ранее известными черно-белыми представлениями и представлениями в режиме «псевдоцвет» в измерительных ТпВ обуславливают необходимость разработки квазицветовых ТпВ в интересах:

- развития ВВТ и для использования в задачах охраны границ, в том числе водных рубежей РФ;
- борьбы с незаконными вооруженными формированиями;

■ гражданских применений для обнаружения выбросов (утечек) углеводородов, дистанционного обнаружения экологических загрязнений на морской и земной поверхности, контроля аварийных зон на линиях электропередач, контроля аварийных ситуаций на железнодорожном транспорте (износ контактной сети, путепроводов, подстанций электроснабжения), проводки судов в ледовой обстановке, уточнения толщины льда, обнаружения и оконтуривания трещин, пригодных для проводки судов, выявления людей с повышенной температурой тела в аэропортах, вокзалах, медицинских учреждениях и т.д. с целью предотвращения распространения инфекций.

В настоящее время остро стоит проблема создания многоцветных тепловизионных систем оперативного контроля в вышеперечисленных обстановках на дальностях, существенно превышающих дальность видения в условиях естественной освещённости.

Современные ТпВ достигли высокой степени совершенства, однако они создают черно-белое изображение объектов, контрасты которого образуются в одном спектральном интервале ИК излучения вследствие разности (контраста) температур или спектральной плотности энергетической светимости (интегральной по всему интервалу). Остаётся неисследованной возможность создания цветного ТпВ, аналогичного цветной телевизионной камере, и те преимущества, которые даёт цветное изображение объектов в ИК области спектра, соответствующее их спектральной плотности энергетической светимости. Современный уровень развития тепловизионной техники создаёт возможность для постановки такой работы.

Цветной ТпВ может быть построен по схеме черно-белого, но вместо односпектрального ИК приёмника, принимающего излучение в интервале 8-14 мкм, должен быть применен трехспектральный приёмник, работающий в трех интервалах  $\Delta\lambda_1 = 2,2-2,8$  мкм,  $\Delta\lambda_2 = 3,2-5,6$  мкм,  $\Delta\lambda_3 = 8-12,5$  мкм либо в одном окне прозрачности атмосферы, но разбитый на участки, например, 8-9,5, 9,5-11, 11-12,5 мкм с режимом интегрального приёма 8-12,5 мкм. Три сигнала приёмника поступают соответственно на синий, зелёный и красный входы цветного кинескопа, воспроизводящего цветное изображение исследуемой поверхности в интервале спектра 8-12,5 мкм.

Предлагаемая к разработке система основана на принципе создания цветного тепловидения (ИК видения) и должна обладать теми же преимуществами, которые имеет цветные фотография, кино, телевидение по отношению к черно-белым. Большинство реальных поверхностей (при земной температуре) селективно излучают (и отражают) ИК излучение (в том числе в интервале 8-14 мкм) с той же мерой селективности, с которой они отражают солнечное излучение в видимом диапазоне 0,4-0,8 мкм [42]. Поэтому цветовой трехспектральный контраст двух участков поверхности,

имеющих различные коэффициенты излучения и одинаковую температуру, значительно выше (в общем случае), чем черно-белый (односпектральный) контраст. Несмотря на усложнение прибора, цветной ТпВ должен обладать весьма значительными преимуществами по отношению к черно-белому в большинстве областей применения тепловидения, в том числе в военной разведке в ночных условиях и в научных исследованиях малоразмерных целей.

Новизна постановки исследований состоит в том, что в ходе выполнения работ будут проведены теоретические, лабораторные и натурные исследования по созданию экспериментального образца широкозахватной высокочувствительной тепловизионной аппаратуры ИК диапазона, позволяющей формировать спектрально-селективные изображения с повышенной чувствительностью.

Реализация этих методов позволит получить дополнительные отличительные признаки, что приведёт соответственно к повышению эффективности ВВТ.

В СПбГУ ИТМО и во ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" имеется многолетний опыт по созданию и проведению испытаний аналогов предлагаемой аппаратуры. Подобная аппаратура разрабатывается для авиационных и морских носителей. Аппаратура для решения задач освещения обстановки должна иметь высокое пространственное разрешение, достаточную чувствительность ( $< 0,01\text{K}$ ) ИК канала на нужных длинах волн излучения и иметь цифровую обработку сигнала.

Ряд задач НИР, в частности построения тепловых изображений в режиме формирования изображений «псевдоцвет», решён в разработанной системе Thermo Tracer TH 9100 SL (Япония).

Наиболее характерным зарубежным аналогом является разработанная аппаратура «Лайнскан» (США) и её модификации, а также японской фирмы Thermographic systems. Отечественных аналогов, доведённых до уровня рабочего конструирования, нет.

#### **4.2.5 Выводы**

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 счёт применения дополнительной обработки изображений (внутреннее электронное сканирование) в реальном масштабе времени.

Особо высокое качество видеоизображений в ИК диапазоне достигается на ТПС, построенных на современных матричных приёмниках излучения с элементарными приёмниками, использующими наноструктурные квантовые ямы, – матричными QWIP.



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

Существенным шагом к решению задач обеспечения качественного наблюдения объектов в неблагоприятных погодных условиях явится создание комплексированных систем наблюдения в ИК и СВЧ диапазонах спектра за счет дополнительной информации, получаемой в субмиллиметровом диапазоне.

Ближайшее направление по совершенствованию ТПС – создание ТпВ с естественным восприятием получаемых изображений в квазицвете.

## **5 Экспериментальные данные по фоно-целевым характеристикам в ИК области спектра**

### **5.1 Реально наблюдаемые контрасты морских объектов**

На рисунках 5.1 и 5.2 представлены кадры полученные с тепловизора.

