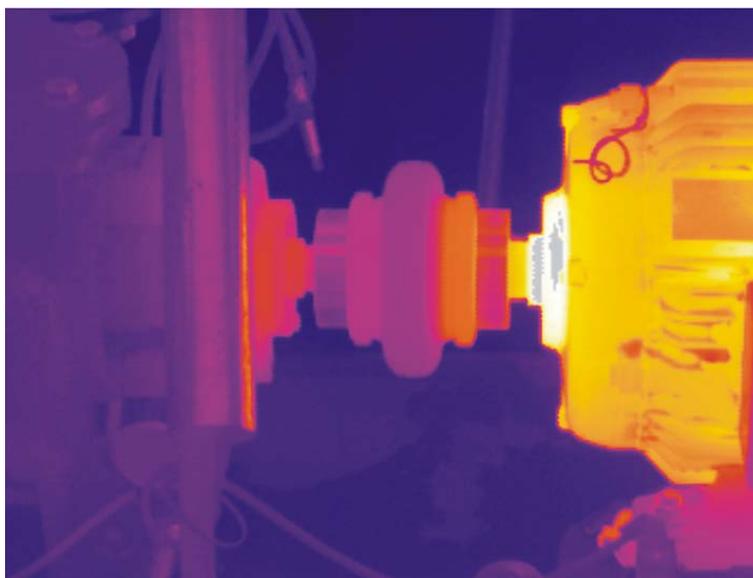


Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников

ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОНИКА

Часть II

ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ



Санкт-Петербург

2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников

ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОНИКА

Часть II

**ОСОБЕННОСТИ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА
ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» в
качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2019

УДК 621.384.3

Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть II. Особенности регистрации и анализа тепловых полей. Учеб. пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 101 с.

Рецензент: Сандуленко Александр Витальевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

«Пособие» посвящено описанию особенностей тепловизионных приборов (ТВП), влияющих на достоверность интерпретации информации, формируемой ими при решении задач дистанционного наблюдения тепловых полей природных и антропогенных объектов.

Конкретные примеры по численным значениям различных характеристик, приводимые в «Пособии», предназначены в качестве исходных данных при выполнении работ за пределами учебного процесса.

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии в качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего образования магистратуры по направлению 12.04.03 “Фотоника и оптоинформатика” при изучении дисциплины «Инфракрасная фотоника», протокол №4 от «12» «ноября» 2019 г.



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников, 2019

Оглавление

Введение	5
1 ИК приборы регистрации и предъявления информации оператору	6
1.1 Особенности интерпретации тепловизионных изображений	6
1.2 Интерпретация количественных данных, получаемых с помощью ТВП	13
1.3 Особенности тепловизионных изображений, обуславливающие неопределённости и неоднозначности при их интерпретации	22
2 Радиометрические и тепловизионные методы дистанционного зондирования	26
2.1 Особенности дистанционного метода измерения радиационных температур	26
2.2 Анализ технических характеристик измерительных ТВП	30
2.3 Тепловизионные приборы дистанционного зондирования в ИК диапазоне	40
3 Функциональная схема, состав и устройство тепловизоров	43
3.1 Фотоприёмные устройства ТВП	43
3.2 Частотная полоса пропускания электронного тракта в ТВП	44
3.3 Геометрические размеры чувствительных элементов МФПУ и их топология.	49
3.4 Рабочий спектральный диапазон ТВП	52
3.5 Чувствительность МФПУ к ИК излучению	58
3.6 Влияние неоднородности параметров элементов МФПУ на качество тепловизионного изображения	61
3.7 Оптические системы ТВП	63
3.8 Системы поддержания рабочей температуры ИК МФПУ	67
3.9 Блоки обработки сигналов	70
3.10 Дисплеи	74
4 Определение характеристик ТВП	77
4.1 Расчётные оценки характеристик ТВП	77
4.1.1 Энергетические расчёты ТВП.	77
4.1.2 Расчётные оценки эффективности использования ИК приборов.	90
4.1.3 Расчётные оценки дальности действия при заданной вероятности правильного решения задачи	91
4.2 Измерение характеристик ТВП	95
4.2.1 Измерение энергетических характеристик ТВП	95
4.2.2 Измерения тактических характеристик ТВП	96
Заключение	98
Список контрольных вопросов	99
Литература	100

Сокращения и условные обозначения

АЧТ	–	абсолютно чёрное тело
ИК	–	инфракрасный
ТВП	–	тепловизионный прибор
МДВ	–	метеорологическая дальность видимости
MWIR	–	middle wave infrared –средневолновый ИК диапазон (3-5 мкм)
LWIR	–	long wave infrared – длинноволновый ИК диапазон (8-14 мкм)
УФ	–	ультрафиолетовое (излучение)
СКЗ	–	среднеквадратическое значение
ОСШ	–	отношение сигнала к шуму
ОЭП	–	оптико-электронные приборы
ОС	–	оптическая система
МФПУ	–	матричное фотоприёмное устройство
БЦО	–	блок цифровой обработки
СГО	–	система глубокого охлаждения

Введение

На каждом этапе развития оптоэлектроники приборостроители последовательно решали задачи, конечной целью которых было дополнить информацию, получаемую оператором в видимом диапазоне, информацией, содержащейся в электромагнитном излучении других диапазонов, которые глаз человека не воспринимает непосредственно. Если на первоначальном этапе освоения ИК области спектра главной задачей было получение инфракрасного изображения объектов, похожего на изображение в видимом диапазоне, то в настоящее время основное внимание уделяется выявлению содержательной информации, содержащейся в тепловизионном изображении и дополняющей визуальный образ.

Тепловизионные изображения, при большой их схожести с телевизионными, несут специфическую информацию о динамике внутреннего энергетического состояния объекта, окружающей обстановке и условиях наблюдения его теплового поля. Как и всякое техническое средство, тепловизионные приборы имеют свои неизбежные ограничения, приводящие к характерным для каждого типа ТВП искажениям в предъявляемую оператору тепловизионную «картинку». Правильная интерпретация результатов дистанционного наблюдения различных сюжетов требует знания особенностей тех или иных искажений, которые вносят ТВП разных схем построения в зависимости от условий их применения. Физическая основа многих особенностей наблюдения тепловых полей состоит в мультипликативном характере регистрируемого сигнала, то есть в том, что пороговая чувствительность ИК приборов зависит от интенсивности ИК излучения визируемого объекта и того фона, на котором он наблюдается. С изменением интенсивности ИК излучения объекта и подстилающей поверхности, на фоне которой он наблюдается, одновременно и неоднозначно изменяется амплитуда контрастного оптического сигнала, вольт/ваттная характеристика и интенсивность собственных шумов фотоприёмника. При этом одновременно изменяется соотношение интенсивностей внутренних шумов фотоприёмного тракта и шумов внешнего фона, а также статистика флуктуаций помеховой составляющей сигнала, подлежащего выделению из совокупности внешних и внутренних помех. Эти зависимости неоднозначны и зависят от совокупности ряда факторов, связанных как с характеристиками условий наблюдения, так и с характеристиками ИК прибора.

Методическое пособие может быть использовано обучающимися в качестве основного источника для самостоятельной подготовки по темам лекционного курса. А также может являться теоретической базой для освоения лабораторных работ по дисциплине, проведения практических расчетов и подготовки курсовой работы.

1 ИК приборы регистрации и предъявления информации оператору

1.1 Особенности интерпретации тепловизионных изображений

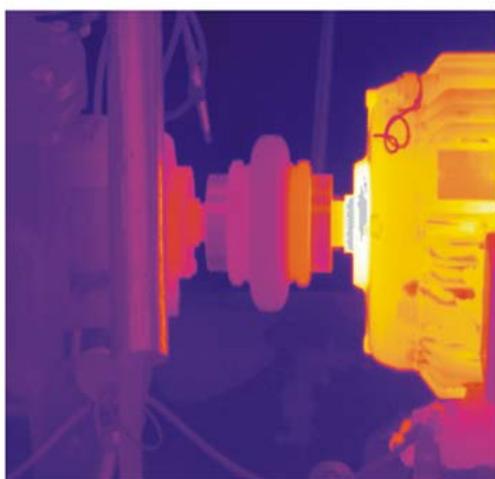
Конечная задача дистанционных наблюдений с помощью оптико-электронных приборов (ОЭП) состоит в получении такой информации, которая позволила бы оператору делать надёжный прогноз развития наблюдаемой ситуации. Время текущего прогноза развития ситуации должно быть больше, чем время, необходимое для принятия решения и выполнения оператором ответных упреждающих действий. Количественным критерием эффективности информационной системы может служить время действия прогноза, а его надёжность традиционно оценивается вероятностными характеристиками. Необходимым условием достоверной интерпретации результатов наблюдений при решении задач дистанционного зондирования является понимание содержательной структуры получаемых данных [1]. Для ОЭП видимого диапазона (телевизионных и фотографических) выявление содержательной информации в получаемом изображении возлагается на оператора, который на основе накопленного повседневного опыта визуального восприятия окружающей обстановки выносит решения самого высокого уровня. Основное требование, предъявляемое к телевизионным и фотографическим системам, состоит в представлении оператору изображения объектов с наименьшими искажениями по геометрическим формам, цветопередаче и соотношению яркостей фрагментов. При анализе тепловизионных изображений оператор не имеет возможности опираться на такой опыт и вынужден привлекать сведения о причинно-следственных связях особенностей тепловизионных изображений объектов, полученные опытным путём, изучением научно-технической литературы и нормативных документов. Поэтому требования к собственно тепловизионным приборам и их построение отличаются в некоторых важных чертах от ОЭП видимого диапазона [2–10]. Очевидное проявление этого наблюдается при сопоставлении тепловизионного (а) и телевизионного (б) изображений одного и того же сюжета, например, теплового портрета работающего электродвигателя (рис. 1.1), на котором демонстрируются телевизионное и тепловизионное изображения работающего электродвигателя, заимствованные из рекламных проспектов фирмы FLIR.

Если для телевизионного изображения увеличение подробности, количества полутонов и правильности цветопередачи приводит в большинстве случаев к повышению его информативности, то и высококачественное тепловизионное изображение, и относительно «размытое» малоконтрастное изображение могут иметь для оператора одинаковое смысловое содержание.

Например, обнаружение неисправных электрических изоляторов по значениям измеренной радиационной температуры (рис. 1.2 а) или локализация остатков сыпучих грузов по тепловому профилю на поверхности вагона (рис. 1.2 б) вполне достаточны для принятия решения, несмотря на сравнительно невысокое качество тепловизионной «картинки».



а



б

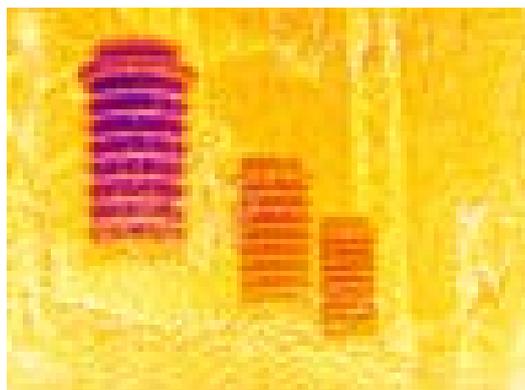


в

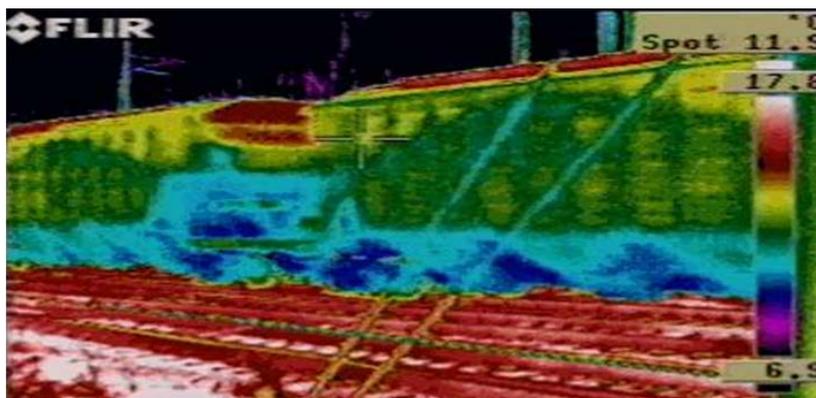
Рисунок 1.1 – Тепловизионный измерительный прибор фирмы FLIR (а) и получаемые с его помощью тепловизионное (б) и телевизионное (в) изображения работающего электродвигателя

Носителем содержательной информации тепловизионного изображения является соотношение тепловых контрастов в оптическом поле конкретного сюжета, которое служит основой для актуальной интерпретации изображения в рамках решаемой задачи. Тепловизионный кадр в явном виде представляет собой отображение на экране монитора **разности** ИК излучения, попадающего на каждый пиксель МФПУ ТВП, по отношению к окружающим его соседям, то есть, отображение тепловых **контрастов** сюжета. Важная особенность тепловидения связана со структурой ИК сигнала, в котором среднее значение фонового излучения существенно превосходит значение теплового контраста наблюдаемого объекта.

Например, при температуре фона 300 К среднее значение его энергетической светимости в диапазоне 8–12 мкм составляет $\sim 1,21 \cdot 10^{-2}$ Вт/см², энергетическая светимость объекта с температурой 301 К (контраст $\Delta T = 1$ К) составляет $\sim 1,23 \cdot 10^{-2}$ Вт/см², то есть, его контраст $\Delta T = 301 - 300 = 1$ К соответствует контрасту энергетических светимостей $(1,23 - 1,21) \cdot 10^{-2} / 1,23 \cdot 10^{-2} \sim 1,6\%$.



а



б

Рисунок 1.2 – Тепловизионное изображение электрических изоляторов (а) и движущегося вагона с насыпным грузом (б) получено с помощью ТВП Р 640 фирмы FLIR

Именно в этой области динамического диапазона сигнала сосредоточена содержательная информация, которую необходимо предоставить оператору с наибольшей подробностью, а остальная часть сигнала (~ 98%) представляет собой «неинформативную» составляющую, так как она одинакова для всех фрагментов наблюдаемого сюжета. Для нормальной работы электронного тракта ТВП её необходимо «вычистить» из всех сигналов тепловизионного изображения. Процедура вычитания постоянной составляющей является стандартной, однако для ИК приборов особенность в том, что уровень фонового излучения, который необходимо вычитать, существенно зависит от того сюжета, который наблюдается в данный момент. Небольшие изменения в сюжете (например, сдвиг линии горизонта на несколько тепловизионных строк или появление холодного или тёплого предмета в поле зрения ТВП) приводят к существенным изменениям среднего значения излучения в кадре, превышающим значение контрастного излучения наблюдаемого объекта. Из-за этого в каждом новом сюжете распределение контрастов на тепловизионном изображении может измениться вплоть до изменения знака контраста, но правильная интерпретация наблюдаемого сюжета от этого не должна зависеть.

Исходным объектом, с которым работает оператор, является тепловизионное изображение, имеющее свои особенности и отличающееся от телевизионного изображения. Привычные для телевидения операции регулировки «яркость» и «контраст» изображения осуществляют адаптацию

изображения на экране дисплея к условиям его внешней освещённости и особенностям зрения оператора. В тепловидении регулировки осуществляют адаптацию, в первую очередь, передаточной характеристики оптико-электронного тракта прибора к интенсивности ИК излучения сюжета, хотя отображаются на экране схожим с телевидением образом видимым усилением яркости свечения фрагментов и увеличением контрастов яркости между ними.

На рис. 1.3 представлен один из таких вариантов последовательной подстройки тепловизионного изображения для обеспечения комфортных условий его наблюдения оператором ТВП путём постепенного увеличения контрастности изображения (кадры 1.3.а и 1.3.б). Для оператора обозначение режима работы оптико-электронного тракта ТВП выводится на экран в привычных ему терминах «контраста» (уменьшен или увеличен). Однако очевидный эффект улучшения комфортности восприятия и более достоверной интерпретации содержательной структуры тепловизионного изображения (более надёжно обнаруживается катер на фоне берегового уреза, очерчен силуэт берега) достигается последовательным выполнением операций над сигналом в блоке цифровой обработки до его поступления в блок монитора. Вначале определяется среднее значение сигналов сюжета во всём кадре, затем строится (как правило) гистограмма распределения сигналов сюжета и определяются максимальные отклонения значений этих сигналов относительно уровня среднего по кадру сигнала (уровня «серого»), устанавливается такой коэффициент передачи сигнала в электронном тракте, чтобы заранее выбранное количество сигналов в кадре (например, 95% или же 80%) попадало в область линейного диапазона воспроизведения полутонов используемого монитора.

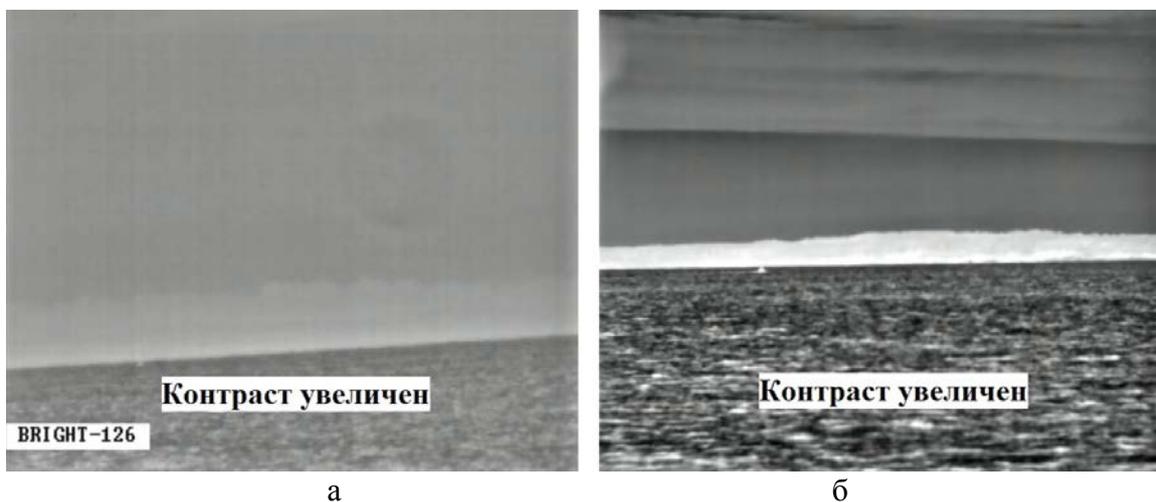
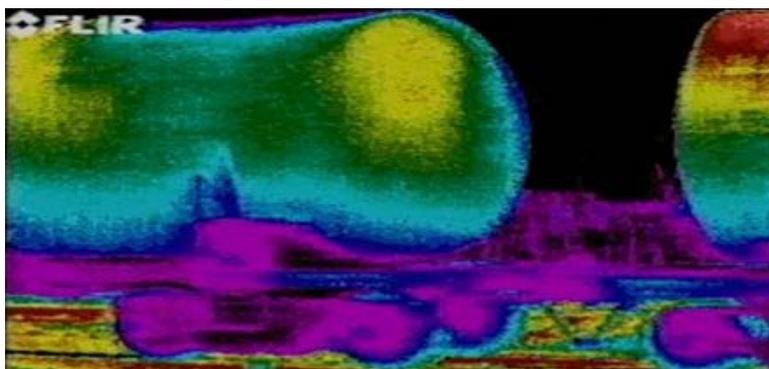


Рисунок 1.3 – Тепловизионное изображение линии берегового уреза получено с помощью ТВП «Маугли» изготовления АО «ЛОМО» при последовательном увеличении контрастности изображения от (а) к (б).

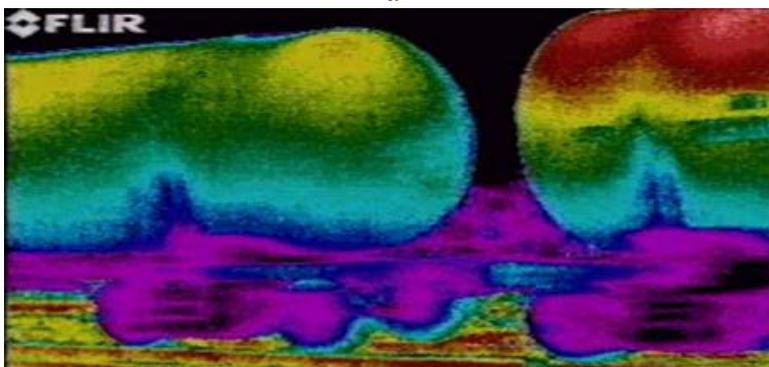
Таким образом, при выборе одного из режимов (рис. 1.3 а) на экране монитора можно воспроизводить все сигналы (но для этого приходится загрублять коэффициент передачи электронного тракта, и изображение становится «вялым»), либо добиваться полутонового воспроизведения

изображения лишь части сигналов в кадре (за счёт достаточно большого коэффициента передачи сигнала, рис. 1.3 б), обеспечивая комфортное восприятие содержательной части информации (но часть фрагментов сюжета находится в области «белее белого» или «чернее чёрного»).

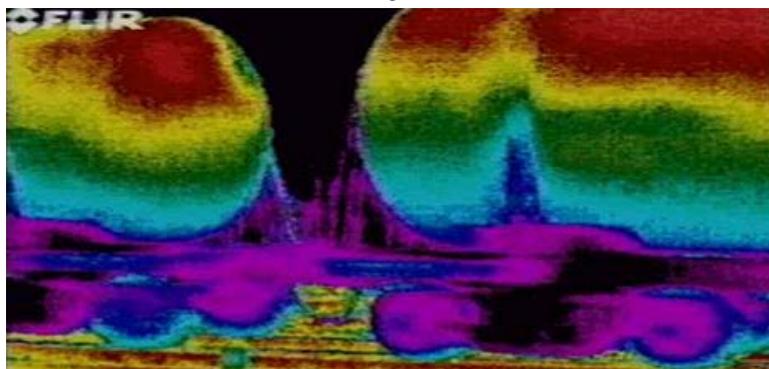
В оптико-электронном тракте ТВП решаются две взаимосвязанные задачи: выработка текущего значения «опорного сигнала» и согласование диапазонов входного и выходного сигналов. Чаще всего употребляются термины «выработка «уровня серого» на экране» и «формирование ширины и положения «температурного окна» в тепловизионном изображении». Например, при движении состава одни и те же цистерны наблюдаются под разными ракурсами (рис. 1.4).



а



б



в

Рисунок 1.4 – Тепловизионное изображение движущихся цистерн получено с помощью ТВП Р640 фирмы FLIR. «Уровень серого» в кадрах 1.4.(а) и 1.4.(б) отличается от «уровня серого» в кадре 1.4.(в), из-за чего изменяется «привязка» цветов фрагментов изображения: жёлтый цвет торца левой цистерны на кадрах (а) и (б) скачком изменяется на красный цвет в кадре (в)

Изменение ракурса приводит к изменению регистрируемой радиационной температуры, однако содержательная информация, смысл которой состоит в определении уровня наполненности каждой из цистерн, не изменяется. На экране дисплея изменение радиационных температур сюжета проявляется в изменении «уровня серого» в чёрно-белом изображении. Изменение теплового поля по мере смещения цистерн в поле зрения ТВП для оператора выглядит естественным в чёрно-белом изображении, однако в палитре Rainbow изменение «уровня серого» в кадре изменяет «привязку» цветов фрагментов изображения к цветовой градационной шкале дисплея. Жёлтый цвет торца левой цистерны на первых двух кадрах (рис. 1.4 а и рис. 1.4 б) скачком изменяется на красный цвет (рис. 1.4 в). Количественные значения радиационной температуры всех фрагментов тепловизионного изображения, включая торец левой цистерны, не изменяются. Но, поскольку при этом изменилась градационная шкала псевдоцветов изображения, то одновременно с изменением «уровня серого» (среднего значения температуры в кадре) изменяется и распределение цветов в изображении деталей сюжета на экране. Происходит изменение цвета торца левой цистерны на красный цвет, которое недостаточно опытный оператор может принять как драматическое, если не будет обращаться к количественным значениям измеряемой радиационной температуры.

Другая важная особенность тепловизионного изображения связана с тем, что диапазон сигналов, поступающих на вход ТВП, существенно больше, чем диапазон яркостей свечения экранов мониторов. Автоматическая обработка сигналов в ТВП нацелена на «вписывание» амплитуд регистрируемых сигналов в линейный динамический диапазон электронного тракта, на выходе которого находится монитор ТВП. Из-за ограниченного диапазона яркостей свечения экрана неизбежно теряются какие-то подробности изображения (рис. 1.5), поэтому предусмотрены несколько вариантов процедуры согласования диапазонов входного и предъявляемого оператору сигналов, из которых он выбирает приемлемый исходя из решаемой задачи. При этом достоверность интерпретации информации не должна снижаться независимо от установки среднего уровня по кадру («уровня серого»), положения и ширины «температурного окна». При выявлении деталей изображения зданий и сооружений (рис. 1.5 а и рис. 1.5 в) ухудшается подробность отображения облаков. При выявлении изображений облаков на небосводе (рис. 1.5 б и рис. 1.5 г) ухудшается подробность отображения зданий и сооружений. Регулировка производится оператором выбором «уровня серого» и шириной «температурного окна» при обработке изображения исходя из приоритета получения содержательной информации о тепловом поле того или иного фрагмента наблюдаемого сюжета.

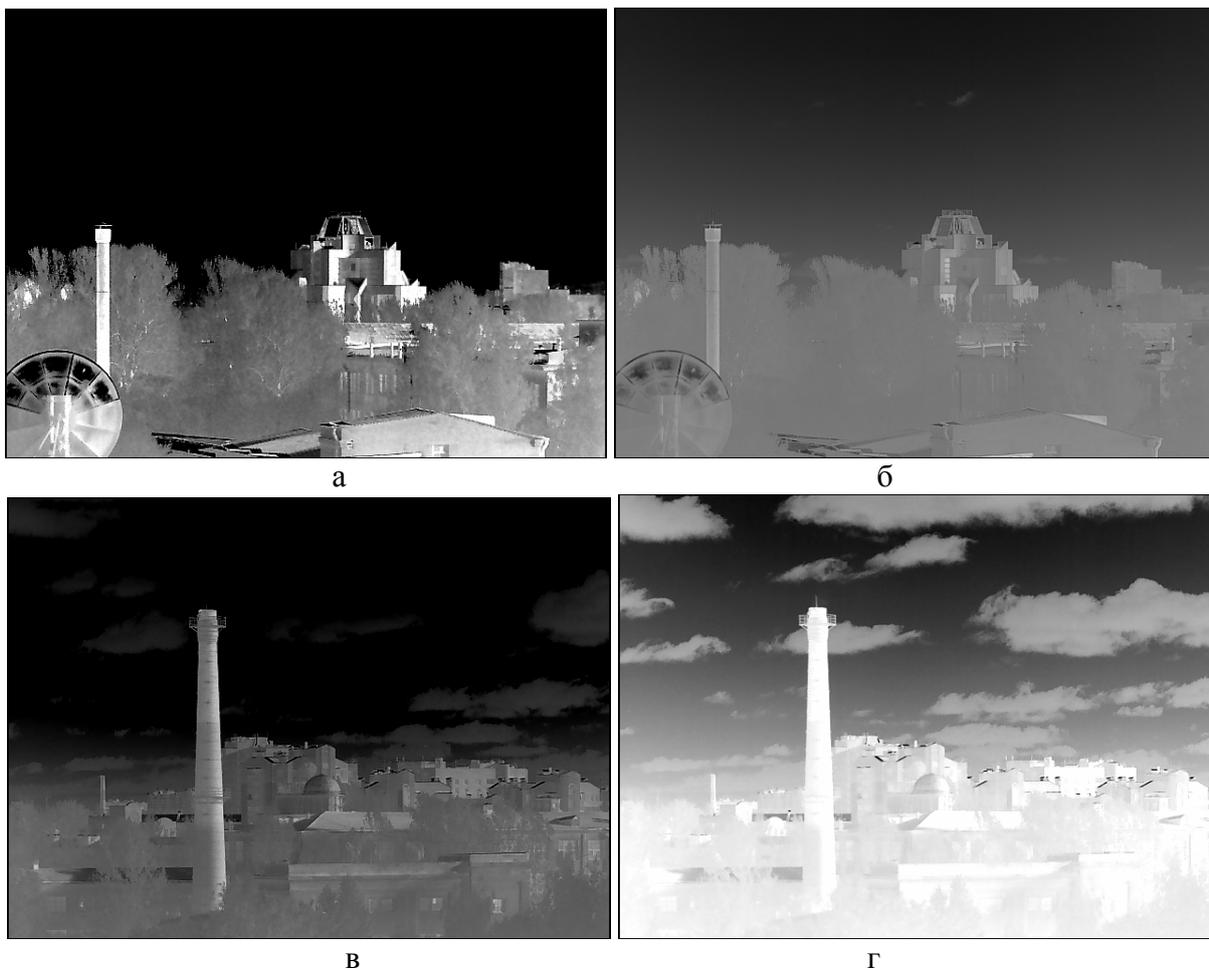


Рисунок 1.5 – Тепловизионное изображение городского пейзажа с различной степенью детализации фонового излучения небосвода и сооружений в зависимости от установки «среднего уровня по кадру», положения и ширины «температурного окна»: при выявлении деталей изображения зданий и сооружений (а) и (в) ухудшается подробность отображения облаков на небосводе (б) и подробность отображения зданий и сооружений (г)

Регулировки тепловизионного изображения настроены таким образом, чтобы наиболее подробно отображалось тепловое поле зоны возможного интереса (предположительно, несущее необходимую содержательную информацию), например, дефекта, в то время как все остальные детали сюжета лишь обозначены и служат для ориентации оператора (рис. 1.6).



Рисунок 1.6 – Изображение дефектного изолятора выделено за счёт снижения детальности изображения сюжета. Тепловизионное изображение получено с помощью ТВП Р 640 фирмы FLIR и предоставлено сотрудниками ФГОУ ПЭИПК

1.2 Интерпретация количественных данных, получаемых с помощью ТВП

Помимо формирования изображения, современный ТВП должен дополнительно выполнять ещё и другие специфические для данного круга задач функции: измерения температуры (радиометрические), выработки координат целей и т.п. В задачах, где оператор на основе содержательной структуры тепловизионного изображения выбирает решение из многих альтернатив, интерпретация информации достаточно сложна и требует привлечения целого ряда дополнительных сведений. Для медицинских, промышленных и экологических областей применения ИК приборов привлекаются данные радиометрических измерений, чаще всего в форме радиационных температур излучающей поверхности наблюдаемого объекта [11]. Повышение достоверности интерпретации результатов такого тепловизионного обследования прямо связано с извлечением в явном виде количественной информации из тепловизионного изображения. Для военных, навигационных и охранных задач предъявление оператору на мониторе информации о радиационных температурах целей избыточно и, скорее всего, давало бы отрицательный эффект. Приоритетными свойствами таких ТВП является минимизация отвлекающих подробностей в тепловизионном изображении наблюдаемого пространства (естественных и организованных помех), предъявление оператору «тревожных зон», «целеподобных» отметок и обеспечение устойчивого автоматического сопровождения выделенных целей.

Универсальным приёмом повышения информативности дистанционного зондирования является предъявление оператору одновременно с тепловизионной картиной распределения радиационных температур по поверхности наблюдаемых объектов числового значения радиационной температуры выбранного фрагмента сюжета и результатов вторичной обработки этих данных, например, изотерм, областей с одинаковой

температурой и т.п. Введение количественных данных в предъявляемую оператору информацию качественным образом повышает её содержательную ценность. Для реализации измерительных функций в такие ТВП вводится специальная схема создания и измерения параметров оптического эталонного сигнала. В отличие от телевидения, где в сигнале существует физически представимое понятие «уровень чёрного», в ИК технике сложно создать условия, при которых на МФПУ не попадали бы фотоны теплового излучения или их попадало бы так же пренебрежимо мало, как в МФПУ видимого диапазона в полной темноте. Кроме того, в земных условиях уровень средней фоновой засветки и флуктуации его теплового излучения на порядки больше такого «нулевого уровня «чёрного» в ИК диапазоне», что делает его практически бесполезным для использования по тем же алгоритмам, что в телевидении. Поэтому в ТВП эталонное («опорное») излучение формируется физическим ИК излучателем, обеспечивающим, как правило, одинаковую засветку всех чувствительных элементов МФПУ. При этом поле зрения МФПУ механически перекрывается от попадания излучения других источников излучения. Сам «опорный излучатель» представляет собой имитатор АЧТ, температура которого обязательно измеряется контактным или неконтактным способом, а иногда и регулируется, подстраиваясь под интенсивность излучения наблюдаемого сюжета.

На рис. 1.7 а – фотоприёмный микроболометрический модуль, на рис. 1.7 б – фотоприёмный модуль в корпусе. Перед входным окном (рис. 1.7 б) расположена ламель встроенного эталонного пассивного ИК излучателя, который механически вбрасывается в поле зрения фотоприёмника во время калибровки и перекрывает всё поле зрения фоточувствительной микроболометрической матрицы.

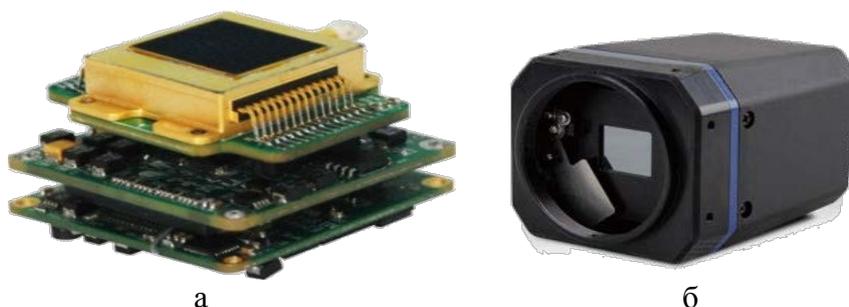


Рисунок 1.7 – Устройство фотоприёмного модуля. Из рекламных материалов фирмы DALI (Китай). а – фотоприёмный микроболометрический модуль, б – фотоприёмный модуль в корпусе

С процедуры калибровки начинается работа ТВП всех типов. ИК излучатель – формирователь эталонного излучения – может быть пассивным (например, чёрная вбрасываемая перед МФПУ ламель, как на рис б б), либо активным (например, с использованием термоэлектрических элементов Пельтье). При засветке фотоприёмной матрицы выполняется ряд операций: выравниваются коэффициенты передачи сигнала от всех чувствительных элементов МФПУ, выявляются и блокируются дефектные элементы,

формируется сигнал для восстановления постоянной составляющей сигнала и другие операции, условно отнесённые к «первичной обработке сигнала». Выполняется операция формирования эталонного («опорного») уровня оптического сигнала $F_{\text{эт}}$.

$$F_{\text{эт}} = \delta \cdot \left(\frac{C_1}{2}\pi\right) \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_{\text{эт}} \cdot \lambda^{-5} \left\{ \exp\left[\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\text{эт}}}\right] - 1 \right\}^{-1} \cdot d\lambda, \quad (1)$$

где δ – апертурный угол чувствительного элемента фотоприёмника; $\varepsilon_{\text{эт}}$ – спектральная излучательная способность поверхности эталонного излучателя; $T_{\text{эт}}$ – температура излучения поверхности эталонного излучателя, C_1 и C_2 – постоянные в формуле Планка [1]. Значение $F_{\text{эт}}$ после соответствующей обработки в электронном тракте можно интерпретировать в единицах радиационной температуры встроенного эталона. После преобразований фотоприёмным и электронным трактами в электрический сигнал значение эталонного уровня хранится в оперативной памяти ТВП в форме значений напряжения «опорного» электрического сигнала эталонного излучателя $U_{\text{эт}}$:

$$U_{\text{эт}} = F_{\text{эт}} \cdot s_{\text{фп}} = \delta \cdot \left(\frac{C_1}{2}\pi\right) \int_{\Delta\lambda} \varepsilon_{\text{эт}} \cdot s_{\text{фп}}(\lambda) \cdot \lambda^{-5} \left\{ \exp\left[\frac{C_2}{\lambda \cdot T_{\text{эт}}}\right] - 1 \right\}^{-1} \cdot d\lambda, \quad (2)$$

где $s_{\text{фп}}(\lambda)$ – спектральная чувствительность элемента МФПУ. Значение $U_{\text{эт}}$ используется для вычисления количественных значений сигналов от всех чувствительных элементов МФПУ при дальнейшей обработке сигналов.

После окончания первого этапа калибровки на МФПУ подаётся излучение сюжета ($F_{\text{сюжета}}$). В соответствии с наблюдаемым распределением излучения в плоскости матрицы МФПУ его элементы вырабатывают индивидуальные сигналы $U_{\text{сюжета}}$:

$$U_{\text{сюжета}} = \delta \cdot \int_{\Delta\lambda} F_{\text{сюжета}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{оптики}}(\lambda) \cdot s_{\text{фп}}(\lambda) \cdot d\lambda,$$

где $\tau_{\text{оптики}}(\lambda)$ – спектральное пропускание оптической системы.

На основе совокупности всех значений сигналов в кадре $U_{\text{сюжета}}$ вычисляется среднее значение сигналов по всему кадру ($U_{\text{среднее}}$). Его можно интерпретировать при соответствующей калибровке как среднее значение яркостной температуры всего кадра (наблюдаемого сюжета). Затем определяется разность усреднённого значения и сигналов от каждого из элементов МФПУ $U_{\text{сюжета}}$:

$$\Delta U = U_{\text{среднее}} \pm U_{\text{сюжета}}$$

Полученный биполярный сигнал ΔU отображает распределение тепловых контрастов в тепловизионном кадре, а зафиксированные значения среднего сигнала от эталона и отклонения от него среднего сигнала кадре несут

информацию об абсолютных значениях лучистых потоков, то есть об абсолютных значениях радиационных температур [12] деталей наблюдаемого сюжета. Таким образом, непосредственно на экране ТВП оператору предьявляется распределение контрастов ИК излучения в наблюдаемом сюжете относительно некоторого среднего уровня ($U_{\text{среднее}}$), зависящего от этого же сюжета $U_{\text{сюжета}}$ и ΔU . Абсолютные значения лучистых потоков (и радиационных температур) в неявном виде содержатся в значениях эталонного сигнала $U_{\text{эт}}$. При измерениях радиационных температур с помощью измерительных ТВП, фактически измеряются контрасты (разности) ИК излучения фрагментов изображения по отношению к ИК излучению эталонного излучателя, то есть производятся относительные измерения. Оператору для выявления содержательной информации предьявляются результаты последующего суммирования измеренного контрастного сигнала с сигналом от эталонного излучателя. Вычисленное среднее по кадру значение сигнала $U_{\text{среднее}}$ используется в дальнейшем для восстановления постоянной составляющей и для формирования и регулировки уровня «серого» в тепловизионном изображении на экране.

На следующем этапе обработки электрического сигнала производится согласование динамического диапазона устройства отображения информации и диапазона поступающего на него информационного сигнала. Наиболее узким динамическим диапазоном обладает экран монитора ТВП. В реальных условиях (внешняя освещённость, относительные перемещения и т.д.) чёрно-белый монитор может представить оператору не более 10 различных уровней серого, то есть 10 градаций сигнала должны достоверно отобразить намного больший диапазон распределения контрастов в наблюдаемом тепловом поле сюжетов $F_{\text{сюжета}}$. Представление о соотношении масштабов разбросов амплитуд поступающего и воспроизводимого на экране сигналов даёт отношение диапазона тепловых контрастов в наблюдаемой обстановке к значению пороговой чувствительности современных ТВП. Среднее значение пороговой чувствительности современных ТВП составляет не хуже $\Delta T_{\text{пор}} \leq 0,08 \text{ К}$, а распределение радиационных температур в характерных сюжетах с учётом фонового излучения подстилающих поверхностей [7] находится, обычно, в пределах от 7 К до 30 К. То есть динамический диапазон характерных входных сигналов, ориентировочно, находится в пределах от 80 до 400, превышая динамический диапазон экрана (10 градаций) в 8–40 раз.

Необходимо отметить, что динамический диапазон цифровой памяти современных ТВП, в которой записываются и обрабатываются сигналы, значительно шире диапазона экрана. Он составляет не менее 1000 уровней дискретизации сигнала. Это даёт возможность проводить в дальнейшем обработку и анализ изображений, архивированных разными способами. Однако в реальном времени оператор должен принимать оперативные решения по изображению на экране монитора ТВП, который в наибольшей степени влияет на искажение полутонов наблюдаемых изображений.

Автоматическое согласование диапазонов входного сигнала и яркостей предьявляемого оператору изображения является одной из актуальных проблем

тепловидения, которая не имеет общего решения для всех задач, где ТВИ используются. Нашедшие наиболее широкое применение на практике приёмы – формирование ширины и положения «температурного окна» и сжатие сигнала – требуют участия оператора на этапе выбора, какой из них целесообразно применить для решения актуальной задачи.

Формирование «температурного окна» представляет собой метод, при котором выбирается (вручную оператором или автоматически по специфическим алгоритмам) линейный диапазон передачи и предъявления оператору на мониторе сигнала, в пределах которого тепловизионное изображение интересующего объекта отображается с максимальным количеством градаций яркости монитора.

На рис. 1.8 приведена заимствованная из «Методики ИК диагностики тепломеханического оборудования» (ОАО «Фирма «ОРГРЭС», Москва, 2000 год) иллюстрация с оригинальными комментариями, демонстрирующая случай, когда необходимо зарегистрировать и измерить малые тепловые контрасты. «Температурное окно» выбрано таким образом, что реализуется максимальная чувствительность ТВИ и хорошо регистрируются дефекты теплоизоляции. Однако при этом весь окружающий сюжет не отображается, поскольку его излучение лежит вне пределов линейного динамического диапазона экрана дисплея («чернее чёрного»).

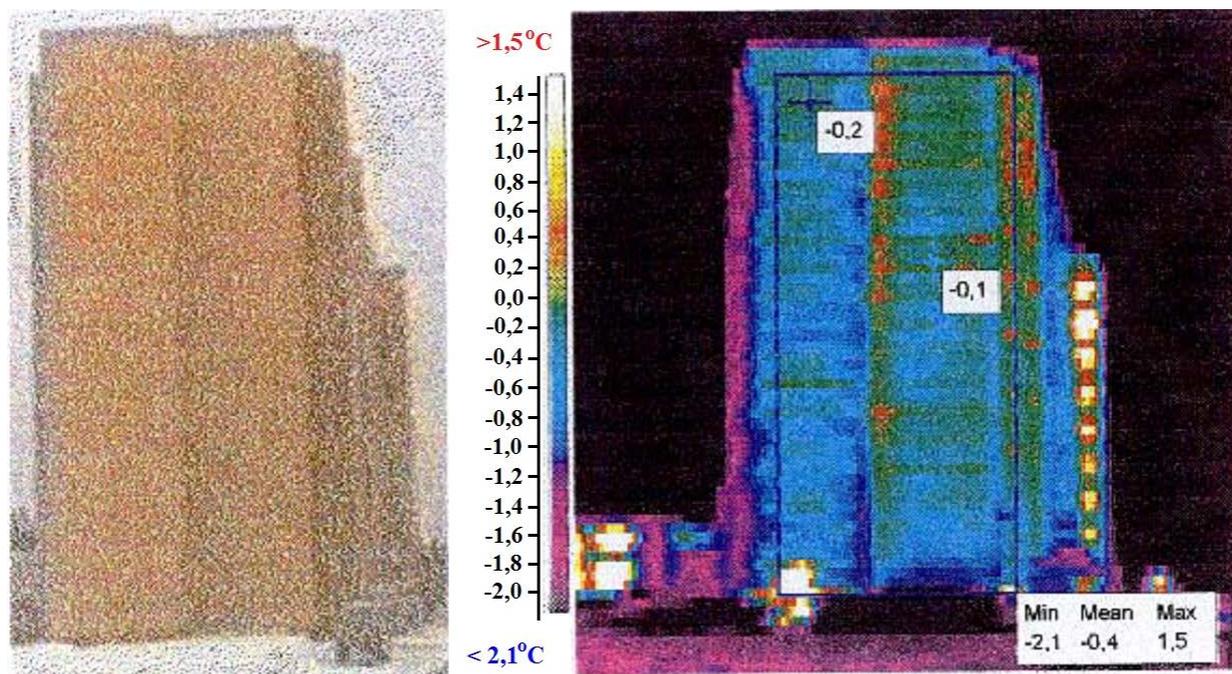


Рисунок 1.8 – Фотографическое и тепловизионное изображения жилого здания. Заимствовано из «Методики ИК диагностики тепломеханического оборудования» (ОАО «Фирма «ОРГРЭС», Москва, 2000 год)

На рис. 1.9 «температурное окно» выбрано наилучшим способом для отображения подробностей теплового поля в области предполагаемого дефекта, но фон неба полностью находится вне наблюдения.

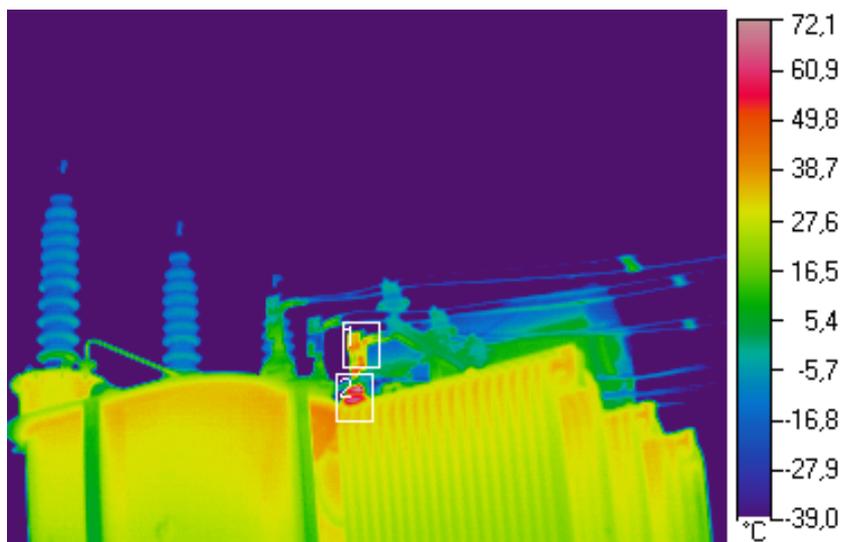


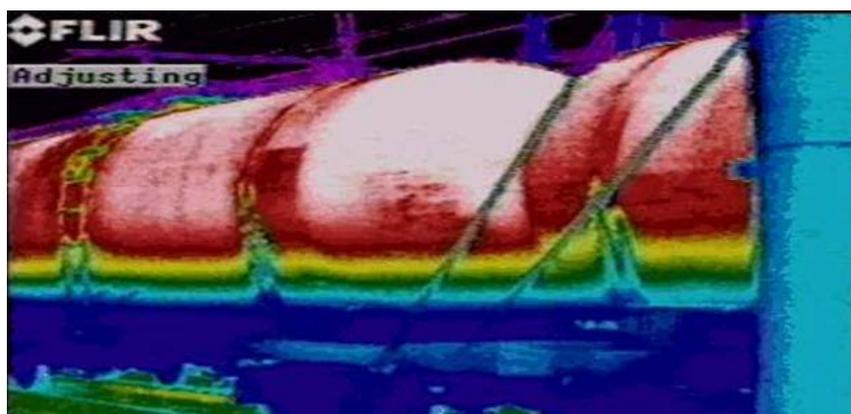
Рисунок 1.9 – Тепловизионное изображение в диапазоне 8 – 12 мкм получено с помощью ТВП фирмы FLIR Р640

Если оператор выбирает положение и ширину «температурного окна» так, чтобы с наилучшей подробностью исследовать интересующий фрагмент изображения, то он будет наблюдаться в полутоновой гамме. Предполагается, что основная смысловая информация содержится именно в тонкой структуре теплового поля наблюдаемого фрагмента, и она должна быть представлена оператору с максимальной подробностью. Все фрагменты изображения вне выбранного диапазона (теплее и холоднее) попадают в не видимую оператором область яркостей монитора «белее белого» и «чернее чёрного». Эти детали изображения скрыты от наблюдателя, так как представляют собой равномерно «залитые» области без видимых границ.

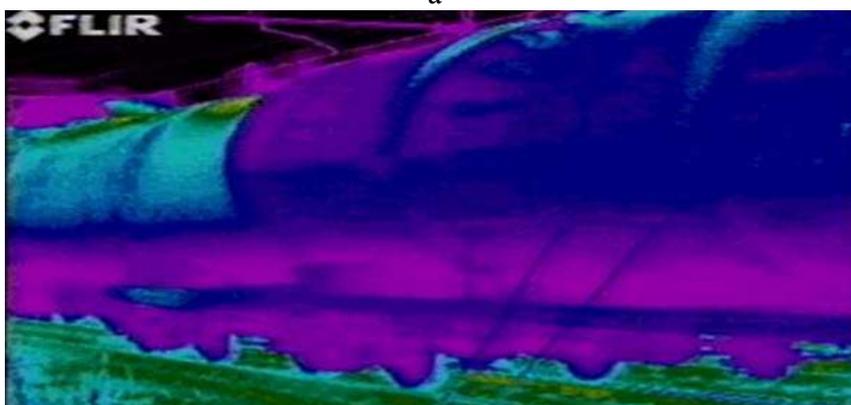
Изменением положения «температурного окна» с максимальной подробностью можно последовательно рассмотреть также и эти фрагменты, однако такой анализ удобнее применять для архивированных тепловизионных записей, так как на него требуется дополнительное время. При тщательном подборе «температурного окна» можно реализовать предельно высокую чувствительность ТВП, значение которой записано в его техническом паспорте (например, 0,05 К). Технически способ реализуется путём изменения уровня сигнала, добавляемого к сигналу от эталонного излучателя (сдвиг «температурного окна»), и изменением коэффициента усиления сигнала (ширина «температурного окна»). В полной мере этот приём целесообразен для сюжетов с малым разбросом контрастов. Однако он требует определённых навыков работы с ТВП и, как правило, трудно выполним в динамических полевых условиях.