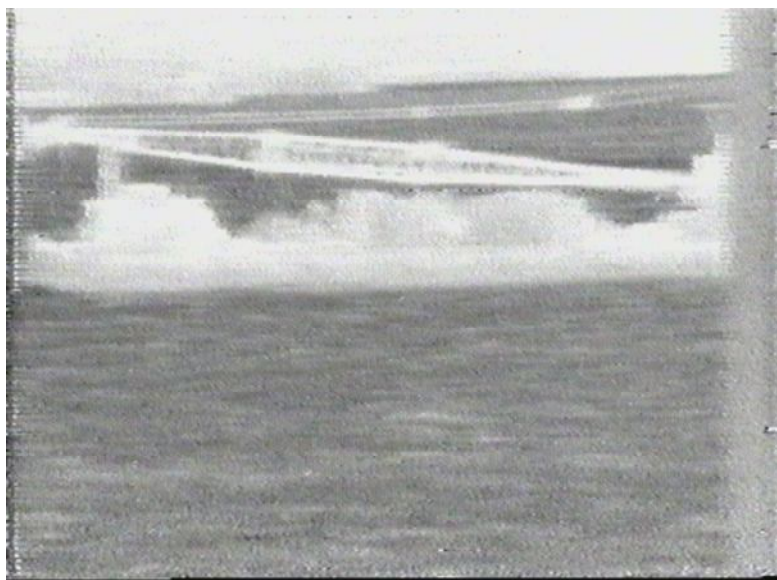


Рисунок 5.1 – ТпВ «Прогресс». Дистанция 300 м

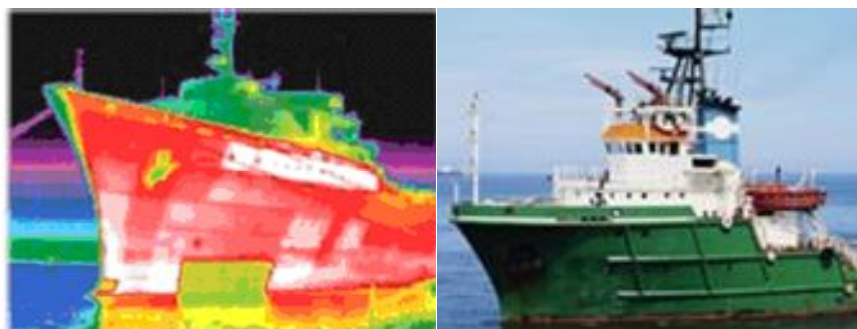


Рисунок 5.2 – Тепловое изображение корабля, полученное ТпВ FLIR Systems, и изображение в видимом диапазоне



Спутный тепловой след надводных и подводных кораблей в основном зависит от перепада температур в тонком скин-слое морской поверхности (около 0,1-1,5 мм) и обуславливается направлением и интенсивностью теплообмена между водой и воздухом. Примеры регистрации тепловизионных изображений кораблей, их спутные следы и след подводной лодки – на рисунке 5.3.

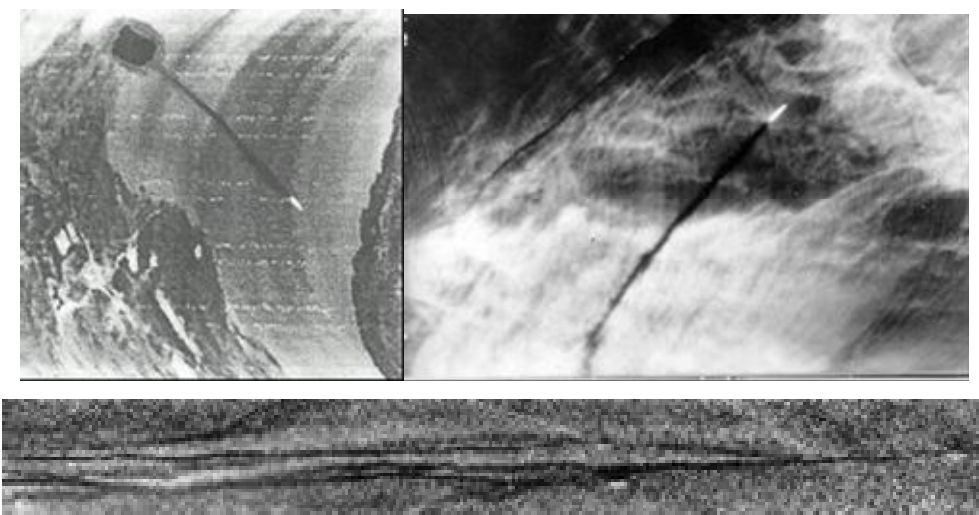


Рисунок 5.3 – Спутный тепловой след надводных и подводных кораблей

## 5.2 Наземные объекты наблюдения



Рисунок 5.4 – Полноформатные тепловизионные изображения, полученные с помощью тепловизионного модуля [43]

## 5.3 Промышленные и жилые объекты

Промышленные и жилые объекты могут иметь контраст от 0 до 100-120 °С. Примеры регистрации тепловизионных изображений приведены на рисунке 6.5.



Рисунок 5.5 – Промышленные и жилые объекты

#### 5.4 Воздушные объекты

Имеют широкий диапазон контрастов, который зависит от наблюдаемого температурного контраста фона (небо, Земля) и состояния использования двигательных систем авиационной техники. На рис. 5.6- 5.8 приведены примеры ИК изображений воздушных объектов.

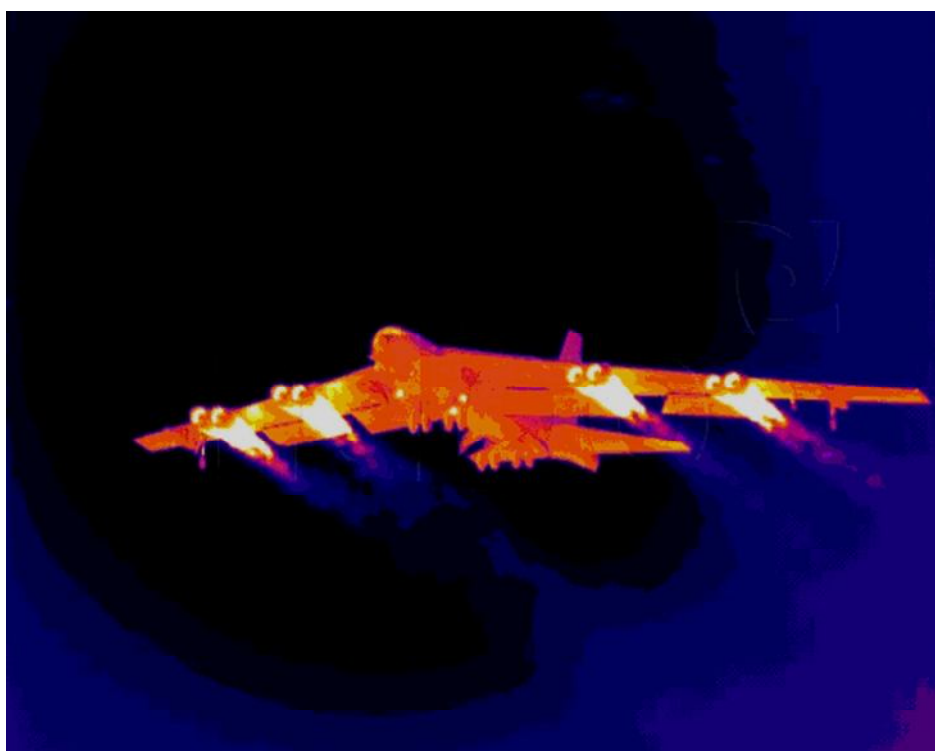


Рисунок 5.6 – Изображение получено на тепловизионной системе Termo Cam с матричным QWIP [44]

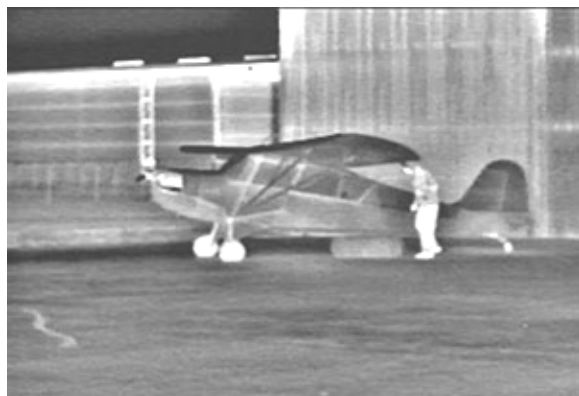


Рисунок 5.7 – ТпВ:  
«Thermal-Eye TSC4500» [45]



Рисунок 5.8 – Однокоординатная  
поворотная ИК платформа:  
изображение (8-12 мкм) [46]

### 5.5 Объекты типа «Танк»

Контраст формируют, в основном, за счет разности температур между окружающей поверхностью фона и областью работы двигательной установки. В зимних условиях эти контрасты максимальны. Специалисты танковых подразделений применяют меры тепловой маскировки. С целью снижения вероятности обнаружения танка в инфракрасном диапазоне и уменьшения вероятности «захвата» танка тепловыми головками самонаведения на крыше силового отделения устанавливается тепловая защита. Благодаря тому, что выхлопные газы смешиваются с воздухом эжекционной системы охлаждения и выбрасываются за корму танка, наибольшее тепловое пятно проявляется не на самом танке, а в нескольких метрах за танком [47].

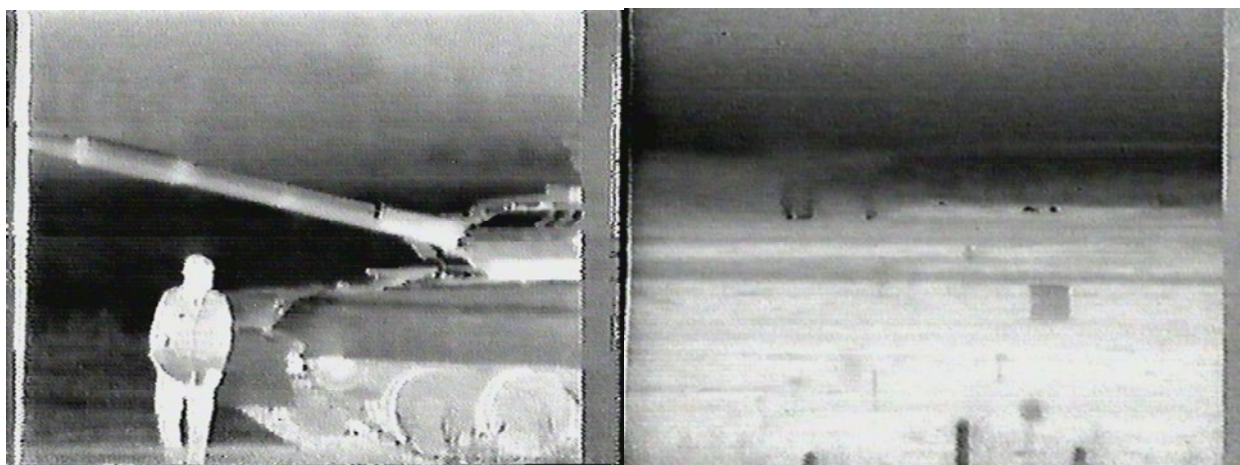


Рисунок 5.9 – Изображение, полученное с ТпВ «Прогресс»