Альтернативный способ «вписывания» контрастного сигнала в диапазон отображаемых яркостей экрана состоит в изменении коэффициента усиления электронного тракта. Его подбирают таким, чтобы все сигналы в кадре «вписывались» в диапазон линейно воспроизводимых яркостей экрана, но при этом чувствительность ТВП «загрубляется». Например, при пороговой чувствительности ТВП $\Delta T_{\text{пор}} \leq 0,08$ К и перепадах радиационных температур

контрастного излучения сюжета $\Delta T_{\text{сюжета}} = 7,0 \text{ К}$ диапазон амплитуд биполярного контрастного сигнала составит не менее 85 градаций. Для отображения сюжета на экране коэффициент линейного усиления электронного тракта ТВП должен быть уменьшен примерно в 8,5 раз. Из-за этого оператор может различить неоднородности лишь с контрастом больше $\Delta T_{\text{сюжета}} \geq 0,68 \text{ К}$. На экране отобразятся очертания всех фрагментов с контрастом больше 0,68 К. Тепловизионное изображение даёт возможность уверенно ориентироваться в общей обстановке, однако все детали теплового поля с контрастом меньше 0,68 К будут отображаться в одной градационной зоне. Изображение выглядит «грубым», без структуры теплового поля объекта и подстилающей поверхности, а сами объекты воспринимаются, в определённой степени, как синтезированные символы этих объектов. Очевидно, что выделение смысловой информации оператором в первом и во втором случаях производится разным образом. По тепловизионному изображению с широким «температурным окном» (рис. 1.10) из-за сильного «загрубления» чувствительности ТВП оператор может выделить наиболее нагретый фрагмент в наблюдаемом сюжете (верхняя часть цистерны на рис. 1.10 а), однако оно не позволяет анализировать тонкую структуру теплового поля цистерн (рис. 1.10 б).



а



б

Рисунок 1.10 – Тепловизионное изображение теплового поля цистерн с широким «температурным окном». Изображение получено с помощью ТВП Р640 фирмы FLIR. Наиболее нагретый фрагмент в наблюдаемом сюжете – верхняя часть цистерны (а) «белее белого»; боковая часть цистерны (б) – «чернее чёрного»

Сжатие сигнала по амплитуде может представлять собой пропорциональное или нелинейное (например, логарифмическое) изменение коэффициентов усиления сигналов, имеющее целью «вписать» все сигналы в кадре (максимально «горячие» и «холодные») в диапазон полутоновых градаций яркости монитора, то есть сделать «температурное окно» максимально «широким», охватывающим все пиковые значения сигналов в кадре. По тепловизионному изображению с широким «температурным окном» (рис. 1.11), обеспечивающему наблюдение всего сюжета, но без полутоновых деталей из-за сильного «загрубления» чувствительности, ТВП фирмы FLIR P640 можно обнаружить самолёт на сложном облачном фоне и уверенно прогнозировать траекторию его дальнейшего движения.

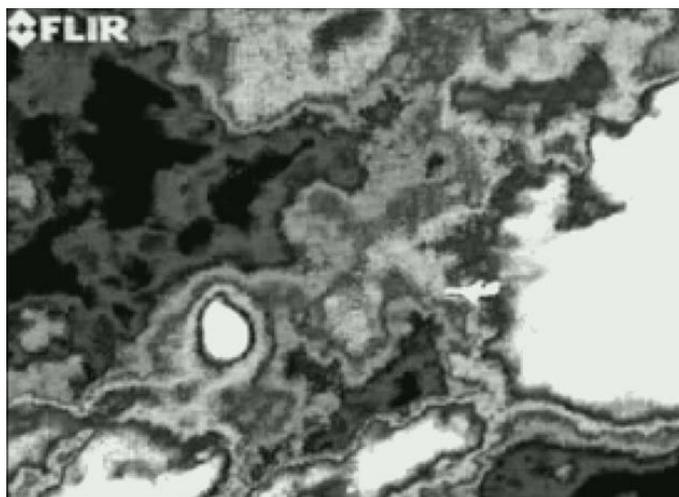


Рисунок 1.11 – Тепловизионное изображение самолёт на сложном облачном фоне. Получено с помощью ТВП фирмы FLIR P640

На рис. 1.12 приведены изображения одного и того же сюжета морской пригоризонтной области, полученные с предельно малым промежутком времени при различных значениях ширины «температурного окна»: $19,6^{\circ}\text{C}$ на рис. 1.12 а, и $40,7^{\circ}\text{C}$ – на рис. 1.12 б. (цветовая температурная шкала в правом углу кадра). Изображение кильватерного следа от прошедшей моторной лодки выглядит более тёмным по отношению к окружающему фону на рис. 1.12 а, и более светлым – на рис. 1.12 б. На рис. 1.12 б (более широкое «температурное окно») проявились подробности облачного небосвода, которые не наблюдаются на рис. 1.12 а (т.к. находились в области «чернее чёрного»), но в кадре на рис. 1.12 а (более узкое «температурное окно») лучше наблюдается тонкая структура теплового поля ВПМ и пригоризонтной области небосвода. Численные значения радиационных температур одних и тех же фрагментов сюжета на первом и втором кадрах совпадают, однако, если оператор ориентируется только на изображение на экране (например, на знак контраста кильватерного следа по отношению к близлежащим участкам моря), то он может неправильно интерпретировать смысл тепловизионного изображения.

Поскольку автоматическая обработка сигналов ТВП на рис. 1.12 построена таким образом, чтобы на экране монитора уверенно различались все

предметы данного сюжета – и сильно нагретые, и холодные, то по тепловизионному изображению можно определить только их контрасты друг относительно друга, но не их абсолютные значения. Это можно сделать лишь путём сопоставления с излучением эталонного излучателя (встроенного или внешнего). На экране ТВП для двух разных сюжетов одинаково ярко (или одинаковым цветом) могут отображаться предметы, например, имеющие контрасты в 0,5 К на уровне фона в 273 К в одном сюжете, и контраст в 20 К на уровне 300 К в другом.

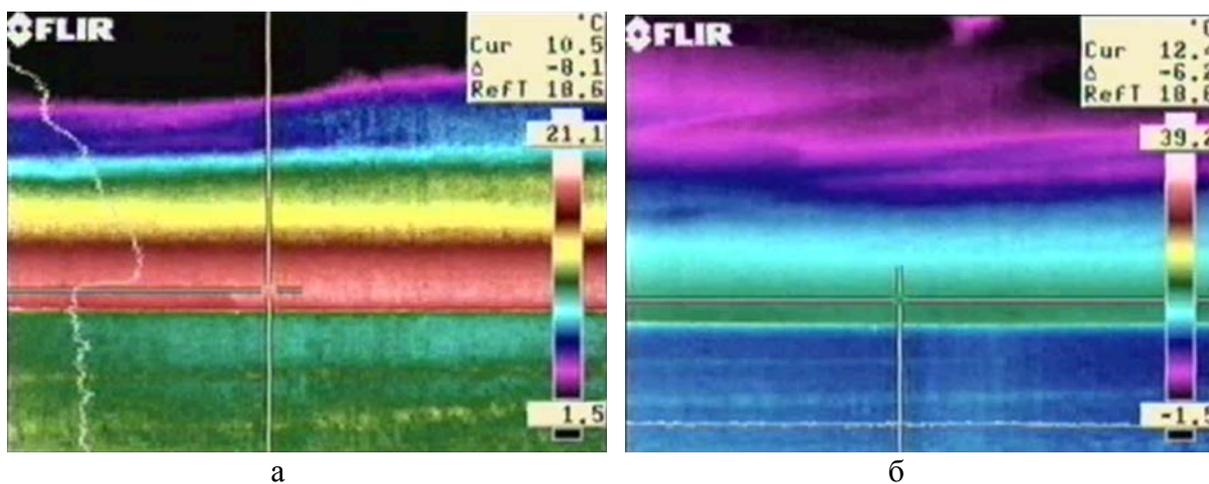


Рисунок 1.12 – Изображения сюжета морской пригоризонтной области, полученные с предельно малым промежутком времени с помощью ТВП Р640 фирмы FLIR. Наблюдаются малые контрасты в 0,5 К на уровне фона в 273 К в (а) и контраст в 20 К на уровне 300 К в (б)

Поэтому только по тепловизионной картине оператор может сделать лишь сравнительные качественные заключения о том, какой из фрагментов более нагрет по отношению к другим. Иногда вполне спокойная ситуация может выглядеть драматической, если судить только по псевдоцветовому её изображению на экране. Без количественных значений недостаточно опытный оператор может сделать неправильные выводы о наличии аварийной ситуации, то есть происходит ошибка второго рода – «ложное обнаружение». Выводимая на экран градационная шкала температур позволяет ориентироваться в соотношениях радиационных температур фрагментов тепловизионного изображения, однако при выборе «температурных окон» разной ширины также изменяется «цена» каждой различимой градации радиационной температуры. Для полноценной интерпретации наблюдаемой картины с целью выделения смысловых её компонент необходимо фиксировать количественные численные значения, например, в единицах температуры, выводимые на экран измерительного ТВП.

Помимо использования встроенных эталонных излучателей (в измерительных ТВП), при практической работе оператор может поместить в тот же кадр объект, излучение (температура) которого известна с приемлемой точностью, чтобы судить о том, насколько удовлетворяет его выбранное «температурное окно» с точки зрения получения достоверных количественных данных. Например, излучение атмосферы сразу над линией горизонта можно

принять близким к излучению АЧТ с температурой воздуха. Сопоставление с его яркостью может служить ориентиром для анализа тепловых контрастов наблюдаемого сюжета в наблюдательных ТВП. Излучение различного рода искусственных и естественных полостей также можно принять с удовлетворительной погрешностью близким к излучению АЧТ с температурой этих объектов.

Следует отметить, что диапазон сигналов в цифровом виде, как правило, обеспечивает обработку и анализ всего диапазона входных сигналов ТВП. Это позволяет производить обработку информации по архивированным данным с применением указанных и других приёмов с получением достоверных количественных значений о характеристиках теплового поля сюжета. Кроме того, если в измерительном ТВП во время наблюдений перемещать курсор – измеритель температуры по изображению, то даже в тех фрагментах тепловизионного изображения, которые «залиты» «белым» или «чёрным», а также в равнояркостных зонах, при перемещении курсора на экране ТВП будет показываться измеренное значение температуры, то есть, показания будут изменяться в соответствии с истинным и не наблюдаемым оператором распределением температур по поверхности объекта.

1.3 Особенности тепловизионных изображений, обуславливающие неопределённости и неоднозначности при их интерпретации

Неоднозначная интерпретация тепловизионного изображения может возникать при наблюдении «позитивного» и «негативного» изображений одного и того же сюжета, если оператор не обладает достаточным опытом. Как правило, «позитивным» называют такое изображение на экране ТВП, при котором более тёплые предметы отображаются более ярким свечением (более светлые в чёрно-белом изображении). При наблюдении некоторых сюжетов более комфортным оказывается его отображение в «негативном» режиме, при котором более нагретый объект отображается более тёмным. Предпочтительный режим выбирается каждым оператором индивидуально и поэтому обязательно вводится в набор функций «быстрого доступа» на панели управления ТВП. На рис. 1.13 приводится тепловизионное изображение одного и того же сюжета в диапазоне 8–12 мкм (плывущий дайвер) при разных значениях «уровня серого» в режиме «позитив» (более тёплое – более светлое) и в режиме «негатив» (более тёплое – более тёмное). Вертикальная полоса в центре – электрическая наводка. Содержательная информация во всех трёх кадрах одинакова, однако для разных операторов эти режимы отображения изображения комфортны в разной степени. Если речь идёт о необходимости сохранять концентрацию внимания оператора в течение длительного времени (например, за время четырехчасовой вахты в охранной системе), то некомфортное изображение вызовет раннюю утомляемость наблюдателя и повышение вероятности пропуска опасного объекта.

Сам по себе режим предъявления изображения «позитив/негатив» не добавляет и не уменьшает содержательной информации в тепловизионное

изображение тепловых контрастов наблюдаемого сюжета. Однако средний уровень (уровень «серого» в чёрно-белом изображении $U_{\text{среднее}}$), относительно которого все детали изображения отображаются либо как «тёплые», либо как «холодные» $\pm \Delta U$, формируется с учётом вклада излучения всех фрагментов сюжета в кадре $U_{\text{сюжета}}$. При появлении в нём «горячих» или «холодных» объектов сам средний уровень в изображении $U_{\text{среднее}}$ автоматически изменяется тоже. И тогда предшествующее соотношение контрастов в тепловизионном изображении $\pm \Delta U$ также изменяется, иногда весьма существенно.

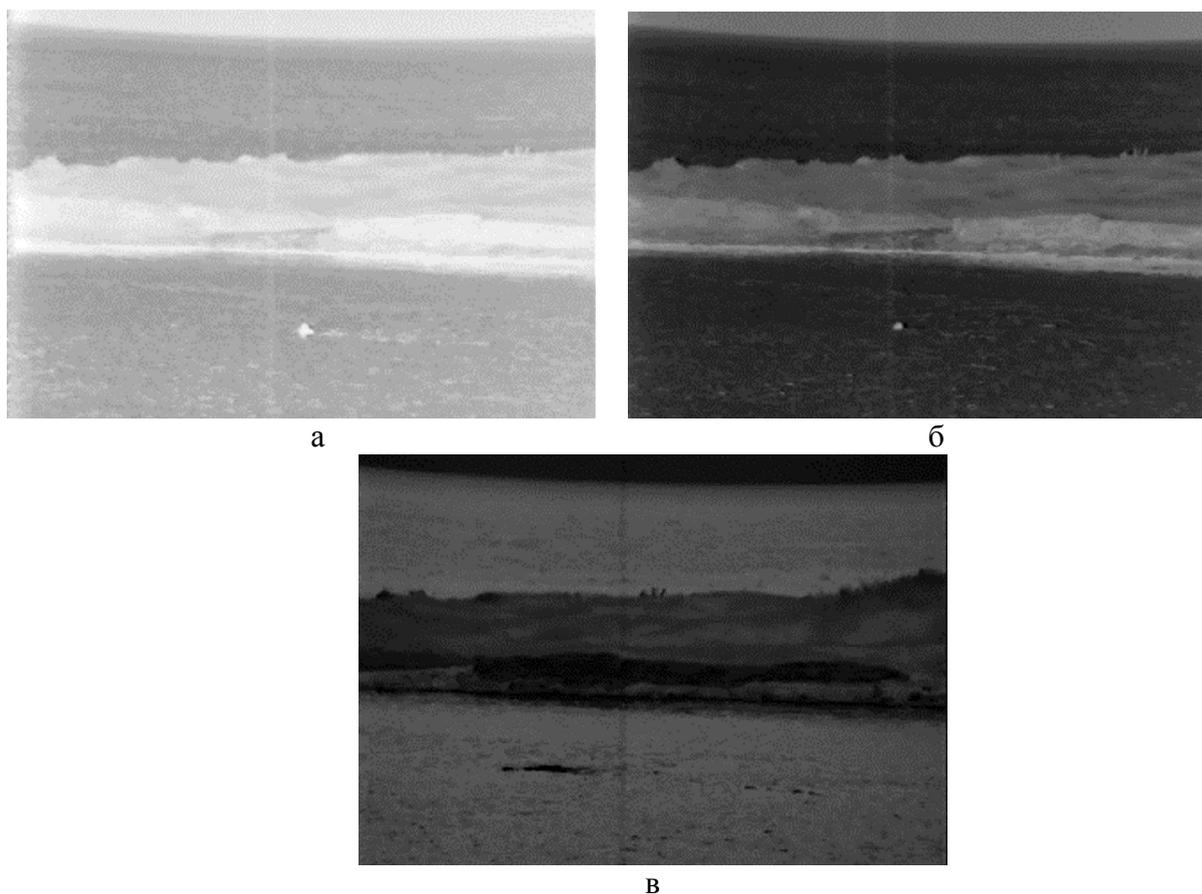


Рисунок 1.13 – Тепловизионное изображение плывущего дайвера: (а) - «позитив» (более тёплое – более светлое) и «уровень серого» - в области высокой яркости экрана; (б) - «позитив» (более тёплое – более светлое) и «уровень серого» - в области малой яркости экрана; (в) - режиме «негатив» (более тёплое – более тёмное)

Некоторые фрагменты изображения, имевшие положительный контраст по отношению к уровню «серого», то есть выглядевшие на экране более яркими на общем фоне (для «позитивного» чёрно-белого изображения) могут оказаться менее «тёплыми» по отношению к новому уровню «серого» и отображаться на экране как более тёмные на общем фоне. Такой эффект может наблюдаться, например, при наблюдении пространства вблизи линии морского горизонта при отсутствии стабилизации поля зрения ТВП (рис. 1.14).

При одном положении поля зрения ТВП большую его часть занимает «холодный» небосвод, соответственно определяя уровень «серого» на экране и распределение относительно него положительных и отрицательных контрастов

воздушных и надводных объектов наблюдения. Из-за качки в другом кадре большую часть тепловизионного кадра займёт излучение «тёплой» морской поверхности, соответственно сдвинув уровень «серого» на экране в область более высоких температур. Изображение облаков и других малонагретых объектов может изменить знак своего контраста по отношению к новому уровню «серого» на экране, то есть от «положительного» стать «отрицательным».



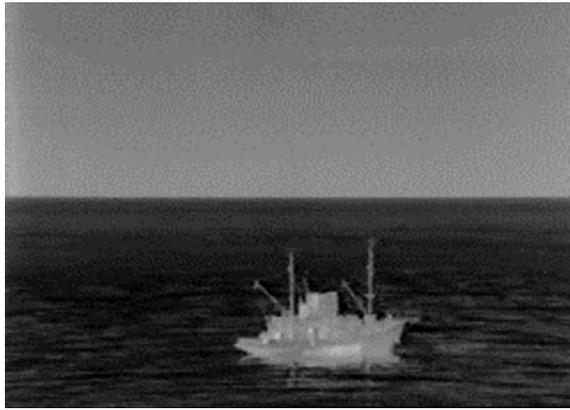
Рисунок 1.14 – Тепловизионное изображение в диапазоне 8–12 мкм с характерными естественными и антропогенными тепловыми аномалиями на морской поверхности, контраст которых может изменяться в зависимости от регулировки уровня «серого»

На рис. 1.15 а – 1.15 д демонстрируются тепловизионные (диапазон 8–12 мкм) изображения одного сюжета, полученное в разных режимах «положительный»/«отрицательный» и разных уровнях «серого» на экране. Анализ изображений показывает, что в каждом из них проявляются информативные детали, которые не заметны на других кадрах, и в то же время теряются другие несущие информацию полутонные фрагменты сюжета.

Этот эффект заметно проявляется при тепловизионном наблюдении артиллерийских и ракетных стрельб, когда вспышки дульного пламени и разрывов на местности изменяют среднее значение ИК излучения в кадре с высокой динамикой, не позволяющей оперативно подстраивать режим воспроизведения дисплея.

Определённое влияние на вероятность пропуска цели оказывает настройка яркости самого дисплея в конкретных условиях внешней освещённости экрана. При солнечной погоде мониторы разных типов по-разному изменяют реально воспринимаемый оператором диапазон яркостей сигналов. При изменении режима изображения «положительный/отрицательный» отдельные детали чёрно/белого изображения могут оказаться в области линейной передачи градаций серого и наблюдаться значительно лучше, чем в альтернативном режиме. Поэтому оператор при наличии возможности выбирает наиболее подходящий режим исходя из текущих условий наблюдения. Орган ручного управления выбором режима входит в состав обязательных легко доступных функций управления ТВП. Несомненно, основной круг задач оператор может решать, используя только накопленный

опыт, однако знание причинно-следственных связей добавляет шансы на выбор правильного решения в неопределённой и экстремальной ситуации.



а



б



в



г



д

Рисунок 1.15 – Тепловизионное изображение одного и того же сюжета, полученное в диапазоне 8–12 мкм при разных режимах (а – «позитив», б...д – «негатив») и разных уровнях «серого» на экране

2. Радиометрические и тепловизионные методы дистанционного зондирования

2.1. Особенности дистанционного метода измерения радиационных температур

Исторически первые приборы дистанционных измерений количественных характеристик оптического ИК излучения тел назывались пирометрами и радиометрами. Как правило, этими терминами обозначались оптические приборы, у которых имелся один фоточувствительный элемент, помещённый в фокусе оптической системы, с помощью которого энергия лучистого потока преобразовывалась в изменение какого-либо электрического параметра приёмника излучения: сопротивления (болометры), диэлектрической проницаемости (пироэлектрики) или электродвижущей силы (термоэлементы). В настоящее время измерительные приборы этого класса широко представлены на рынке недорогих ОЭП. Они занимают свою «нишу» и совершенствуются, главным образом, за счёт комплексирования с другими техническими средствами дистанционной диагностики. Достоинством пирометров и радиометров является их простота и относительно малая стоимость. Поэтому при правильно подобранной методике проведения измерений применение такого рода приборов может оказаться вполне рентабельным.

Например, если нужно дистанционно контролировать технологический процесс в нескольких зонах, то можно с помощью предварительного тепловизионного обследования выбрать наиболее характерные или критичные зоны, наблюдение за которыми осуществлять затем в непрерывном автоматическом режиме с помощью специализированных пирометров. В частности, такой подход рационален при контроле режимов горения в мощных котлах, например, типа «КВГМ», где работают несколько горелок и может сжигаться несколько видов топлива одновременно (мазут и газ). Пульсация пламени, возможность погасания одной или нескольких горелок и их взаимное влияние друг на друга контролируются дистанционно с достаточной надёжностью с помощью простых пирометров, но выбор места их установки целесообразно выполнять с помощью ТВП (рис. 2.1).

С использованием специальных приёмов, позволяющих регистрировать ИК излучение в сверхузких спектральных полосах, можно получать оперативную информацию о динамике процессов горения даже при их маскировке газообразными и пыледымовыми продуктами сгорания, как показано на рис. 2.2 а, б. Изготовители ТВП FLIR GF309 FLIR (фирма FLIR) утверждают даже о возможности измерения температуры объекта сквозь пламя и продукты сгорания.



Рисунок 2.1 – Тепловизионное изображение области работы газовых горелок получено тепловизионным прибором FLIR GF309 и заимствовано из рекламных материалов фирмы FLIR (Tthermal imaging camera FLIR GF309)



а



б

Рисунок 2.2 – Тепловизионное (а) и телевизионное (б) изображения высокотемпературной камеры сгорания с примером измерения температуры объекта. Заимствовано из рекламных материалов фирмы FLIR (Tthermal imaging camera FLIR GF309)

Тепловизионные приборы можно рассматривать как совокупность множества радиометров, информация от которых специальным образом собирается и формируется в тепловизионное изображение. Способы технической реализации ТВП весьма разнообразны - от одноэлементных сканирующих (типа IRTIS) до матричных – «смотрящих» ТВП (типа FLIR). С радиометрами их объединяет то, что после регистрации оптического сигнала $F_{\text{сюжета}}(\lambda)$ и его преобразования $s_{\text{фп}}(\lambda)$ в фотоприёмном устройстве (ФПУ) в измерительных ИК приборах определяется значение энергии лучистого потока для каждого чувствительного элемента. Оно пропорционально амплитуде электрического сигнала $U_{\text{сюжета}}$ после МФПУ.

Амплитуда электрического сигнала пропорциональна энергии лучистого потока, падающего на единичный элемент МФПУ. Она измеряется и калибруется с использованием эталонных ИК излучателей, как правило, на предприятии – изготовителе ТВП. Физической величиной, которая регистрируется пирометрами, радиометрами и тепловизионными приборами,

является энергия лучистого потока. При априорно известных значениях таких параметров прибора, как ширина и положение рабочего спектрального диапазона, вид его спектральной и поляризационной чувствительности, время накопления сигнала, пространственно-частотные и временные передаточные функции основных функциональных узлов, определяется количественное значение лучистого потока, падающего на элемент МФПУ. На основании значения лучистого потока для каждого элемента тепловизионного изображения вычисляется радиационная температура излучающей поверхности наблюдаемого объекта. Отличительной особенностью современных измерительных ТВП является введение в его оптическую схему эталонного излучателя – модели АЧТ. По отношению к излучению этого элемента производится сравнение регистрируемого излучения объекта. Поэтому качество встроенного эталонного излучателя и его сохранность во время эксплуатации (спектральной излучательной способности поверхности эталонного излучателя $\varepsilon_{\text{ЭТ}}$) являются важнейшими факторами, позволяющими использовать ТВП как измерительное средство.

Ещё одна особенность использования ТВП в качестве измерительного средства связана с тем, что в процессе работы при процедуре оперативной калибровки эталонный излучатель «засвечивает» непосредственно ИК МФПУ. Сигнал от эталонного источника описывается выражением (1).

При наблюдении сюжета ИК излучение проходит через оптическую систему ТВП, характеристики которой измеряются в процессе заводской настройки и вводятся в соответствующую программу как спектральное пропускание оптической системы τ оптики (λ) для корректировки рассчитываемых значений. Сигнал от наблюдаемого сюжета описывается выражением (2).