## 5.6 Цели типа «Ангары»


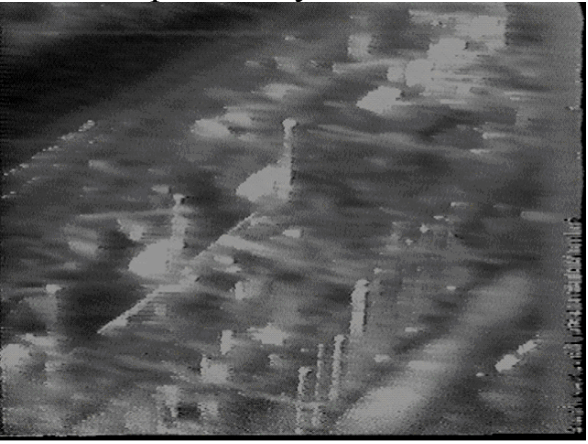


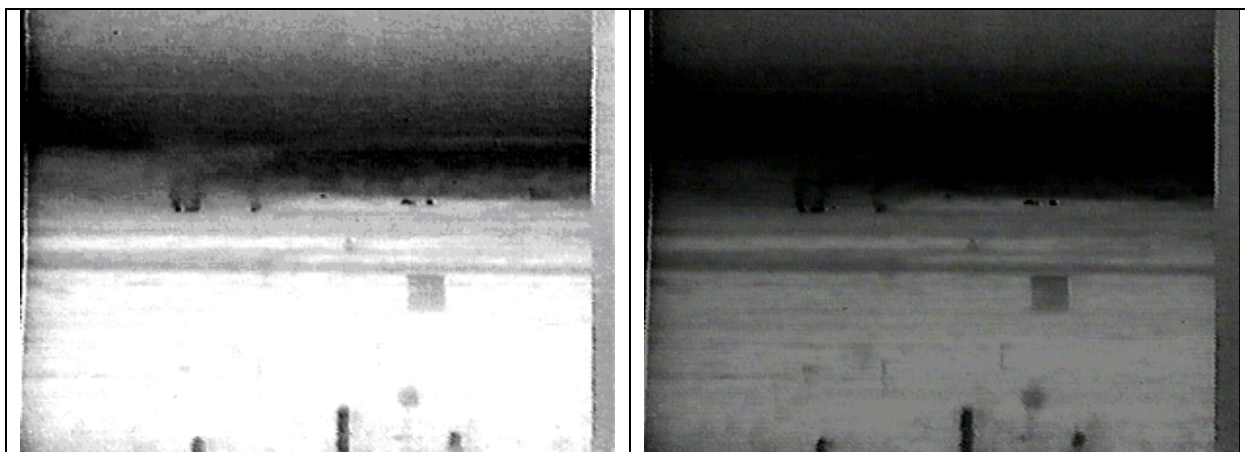
Рисунок 5.10 – Фрагменты изображений ИК и видимого диапазона, полученных малогабаритным сканирующим прибором с высоты 1,5 км [46]

## 5.7 Неблагоприятные условия наблюдения

Следует особо оговорить, что приведённые выше тепловизионные изображения, полученные при наблюдении объектов ТпВ различных классов, показывают предельные характеристики в благоприятных погодных и климатических условиях. Но эти условия в природе зачастую сменяются на неблагоприятные. Для иллюстрации и сравнения благоприятных и неблагоприятных условий достаточно обратиться к таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Сравнительные представления наблюдаемости объектов в благоприятных и неблагоприятных погодных и климатических условиях ТпВ «Прогресс»

Благоприятные условия	Неблагоприятные условия
	
Благоприятные условия	Неблагоприятные условия



### **5.8 Основные задачи по подъёму тепловизионного приборостроения**

На основании анализа оснащённости управлений ВТ РФ, промышленности России и медицинских центров тепловизионной техникой и комплексированными системами можно прийти к неутешительным выводам:

состояние развития отечественной тепловизионной техники на российской элементной базе остановилось на уровне 1980-2000 годов;

в России начинается интенсивная интервенция модульных систем и готовых тепловизионных приборов производства зарубежных фирм (Франция, Япония, США); при этом стоимости тепловизионных модулей составляют десятки тысяч долларов, а готовые тепловизионные приборы имеют цену до нескольких миллионов рублей;

коллективы разработчиков тепловизионной аппаратуры во ФГУП НПК «ГОИ им С.И. Вавилова», НПО «Орион», ИФП СО РАН, ООО «НТК «Криогенная техника», НПО «Геофизика», НПО «ЦИКЛОН» и заводов КМЗ, КОМЗ, УОМЗ хотя и сохранили основных исполнителей, но их средний возраст давно перешёл рубеж 50-летней отметки.