Однако в процессе эксплуатации внешние поверхности линз могут загрязняться, царапаться, покрываться влагой, что вносит непредсказуемую погрешность из-за уменьшения их пропускания $\tau_{\text{оптики}}(\lambda)$ и, в соответствии с законами физической оптики, пропорционального увеличения коэффициента излучения оптических элементов $\varepsilon_{\text{оптики}} = 1 - \tau_{\text{оптики}}(\lambda)$. Эти погрешности не подлежат упреждающему учёту, но могут вносить дополнительную погрешность в численные значения измеряемых температур. Поэтому гарантии сохранения статуса измерительного прибора, как правило, не слишком длительны, и требуется регулярная калибровка измерительного ТВП на предприятии-изготовителе, поскольку оригинальные «прошивки» алгоритмов обработки сигналов хранятся там, и существует стандартная процедура их корректировки. Оценку вносимой погрешности можно сделать для следующих количественных значений условий измерения температуры в диапазоне 8–12 мкм, используя методики расчётов, приведённые в [1]:

- температура оптической системы $T_{\text{опт}} = 298 \text{ К} (+25^\circ\text{C})$;
- коэффициент пропускания чистой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,75$; $\varepsilon_{\text{оптики}} = 0,25$;
- коэффициент пропускания загрязнённой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,65$; $\varepsilon_{\text{оптики}} = 0,35$.

Собственное тепловое излучение оптической системы, попадающее на чувствительные элементы МФПУ составляет $3,018 \text{ мВт/см}^2$ в первом случае (чистая оптика) и $4,225 \text{ мВт/см}^2$ во втором случае (загрязнённая оптика).

При наблюдении объекта, имеющего температуру -20°C (253 К , $M^0 = 5,091 \text{ мВт/см}^2$) его излучение, достигающее МФПУ, будет составлять $5,091 \cdot 0,75 = 3,812 \text{ мВт/см}^2$ для чистой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,75$ и составлять $5,091 \cdot 0,65 = 3,309 \text{ мВт/см}^2$ для загрязнённой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,65$.

Суммарный лучистый поток состоит из информационного потока от объекта и «шумового» потока от оптической системы. Для случая чистой оптики значение облучённости суммарным потоком составит $6,684 \text{ мВт/см}^2$ и равно $7,533 \text{ мВт/см}^2$ для грязной оптики. Разница составляет $0,698 \text{ мВт/см}^2$. То есть на МФПУ попадает добавочное излучение от линз ($0,698 \text{ мВт/см}^2$), которое при калибровке ТВП не могло быть учтено заранее. Интерпретация значений измеренного потока продолжается по коэффициентам, заложенным в блок обработки для чистой оптики ($\tau_{\text{оптики}} = 0,75$). Поэтому после обработки сигналов при грязной оптике будет показано значение $258,83 \text{ К}$ вместо реальных 253 К , которые были бы получены при чистой оптике. То есть для наблюдения объекта, температура которого ниже температуры ТВП (например, холодной стены здания), значение его радиационной температуры завышено на $5,83 \text{ К}$ из-за неконтролируемого загрязнения оптической системы.

При наблюдении объекта с температурой излучения $+40^\circ\text{C}$ (313 К , $M^0 = 15,245 \text{ мВт/см}^2$) его излучение, достигающее МФПУ, будет составлять $15,245 \cdot 0,75 = 11,434 \text{ мВт/см}^2$ для чистой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,75$ и составлять $15,245 \cdot 0,65 = 9,909 \text{ мВт/см}^2$ для загрязнённой оптики $\tau_{\text{оптики}} = 0,65$.

Суммарный лучистый поток, состоящий из информационного потока от объекта и «шумового» потока от оптической системы, для случая чистой оптики составит в единицах облучённости $14,452 \text{ мВт/см}^2$. Для грязной оптики облучённость составит $14,134 \text{ мВт/см}^2$. Разница равняется $0,347 \text{ мВт/см}^2$. То есть на МФПУ попадает ослабленное сверх расчётного излучение объекта и добавочное излучение от линз ($0,347 \text{ мВт/см}^2$). Эти изменения не могли быть учтены заранее при калибровке ТВП. Интерпретация значений измеренного потока осуществляется по коэффициентам, заложенным в блок обработки для чистой оптики ($\tau_{\text{оптики}} = 0,75$). Поэтому после обработки при грязной оптике будет показано значение радиационной температуры объекта $311,45 \text{ К}$ вместо реальных 313 К , которые были бы получены при чистой оптике. То есть для наблюдения объекта, температура которого выше температуры ТВП (например, нагретого объекта электроэнергетического оборудования), значение его радиационной температуры занижено на $1,55 \text{ К}$ из-за неконтролируемого загрязнения оптической системы.

В дополнение к этой основной функции ТВП – измерение энергии лучистого потока - в блок обработки сигнала измерительного ТВП вводится целый набор дополнительных функций, позволяющих повысить достоверность интерпретации получаемых данных. Тепловизор как инструмент наблюдения теплового поля объекта оснащается встроенными алгоритмами, позволяющими учитывать такие параметры условий наблюдения, как температура

окружающего фона, пропускание атмосферной трассы, угловой размер объекта, его излучательная и отражательная способности и т.п. Причём, чем больше физических факторов принимается во внимание при расчётах, тем более полную содержательную информацию получает оператор. Для анализа принимаемых во внимание факторов целесообразно провести анализ технических паспортов измерительных ТВП, использующихся в современной тепловизионной диагностике.

2.2 Анализ технических характеристик измерительных ТВП

Измерительные ТВП являются универсальными приборами, используемыми в самых различных областях. Принято при описании таких ТВП использовать их технические характеристики, оставляя пользователю возможность выбора комплектации прибора применительно к конкретной задаче на основе его технических параметров. Анализ технической информации, предъявляемой изготовителем пользователю, приводится на примере ТВП FLIR THERMACAM™ R640 (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – Внешний вид ТВП FLIR THERMACAM™ R640 заимствован из рекламного проспекта фирмы FLIR

Анализ паспортных характеристик ТВП THERMACAM™ R640.

Спектральный диапазон от 7,5 до 13 мкм.

Рабочий спектральный диапазон выбирается в окне прозрачности LWIR из-за того, что большинство объектов тепловизионного обследования находится в состоянии естественного теплового обмена с окружающей средой. Максимум контрастного излучения этих объектов находится именно в LWIR диапазоне. Высоко нагретые объекты, которые тоже входят в число подлежащих к тепловизионному обследованию, имеют достаточно мощное излучение, которое успешно регистрируется тепловизорами диапазона 8 – 12 мкм.

Тип детектора - матрица в фокальной плоскости (FPA), неохлаждаемый микроболометр 640 × 480 пикселей.

Для современных измерительных ТВП формат матрицы 640×480 пикселей является максимальным. Он соответствует телевизионному стандарту США. Американская фирма FLIR использует болометрические матрицы из материала VO_x , который отличается наиболее высокой чувствительностью среди современных болометрических материалов, но требует тепловой стабилизации чувствительного слоя матрицы, как правило, $+25^\circ\text{C}$. Для обеспечения работы ТВП при высоких температурах окружающей среды в них применяются термоэлектрические охладители (элементы Пельтье). Поскольку от этих элементов нужно отводить и рассеивать избыточную тепловую энергию, то характерным признаком ТВП с МФПУ на материале VO_x является наличие на корпусе прибора зоны повышенного нагрева, которая обеспечивает рассеяние избыточного тепла.

**Поле зрения / минимальное расстояние фокусировки $24^\circ \times 18^\circ / 0.3 \text{ м}$
Оптическое разрешение (IFOV) $0,65 \text{ mrad}$ (рис. 2.4).**

Использование единиц измерения «миллирадиан» распространено благодаря её удобству в инженерных расчётных оценках. Значение 1 миллирадиан ($1 \cdot 10^{-3}$ радиан) соответствует распространённой величине «одна тысячная дистанции», т.д. Она означает, что на расстоянии 1000 единиц длины под таким углом будет наблюдаться линия в 1 единицу длины. Например, объект высотой в 1 метр будет занимать такой угол (1 тд) на расстоянии 1000 метров, или объект размером 1 мм будет занимать угол в 1 тд (1 мрад) на расстоянии 1 метр. Приведённое значение $0,65 \text{ мрад}$ означает, что минимальный размер объекта, посылающего своё излучение на один пиксель МФПУ ТВП с данным объективом, составляет $0,65 \text{ см}$ ($6,5 \text{ мм}$), если он наблюдается с расстояния 10 метров (1000 см). Все подробности внутри этого элемента ($6,5 \text{ мм}$) интегрируются в едином лучистом потоке и не могут отдельно различаться на расстояниях 10 метров и дальше. Если есть необходимость различить с помощью данного ТВП более мелкие фрагменты, чем $0,65 \text{ см}$ на поверхности объекта, то нужно к нему приблизиться.

Оптическое разрешение является одной из основных характеристик оптического прибора и зависит от целого ряда его параметров. Для пользователя ТВП полезно заранее оценивать потенциальную возможность получить информацию нужного смыслового содержания, которое чаще всего зависит от возможности отдельно наблюдать тепловые контрасты малых фрагментов наблюдаемой поверхности объекта. Если нет возможности использовать объективы с другими фокусными расстояниями или трансфокаторы, то у оператора есть только один способ улучшить детальность наблюдаемой картины – приблизиться к объекту наблюдения.

Наиболее простой способ оценки параметра, характеризующего оптическое разрешение, состоит в делении размера поля зрения ТВП на количество пикселей матрицы его МФПУ. В данном приборе это $24^\circ / 640 = 135$ угловых секунд = $0,655 \text{ мрад}$.

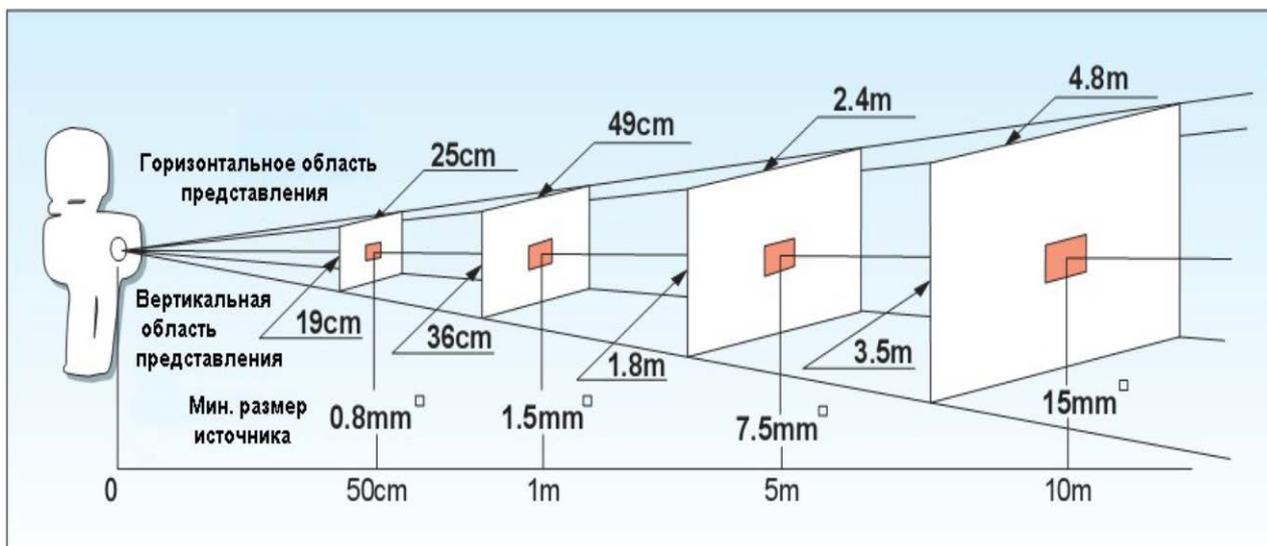


Рисунок 2.4 – Иллюстрация взаимной связи поля зрения ТВП и его оптического разрешения. Заимствован из руководства пользователя фирмы NEC

Температурная чувствительность < 80 мК при 30°C.

Этот параметр означает, что, если на равнорекостной поверхности, имеющей температуру +30°C, будет находиться область с контрастом температуры в $\pm 0,08$ К (то есть 30,08°C или 29,92°C), то она будет достоверно обнаружена оператором. Область должна занимать размер более, чем 10×10 пикселей. Если эта область занимает лишь 1 пиксель, то она будет обнаружена при контрасте его температуры, примерно в 7 раз выше указанного значения 80 мК, то есть при контрасте около $\pm(0,5$ К–0,6 К). Это связано с параметром «температурно-частотная характеристика ТВП», которая обуславливает ухудшение пороговых значений чувствительности ТВП с уменьшением размера обнаруживаемого объекта.

Нужно также заметить, что контраст радиационной температуры может быть вызван не только разностью термодинамических температур фрагментов поверхности, но и различием их оптических характеристик. Для указанного диапазона 7,5–13 мкм пороговый контраст радиационной температуры $\Delta T = 0,08$ К при температуре измерения +30°C (303 К) соответствует энергетической пороговой чувствительности ТВП $\Delta M_{\text{пор}} = 0,2283$ мВт/см². Рассматривая для простоты ситуацию более холодного фона, чем +30°C (чтобы пренебречь влиянием отражённой составляющей излучения), можно рассчитать, что для получения такого же порогового контрастного излучения достаточно изменения излучательной способности $\Delta \epsilon_{\text{пороговое}} = 0,013$, например, от значения $\epsilon = 0,870$ до значения $\epsilon = 0,883$. Учитывая угловое пространственное распределение коэффициентов излучения реальных тел, следует заключить, что указанные количественные значения не могут быть реально измерены с удовлетворительной погрешностью. Приводимые значения пороговых чувствительностей являются расчётными, получаемыми путём вычислений, основанных на измерениях сигналов, значительно превышающих пороговые значения.

Значение пороговой чувствительности прибора в единицах плотности лучистого потока – энергетической светимости $\Delta M_{\text{пор}}$ - не зависит от температуры излучения наблюдаемого сюжета и является значением энергетической пороговой чувствительности тепловизора к перепаду лучистого потока. Указанное в паспорте значение «температурной чувствительности $\Delta T_{\text{пор}} < 80 \text{ мК}$ при $+30^\circ\text{C}$ » справедливо только при такой температуре наблюдаемого сюжета $+30^\circ\text{C}$ (303 К) и будет иметь другие значения при других его температурах. В частности, при температуре сюжета -30°C (243 К) значение энергетической пороговой чувствительности $\Delta M_{\text{пор}} = 0,2283 \text{ мВт/см}^2$ соответствует пороговому контрасту радиационных температур $\Delta T_{\text{пор}} = 0,168\text{К}$, то есть для «холодного» фона он в два раза хуже, чем при температуре $+30^\circ\text{C}$. При температуре сюжета $+70^\circ\text{C}$ (343 К) значение энергетической пороговой чувствительности $\Delta M_{\text{пор}} = 0,2283 \text{ мВт/см}^2$ соответствует пороговому контрасту радиационных температур $\Delta T_{\text{пор}} = 0,058 \text{ К}$ (то есть численное значение $\Delta T_{\text{пор}}$ лучше, чем при температуре сюжета $+30^\circ\text{C}$ на 28%).

Частота кадров 30 Гц без перемежения. Этот параметр свидетельствует о «привязке» к американскому стандарту телевидения (60 Гц) и о том, что тепловизионное изображение предъявляется оператору в режиме «прогрессивной развёртки», когда на экран последовательно выводятся все строки изображения: 1,2,3, ... 480. Это обеспечивает устойчивое изображение на экране различных меток и перекрестий, в то время как при чересстрочной развёртке они мерцают с частотой кадров.

Фокусировка. Ручная или автоматическая (объектив Ultrasonic). Это одна из важнейших для оператора функция, так как от качества оптической фокусировки зависит погрешность измерения температуры объекта. При расфокусированном изображении относительно допустимые погрешности можно получить лишь при наблюдении равномерных поверхностей большой площади. При наблюдении объектов с выраженной пространственной структурой теплого поля недостаточная оптическая фокусировка приводит к тому, что часть лучистой энергии одного фрагмента изображения попадает на разные чувствительные элементы МФПУ. Погрешность при этом зависит от степени расфокусировки и не поддаётся количественной оценке и компенсации. Существующие способы апостериорной обработки плохо сфокусированных (размытых) изображений могут дать положительный эффект с точки зрения улучшения комфортности наблюдения его оператором, однако корректных способов устранения погрешностей измерения температуры с приемлемой точностью в настоящее время не предложено. Поэтому плохая оптическая фокусировка приводит к невосполнимому браку в результатах измерения температур с помощью ТВИ. Приведённое в техническом паспорте указание говорит о том, что оператор может в ручном режиме сфокусироваться на интересующий его объект, ориентируясь на личную оценку качества и резкости тепловизионного изображения на экране дисплея. Однако на практике процедура такой оптической фокусировки часто занимает много времени или же вообще вызывает сомнения в правильности результата, так как

тепловизионное изображение объектов в принципе более «размытое» по сравнению с телевизионным из-за малого формата матриц МФПУ и в 20 раз большей длины волны оптического излучения. Поэтому в современных ТВП в блоке цифровой обработки реализуются разнообразные алгоритмы «автофокусировки» по результатам оперативного автоматического анализа характеристик тепловизионного изображения (выделение высоких пространственных частот, максимизация градиентов сигналов на границах и контурах объектов и т.д.). Автоматическая фокусировка, как правило, позволяет сфокусироваться на наиболее контрастные объекты наблюдаемого сюжета.

Электронное увеличение/сдвиг 2, 4, 8 кратное / плавный.

Функция улучшает комфортность работы оператора. Информационная составляющая тепловизионного изображения не изменяется.

Представление изображения. Дисплей Цветной ЖК дисплей с размером по диагонали 5,6 дюйма (1024×800 пикселей).

Показана реализация одного из требований к дисплеям, заключающегося в том, чтобы один информационный пиксель (элемент матрицы МФПУ) отображался матрицей светящихся элементов 2×2 пикселей.

Измерение. Интервал температур: От -40°С до +500°С в двух диапазонах, до +2000°С – опция.

Эта техническая характеристика свидетельствует о применённом способе расширения рабочего динамического диапазона входных сигналов. Применяется приём разделения всего диапазона на два с изменяющимися (выбираемыми оператором) границами. Реализуется этот приём путём заводской калибровки ТВП на стадии его изготовления.

Точность ±2°С или ± 2% от абсолютной температуры (в °С).

Следует заметить, что погрешность измерения радиационной температуры объектов, занимающих один пиксель с угловым размером 0,655 мрад, выше на 2,5 К, чем указанная в паспорте. В неявном виде присутствует условие, чтобы измерения температуры проводились по изображениям объектов с угловым размером, превышающим несколько пикселей. Это выражается в том, что перекрестие на экране и очерченные на экране области измерения температур захватывают несколько пикселей. Наименьшая погрешность измерений достигается при измерении температуры объектов, изображения которых занимают порядка 9×9 пикселей. При таких размерах изображения реализуется указанная «Точность ±2°С или ±2% от абсолютной температуры (в °С)».

Повторяемость ±1°С или ± 1% от абсолютной температуры (в °С).

Эта характеристика призвана указать на количественное значение допускаемого диапазона нестабильности работы ТВП в течение процедуры измерения. В приведённом виде она может быть истолкована так, что за то время, пока происходит обследование одного объекта, несоответствие результатов измерений одного и того же объекта больше, чем «±1°С или ±1% от абсолютной температуры (в °С)» будет вызвано нестабильностью теплового

поля наблюдаемого объекта или условий измерений, а не нестабильностью чувствительности ТВП.

Корректировка коэффициента излучения. Изменения коэффициента излучения от 0,01 до 1,0, поправка на отраженную температуру окружающего воздуха. Встроенная таблица коэффициентов излучения различных материалов.

Этот пункт меню при обработке результатов измерений вносит наибольшие (по абсолютному значению) погрешности в их интерпретацию в единицах радиационной температуры. При введении завышенных значений коэффициента излучения объекта (например, вводится $\varepsilon = 0,87$ вместо реального значения $\varepsilon = 0,70$) данные о радиационной температуре на экране дисплея ТВП будут показывать заниженное значение измеренной температуры. И наоборот, если вводится заниженное значение $\varepsilon = 0,68$, в то время как у реального объекта $\varepsilon = 0,87$, то значения радиационной температуры на экране дисплея ТВП будут завышены.

Коррекция пропускания атмосферы. Автоматическая, на основании введенных расстояния, температуры атмосферы, относительной влажности воздуха.

Встроенные алгоритмы обработки информации учитывают ослабление полезного излучения объекта и собственное (паразитное) излучение атмосферной трассы. Методики учёта параметров атмосферы обладают вполне удовлетворительной достоверностью, однако погрешности возникают на этапе количественного определения параметров, которые необходимо ввести для расчётов. В первую очередь это относится к параметрам влажности и температуры атмосферной трассы, которые в естественных условиях, чаще всего, изменяются вдоль атмосферной трассы. При этом изменения тем более значительны, чем хуже пропускание атмосферы, то есть по мере усиления влияния этих параметров увеличивается погрешность их определения.

Коррекция отражённой температуры. Автоматическая, на основании введённого значения

Некорректная формулировка второго по важности фактора, влияющего на погрешности интерпретации результатов измерений. Некорректность в том, что отражается излучение, а температура – одна из возможных его характеристик. Методика коррекции влияния отражённого от наблюдаемой поверхности ИК излучения фона достаточно проста, однако до настоящего времени нет общепринятых и универсальных методов определения количественного значения того лучистого потока, который отражается от наблюдаемой поверхности объекта в направлении наблюдателя. В совокупности с погрешностями вводимых значений излучательной способности поверхности объекта, погрешности определения параметров фонового излучения дают основной и определяющий вклад в совокупную погрешность интерпретации результатов измерений в единицах радиационных температур.

Коррекция температуры оптики. Автоматическая, по информации встроенных датчиков. Коррекция пропускания внешней оптики/окна.

Автоматическая, на основании задаваемых значений температуры и коэффициента пропускания оптики.

Методика расчётов данных, необходимых для учёта влияния температуры и коэффициента пропускания оптической системы ТВП на интерпретацию результатов измерений, отработаны и корректируются в процессе заводских калибровок ТВП. Однако при загрязнении и запотевании оптики (наружных и внутренних поверхностей) заводские корректировки оказываются недостаточными. Запотевание внешних и внутренних оптических поверхностей может быть незаметно оператору, поскольку водяная плёнка толщиной уже в 5–10 мкм или капли таких же размеров существенно исказят лучистый поток диапазона 7,5–13 мкм, но будут прозрачны в видимом диапазоне.

Сохранение изображения. Формат файлов - ИК Радиометрический формат JPEG, 14 бит/ нерадиометрическая запись.

Прямое указание на динамический диапазон архивируемых сигналов. Он вполне достаточен для большинства промышленных и медицинских применений измерительных ТВП.

Сменные объективы (дополнительная опция). Распознавание объективов Автоматическое

Универсальность применения измерительных ТВП предусматривает необходимость их работы на больших расстояниях от объекта обследования. Представленный изготовителем номенклатурный ряд объективов позволяет выбрать наиболее подходящий объектив для конкретных условий наблюдения. Особенность в том, что ТВП на тепловых МФПУ для реализации высоких требований по приборной чувствительности используют объективы с большим значением апертуры: от 1:0,7 до 1:1,2. Из-за этого, например, длиннофокусный объектив с фокусным расстоянием 100 мм должен иметь световой диаметр входного зрачка также не менее 100 мм. Оптические системы профессиональных ТВП высокого уровня микроминиатюризировать невозможно. Платой за уменьшение размеров оптической системы, например, в ТВП типа FLIR ONE (диаметр входного зрачка объектива около 4 мм), является невысокое оптическое качество тепловизионного изображения и малое рабочее расстояние реального тепловизионного наблюдения объектов.

Требования к условиям окружающей среды: интервал рабочих температур от –15°C до +50°C. Интервал температуры хранения от –45°C до +70°C. Влажность: работа и хранение – от 10% до 90%, без конденсации влаги.

Диапазон рабочих условий ТВП достаточно широк. При температурах окружающей среды вблизи +50°C погрешности измерения температуры возрастают, в том числе, из-за оптического германия, физические свойства которого при температурах более +50°C приближаются к характеристикам металлов (уменьшается прозрачность материала). Повышенная влажность воздуха опасна тем, что из-за естественного воздухообмена влага проникает внутрь конструкции ТВП и его объектива, а затем оседает на оптических поверхностях и встроенном эталоне АЧТ (опорном излучателе).

Для сопоставления с параметрами более простых измерительных ТВП приводится анализ данных из рекламных материалов фирмы NEC (рис. 2.5).

Тепловизор TH7800 фирмы NEC. Анализ технических характеристик.

Спектральный диапазон 8–14 мкм. Болومترическая неохлаждаемая матрица форматом 320×240 элементов формирует тепловизионное изображение такой же информационной производительности, что и для ТВП с МФПУ формата 640×480 элементов, но на вдвое более близком расстоянии от объекта наблюдения (угловая разрешающая способность 1.5 мрад). Чувствительность ТВП хуже, чем у ТВП FLIR THERMACAM™ R640 (0,1°С вместо 0,08°С) – из-за применения болометра, изготовленного из другого материала (αSi вместо VO_x), который обладает худшей чувствительностью, но не требует термоэлектрического охлаждения при термостабилизации. Параметр «Точность $\pm 2^\circ\text{C}$ или $\pm 2\%$ от показания» одинакова для всех измерительных ТВП, начиная с первых образцов измерительных ТВП «АГА», выпускавшихся в 1970 году.



Рисунок 2.5 – Тепловизор TH7800 фирмы NEC

Число разрядов АЦП – 14 бит обеспечивает более широкий динамический диапазон регистрируемых сигналов.