В связи с этим необходимо:

срочное восстановление в ведущих вузах кафедр по подготовке специалистов в области тепловизионного приборостроения;

выделение и финансирование специальных программ по сотрудничеству восстановленных факультетов и кафедр с ведущими специалистами указанных выше НПО и заводов;

разработка и финансирование единой программы развития работ в области создания и возрождения отечественного тепловидения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ллойд, Дж. Системы тепловидения. – М. : «Мир», 1978.
- 2 Джемисон Дж. Э. и др., Физика и техника инфракрасного излучения, «Советское радио», 1965
- 3 Хадсон Р., Инфракрасные системы, «Мир», 1972
- 4 Тарасов, В.В., Якушенков, Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : Логос, 2004.
- 5 Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов : учебное пособие для втузов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1977. – 600 с.
- 6 Певцев, Е., Чернокнижин, В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. – 2001. – №1. – С. 32–36; № 2. – С. 30–34; № 3. – С. 12–20.
- 7 Волков, В. Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения // Журнал «Специальная техника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://st.ess.ru/publications/2\\_2001/volkov/volkov.htm](http://st.ess.ru/publications/2_2001/volkov/volkov.htm)
- 8 Sa'ar, Amir; Shappir, Joseph. Voltage tunable integrated infrared imager. – USP 20070063219. – March 22, 2007.
- 9 Lettington, Alan H.; Blankson, Isaiah M.; Attia, Magdy; Dunn, Dennis. Review of imaging architecture // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4719. – p. 327.
- 10 Мельников, Г.С. Квантовые точки и квантовые колодцы – нанотехнологии [Электронный ресурс] . – Портал МГУ, Нанометр, 2009. – Режим доступа: [http://www.nanometer.ru/2009/02/18/kvantovanie\\_60223.html](http://www.nanometer.ru/2009/02/18/kvantovanie_60223.html)
- 11 Тарасов, В.В.; Якушенков, Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы. – Логос, 2007.
- 12 Покровский, Я.Е. Физика конденсированных сред // "Вестник РФФИ". – 1999. – №4.
- 13 Тарасов, В.В.; Торшина, И.П.; Фотиев, Ю.А.; Якушенков, Ю.Г. Сборник контрольных вопросов по дисциплинам «Оптические и оптико-электронные приборы и системы», «Источники и приемники оптического излучения», «Тепловизионные системы» (уч. пособие для вузов). – М. : МИИГАиК, 2004.
- 14 Almogy, Gilad; Xu, Yuanjian; Tong, Andrew; Shakouri, Ali; Yariv, Amnon. Monolithic integration of quantum well infrared photodetector and modulator. – American Institute of Physics. – 1996. – S0003-6951-96100415-5.
- 15 Тарасов, В.В.; Якушенков, Ю.Г. Конспект лекций «Многоэлементные приемники излучения». – М. : МИИГАиК, 2001.

16 Rogalski, Antoni. Infrared detectors: status and trends. Review [Электронный ресурс] // Progress in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 27. – P. 59–210. – Режим доступа: <http://www.antoni.rogalski.strona.pl/Status.pdf>

17 Фроимсон, И. М. Эффективность тепловизионных приборов. Метод классификации тепловизионных систем. Шкала эквивалентности приемников излучения

18 Norton. P.R. Infrared image sensors // Optical Engineering. – 1991. – Vol. 30. – P. 1649–1663.

19 Ciupa, R.; Rogalski, A. Performance limitations of photon and thermal infrared detectors // Opto-Electronics Review. – 1997. – N5. – P. 257–266.

20 Kozlowski, L.J. HgCdTe focal plane arrays for high performance infrared cameras // Proceedings of SPIE. – 1997. – Vol. 3179. – P. 200–211.

21 Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : Учебник для вузов. – М. : Логос, 2004.

22 Агентство по перспективным оборонным научно-исследовательским разработкам США [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.darpa.mil/mto/personnel/balcerak\\_r.html](http://www.darpa.mil/mto/personnel/balcerak_r.html)

23 Андрюшин, С. Я.; Кравченко, Н. В.; Кулыманов, А. В.; Либерова, Г. В.; Таубкин, И. И.; Тришенков, М. А.; Филачев, А. М.; Эскин, Ю. М. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре РФ «НПО «Орион» // Прикладная физика. – 2000. – №5. – С. 5-17.

24 Дмитриев, Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания // «Электроника»: Наука, технология, бизнес. – 2005. – №8.

25 Овсяк, В.Н. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 243 с.

26 ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://soi.srv.pu.ru/r\\_1251/directions/dir1/dir1.htm](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/directions/dir1/dir1.htm)

27 Схемы и параметры тепловизоров с оптико-механическим сканированием. – Тепловизоры. – Сайт «Электрические сети» [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://leg.co.ua/arhiv/raznoe-arhiv/teplovizory-5.html>

28 ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://soi.srv.pu.ru/r\\_1251/directions/dir1/dir1.htm](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/directions/dir1/dir1.htm)

29 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kropka.ru/refs/69/37301/1.html>

30 «Специальная Техника» [Электронный ресурс]. – Электронный журнал. – 2004. – №2. – Режим доступа: [http://st.ess.ru/publications/2\\_2004/tarasov/table1.htm](http://st.ess.ru/publications/2_2004/tarasov/table1.htm)

31 Криксунов, Л. З.; Усольцев, И. Ф., Инфракрасные системы: «Советское радио», 1968.

32 Тавгер Б.А., Демиховский В. Я. Квантовые размерные эффекты в полупроводниковых и полуметаллических пленках.- Успехи физ.наук, т.96, с.61-86, 1968

33 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: фото SecNews.ru

34 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Security/PanTilt\\_Zoom/ThermoVision\\_2000,3000\\_MS/TVS2000-3000.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Security/PanTilt_Zoom/ThermoVision_2000,3000_MS/TVS2000-3000.pdf)

35 Сайт фирмы «Евролэйз photonics» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.eurolase.ru/titanium.pdf>

36 Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., Ошарин А.А., Серов И.Н., Снурницына Н.Б., Архипова Л.Н., Гальперн Л.А., Тарабукин В.В., Васильев Е.А., Белобородов В.П., Козырева Т.А. «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.