Условия эксплуатации: -15°C $+45^\circ\text{C}$. Более узкий диапазон рабочих температур ТВП обусловлен отсутствием в его составе термоохладителя для термостабилизации болометрического МФПУ при повышенных температурах эксплуатации.

Относительная влажность – не более 90% (без конденсации) обусловлена общими для всех ТВП причинами.

Остальные параметры измерительных ТВП не характеризуют их, собственно, как инфракрасные приборы, но связаны с применением

современных аппаратно-программных комплексов обработки тепловизионной информации.

Тепловизионный гаджет FLIR ONE

Наиболее миниатюрными общедоступными ТВП в настоящее время можно считать тепловизоры фирмы FLIR (рис. 2.6), особенность которых состоит в том, что они выполнены в виде приставки (гаджета) FLIR ONE к смартфону Apple (первоначально только к iPhone 5 и iPhone 5S). В настоящее время выпускаются аналогичные ТВП для других моделей смартфонов, включая Android – смартфоны. Приставка решает только одну задачу – отобразить на экране смартфона совмещённое с телевизионным ИК изображение сюжета, для чего рядом с ИК объективом ТВП размещён объектив миниатюрной ТВ камеры.



Рисунок 2.6 – Внешний вид тепловизионного гаджета FLIR ONE к iPhone 5. Входное окно объектива ТВП – слева, входное окно объектива ТВ камеры – справа

Используемая в данном приборе микроболометрическая матрица имеет малый формат 60×90 элементов. Даже при использовании удачных алгоритмов вторичной обработки изображений, отображаемое на экране смартфона тепловизионное изображение достаточно размытое. Для компенсации этого недостатка разработчики решили задачу совмещения тепловизионного (форматом 60×90 элементов) и телевизионного (форматом 640×480 элементов) изображений, что существенно повышает комфортность восприятия объединённого изображения, не теряя информацию о тепловом поле наблюдаемого объекта.

Применение малоформатной матрицы преследовало цель максимально удешевить ТВП, что вполне удалось: модификация ТВП FLIR ONE^{pro}, использующая матрицу 240×320 элементов, стоит в несколько раз дороже.

Вместе с тем, оригинальный гаджет FLIR ONE успешно справляется с задачей и обладает чувствительностью порядка 0,15 К. Функция измерения радиационной температуры унифицирована с другими измерительными ТВП фирмы FLIR.

Объектив ТВП имеет диаметр входного зрачка около 4 мм и, соответственно требованию к оптическим системам ТВП, относительное отверстие в пределах от 1:0,9 до 1:1,4. Из-за этого фокусное расстояние объектива также составляет несколько миллиметров, поле зрения достаточно велико и наиболее приемлемое расстояние до наблюдаемого объекта от 0,5 м до 2,0 м. Таким образом на практике демонстрируется тезис о том, что микроминиатюризация классической оптики существенным образом ограничивает круг применения её применения.

На рис. 2.7 приводятся изображения теплового поля электронной платы, полученные двумя разными ТВП фирмы FLIR. Тепловизионное изображение форматом 60×90 элементов (рис. 2.7 а, FLIR ONE) менее комфортно по сравнению с изображением формата 640×480 элементов от ТВП FLIR-P640 (рис. 2.7 б).

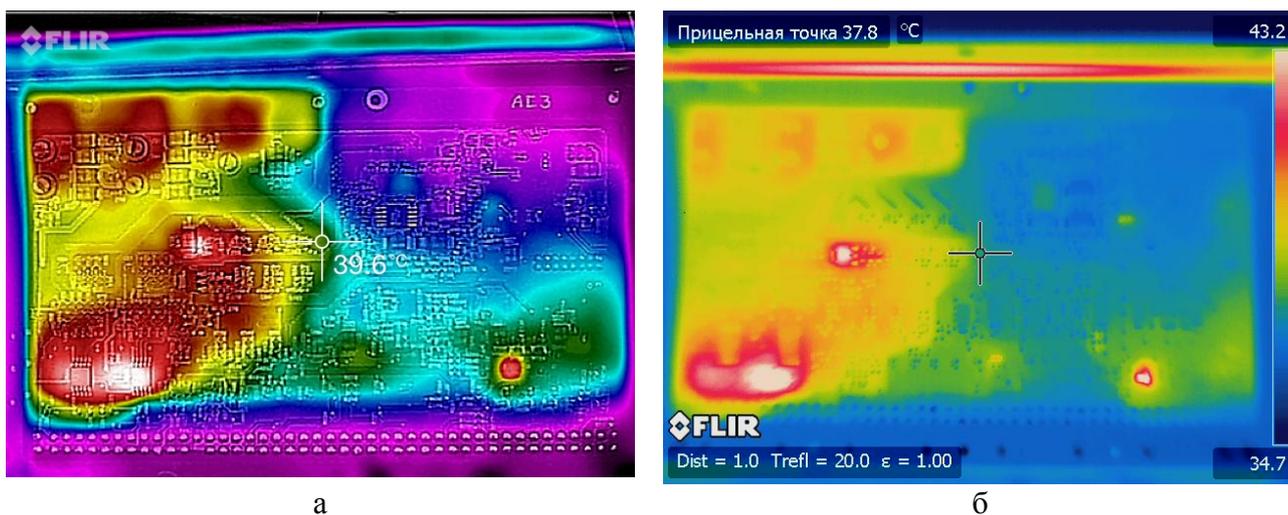


Рисунок 2.7 – Тепловизионное изображение теплового поля электронной платы с зонами локального перегрева (дефекты): а – FLIR ONE; б – FLIR-P640

Вместе с тем, содержательная структура тепловизионного изображения FLIR ONE достаточна для решения специфической задачи - первичного поиска зон локального перегрева, измерения температуры элементов на плате и оценки динамики их теплообмена при включении и выключении электрического питания элементов на плате. При использовании ТВП FLIR ONE и ТВП FLIR-P640 задача решалась специалистами примерно с одинаковым успехом, который зависел в большей степени от их опыта и квалификации, чем от типа ТВП.

При всех прочих равных условиях преимущество в дальности обнаружения объектов будет иметь тот ИК прибор, у которого площадь входного зрачка оптической системы больше. В отличие от радиоэлектронной

компонентной базы, микроминиатюризация тепловизионной оптики неизбежно приводит к определённой потере содержательной информации.

2.3. Тепловизионные приборы дистанционного зондирования в ИК диапазоне

Тепловизор ТН7800 фирмы NEC военного назначения

Тепловизионные приборы, не предназначенные для измерительных задач, характеризуются, как правило, «тактическими характеристиками», гарантирующими решение квалифицированным оператором типовых задач в стандартных условиях только по тепловизионному изображению без привлечения дополнительной информации в виде значений радиационных температур. В технической документации наиболее важными являются заявленные значения «дальности действия», то есть дистанции, на которых оператор принимает решения данного иерархического уровня (обнаружение, распознавание, классификация) с заданной вероятностью ошибок первого и второго рода (пропуск цели и ложная тревога). В качестве примера приводится анализ рекламного проспекта (рис. 2.8) вертолётной обзорно-прицельной тепловизионной системы CM6240FC фирмы SAGEM.

Ключевая информация о ТВП содержится в диаграмме, построенной (как указано на рисунке) на экспериментальных данных. Дальность обнаружения надводного корабля с вертолёта составляет 50 км, при дальности его распознавания 30 км. Дальность обнаружения военнослужащего составляет 10 км при дальности его распознавания 4,2 км. Эти характеристики определяются экспертным методом и во многом являются «договорными» в том смысле, что общие правила принятия решения об обнаружении, распознавании и классификации вырабатываются и устанавливаются для членов экспертной группы перед началом экспериментов. При изменении критериев результаты экспертных оценок могут измениться в ту или иную сторону.

Определённую степень объективности вносят приводимые технические характеристики. В частности, указанный рабочий спектральный диапазон MWIR (3–5 мкм) характерен для многих военных ТВП из-за технологической возможности производить крупноформатные МФПУ с предельно высокой чувствительностью, компенсирующей более низкие (чем в LWIR) тепловые контрасты наблюдаемых сюжетов. При этом размер чувствительного элемента МФПУ может быть уменьшен до 17 мкм, что, соответственно, позволяет уменьшить размеры оптической системы и системы криогенного охлаждения. Указанный формат матрицы МФПУ (640×576 элементов) и размеры полей зрения ($2,3^\circ \times 1,7^\circ$) позволяют оценить угловую пространственную способность ТВП – 12,9 угловых секунд, или 0,063 мрад. Угловое разрешение ограничивается, скорее всего, турбулентностью приземного слоя атмосферы на предельных дальностях.

В совокупности со значением пороговой чувствительности (0,035 К) значение углового пространственного разрешения позволяет сделать теоретические оценки дальности действия ТВП с применением критериев Джонсона, или при использовании других стандартных методик. Эти оценки в первом приближении совпадают с приведёнными в проспекте данными.



CM6240FC Cooled Thermal Imaging Camera

Detector

- Type:HgCdTe cooled FPA detector
- Wavelength:3-5µm
- Resolution:640×512
- Pixel size:1.5µm

System

- System NETD:≤30mk @ 25°C
- Startup time:≤8 minute@25°C

Lens

- characteristic
- WFOV:1.4°×10.5°
- NFOV:2.3°×1.71(±5%)
- F number:4
- Focal length:240-40mm (continuous zoom)

Physical characteristic

- Power supply:DC 28±2.8V
- Power consumption:≤30W
- Video output:PAL, 750
- Remote control:RS422
- Display:External monitor
- Color:Black
- Weight:≤3.5kg
- Dimension:250(L)×203(W)×116(H)mm

Function

- Gain/brightness adjustment: Manual & Automatic
- Enhancement
- Filter
- Electronic zoom:2x, 4x
- Flip video
- Focus:Auto/Manual
- Black/White Hot

Environmental adaptability

- Operating temperature: -40°C-- +55°C
- Storage temperature: -55°C-- +70°C
- Vibration:Mil-STD 810F
- Shock:Mil-STD 810F



Main application

Widely used for long distance observation and aiming, as well as various aviation nacelle



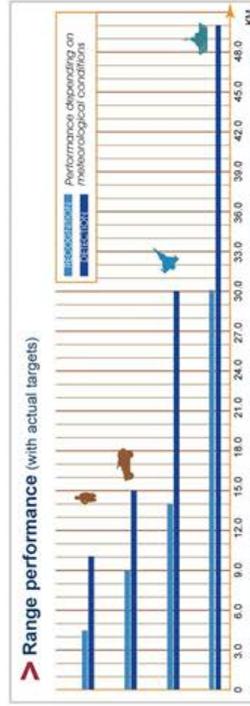
CM6240FC Cooled Thermal Imaging Camera

Product introduction

Used for nacelle

The main feature

- Cooled FPA technology • High resolution (640x512) image
- Multiple remote interfaces • 4X electronic zoom • Continuous zoom function



▲ The information contained in this document is subject to change without notice

Рисунок 2.8 – Рекламный проспект вертолётной обзорно-прицельной тепловизионной системы CM6240FC фирмы SAGEM

3 Функциональная схема, состав и устройство тепловизоров

В рамках курса рассматривается один из типов устройств регистрации ИК излучения – тепловизионные приборы (ТВП). В русскоязычном названии этих приборов заложено их (ТВП) отличие от другого очень близкого к нему типа ИК приборов – тепlopеленгаторов (ТП). Исторически ТП были воплощены в законченные приборы (военного применения) намного раньше тепловизионных приборов, однако техническая сущность различий состояла лишь в способе обработки электрического сигнала после фотоприёмника и методе его предъявления оператору. Современное состояние аппаратно-алгоритмической базы стёрло эти различия, поэтому целесообразно рассматривать обобщённый тип ИК приборов, который удобнее называть тепловизором. Оставляя в стороне исторический опыт создания ТВП, ограничим рассмотрение современными ТВП, использующими матричные фотоприёмные устройства (МФПУ) и работающие в MWIR (3–5 мкм) и LWIR (8–12 мкм) «окнах прозрачности атмосферы» [1].

Структурная схема ТВП полностью отвечает структурным схемам подавляющего большинства оптико–электронных приборов (ОЭП). Основные функциональные блоки – оптическая система (ОС), матричное фотоприёмное устройство (МФПУ), блок цифровой обработки (БЦО) и дисплей – призваны сформировать оптическое изображение на матрице МФПУ, преобразовать лучистый поток в цифровой электрический сигнал и перевести его в изображение видимого диапазона для предъявления оператору. Два дополнительных блока чаще всего присутствуют в современных ТВП: устройство обеспечения рабочей температуры МФПУ и встроенный эталон ИК излучения. Хотя в некоторых современных приборах найдены компромиссные решения, позволяющие обойтись и без этих двух ранее обязательных блоков ТВП.

3.1 Фотоприёмные устройства ТВП

Основным функциональным блоком ИК приборов следует считать фотоприёмник. На настоящем этапе развития технологии фотоэлектроники ИК фотоприёмники являются наиболее «слабым звеном» среди всех технических функциональных блоков ТВП, ограничивающим реализацию всё более высоких его параметров. Это связано с фундаментальными физическими причинами, по которым чувствительность ИК приёмников не может быть улучшена выше некоторого уровня, определяемого фоновыми шумами. Другие функциональные блоки ТВП (системы обеспечения рабочей температуры ФПУ, оптическая система, аппаратно-программный комплекс и конструкция) призваны обеспечить наиболее «комфортные» условия работы ФПУ, чтобы реализовать его максимальные возможности, в первую очередь, чувствительность. Отдавая приоритет требованиям ФПУ, вырабатываются компромиссные варианты их совмещения с другими функциональными блоками.

Особенностям создания и применения ИК ФПУ посвящена чрезвычайно обширная библиография [15–18]. В настоящих материалах затрагиваются лишь те их свойства, которые оказывают влияние на эффективность извлечения оператором содержательной информации из тепловизионного изображения при решении задач дистанционного наблюдения.

Применительно к современному тепловидению целесообразно говорить о матричном фотоприёмном устройстве (МФПУ) как о едином функциональном элементе, совмещающем собственно чувствительные элементы и совокупность микроэлектронных устройств, обеспечивающих их нормальную работу в составе электронных схем и формирующих информационный сигнал в согласованном протоколе обмена с другими функциональными блоками ТВП. Интеграция полупроводниковых элементов МФПУ, преобразующих падающий лучистый поток в дополнительные носители электрических зарядов, с микроэлектронными устройствами, преобразующими эти заряды в структурированную последовательность электрических сигналов, предъявляемую оператору для выявления содержательной информации, проявляется не только в физическом их совмещении в общем твердотельном устройстве. С позиций преобразования информации, которую содержит оптическое поле наблюдаемого сюжета, современное МФПУ представляет собой единый пространственно-временной фильтр, обладающий специфической для каждого типа МФПУ передаточной характеристикой, и обуславливающей его преимущественное выделение одних пространственно-временных частот (конфигураций изображения объектов) и относительное подавление других. Вопросы оптимизации пространственной и временной фильтрации сигналов подробно изучены для сканирующих ИК приборов [2–6]. Для современных несканирующих ТВП используются крайне упрощённые модели [7–9, 13, 14, 18], которые, однако, показывают, что основное искажение пространственно-временного распределения тепловых контрастов наблюдаемого сюжета происходит из-за его пространственно-временной фильтрации в МФПУ. При этом происходит добавление собственных шумов и потеря содержательной информации сигнала, восстановить которую при дальнейшей обработке невозможно.

3.2 Частотная полоса пропускания электронного тракта МФПУ в ТВП

Современные ТВП разрабатываются как универсальные приборы в том смысле, что должны представлять оператору неискажённую информацию о распределении теплового поля широкого набора антропогенных объектов на фоне разнообразных естественных образований. Наиболее сложной в техническом плане остаётся задача объединить в одном устройстве оптимизацию алгоритмов выделения точечного сигнала и алгоритмов неискажённой передачи всех крупноразмерных деталей наблюдаемого сюжета (например, линии горизонта). Сложность состоит в том, что для оптимального выделения сигналов от малоразмерных и от крупноразмерных объектов требуется выполнить два взаимно исключаящих требования по формированию

полосы пропускания электронного тракта ТВП. Имеющие компромиссно выбранную полосу универсальные устройства проигрывают по своей эффективности специализированным, оптимизированным на решение одной из задач.

При обнаружении точечных целей, изображение которых занимает один пиксель матрицы МФПУ, пространственный и временной спектры сигналов чрезвычайно широки. Единственной возможностью повлиять на соотношение полезного сигнала (содержательной информации) к совокупным шумам (помеховой составляющей информации) [18] является регулировка частотной полосы пропускания схем первичной аналоговой обработки сигналов в МФПУ (до преобразования сигнала в цифровую форму). Для выделения точечных целей необходимо резкое сужение частотной полосы электронного тракта, чтобы подавить избыточные внутренние шумы и внешние помехи. Обычно это делается за счёт подавления низких частот и сдвига рабочей полосы в высокочастотную область. Альтернативная задача заключается в предъявлении оператору изображения наблюдаемого сюжета максимально близким к реальности, включая изображения тепловых полей равномерно нагретых объектов крупных размеров (например, ландшафтов). Для комфортного наблюдения оператором окружающей обстановки рабочая полоса частот электронного тракта должна быть очень широкой, начинаясь от самых низких (от единиц Гц) до десятков кГц. Традиционно первый режим называют «теплопеленгационным», а второй – «теповизионным», поскольку в первом случае ставится задача оптимальным образом обнаружить точечную цель на фоне совокупности помех, а во втором – представить оператору тепловое поле окружающей обстановки с минимальными искажениями. Для стандартных решений при прочих равных условиях в режиме теплопеленгации значение ОСШ по точечной цели примерно в 6 раз выше, чем в режиме тепловидения. Однако этот выигрыш оказывается практически бесполезным, если решение об обнаружении принимает не автомат в блоке цифровой обработки информации, а оператор по изображению на экране. Все фоновые образования отображаются на экране дисплея в виде контуров, настолько затрудняющих выделения истинной цели из совокупности целеподобных отметок, что оператор лишь в редких случаях «спокойного» фона выносит правильное решение об обнаружении цели в реальном режиме времени.

Сложность выбора режима работы ИК прибора усугубляется ещё и тем, что оператор достоверно обнаруживает точечную цель на экране при низких значениях отношения сигнала к шуму (ОСШ), равных 2,4 при времени наблюдения менее 10 секунд. При значениях ОСШ = 3,4 оператор достоверно обнаруживает точечную цель даже в присутствии флуктуирующих фоновых помех и зашумлённости экрана дисплея. Современные алгоритмы автоматического обнаружения точечных целей в теплопеленгационном режиме требуют значений ОСШ не менее 6–10, чтобы обеспечить те же показатели надёжности, что и оператор. То есть замена оператора автоматической системой обнаружения требует обеспечения более высокого значения ОСШ (в 2–3 раза) при современном уровне алгоритмов автоматического обнаружения

точечных целей. Это требование эквивалентно уменьшению дальности обнаружения в 1,4–1,7 раза при прочих равных условиях, либо необходимости увеличить в 2–3 раза площадь входного зрачка оптической системы ИК прибора. Использование режима тепловизионной с автоматическим обнаружением целей по специализированным алгоритмам целесообразно в тех системах, где требуется длительный непрерывный контроль за окружающей обстановкой. При длительном непрерывном наблюдении оператор теряет свои преимущества перед автоматическим устройством обнаружения целей из-за утомляемости от рутинных операций. Таким образом, построение МФПУ как единого функционального элемента определяет технический облик ИК прибора в целом и обуславливает особенности представления информации оператору для выявления её содержательной составляющей на фоне помех и искажений.

В тепловизионном режиме изменения верхней и нижней границ полосы пропускания сигнала по-разному влияют на тепловизионное изображение [5], обуславливая возможность неправильной его интерпретации. Нижняя граница полосы пропускания электронного тракта выбирается такой, чтобы изображение наиболее крупных однородных по яркости объектов не отличалось на экране монитора больше, чем на одну градацию в крайних периферийных точках. Но, например, из-за неудачно выбранной нижней границы полосы пропускания электронного тракта изображение равномерно нагретой стены, занимающей всё поле зрения ТВП, может выглядеть так, как будто одна её часть нагрета сильнее, чем другая. Оператор будет интерпретировать такой приборный артефакт как наличие тепловой аномалии в сюжете, например, ландшафта. Опасным является проявление этого эффекта в тепловизионных приборах для вождения транспортных средств. Оператор может воспринимать более яркие или более тёмные фрагменты изображения ровной поверхности (приборные артефакты) как наличие возвышения или углубления ландшафта по пути следования и принимать неправильные решения. Современные методы цифровой обработки сигналов способны компенсировать сдвиг нижней границы полосы пропускания сигнала, однако это делается «по умолчанию», и оператор вынужден опытным путём проверять наличие и эффективность применённых алгоритмов.

При выборе верхней границы полосы пропускания электронного тракта учитывается количество выборок (опросов) каждого из пикселей современного МФПУ за время кадра, поэтому простые соотношения [2–5] нуждаются в существенной корректировке. Проявлением выбора зауженного значения верхней границы полосы пропускания сигнала является эффект «тянучки» за ярким сигналом (для аналогового сигнала) или «оконтуривания» дискретного тепловизионного изображения объекта, вызванный дифференцированием сигнала. На рис. 3.1 за яркими светлыми объектами (лодка, буи, пловец) наблюдается тёмная зона – «тянучка» [5], стр. 305, обусловленная дифференцированием аналогового сигнала от ФПУ. Тёмная зона может восприниматься как область поверхности воды с более низкой температурой, что, действительно, имеет место в области ВПМ на уровне берегового мыса на тепловизионном изображении.



Рисунок 3.1 – Тепловизионное изображение получено с помощью сканирующего ТВП диапазона 8–12 мкм

Для некоторых задач эффект подчёркивания контуров является весьма привлекательным, так как улучшает комфортность наблюдения «вялых» тепловизионных изображений и вводится специально.

На рис. 1.5 на уровне вторичной цифровой обработки изображения заметно улучшена комфортность восприятия сюжета (рис. 1.5 а). Однако при этом проявляются другие недостатки, связанные с потерей информации об отдельных деталях тепловизионного изображения. На рис. 1.5 б изображение «вялое», что, однако, не мешает обнаружить облака на небосводе, тепловые неоднородности на верхней части трубы (слева) и отдельные тепловые неоднородности на стене и ограждение на крыше удалённого здания. Структура кроны дерева на ближнем плане не видна. На левой фотографии изображение более комфортно, видна структура кроны деревьев и проявляются не наблюдавшиеся детали теплового поля удалённого здания. Однако облако на небосводе не наблюдается, пропадают отдельные детали на изображении удалённого здания. Сделать вывод о том, какое из двух изображений содержит больше полезной информации, можно лишь в случае конкретно сформулированной задачи дистанционного наблюдения.

На рис. 3.2 приводится тепловизионное изображение после вторичной цифровой обработки с подчёркнутыми контурами объектов, улучшающими восприятие сюжета. Для данного сюжета введение режима «оконтуривания» вполне оправдано. Однако неопытного оператора введение такого режима может ввести в заблуждение из-за незнания его специфического проявления в псевдоцветовом изображении (рис. 3.3).



Рисунок 3.2 – Тепловизионные изображения получено с помощью ТВП на матричном болометрическом фотоприёмнике (диапазон 8–12 мкм)

На рис. 3.3 контуры (синие) вокруг тепловизионного изображения кистей рук и между пальцами обусловлены особенностями формирования электрического сигнала от ИК МФПУ в электронном тракте ТВП и являются приборным артефактом. Неопытный наблюдатель на основании подобного тепловизионного изображения может прийти к ложным выводам, как, например, убежденность в существовании некоторой тепловой «ауры» вокруг тела человека на основании неправильно интерпретируемых тепловизионных изображений.

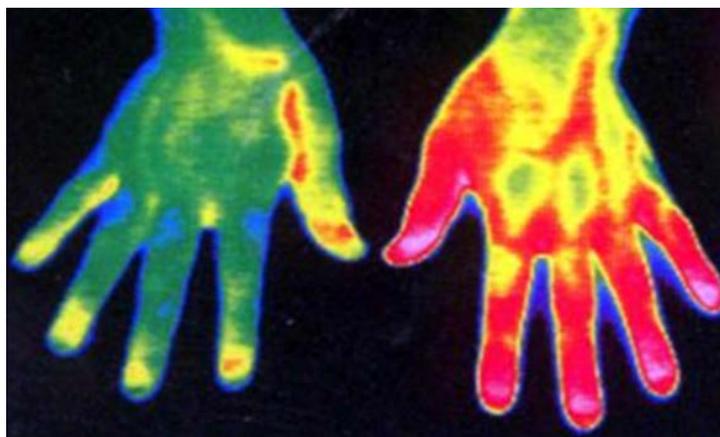


Рисунок 3.3 – Тепловизионное изображение кистей рук. Заимствовано из рекламных материалов фирмы SOFRADIR. Контурные линии вокруг тепловизионного изображения являются приборным артефактом

Опираясь на изложенные в литературе материалы о методах создания и применения фотоприёмников, целесообразно выделить три группы характеристик современных МФПУ, которые могут заметным образом понизить достоверность выводов оператора, если он их не учитывает при интерпретации тепловизионных изображений.