37 Г.С. Мельников, Н.А. Клишо, В.М. Самков, Ю.И. Солдатов, Э.Д.Панков, В.В. Коротаев Метод реализации режима сверхразрешения при комплексировании субмиллиметрового и ИК-диапазонов на двух диапазонных QWIP матрицах. Известия ВУЗов, Серия Приборостроение №9, 2008 г., г. Санкт-Петербург.

38 Мельников Г.С., Клишо Н.А, Самков В. М., Солдатов Ю.И., Коротаев В В «Оптико-электронная комплексированная система наблюдения и распознавания, работающая в ИК и Терагерцовой областях спектра.».

39 Мельников Г.С., Донцов Г.А., Попов А.С., Ошарин А.А., Серов И.Н., Снурницына Н.Б., Архипова Л.Н., Тарабукин В.В., Васильев Е.А., Гальперн Л.А., Козырева Т.А, Белобородов В.П.. 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 2005г.

40 Сайт фирмы FLIR. Описание ИК матричных приёмников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.corebyindigo.com/products/roics\\_2d.cfm](http://www.corebyindigo.com/products/roics_2d.cfm)

41 Выставкин, А.Н.; Шитов, С.В.; Коваленко, А.Г.; Ковтонюк, С.А.; Пестряков, А.В.; Вдовин, В.Ф.; Перминов, В.Г. Субмиллиметровый матричный радиометр на высокочувствительных болометрах



42 "Справочник по инфракрасной технике" ред. У. Вольф, Г. Цесис т.1, М., Мир, 1995г., 606с.

43 Patent 2002320148 JP. Photodetector / Nishino Hiroshi. – 31.10.02 (Priority number: 20010126282 JP; 24.04.01).

44 Сайт фирмы FLIR [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.corebyindigo.com/gallery/military/militarygallery.cfm>

45 Сайт фирмы ООО «ТАСК-Т». Стационарный неохлаждаемый тепловизор Thermal-Eye TSC4500 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://taskt.ru/equipment/thermal/pdf/tsc4500.pdf>

46 Ясинский, Г.И.; Павлов, Н.И. Малогабаритный авиационный сканер для дистанционного зондирования земной поверхности // Труды конференции "Прикладная оптика-2006". Т.1. - С.149. (ФГУП НИИКИ ОЭП, Публикации 2006 г.) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.niiki.ru/doc/konf/po2006/1\\_35.pdf](http://www.niiki.ru/doc/konf/po2006/1_35.pdf)

47 Сайт Харьковского конструкторского бюро по машиностроению им. А.А. Морозова, [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://morozov.com.ua/rus/body/t5-6x-13.php?menu=history4.php>



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

---

## **КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год - кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год - кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год - кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года - кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год - профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год - профессор М.А. Резунов;
- с 1947 по 1972 год - профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год - заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время - почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

История кафедры началась в 1937-38 годах с организации в Ленинградском институте точной механики и оптики (ЛИТМО) кафедры военных оптических приборов. Первым заведующим кафедрой был К.Е. Солодилов, до этого возглавлявший Центральное конструкторское

бюро (ЦКБ) Всесоюзного объединения оптико-механической промышленности (ВООМП). Преподавателями кафедры стали сотрудники этого ЦКБ - М.А. Резунов, М.Я. Кругер, С.Т. Цуккерман, В.А. Егоров, Б.М. Кулежнов.

В годы Великой Отечественной войны кафедра была эвакуирована в Черепаново, где обязанности заведующего кафедрой выполнял профессор А.И. Захарьевский. Преподавателями кафедры по состоянию на 01.04.1945 г были профессор Чулановский, доцент Кругер, ст. преподаватель Гриневич, ассистенты Дедюлин и Погарев. После возвращения в Ленинград кафедрой в 1945-46 годах по совместительству заведовал начальник конструкторского бюро (КБ) Государственного оптического института им. С.И. Вавилова (ГОИ) М.А. Резунов.

В начале 1947 года кафедру возглавил профессор С.Т. Цуккерман, который руководил ею до 1972 года. В 1958 году кафедра была реорганизована в кафедру специальных оптических приборов, а в 1967 году в кафедру оптико-электронных приборов (ОЭП).

Создание С.Т. Цуккерманом в предвоенные годы книги «Точные механизмы» (М.: Оборонгиз, 1941) является значительным вкладом в развитие отечественного точного приборостроения. С.Т. Цуккерман является автором более 120 научных работ и более 50 изобретений. В предвоенные, военные и послевоенные годы С.Т. Цуккерман работал над созданием прицельных устройств для зенитной и авиационной артиллерии. Он был одним из создателей серийного авиационного гироскопического прицела АСП с автоматической выработкой поправки на упреждение, который устанавливался на истребителях МиГ, а также механического ракурсного прицела для мелкокалиберной зенитной артиллерии, широко применяемого во время войны во Вьетнаме.

В 1958 г. при кафедре была организована отраслевая лаборатория «Специальные оптические приборы» с достаточно сильной группой конструкторов-разработчиков. С.Т. Цуккерман и старший научный сотрудник А.С. Гридин руководили разработкой приборов управления по лучу (ПУЛ), предназначенных для управления движением различных подвижных объектов по прямой линии или по программе.

В начале 60-х годов старший научный сотрудник Г.Г. Ишанин занимался разработкой фотометрической аппаратуры, предназначенной для паспортизации оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Значительное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре выдающегося специалиста в области оптико-электронного приборостроения, члена-корреспондента Российской академии наук (РАН), Героя Социалистического Труда, лауреата Ленинской премии профессора М.М. Мирошникова, который, работая на кафедре ОЭП с 1969

года по 1976 год в должности профессора по совместительству, поставил и читал курс «Теория оптико-электронных приборов».