3.3 Геометрические размеры чувствительных элементов МФПУ и их топология

Современные ТВП строятся на основе применения инфракрасных матричных фотоприёмных устройств (ИК МФПУ), работающих в одном из «окон прозрачности» атмосферы 3–5 мкм или 8–12 мкм. Размеры чувствительных элементов, их расположение и количество в матрице отличаются от таких же параметров в фотоприёмных матрицах видимого диапазона [15–18]. Размеры чувствительных элементов и зазоры между ними («шаг» элементов матрицы) в современных ИК МФПУ составляют до 17 мкм, а формат матриц не превышает 1200×1080 элементов. На рис. 3.4 показана матрица чувствительных элементов болометрического МФПУ фирмы SOFRADIR и его условная схема.

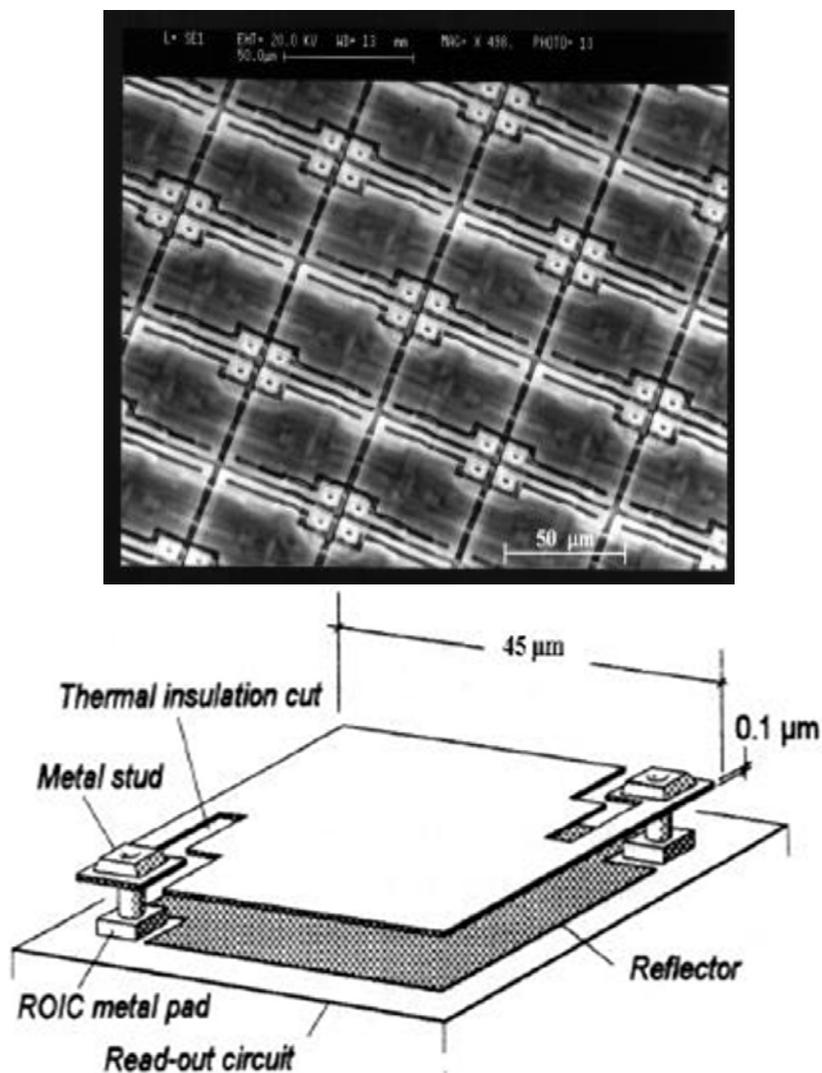


Рисунок 3.4 – Матрица чувствительных элементов болометрического МФПУ фирмы SOFRADIR и его условная схема. Thermal insulation cut – теплоизоляционный зазор; Metal stud – металлический столбик; ROIC metal pad – металлическая контактная площадка; Reflector – отражающий слой; Read-out circuit – схема считывания

На рис. 3.5 показаны образцы матриц ИК МФПУ разного формата фирмы SOFRADIR.

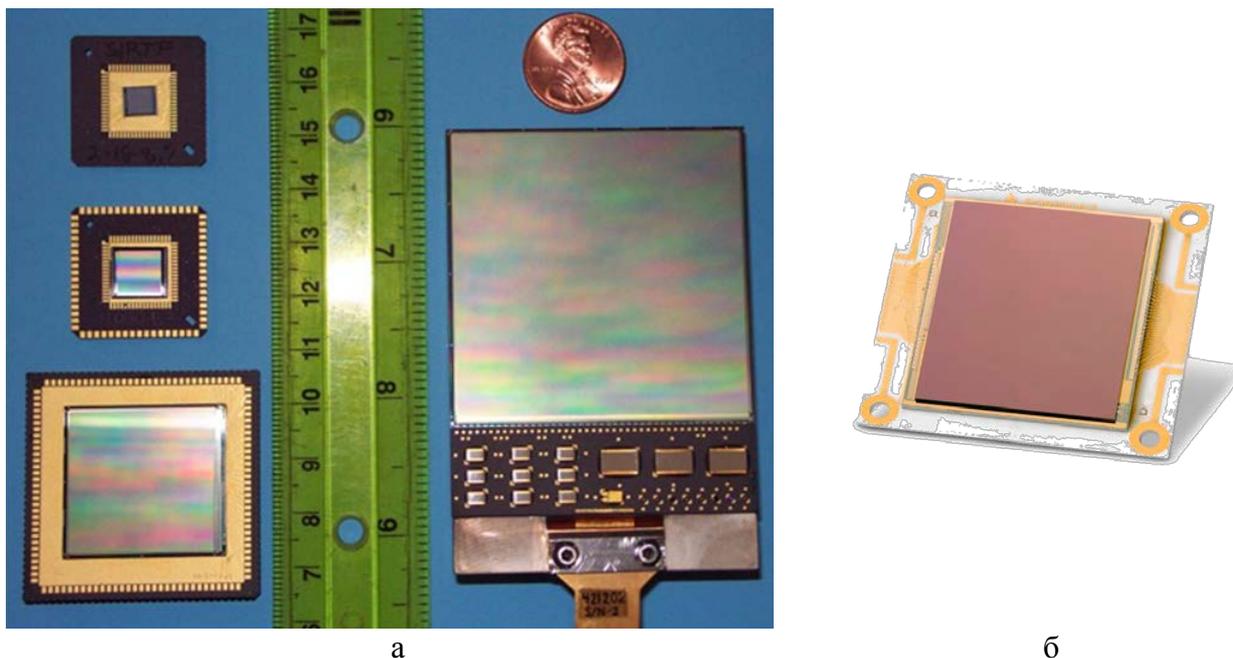


Рисунок 3.5 – Внешний вид ИК фоточувствительных матриц фирмы SOFRADIR с количеством фоточувствительных элементов от 128×128 элементов до 2000×2000 элементов

Топология чувствительной зоны микроболметра китайской фирмы DALI показана на рис. 3.6. Микроболметрические элементы МФПУ имеют размеры 17 мкм.

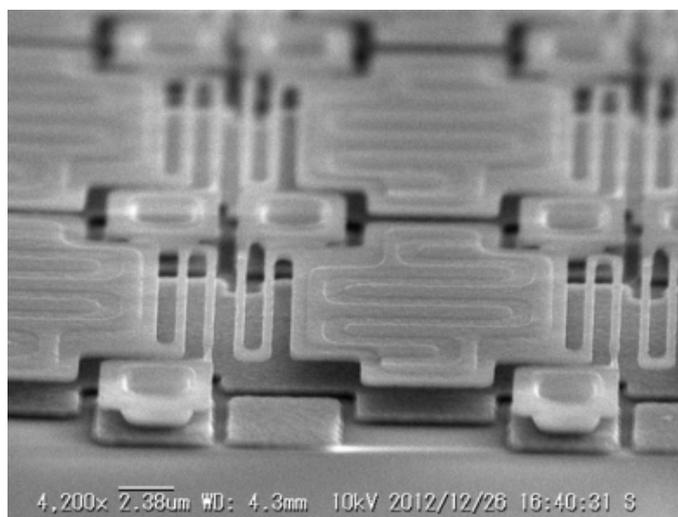


Рисунок 3.6 – Топология чувствительной зоны микроболметрического элемента. Заимствовано из рекламных материалов китайской фирмы DALI

Принципиальным свойством информации, получаемой с помощью любых дискретных фотоприёмников, является её пространственная и временная дискретизация, обусловленная волновыми свойствами электромагнитного излучения. Масштабы дискретизации обычно характеризуют в терминах

«пространственного разрешения», которое дополнительно учитывает параметры оптической системы.

Применительно к задачам обнаружения точечных целей пространственная дискретизация изображения приводит к зависимости значения полезного сигнала от взаимного расположения центра изображения малоразмерного объекта и центра чувствительного элемента МФПУ (пространственная «фаза»), обуславливающей модуляцию «пеленгационной характеристики» при их относительном перемещении. В самом первом приближении принимается [2–5], что чувствительность элемента МФПУ равномерно распределена по его площади. Сложные расчёты, учитывающие отношение сигнала от точечного объекта к совокупности внутренних и фоновых шумов [18, стр. 205], показывают, что при решении задач определения координат точечных целей размер площадки чувствительного элемента МФПУ должен составлять от 1,2 до 1,5 величины радиуса кружка рассеяния оптики.

При наблюдении объектов крупных размеров эффект модуляции «пеленгационной характеристики» сглаживается из-за особенностей формирования их изображения в плоскости матрицы. Кроме того, в современных ТВП применяются различные методы обработки изображений, позволяющие устранить «ступенчатые» контуры наблюдаемых объектов. Удачно подобранный алгоритм обработки изображения позволяет сделать почти незаметной для оператора дискретную структуру тепловизионного изображения. Однако в измерительных ТВП дискретизация изображения в совокупности с неполным заполнением площади матрицы МФПУ чувствительным слоем ($\text{fill-factor} < 1$) обуславливают появление дополнительной погрешностей измерения лучистого потока от объекта [4]. Погрешность измерения лучистого потока от малоразмерного объекта добавляется к паспортной приборной погрешности, обусловленной другими факторами. Она имеет самое большое значение для «точечного» объекта, изображение которого занимает один чувствительный элемент, и уменьшается с увеличением изображения наблюдаемого объекта, примерно обратно пропорционально количеству элементов, принимающих участие в формировании его изображения. Для современных болометрических матричных измерительных ТВП значение максимальной дополнительной погрешности $\Delta T_{\text{погрешн}}$ измерения радиационной температуры точечного излучателя составляет $\Delta T_{\text{погрешн}} \sim 2,5$ К. При размерах изображения излучателя 9×9 элементов МФПУ погрешность измерения совпадает с паспортной приборной погрешностью.

Необходимо подчеркнуть, что дискретизация изображения и, следовательно, модуляция «пеленгационной характеристики» и погрешность измерения лучистого потока малоразмерных объектов - неустранимое свойство всех оптико-электронных систем, имеющих конечные размеры чувствительных элементов ФПУ и конечные размеры «кружка рассеяния» оптической системы. Многообразные технические приёмы, направленные на уменьшение размаха «пеленгационной характеристики» (например, «микросканирование»), имеют

целью довести его до согласованного («договорного») значения, поскольку пространственно-временную дискретизацию изображения устранить полностью не представляется возможным физически. В телевизионных системах используются МФПУ с нанесёнными на каждый чувствительный элемент микролинзами, позволяющими устранить отрицательное влияние неполного заполнения площади матрицы чувствительной областью преобразования свет/сигнал (увеличить fill-factor ~ 1). Для ИК МФПУ до настоящего времени не найдены оптические материалы и не отработана технология создания таких микролинз.

Волновые свойства света не позволяют исключить зазоры между чувствительными элементами совсем. Для современных технологий размеры чувствительных элементов матрицы, а также зазоры между ними, соизмеримы с длиной волны регистрируемого излучения. Из-за этого, например, линейный размер современной матрицы МФПУ форматом 1200×1080 элементов не может быть меньше 20 мм×18 мм. Эти геометрические размеры определяют все дальнейшие конструкторские решения при создании ТВП, в первую очередь, габариты оптической системы и охлаждающего устройства [19]. Из-за того, что рабочие длины волн ИК излучения в тепловидении в 10–20 раз больше длины волны видимого излучения (0,5 мкм), телевизионные приборы существенно меньше тепловизионных при прочих равных условиях (формат кадра, поле обзора и т.п.). По этой же причине существуют физические ограничения на пути микроминиатюризации тепловизионных приборов высокого класса.

3.4 Рабочий спектральный диапазон ТВП

Рабочий спектральный диапазон ТВП определяется, в первую очередь, диапазоном спектральной чувствительности МФПУ. Несмотря на разный способ преобразования лучистого потока в электрический сигнал в тепловых и фотоэлектрических МФПУ [15–17], реальный рабочий спектральный диапазон ТВП формируется встроенным в МФПУ спектральным полосовым ИК светофильтром. Традиционно рабочие спектральные диапазоны ИК приборов выбирались в пределах двух «окон прозрачности» атмосферы 3,4–5,2 мкм и 7,4–13,6 мкм. На предыдущих этапах развития ИК техники, когда чувствительность фотоприёмников была относительно низкой и ограничивалась шумами электронных каналов, рабочие спектральные диапазоны старались сделать максимально широкими, чтобы зарегистрировать наибольшее количество «полезного» (информативного) излучения сюжета. В настоящее время реальная чувствительность ИК приборов высока и в большей степени ограничивается внешними фоновыми помехами. Одним из способов борьбы с естественными и организованными помехами является их спектральная селекция.

Тонкая спектральная структура теплового поля связана с температурами и спектральными оптическими характеристиками наблюдаемых естественных образований (включая собственное излучение атмосферной трассы) и

антропогенных объектов. Существуют физические предпосылки, чтобы добиться преобладания содержательной составляющей тепловизионной информации над помеховой за счёт соответствующего выбора ширины и положения рабочего спектрального диапазона ТВП в пределах MWIR и LWIR «окон прозрачности» атмосферы.

Для разных применений тепловидения эффективность спектральной селекции различна. Например, качество спектральной фильтрации падающего ИК излучения прямым образом влияет на погрешность количественных измерений, например, в единицах радиационных температур. Это важный фактор при создании универсальных и специализированных измерительных ТВП. Для ТВП, отнесённых к группе «газовизоров» и предназначенных для обнаружения повышенных концентраций конкретных газов, качество ИК светофильтров имеет решающее значение. В этих приборах ширина рабочего спектрального диапазона составляет доли микрона при очень сильном подавлении всего излучения вне его.

При решении задач наблюдения за окружающей обстановкой (военные и охранные MWIR ТВП) в стремлении обеспечить круглосуточный всепогодный режим работы часто «захватывают» область короче 3 мкм, чтобы в дневных условиях регистрировать ещё и отражённое от объектов ИК излучение Солнца.

Тепловые МФПУ (болومترические, пироэлектрические) в принципе не селективны. Широкое распространение ТВП LWIR диапазона обусловлено физическими особенностями формирования ИК излучения реальных тел в условиях естественного теплообмена, из-за которых именно в этом LWIR диапазоне наблюдается максимальный тепловой контраст антропогенных объектов и природных образований. Нет технических проблем для создания тепловых МФПУ MWIR диапазона, однако в нём тепловые контрасты объектов наблюдения заметно меньше, чем в LWIR диапазоне. Тепловые МФПУ MWIR диапазона могут быть использованы для наблюдения за высоко нагретыми объектами и не обеспечат той универсальности применения ТВП, как МФПУ LWIR диапазона.

Фотоэлектрические МФПУ обладают существенным преимуществом перед тепловыми по чувствительности. Особенность их применения состоит в том, что эти преимущества реализуются лишь при охлаждении чувствительного слоя до низких, часто криогенных, температур. Причём, чем ниже температура охлаждения, тем шире выбор веществ, которые можно применить для создания высокочувствительных фотоэлектрических слоёв МФПУ [2–5,8–10,14–17]. Фотоэлектрические материалы обладают селективными характеристиками спектральной чувствительности из-за квантового характера процессов поглощения и преобразования электромагнитного излучения в электрический сигнал. Наиболее важными являются наличие максимума и «красной границы» чувствительности, то есть максимальной длины волны ИК излучения (минимальной энергии фотона), дальше которой МФПУ не формирует электрического отклика на падающее излучение [17], сколь бы интенсивным оно ни было (рис. 3.7 а, 3.7б). Из-за этого нет универсальных, пригодных для всех спектральных диапазонов составов материала чувствительных элементов

МФПУ. Наиболее распространённый в настоящее время материал КРТ (HgCdTe) применяется для создания МФПУ в диапазоне длин волн от видимых до 16 мкм, однако и он имеет характерную «красную границу», положение которой зависит от химического состава материала.

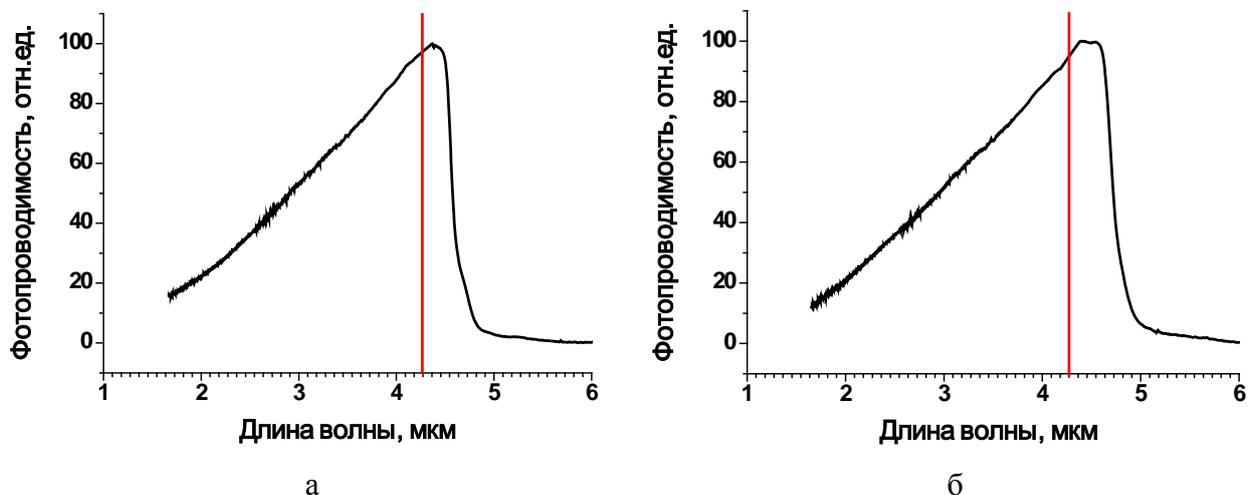


Рисунок 3.7 – Спектры фоточувствительности слоя $Cd_xHg_{1-x}Te$ при $T = 77 K$:
а – $x = 0,3215$, $d = 6,78$; б – $x = 0,316$, $d = 6,45$

Существует достаточно успешное направление создания фотоэлектрических МФПУ на основе «квантовых ям» КВИП (QWIP фотоприёмники). Отличительной способностью этих МФПУ является их исходная чувствительность к ИК излучению в узком спектральном диапазоне (ширина порядка 1 мкм) и к только одной его поляризационной составляющей. Для наблюдательных приборов эти особенности не являются ограничением, тем более, что чувствительность ТВП с такими QWIP МФПУ весьма высока, а степень однородности матрицы превосходит другие фотоприёмники такого же формата (рис. 3.8).



Рисунок 3.8 – ТВП с использованием QWIP МФПУ форматом 640×480 элементов. Заимствовано из рекламных материалов фирмы SOFRADIR

Для измерительных ТВП с QWIP МФПУ, а также для ТВП типа GF – Gas Finder требуются дополнительные процедуры при сопоставлении результатов измерений радиационных температур, например, болометрическим ТВП (рабочий диапазон 8–12 мкм) и яркостных температур для QWIP ТВП (рабочий диапазон 8,5–9,3 мкм). Если для АЧТ измеренная радиационная (в диапазоне) и яркостная (на длине волны) температуры совпадают, то для реальных тел несовпадение может быть принципиальным, для чего, собственно, и создаются «газовизоры» типа GF.

Перспективным направлением считается создание двухспектральных MWIR и LWIR МФПУ [6, 8, 15, 17]. Мотиватором при этом выступает повседневный опыт использования телевизионных приборов, аналогия с которым свидетельствует, что цветное (многоспектральное) изображение более информативно, чем монохромное или чёрно-белое. Преодоление технических трудностей при их воплощении в тепловидении представляет собой самостоятельную область разработок. Однако накопленный опыт свидетельствует о наличии достаточно серьёзных проблем в области выявления смыслового содержания информации, получаемой такими двухспектральными ТВП. Помимо того, что в MWIR и LWIR диапазонах собственное излучение может формироваться разными по глубине поверхностными слоями объекта с разной термодинамической температурой (как для воды), вклад отражённого ИК излучения Солнца в этих диапазонах разный. Наличие на тепловизионных изображениях солнечных теней чаще всего не мешает оператору правильно интерпретировать наблюдаемую обстановку в MWIR ТВП, однако при формировании суммарного двухспектрального изображения простые приёмы совмещения MWIR и LWIR изображений не повысят его содержательную составляющую по сравнению с каждым из них по отдельности.

Для более подробного описания спектральных особенностей формирования фотоэлектрического отклика в ИК МФПУ необходимо указать, что в тепловых фотоприёмниках рабочий спектральный диапазон формируется специальным оптическим элементом, устанавливаемым перед фоточувствительной матрицей. Этот элемент играет роль полосового спектрального светофильтра, обеспечивающего равномерное пропускание ИК излучения в рабочем диапазоне МФПУ с коэффициентом $\tau(\Delta\lambda)$, и отражение ИК излучения вне его границ. В технической зарубежной литературе по микроболометрическим МФПУ этот элемент называют «оптическим резонатором» и указывают, что принцип его действия основан на «многократном отражении излучения со строго определёнными длинами волн в конструкции из двух параллельных оптических поверхностей».

Чувствительный слой теплового фотоприёмника нагревается собственным тепловым излучением всех оптических элементов ТВП, включая «оптический резонатор». В рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ их излучение пропорционально коэффициенту излучения $\varepsilon(\Delta\lambda) = 1 - \tau(\Delta\lambda)$. Вне границ рабочего спектрального диапазона $\Delta\lambda$ на болометрический элемент дополнительно попадает собственное тепловое излучение от самого

«оптического резонатора», коэффициент излучения которого во всём диапазоне длин волн от 0 до ∞ должен приближаться к единице (исходя из назначения этого элемента), за исключением рабочего участка $\Delta\lambda$, в котором он равен $\varepsilon(\Delta\lambda) = 1 - \tau(\Delta\lambda)$. Поскольку его температура близка к температуре внутренней полости ТВП и изменяется достаточно медленно, то постоянный лучистый поток, нагревающий болометр, участвует в формировании «постоянной составляющей» электрического сигнала МФПУ и его «темнового тока». Компенсация этой составляющей сигнала возлагается на электронную схему первичной обработки сигнала от МФПУ. Порядок величин можно оценить, приняв температуру внутренней полости ТВП $+25^\circ\text{C}$ и суммарный коэффициент пропускания его оптической системы, включая «оптический резонатор», $\tau(\Delta\lambda) = 0,6$.

На болометрический элемент попадает лучистый поток, эквивалентный лучистости АЧТ (M°) в диапазоне от 0 до ∞ за вычетом той его части ($M_{\Delta\lambda}$), которая формируется в рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda$ и в котором коэффициент излучения равен $\varepsilon(\Delta\lambda) = 1 - \tau(\Delta\lambda) = 0,4$. Для выбранных параметров расчёта эти значения составляют:

$$M^\circ - M_{\Delta\lambda} = \sigma \cdot T^4 - \tau(\Delta\lambda) \int_{\Delta\lambda} M_\lambda d\lambda = 0,042 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} - 0,007 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} = 0,035 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}.$$

Отношение величины лучистого потока, засвечивающего болометрический элемент в рабочем спектральном диапазоне ($\tau(\Delta\lambda) \cdot \int_{\Delta\lambda} M_\lambda d\lambda$), к суммарному лучистому потоку его тепловой (темновой) засветки составляет 0,2. То есть 80% «паразитной засветки» поступает на чувствительный элемент из нерабочей спектральной области. Флуктуации лучистого потока, дающие свой вклад в темновые шумы болометра, соответствуют дисперсии флуктуаций чёрного тела во всём спектральном диапазоне длин волн от 0 до ∞ :

$$D_M^\circ = 2\pi h^2 c^3 \int_0^\infty \varepsilon^2(\lambda) \exp\left\{\frac{C_2}{\lambda T}\right\} / \left\{\lambda^6 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]^2\right\} d\lambda.$$

Наличие «тёплого» «оптического резонатора» вносит определённый вклад в ухудшение чувствительности тепловых МФПУ по сравнению с фотонными.

Неселективный характер спектральной чувствительности тепловых МФПУ обуславливает достаточно малую зависимость их отклика от вариаций спектрального состава регистрируемого излучения, хотя она, несомненно, учитывается при заводской калибровке болометрических ТВП по излучению эталонных АЧТ с разными температурами.

Спектральная чувствительность фотонных МФПУ s_λ теоретически имеет вид, близкий к представленному на рис. 3.7, то есть характеризуется наличием «красной границы», дальше которой более длинноволновое излучение не вызывает генерацию носителей заряда в чувствительном элементе, сколь бы интенсивным оно ни было.

При разработке МФПУ его рабочий спектральный диапазон $\Delta\lambda$ выбирают вблизи максимума чувствительности $s_{\lambda\max}$, однако в пределах всего $\Delta\lambda$ неравномерность s_λ часто достаточно велика. В отличие от тепловых МФПУ, ИК светофильтр охлаждают и включают в состав конструкции охлаждаемых фотонных МФПУ. При этом картина формирования «темновых» лучистых потоков принципиально изменяется. Охлаждаемый ИК светофильтр имеет низкую собственную температуру (как правило, криогенную), из-за чего его тепловое излучение во всём диапазоне чувствительности фотоприёмного слоя пренебрежимо мало. «Темновой» лучистый поток формируется только собственным излучением оптических элементов ТВП в рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda$. Спектральный коэффициент излучения оптической системы $\varepsilon(\lambda)=1-\tau(\lambda)$, а её температура определяется конструкцией ТВП. Соответственно этому, шумовой сигнал в чувствительных элементах вызывают флуктуации «темнового» лучистого потока лишь в пределах рабочего спектрального диапазона МФПУ $\Delta\lambda$. Выше приведена оценка, свидетельствующая, что охлаждаемый фильтр не пропускает до 80% той фоновой засветки, которая попадает на МФПУ, если светофильтр не охлаждается. Дисперсия флуктуаций лучистого потока может быть оценена по формулам для АЧТ при соответствующем учёте спектрального коэффициента излучения оптической системы $\varepsilon(\lambda)$:

$$D_M^o = 2\pi h^2 c^3 \int_{\Delta\lambda} \frac{\varepsilon^2(\lambda) \exp\left\{\frac{C_2}{\lambda T}\right\}}{\left\{\lambda^6 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1\right]^2\right\}} d\lambda$$

$$= \int_{\Delta\lambda} \varepsilon^2(\lambda) \cdot M_\lambda^o(\lambda, T) \cdot c \cdot h \cdot \exp\left\{\frac{C_2}{\lambda T}\right\} / \left\{\lambda \left[\exp\left\{\frac{C_2}{\lambda T}\right\} - 1\right]\right\} d\lambda.$$

Селективный характер чувствительности фотонных МФПУ вызывает необходимость более сложного учёта спектральных особенностей контрастного излучения целей и трансформации его спектрального состава при прохождении атмосферных трасс и оптической системы ТВП при вычислении величины полезного сигнала, подлежащего выделению в присутствии внутренних шумов и фоновых помех. Значение полезного сигнала U определяется выражением, описывающим свёртку спектральных величин излучения сюжета $L_{\text{сюжета}}(\lambda)$, пропускания атмосферной трассы $\tau_{\text{атмосферы}}(\lambda)$, пропускания оптической системы $\tau_{\text{оптики}}(\lambda)$ и спектральной чувствительности МФПУ $s(\lambda)$ в пределах рабочего спектрального диапазона $\Delta\lambda$:

$$U = \int_{\Delta\lambda} L_{\text{сюжета}}(\lambda) \cdot \tau_{\text{атмосферы}}(\lambda) \cdot s(\lambda) d\lambda.$$

Спектральное распределение излучения сюжета и пропускания атмосферы являются случайными величинами. Рабочие спектральные диапазоны MWIR и LWIR являются достаточно широкими, чтобы в их пределах тонкая спектральная структура оптического поля наблюдаемых

сюжетов в естественных условиях изменялась за счёт динамики соотношения собственного излучения объектов и отражённого от них ИК излучения фоновых образований. Даже при стендовых калибровках и измерениях параметров ТВП возникают сложности из-за одновременного изменения интенсивности и спектрального состава излучения эталонных АЧТ при изменении их температуры. Например, при создании изображения щелевого источника ИК излучения (измерения «функции рассеяния линии») эталонное АЧТ помещают за соответствующей щелевой диафрагмой. Ширина щели в начале процедуры измерений должна быть достаточно большой, из-за чего лучистый поток от АЧТ также велик. Его интенсивность подбирается таким образом, чтобы сигнал от МФПУ не выходил за пределы линейного динамического диапазона преобразования сигналов. Это делается исключительно путём регулировки температуры АЧТ, поскольку введение любых ослабляющих ИК фильтров вносит непредсказуемую погрешность в эталонное излучение. Дальнейшая процедура измерений состоит в уменьшении ширины щели, которая сопровождается пропорциональным уменьшением лучистого потока. С приближением к уровню предельного геометрического разрешения требуется увеличить интенсивность лучистого потока от АЧТ для работы ТВП в той же области линейного динамического диапазона сигнала. Интенсивность лучистого потока увеличивают за счёт увеличения температуры АЧТ, что одновременно сдвигает спектр его излучения в коротковолновую область. Таким образом, при сохранении постоянной интегральной мощности эталонного излучения изменяется его спектральный состав. Если для тепловых фотоприёмников это не столь существенно, то для фотонных фотоприёмников с выраженным максимумом спектральной чувствительности это может привести к непрогнозируемым погрешностям. Аналогичные проблемы сопровождают процедуру измерения «функции рассеяния точки». Схожие эффекты возникают при работе ТВП с высокочувствительными фотонными МФПУ в реальных условиях и могут затруднить выявление содержательной структуры регистрируемой информации.

3.5 Чувствительность МФПУ к ИК излучению

Особенность ИК приборов состоит в том, что их пороговая чувствительность зависит от того фона, на котором наблюдается объект. Эта зависимость неоднозначна и определяется целым рядом факторов, связанных и с характеристиками ИК прибора, и с «фоновой нагрузкой», то есть ИК излучением самого сюжета наблюдения. Процесс формирования электрического отклика в ИК фотоприёмнике на падающий поток фотонов является мультипликативным. В первую очередь это проявляется в зависимости крутизны вольт/ваттной характеристики, положения «рабочей точки» в пределах динамического диапазона и интенсивности собственных шумов от интенсивности оптического сигнала. Его представление в качестве аддитивного процесса является вынужденной мерой упрощения, без которой невозможно было бы построение инженерных методик расчётов и реального

проектирования ИК МФПУ. Выбор характеристики чувствительности МФПУ предполагает такую его оценку, которая давала бы возможность предсказать, какие значения тепловых контрастов сможет различать и обрабатывать оператор на тепловизионном изображении прибора, использующего данное МФПУ. Ключевым звеном, несомненно, является характеристика собственно чувствительного слоя, показывающая, какая часть лучистого потока может быть преобразована в электрический сигнал, традиционно обозначаемая как «квантовая эффективность». При выборе материала фотоприёмника приоритет отдаётся материалам с наиболее высоким показателем этой величины. Однако для современных МФПУ, интегрированных с микроэлектронными схемами считывания и первичной обработки сигналов [18], более существенным оказывается технологическая возможность эффективной трансляции образовавшегося при падении лучистого потока избыточного заряда в электрический сигнал на выходе МФПУ как законченного устройства. Если выигрыш в величине квантовой эффективности может составлять от 2 до 5 раз при выборе разных фотоэлектрических материалов, то возможный проигрыш при неэффективном переносе и считывании сигнала за счёт несовместимых технологий достигает порядка и более. Примером может служить МФПУ на основе кремния, имеющий достаточно низкий квантовый выход (не более 20%), однако хорошо реализующий кремниевую технологию создания основных электронных схем и мультиплексоров в едином твёрдом чипе. Качество изображения ТВП с МФПУ на основе силицида платины (SiPt) демонстрирует его высокую чувствительность и однородность параметров элементов матрицы (рис. 3.9).



Рисунок 3.9 – Изображение получено ТВП с использованием МФПУ на SiPt. Материалы заимствованы из рекламных проспектов фирмы InfraMetrics

Материал КРТ с более высоким квантовым выходом требует применения технологии гибридной сборки высокой сложности, которая обладает значительным уровнем технических рисков на каждой технологической операции.

С появлением многоэлементных ФПУ характеристика их чувствительности перешла в разряд статистических. Современные технологии изготовления многоэлементных фотоприёмников позволяют получить изделия, у которых все основные параметры имеют определённый разброс значений, в первую очередь, параметр чувствительности. Поэтому, как правило, характеризуя МФПУ, указывают среднее значение чувствительности его элементов и количество элементов, имеющих чувствительность хуже средней. Чтобы обеспечить тепловизионное изображение равномерного фона без аномалий яркости на экране дисплея, электронный тракт ТВП производит соответствующую корректировку коэффициентов передачи сигнала от каждого чувствительного элемента МФПУ. Очевидно, что выравнивание изображения производится с учётом всех элементов, в первую очередь, имеющих чувствительность хуже средней. Таким образом, квантовый выход и показатель эффективности передачи сигнала в схему считывания являются лишь составной частью реальной чувствительности МФПУ, зависящей ещё и от эффективности алгоритма выравнивания, его реализации и устойчивости при разных фоновых засветках. Поэтому для современных ИК МФПУ использование традиционных параметров чувствительности [2–5] оказывается недостаточным и, часто, недоступным для непосредственного измерения [8, 13–18, 20].

Наиболее широко применявшимся параметром, характеризующим чувствительность ИК фотоприёмников, являлась величина их «обнаружительной способности» D^* . Она имеет физический смысл такого значения отношения сигнала к шуму, которое возникло бы на контактах фоточувствительного элемента, если бы на него попадал 1 Ватт лучистой мощности. На практике используются различные нормировки этой величины, чтобы придать ей универсальность: нормировки по площади, полосе частот, длине волны, температуре излучателя и т.д. Удобство этой величины в том, что она позволяла аналитическим путём рассчитывать характеристики ИК приборов различного назначения и прогнозировать влияние тех или иных конструктивных параметров (например, диаметра оптики) на технические и тактические характеристики приборов в целом. С другой стороны, технология измерения значений D^* позволяет осуществлять их с необходимой точностью.

Интеграция чувствительных элементов с первичной электроникой в ИК МФПУ не позволяет прямым образом измерить значение его «обнаружительной способности» D^* . На практике для характеристики чувствительности ИК МФПУ применяется параметр, который прежде использовался для характеристики тепловизионных приборов в целом – пороговая разность температур ($\Delta T_{\text{пор}}$). Для придания общности этого параметра указывают характеристики условной оптической системы (обычно, апертура 1:1; $\tau = 0,6$), спектральный диапазон и температуру окружающего фона. Этого вполне достаточно при оценках применимости данного МФПУ для решения тепловизионных задач, однако для оценки его применимости, например, для обнаружения точечных целей потребуются дополнительные прямые исследования.

Также требуются дополнительные прямые исследования параметра чувствительности ТВП при наблюдении объектов на разных по температуре фонах. Физические причины зависимости обнаружительной способности ИК фотоприёмника от фонового излучения связаны с изменением электрического «отклика» чувствительного слоя на одинаковые по мощности приращению лучистого потока (контрастного излучения объекта) в зависимости от общей интенсивности (средней составляющей) падающего оптического излучения и от величины регистрируемого сигнала (амплитуды контраста). Для малых по амплитуде контрастов принято считать это изменение пренебрежимо малым, а характеристику преобразования «свет/сигнал» - линейной. Но при больших засветках могут проявиться вторичные эффекты, связанные как с переходом в нелинейную область свет/сигнальной характеристики, так и с проявлением энергетических «ловушек» в полупроводниковом материале, с неполным считыванием сигналов и т.д. Примерами таких проявлений служит «след» от засветки МФПУ ТВП прямым изображением Солнца, тёмные траекторные следы от близко летящих пиротехнических элементов и др. Применением использования эффекта «ослепления» ТВП служат штатные устройства создания тепловых заградительных помех в военной технике (рис. 3.10). На рис. 3.10 а, б видны тёмные траекторные следы от пиротехнических зарядов. Следы наблюдаются достаточно длительное время после окончания светового воздействия. В отдельных случаях они могут замаскировать на тепловизионном изображении ценную информацию, для чего, собственно, и применяются эти средства оптико-электронного противодействия.

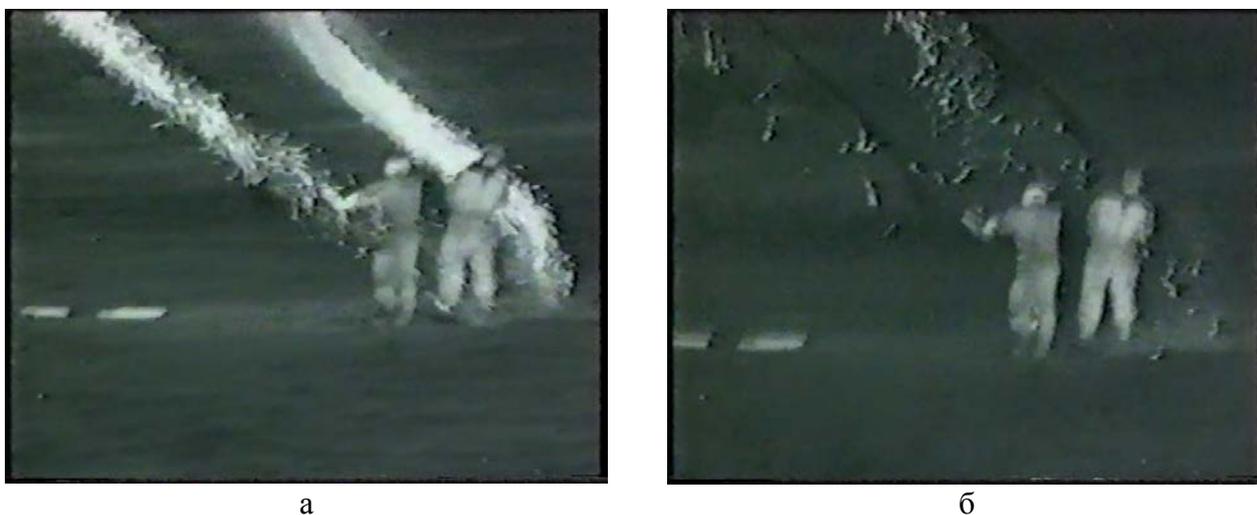


Рисунок 3.10 – Изображение получено ТВП с использованием МФПУ на SiPt. Материалы заимствованы из рекламных проспектов фирмы InfraMetrics

3.6 Влияние неоднородности параметров элементов МФПУ на качество тепловизионного изображения

Физические причины неоднородности параметров элементов МФПУ связаны, во-первых, с наличием локальных неоднородностей на исходных пластинах того материала, на котором методами полупроводниковой

микроэлектроники формируются сами чувствительные элементы и интегрированные в твёрдое тело электрические схемы считывания и первичной обработки сигналов. Вторая причина появления неоднородностей характеристик отдельных элементов в массиве матрицы связана с технологией её изготовления, насчитывающей большое количество технологических последовательных операций обработки (более 30 ответственных – критических - операций). Большой разброс параметров чувствительных элементов матрицы существенно усложняет алгоритм получения равномерного тепловизионного изображения, который реализуется, как правило, методами цифровой обработки сигналов. Остаточные эффекты при недостаточно выравненных параметрах канала передачи «ИК сигнал – электрический сигнал – видимое изображение» могут формировать на изображении артефакты в виде концентрических полос, разнояркостных кластеров и др. Стремление получить матрицы с большим количеством чувствительных элементов заставляет использовать для подложек исходные пластины кристаллов большого размера, на которых формируется матрица МФПУ. На рис. 3.11 показано поле неоднородностей исходной кристаллической подложки, используемой для формирования на ней матричного ФПУ.

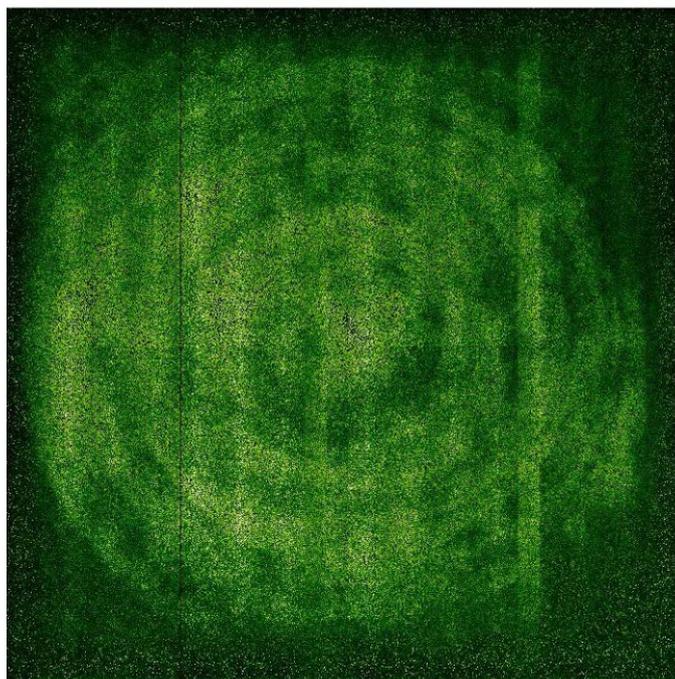


Рисунок 3.11 – Неоднородности на кристалле, который используется для создания 4-х мегапиксельного ИК МФПУ HAWAI –II

Очевидно, что неоднородность параметров элементов крупноформатной матрицы, сформированной на едином кристалле, будет значительно выше, чем у каждой из малоформатных матриц, изготовленных из того же кристалла. Неоднородности исходного кристалла обуславливают неоднородности параметров матрицы в зависимости от её формата. Поэтому современная тенденция состоит в том, чтобы использовать для изготовления МФПУ

кристаллические подложки наибольшего диаметра. Максимальный размер кремниевых подложек достигает 300 мм (рис. 3.12).



Рисунок 3.12 – Одна из технологических операций по производству ИК МФПУ малого формата из одной подложки полупроводникового материала. Материалы заимствованы из рекламных материалов китайская фирмы DALI

3.7 Оптические системы ТВП

Системообразующим фактором выступает совмещение МФПУ с оптической системой ТВП. Особенности построения тепловизионных оптических систем обусловлены тем, что требуемые достаточно широкие поля обзора могут быть обеспечены линзовыми или зеркально-линзовыми схемами с большой долей преломляющих элементов. Выбор преломляющих оптических материалов для конструирования таких компонент, пропускающих излучение в широком ИК диапазоне, достаточно ограничен, а полностью зеркальными их сделать не всегда удаётся. Наиболее применяемым оптическим материалом в настоящее время является кристаллический германий Ge. В сложных оптических тепловизионных объективах используются, кроме того, различные ИК стёкла (серия материалов ИКС), ИК керамики ZnS и ZnSe, кристаллический кремний. Зеркальные оптические системы имеют преимущества при создании приборов с узким полем зрения.

Основной задаче оптической системы – собрать необходимое и достаточное количество энергии от цели и передать её на чувствительный элемент МФПУ – в реальных условиях мешает расфокусировка изображения. Она вызывается разными факторами, и в первую очередь тем, что при одинаковом изменении температуры у разных материалов по-разному изменяются показатель преломления и тепловое линейное расширение. Поэтому одним из важнейших эксплуатационных качеств оптической системы является её способность «удерживать» максимальную концентрацию энергии в изображении точечного объекта во всём диапазоне условий эксплуатации. Ручная или автоматическая подфокусировка изображения не решает в полной мере проблему термической расстраиваемости изображения.

Возможность обнаружения малоразмерных объектов прямым образом зависит от площади входного зрачка оптической системы, в то время как для наблюдения объектов, занимающих несколько пикселей (от 9×9 и более), более важным является параметр её «энергетической апертуры» [2], стр. 542. Для заданного уровня чувствительности МФПУ площадь входного зрачка оптической системы ТВП не может быть меньше некоторой расчётной величины, что, в свою очередь, определяет размеры прибора в целом. Тем самым обуславливается системная связь между типом МФПУ и габаритами оптической системы, обеспечивающими выделение из наблюдаемого пространства достаточного количества энергии электромагнитного излучения нужного спектрального диапазона, чтобы зарегистрированный МФПУ сигнал обеспечивал такое отношение сигнала к шуму, которое удовлетворял бы алгоритм оперативной обработки информации с позиций гарантированного выделения цели в присутствии сложных помех.

Важные особенности разработки и конструирования ИК ОС связаны с необходимостью учёта влияния собственного теплового излучения оптических элементов. ТВП чувствительны к наличию в оптической системе виньетирования, центральному экранированию, эффектам автоколлимации МФПУ («эффект нарцисса» [5]), собственному излучению элементов конструкции и т.д. На рис. 3.13 в центре кадра выделяется светлое пятно, вызванное автоколлимационным эффектом (эффект «нарцисса»). Ближе к периферии кадра выделяется кольцевая светлая зона того же происхождения. Приведённая иллюстрация выбрана специально для наглядной демонстрации этого специфического эффекта. На практике он действует одновременно с другими факторами и может приводить к неоднозначной или ошибочной интерпретации тепловизионного изображения.

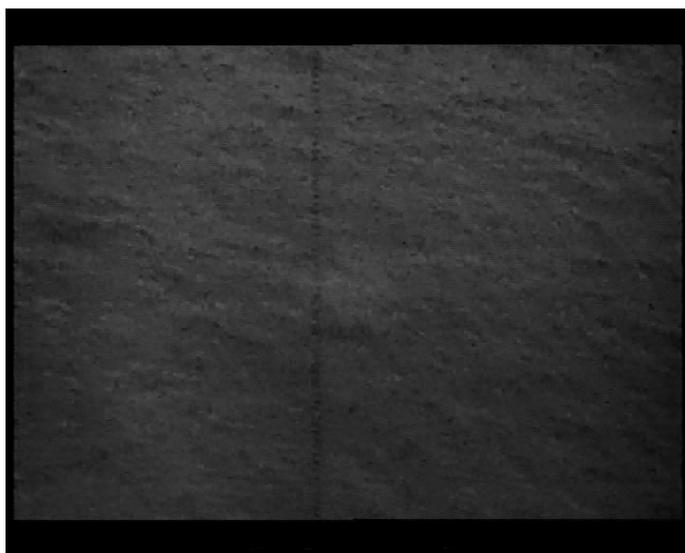


Рисунок 3.13 – Тепловизионное изображение участка взволнованной поверхности моря в диапазоне 8–12 мкм

Внесение дополнительного теплового излучения в наблюдаемую тепловизионную картину сюжета часто связано с недостаточной защитой от

переотражения собственного теплового излучения внутренних элементов и конструкции самого ТВП (например, двигателей подфокусировки или деталей системы отвода тепла) от фрагментов визируемого объекта. Фирма FLIR практикует применение специальных экранов для уменьшения погрешностей измерения температуры с помощью высокочувствительных ТВП, например, с чувствительностью лучше 25 мК (рис. 3.14).



Рисунок 3.14 – Специальный экран для уменьшения погрешностей измерения температуры с помощью ТВП FLIR 640

Для практических задач, связанных с выработкой координат удалённой цели для её автоматического сопровождения и целеуказания, важной характеристикой оптической системы ТВП является неизменность её оптической оси при изменении поля обзора. Входящие в оптико-электронные комплексы военного и охранного назначения ИК каналы обладают возможностью вести наблюдение в нескольких полях зрения. Как правило, требуются широкое поле зрения для обзора окружающей обстановки и ориентации на местности, среднее и узкое поля зрения для распознавания объектов и прицеливания. В этом случае используются либо оптические системы с изменяющимися фокусными расстояниями (плавный zoom), либо оптические системы с дискретно изменяемыми фокусами (за счёт «вбрасывания» дополнительных оптических элементов) [19]. Если для трансфокаторов используются механизмы перемещения линз за счёт вращательно-поступательного их движения, то неизбежные и допускаемые на практике децентрировки линз приводят к смещению оптической оси до десятка пикселей в крайних положениях трансфокатора. Такие погрешности чрезмерны для систем целеуказания. Поэтому применяют либо дорогостоящие механизмы линейного перемещения линзовых компонент трансфокатора, либо дискретное изменение фокусного расстояния системы за счёт введения/выведения линзовых компонент. В любом случае требуется дополнительное время на выполнение этих операций (в лучших схемах достигают не менее 0,3 сек), что в боевых условиях может оказаться критичным. Приём использования трёх

параллельных каналов, как в телевизионных системах, в настоящее время технически слишком дорог и не находит широкого применения.

На рис. 3.15 показан ИК объектив для дистанционного наблюдения (о чём свидетельствует большой диаметр объектива) с плавно изменяющимся фокусным расстоянием. Видны направляющие, обеспечивающие поступательно-вращательное движение фокусирующих элементов, и набор шестерёнчатых передач, участвующих в обеспечении удержания плоскости наилучшего изображения на плоскости чувствительных элементов МФПУ.



Рисунок 3.15 – Вариафокальный ИК объектив для дистанционного наблюдения. Заимствовано из рекламных материалах фирмы DALI (Китай)

В качестве альтернативы на практике используется приём смены объективов в зависимости от требуемого поля обзора (рис. 3.16). Помимо меньшей стоимости, такой приём обладает преимуществами по массе и габаритам перед универсальным вариафокальным объективом, однако требование оперативного изменения поля зрения заставляет нести эти издержки при решении ряда военных или охранных задач.