С 1972 года по 1992 год кафедрой ОЭП заведовал заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев, известный специалист в области автоматических ОЭПиС в комплексах навигации и управления авиационной и космической техникой. Соответственно тематика выполнения научно-исследовательских работ на кафедре приобрела новые направления, существенно увеличилось число тем, носящих поисковый фундаментальный характер. Были разработаны новый учебный план и программы учебных дисциплин.

Л.Ф. Порфирьев является автором 19 учебников, учебных пособий и монографий, среди которых можно выделить такие как «Теория оптико-электронных приборов и систем» (Л.: Машиностроение, 1980), «Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах» (Л.: Машиностроение, 1989). Результаты его работ можно оценить как значительный вклад в разработку общей теории оптико-электронных систем.

Л.Ф. Порфирьев как руководитель проводил достаточно жесткую кадровую политику, при которой на кафедре оставались работать только те сотрудники, которые отличались преданностью делу. При этом он оказывал всемерную поддержку сотрудникам кафедры по разработке ими различных направлений теории и практики оптико-электронного приборостроения. По результатам научно-исследовательских работ в этот период защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Г.Н. Грязин (1983 г.), Е.Г. Лебедько (1985 г.), Э.Д. Панков (1986 г.), Г.Г. Ишанин (1988 г.), защищено много диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В этот период под руководством Э.Д. Панкова начали проводиться исследования по разработке новых оптико-электронных систем измерения взаимного положения разнесенных в пространстве объектов.

Г.Н. Грязин, перешедший на кафедру с радиотехнического факультета в конце 60-х годов, продолжил свои работы в области прикладного телевидения, в частности, по разработке систем наблюдения за быстродвижущимися объектами и быстропротекающими процессами.

С 1975 года заведующим отраслевой лабораторией стал старший научный сотрудник А.Н. Тимофеев, который продолжил исследования по разработке методов и средств контроля пространственного положения объектов с помощью ОЭП с оптической равносигнальной зоной для машиностроения, энергетики, строительства, судостроения и железнодорожного транспорта.

С 1975 года, после увольнения в запас, из Ленинградской военной инженерной краснознаменной академии (ЛВИКА) им. А.Ф. Можайского на кафедру пришел работать в должности профессора С.П. Авдеев,

известный специалист в области ОЭПиС космических аппаратов. Он поставил курсы и читал лекции по учебным дисциплинам «Оптико-электронные приборы», «Оптико-электронные приборы систем управления», «Оптико-электронные приборы для научных исследований».

Существенное влияние на содержание подготовки специалистов и научных исследований оказало привлечение к работе на кафедре лауреата Ленинской и Государственной премий профессора Б.А. Ермакова, известного специалиста в области физической оптики и оптико-электронного приборостроения. Б.А. Ермаков работал на кафедре ОЭП с 1979 года по 1992 год в должности профессора по совместительству и поставил курс «Оптико-электронные приборы с лазерами».

В 70-80 годах под руководством доцента Е.Г. Лебедько проводились исследования законов отражения лазерного излучения от нестационарных поверхностей и протяженных объектов, исследования в области теории идентификации объектов по их излучению в сложной фоновой ситуации. Создан комплекс для лазерной локации крупногабаритных морских объектов сложной конфигурации и водной поверхности. В этих работах принимали участие доценты О.П. Тимофеев и С.Б. Лукин.

В 70-90 годах под руководством Л.Ф. Порфирьева был разработан ряд астродатчиков, систем астрориентации и космической навигации (В.И. Калинин, А.Л. Андреев, С.Н. Ярышев).

С 1992 г. заведующим кафедрой является заслуженный деятель науки Российской Федерации, профессор Э.Д. Панков. В 1992 году кафедра была переименована в кафедру оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС).

Под руководством Э.Д. Панкова в 70-90-х годах были проведены разработки ряда оптико-электронных приборов и систем специального и гражданского применения, нашедших практическое внедрение и способствующих научно-техническому прогрессу и укреплению обороноспособности нашей страны.

В частности, исследования и разработки в области линейных и угловых измерений позволили приступить к решению общей проблемы согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах с помощью оптико-электронных систем.

В рамках указанной проблемы доцентом И.А. Коняхиным проводились исследования, результаты которых можно классифицировать как разработку теории построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации.

В то же время доцентом В.В. Коротаевым разработан ряд поляризационных приборов и измерительных установок. Теоретическим результатом работ явилась разработка методологии анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов. По результатам указанных работ В.В. Коротаев (в

1997 г.) и И.А. Коняхин (в 1998г.) защитили диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук.

Применение многоэлементных приемников в системах пеленгации дало толчок развитию телевизионных систем технического зрения, измерительных телевизионных систем и систем обработки изображений. Результаты этих исследований были использованы доцентом А.Л. Андреевым при постановке учебных курсов «Оптико-электронные системы с ЭВМ», «Специализированные аппаратные и программные средства ОЭП», «Автоматизированные телевизионные вычислительные комплексы», а также доцентом С.Н. Ярышевым при постановке им в 1993 году учебной дисциплины «Видеотехника».

Указанные курсы обеспечиваются лабораторным практикумом на базе рабочих мест, оснащенных персональными компьютерами, объединенными в локальную сеть. Рабочие места оснащены аппаратными и программными средствами цифровой видеозаписи и обработки изображений. В этот период Г.Н. Грязиным были подготовлены дисциплинам: «Телевизионные системы», «Прикладное телевидение и телевизионно-вычислительные комплексы» (совместно с А.Л. Андреевым).

На основе обобщения методик расчета оптико-электронных систем различного назначения и принципа действия в 1981 году были развернуты работы по созданию элементов систем автоматизированного проектирования ОЭП. За период с 1981 по 1987 год под руководством И.А. Коняхина были разработаны оригинальные пакеты прикладных программ расчета параметров систем измерения пространственного положения объектов.

Развитие компьютерной техники и программного обеспечения общего назначения позволило создать проблемно-ориентированное программное обеспечение поддержки проектирования ОЭП на системотехническом уровне.

По результатам научных работ сотрудниками кафедры ОЭПиС выпущено в свет 15 монографий, 11 учебников и учебных пособий. На кафедре подготовлено 14 докторов наук, а также более 110 кандидатов наук.

На разработки кафедры получены авторские свидетельства СССР и патенты Российской Федерации на более чем 200 изобретений. Наибольший вклад в изобретательскую деятельность внес Э.Д. Панков - автор 123 изобретений, из которых 33 внедрены в промышленности.

**При заявлении научно-педагогической школы «Оптико-электронное приборостроение» в 2009 году были сформулированы следующие основные научно-технические результаты, достигнутые в период с 1938 по 2009 годы:**

- разработаны принципы построения военных оптико-механических приборов;

- разработаны принципы построения точных механизмов;
- разработаны принципы построения оптико-электронных приборов с оптической равносигнальной зоной;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения оптико-электронных приборов;
- разработаны методы описания импульсных сигналов, идентификации и классификации объектов в системах нестационарной лазерной локации;
- разработаны теория, принципы построения и методы расчета импульсных телевизионных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- обнаружен термоупругий эффект в кристаллическом кварце и создан новый тип приемников оптического излучения;
- разработана теория построения автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- разработана методология анализа поляризационных свойств оптических систем с изменяющейся ориентацией элементов;
- систематизированы теоретические основы и принципы построения измерительных систем на основе матричных фотопреобразователей;
- разработаны основы построения ОЭС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах.

Основоположники научной школы:

Солодилов Константин Евгеньевич, заведующий кафедрой с 1938 г. по 1942 г., профессор;

Цуккерман Семен Тобиасович, заведующий кафедрой с 1947 г. по 1972 г., профессор;

Мирошников Михаил Михайлович, директор ГОИ, д.т.н., профессор, профессор кафедры ОЭП с 1967 г. по 1978 г.; член-корреспондент Российской Академии наук, Герой Социалистического Труда, лауреат Ленинской премии.

Порфирьев Леонид Федорович, заведующий кафедрой с 1972 г. по 1992 г., д.т.н., профессор, Заслуженный деятель науки и техники РСФСР.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

На кафедре была открыта подготовка по новой специализации инженеров «Оптико-электронные приборы и системы обработки видеoinформации» и новая магистерская программа «Оптико-электронные методы и средства обработки видеoinформации».

В 2007 году был создан научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения (НОЦ ОЭП).

Научно-образовательный центр оптико-электронного приборостроения выполняет научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию видеоинформационных и информационно-измерительных приборов различного назначения, высокоточных приборов для измерения линейных, угловых и других физических величин в промышленности, энергетике, на транспорте, а также систем технического зрения и обработки видеоинформации. К выполнению научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ широко привлекаются студенты, аспиранты, молодые специалисты, молодые кандидаты наук. Научно-образовательный центр является активным участником Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы.

### **Направления научных исследований кафедры ОЭПиС в 2007-2011 годах.**

Развитие теоретических основ и принципов построения оптико-электронных приборов и систем, в том числе:

- видеоинформационных измерительных систем;
- видеоинформационных систем наблюдения;
- видеоинформационных импульсных систем наблюдения быстро движущихся объектов;
- комплексированных телевизионно-тепловизионных систем наблюдения,
- ОЭПиС обеспечения техносферной безопасности;
- ОЭПиС согласования отсчетных баз на нестационарно деформируемых объектах;
- автоколлимационных систем с компонентами нарушенной типовой конфигурации;
- ОЭПиС цветового и спектрального анализа объектов;
- фотометрических систем аттестации ОЭПиС, источников и приемников оптического излучения;
- систем лазерной локации с нестационарным облучением;
- ОЭС сепарации полезных ископаемых.

По результатам исследований в этот период на кафедре были защищены 14 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Идет активное пополнение преподавательского состава молодыми кандидатами наук. В настоящее время на кафедре работает 7 кандидатов наук в возрасте до 35 лет.

Мы занимаемся разработкой оптико-электронных приборов и систем в целом:

- системотехническое проектирование,



- разработка (выбор) оптической системы,
- разработка конструкции,
- разработка (выбор) электроники и средств обработки информации,
- разработка программного обеспечения,
- сборка, юстировка, настройка и испытания.

*Заказчикам мы сдаем законченное изделие.*

По итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО 2007-2010 годов кафедра занимала призовые места.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры:

<http://oeeps.ifmo.ru/>

Валерий Валерьевич Коротаев  
Геннадий Семенович Мельников  
Сергей Васильевич Михеев  
Вячеслав Михайлович Самков  
Юрий Иванович Солдатов

# **Основы тепловидения**

**Учебное пособие**

В авторской редакции В.В. Коротаев, Г.С. Мельников  
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО  
Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99  
Подписано к печати  
Заказ №  
Тираж  
Отпечатано на ризографе

**Редакционно-издательский отдел**  
Санкт-Петербургского национального  
исследовательского университета  
информационных технологий, механики  
и оптики  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