Рисунок 3.16 – Набор дискретных объективов, дающих тот же диапазон полей зрения ТВП, какой обеспечивает вариафокальный ИК объектив на рис. 3.15. Заимствовано из рекламных материалах фирмы DALI (Китай)

Определённые корректировки при интерпретации тепловизионных изображений оператор должен вводить при использовании объективов с широкими полями зрения. Большинство универсальных ТВП допускает применение широкоугольных оптических систем с заметной дисторсией. В результате на краях их поля зрения геометрические образы объектов искажаются. Наиболее показательны в этом плане изображения, получаемые с применением сверхширокоугольных объективов типа «рыбий глаз». Однако и для объективов с полем зрения $30^\circ - 40^\circ$ заметны искажения, например, линии горизонта, которые выражаются в том, что линия раздела выглядит прямой только в центре поля зрения, а в верхней и нижней частях кадра она «изгибается» в верхнюю и нижнюю стороны (рис. 3.17).

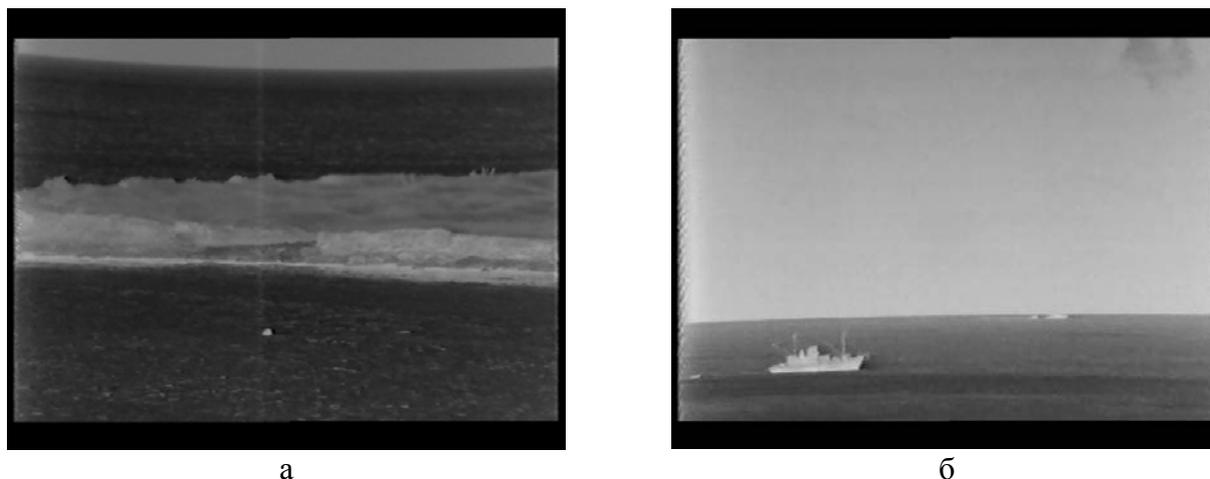


Рисунок 3.17 – Линия горизонта искажена из-за дисторсии изображения в оптической системе ТВП на левом снимке (а) дуга «концами вверх», на правом снимке (б) – «дуга концами вниз»

Если оператор не имеет заранее представления об истинной конфигурации наблюдаемого объекта, это может привести к неправильной интерпретации тепловизионного изображения. Например, при оценках окружающей обстановки при пилотировании летательных аппаратов вблизи линий электропередач важным является понимание реального положения проводов. ТВП для вождения механизированных средств (объективы с полем зрения $30^\circ - 40^\circ$) могут дать водителю ложную информацию о наличии на местности углубления или возвышенности из-за эффекта дисторсии.

3.8 Системы поддержания рабочей температуры ИК МФПУ

Важнейшим условием стабильной работы ТВП является обеспечение стабильной температуры чувствительного слоя МФПУ во всём диапазоне рабочих температур прибора. Для создания и поддержания рабочей температуры МФПУ в состав ТВП вводят специальные устройства. В зависимости от типа МФПУ температура чувствительной матрицы может быть близкой к комнатной (для тепловых МФПУ) или же криогенной от 60 К до 120 К (для фотоэлектрических МФПУ). Особенность современной

фотоэлектроники в том, что при более низких рабочих температурах чувствительного слоя МФПУ проще достигаются предельно высокие характеристики чувствительности ИК фотоприёмников, причём это тем более заметно, чем больше длина волны регистрируемого излучения. Поэтому велика доля высокочувствительной тепловизионной аппаратуры, в которой применяются газовые микрокриогенные системы, несмотря на все сложности обеспечения их долговечности и снижения уровня вносимых ими помех.

На рис. 3.18 приведены: конструкция МФПУ АО «НПО «Орион» с глубоко охлаждаемым холодным фильтром $\Delta\lambda = 3,6-4,8$ мкм, микрокриогенная система охлаждения и глубоко охлаждаемая матрица формата 640×512 элементов с шагом 15 мкм $d/f = 1:4$, изготовленная на основе антимонида индия.

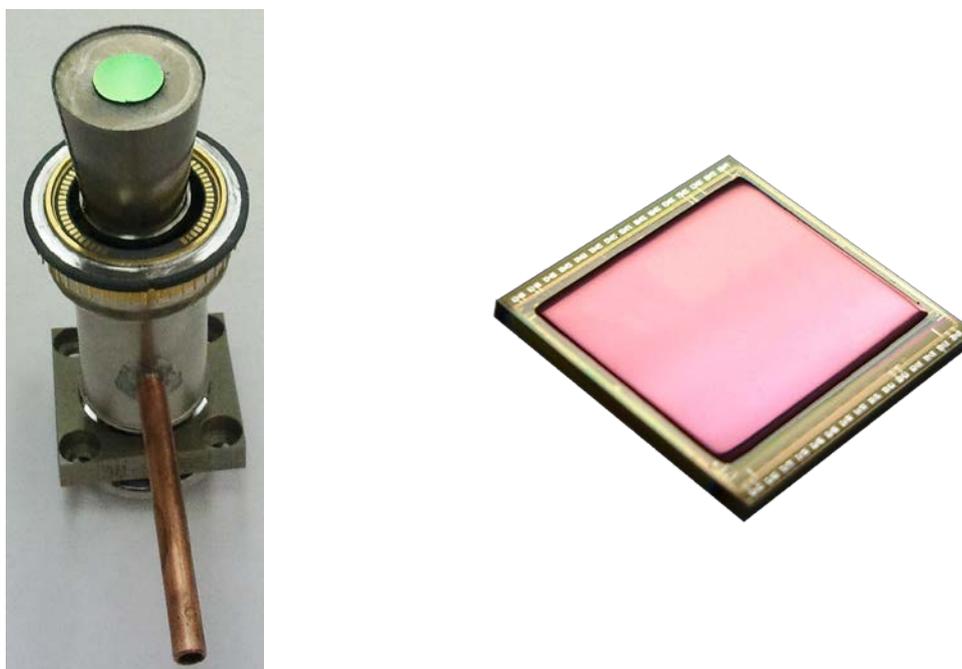


Рисунок 3.18 – Конструкция МФПУ с глубоко охлаждаемым ИК фильтром и микрокриогенной системой охлаждения. Заимствовано из рекламных материалов АО «НПО «Орион»

В качестве основных функциональных характеристик для систем глубокого охлаждения (СГО) используют величины «холодопроизводительность» [Вт] и «температурный уровень» (температуру охлаждения) [К]. Современные СГО обеспечивают в определённых границах «обмен» температурного уровня охлаждения на отводимую тепловую мощность. На рис. 3.19 из [2] приведены зависимости тепловой нагрузки (холодопроизводительности) от температуры холодного наконечника охлаждаемого устройства при различных потребляемых мощностях управляемого компрессора.

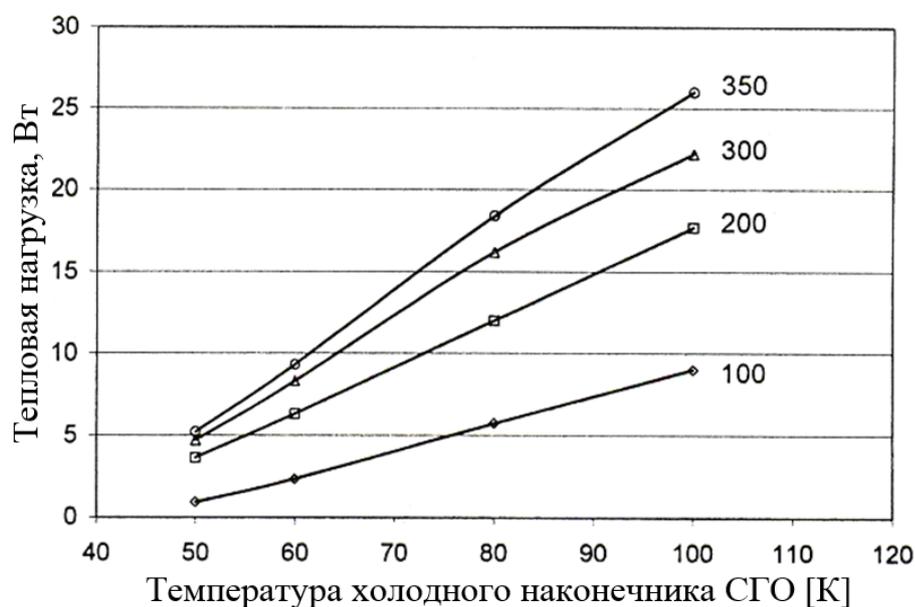


Рисунок 3.19 – Зависимость тепловой нагрузки от требуемой температуры холодного наконечника охлаждаемого устройства марки LPI 9710 для потребляемых мощностей от 100 Вт до 360 Вт

На рис. 3.20 а, б приведены два наиболее распространённых типа конструкций СГО для ТВП: интегрированная конструкция Ricor K508 (а) и разнесённый в пространстве блок компрессора и охладителя (б) МСМГ-0,7А-0,4/80 КВО.0743.000 («Сплит-Стирлинг»).

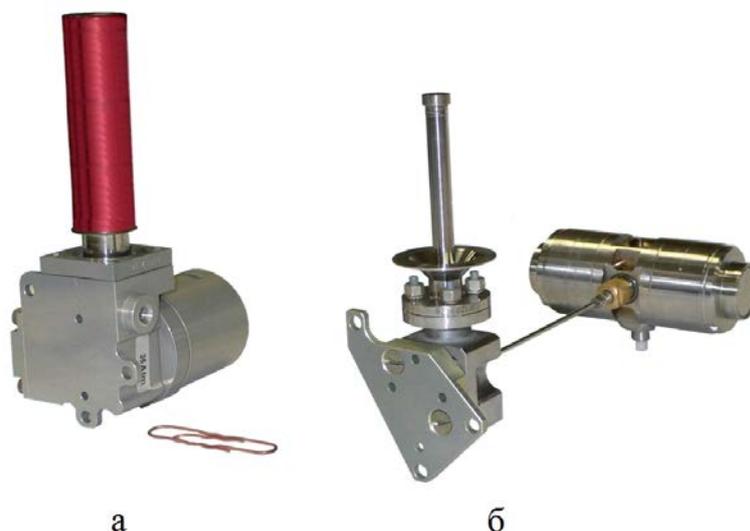


Рисунок 3.20 – Микрокриогенная система глубокого охлаждения Ricor K508 (а) и отечественная МСМГ-0,7А-0,4/80 КВО.0743.000 (б)

Для тепловых МФПУ широко распространены термоэлектрические стабилизаторы температуры (с использованием элементов Пельтье). Они работают при малых напряжениях электрического питания (до 10 В), но больших токах потребления (единицы ампер). Их особенность в том, что они создают лишь перепад температур между охлаждаемым объектом и окружающей средой, то есть при охлаждении объекта «отслеживают»

температуру окружающей среды и создают вполне определённый перепад температур между ним и своим «горячим» элементом. «Горячий» элемент охлаждается за счёт естественного теплообмена с окружающей средой, и поэтому температура охлаждаемого объекта также изменяется в зависимости от температуры окружающей среды. Необходимо заранее обеспечить определённый температурный «запас», если предполагается работа при высоких температурах. Наиболее распространённые конструкции термоэлектрических охладителей (ТЭО) могут создать и поддерживать температурный перепад в -20°C на одном каскаде ТЭО. Для многокаскадных ТЭО теоретически можно достичь большого значения перепада температур, однако на практике для наиболее распространённых двухкаскадных термоэлектрических охладителей он не превышает -40°C (рис. 3.21).

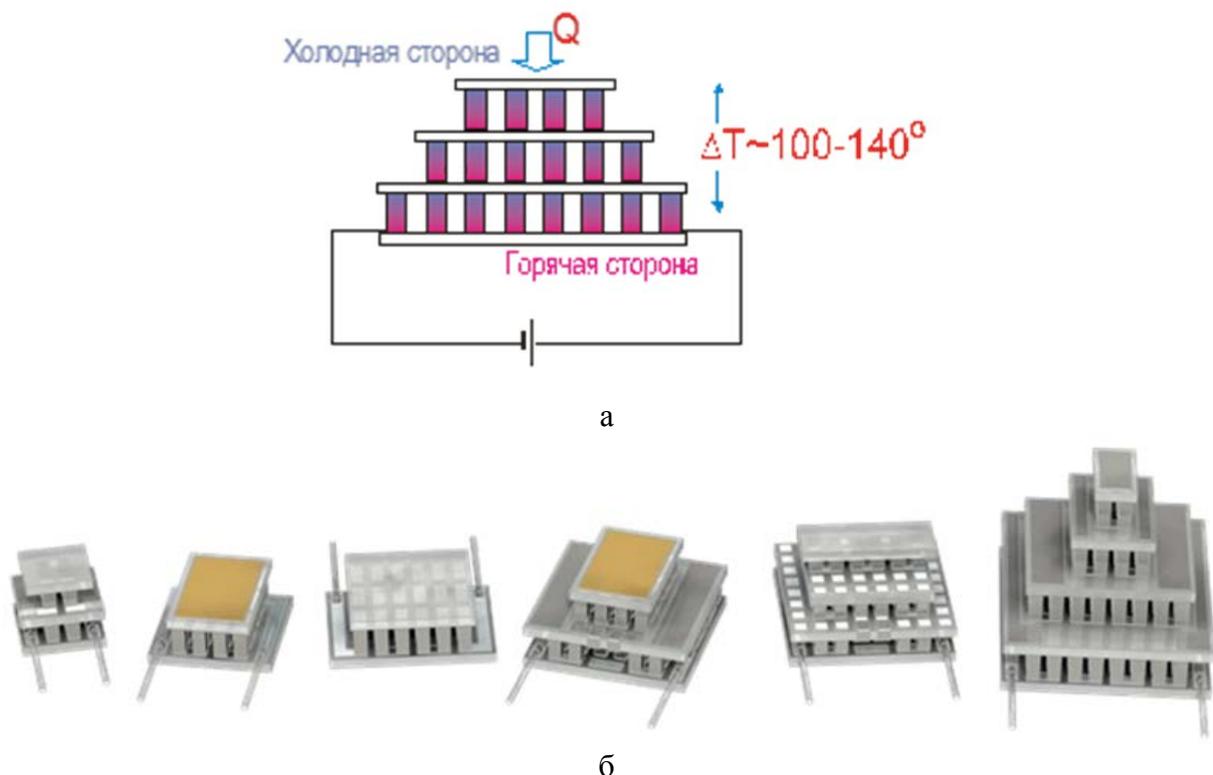


Рисунок 3.21 – Схема построения (а) и примеры реализации (б) ТЭО Заимствовано из рекламных материалов отечественной фирмы АО «РМТ»

Независимо от типа системы охлаждения, следует указать на то, что они при своей работе потребляют значительную электрическую мощность и выделяют тепловую энергию. Поскольку КПД преобразования электрической энергии в «холод» для обеспечения работы МФПУ не очень высок, то существует проблема отвода тепла от ТВП в целом, особенно если он находится внутри замкнутого объёма.

3.9 Блоки обработки сигналов

На современном уровне техники обработки электрических сигналов принято выделять две условные группы задач, которые алгоритмически и

аппаратно решаются разными функциональными блоками: предварительная обработка сигналов и вторичная цифровая обработка информации. Для современных МФПУ существует перечень обязательных операций, которые необходимо выполнять на уровне предварительной обработки сигнала до решения всех последующих задач обработки информации. В этот общий для всех ИК приборов перечень входят операции по выравниванию передаточных характеристик оптико-электронных каналов для каждого чувствительного элемента МФПУ, выявление и «блокирование» дефектных элементов, определение и вычитание постоянной составляющей сигнала, преобразование аналогового сигнала в цифровую форму, «вписывание» регистрируемого сигнала в линейный участок динамического диапазона передаточной характеристики электронного тракта и т.д. Вторичная цифровая обработка, помимо общих задач согласования потока тепловизионной информации с пропускной способностью средств её отображения, обеспечивает выполнение специфических задач данного типа ИК прибора. В измерительных ТВП осуществляются операции измерений лучистых потоков и представление результатов в виде чисел, изотерм, цветовых палитр и т.п. В военных ТВП в блоке цифровой обработки информации осуществляется формирование координат отслеживаемых целей, автоматическое выделение «тревожных зон» и т.д. Практическое внедрение тепловидения в различные сферы деятельности привело к тому, что ТВП просто как наблюдательный прибор уже не представляет интереса. Он непосредственно включается во взаимосвязанную с другими приборами и средствами систему, от которых получает и которым выдаёт информацию в согласованном протоколе обмена: значения текущих координат и траектории движения целей, значения радиационной температуры объектов с учётом ИК подсветки фоном и трансформаций контрастного сигнала атмосферной трассой и т.п. Функцию связующего звена, адаптирующего сигналы от ИК МФПУ к специфическим задачам данного типа ИК прибора, выполняет блок цифровой вторичной обработки информации.

Предварительная обработка сигналов от ИК МФПУ основана в первую очередь на учёте физических особенностей их работы. Если рассматривать основное звено преобразования лучистого потока в электрический сигнал – ИК фотоприёмник, то физические причины зависимости его обнаружительной способности от фонового излучения связаны с изменением электрического «отклика» чувствительного слоя на одинаковые по мощности приращения лучистого потока в зависимости от общей интенсивности (средней составляющей) падающего оптического излучения, от его спектрального состава и от величины регистрируемого приращения. Для малых по величине приращений оптического сигнала принято считать это изменение пренебрежимо малым, а характеристику преобразования «свет - сигнал» - линейной, во всяком случае, в более широком диапазоне, чем передаточная характеристика электронного тракта. Для пороговых оптических сигналов более существенно то, что шумы, возникающие при регистрации оптического потока, зависят от «фоновой нагрузки», то есть от величины средней составляющей и дисперсии флуктуаций излучения фона. При этом изменяются

и флуктуации падающего лучистого потока, и флуктуации числа генерируемых и рекомбинирующих носителей электрических зарядов. Особенности этих процессов посвящена обширная литература [2–10, 8, 9, 13–18], но в рассматриваемом аспекте важно отметить два обстоятельства. В зависимости от фоновой засветки изменяется дисперсия шумов фотоприёмника при регистрации сигнала, то есть один и тот же по амплитуде оптический сигнал на различных фонах обуславливает различное отношение сигнала к внутреннему шуму на выходе фотоприёмного устройства.

Второе обстоятельство связано с тем, что статистические характеристики флуктуаций оптического фонового излучения и статистические характеристики внутренних электрических шумов фотоприёмника могут либо быть близкими, либо существенно различаться (например, по виду плотности вероятности распределения флуктуаций, по дисперсии, по спектру и т.д.). При этом в зависимости от фоновой ситуации доминирующими могут оказаться либо флуктуации фонового излучения, либо флуктуации электрических внутренних шумов фотоприёмника [7], и их совокупное воздействие существенным образом различается. Эта проблема становится всё более существенной по мере повышения обнаружительного потенциала ИК приборов, например, улучшения их пороговой чувствительности. Наиболее характерно её проявление при наблюдении пространства вблизи линии морского горизонта. Непосредственно примыкающие к границе наблюдаемого раздела области моря и неба обладают относительно малыми флуктуациями фонового излучения, соизмеримыми с флуктуациями внутренних шумов ТВП. Статистические характеристики суммарного шума соответствуют характеристикам суммы двух независимых случайных процессов с законами распределения, близких к нормальному. Периферийные зоны поля обзора ТВП в большинстве ситуаций отличаются от области линии горизонта как по среднему значению, так и по характеру флуктуаций яркости. Из-за этого меняется чувствительность ИК прибора и изменяется соотношение между вкладом внешних и внутренних шумов в совокупное отношение «сигнал/шум». Фоновые шумы определяют статистические характеристики результирующих шумов и, как правило, настолько отличаются от нормального закона, что для них алгоритмы, оптимальные при выделении сигналов из шумов с нормальным законом распределения, могут давать существенный проигрыш по сравнению с другими [2, 7]. Это положение в принципе характерно для всех ситуаций наблюдения в пригоризонтной области моря, но степень различия характеристик фоноцелевой обстановки в центре и на периферии поля зрения ИК прибора зависит от его величины и будет разной, например, при разной кратности увеличения оптической системы одного и того же прибора, работающего в режиме наблюдения за надводной обстановкой (широкое поле зрения) и в режиме сопровождения и выработки координат цели (узкое поле зрения). Кроме того, изменение гидрометеоусловий наблюдения (например, при переменной облачности) случайным образом изменяет распределение статистических характеристик фонового излучения по полю обзора ИК прибора [7].

Поскольку большинство практических алгоритмов обработки сигналов ориентируется на гауссово распределение шумов, то важно количественное определение параметров условий, при которых они становятся негауссовыми, и встроенные алгоритмы обработки сигналов становятся неоптимальными. В [7] приведены примеры ошибок в оценках вероятности обнаружения и вероятности ложных тревог, если это изменение статистики шумов не учитывается. Показано, что при изменениях соотношения внутренних и внешних шумов вероятность правильного обнаружения может меняться всего лишь на проценты, в то время как вероятность ложных тревог меняется на несколько порядков. Для задач автоматического выделения сигналов на фоне внутренних шумов и внешних помех изменение закона распределения помех при выборе процедуры оптимальной фильтрации и обработки сигналов или при выработке решающих правил обуславливает необходимость использования в блоках цифровой обработки информации адаптивных алгоритмов. Задача адаптации алгоритма обработки информации состоит в подавлении внешних помех до уровня внутренних шумов.

Для тепловизионных приборов, где решение принимает оператор, дополнительно включается зависимость правильной интерпретации наблюдаемой картины (например, распознавания объекта) от субъективных особенностей наблюдателя, в частности, от степени обученности и способности оператора использовать дополнительную информацию, присутствующую в тепловизионном изображении, такую, как относительный масштаб изображений объектов, динамика их перемещений, характер подстилающей поверхности, положение относительно линии горизонта и т.п.

В настоящее время не продемонстрировано успешных приёмов автоматического распознавания объектов по их тепловизионному изображению. Эта задача с трудом поддаётся формализации, поэтому максимальный успех автоматической обработки информации состоит в выявлении «тревожных зон» и привлечении оператора к принятию решений более высокого иерархического уровня. Поскольку оператор принимает решение на основе опыта, сформированного при наблюдении окружающей обстановки в видимом диапазоне, то роль блоков вторичной обработки информации современных ТВП заключается в формировании на экране монитора изображения, в наибольшей степени позволяющего оператору использовать этот опыт. Тепловизионное изображение дополняется данными о температуре объекта, данными о положении строга сопровождения цели или выделением областей с одинаковой температурой. С этой точки зрения используемые аппаратно-программные средства являются общими для многих систем визуализации цифровых данных.

Нерешённой специфической проблемой тепловидения является автоматический подбор такого «температурного окна», направляемого на дисплей изображения, в котором с максимальной подробностью отображались бы все отличительные особенности теплового поля наблюдаемого объекта. Основная проблема связана с малым динамическим диапазоном воспроизводимых дисплеем градаций яркости изображения, что требует

адаптации режима воспроизведения тепловизионного изображения к условиям его формирования. Основные характеристики ТВП оцениваются теоретически и измеряются, как правило, в комфортных условиях лабораторно-стендовых измерений, либо при специально организуемых испытаниях в натуральных условиях. Получаемые при этом значения, например, дальности действия, чувствительности, «рабочего времени» следует принимать в качестве максимально возможных.

Самоочевидная посылка состоит в том, что по мере увеличения чувствительности ИК приборов возрастает роль флуктуаций фоновых шумов в суммарном шуме, из которого выделяется полезный сигнал. Если для ТВП с преобладающими внутренними шумами особенности излучения фона имели второстепенное значение, то эффективность современных и перспективных ИК приборов в существенной степени зависит от возможности их адаптации к условиям наблюдения на сложном внешнем фоне и неискажённого предъявления полученной информации оператору. Эффективность алгоритма адаптации может быть оценена по степени ухудшения параметра чувствительности прибора в условиях реальных фоновых помех по сравнению с этими же параметрами, измеренными в комфортных условиях.

3.10 Дисплеи

Дисплеи осуществляют «стыковку» всего оптико-электронного фотоприёмного тракта ТВП с оператором, оперативно принимающим окончательное решение по наблюдаемому на экране изображению. Если МФПУ современных ТВП представляется наиболее «узким» звеном, характеристики которого приблизились к физическим ограничениям, а оптика, система охлаждения и электроника созданы исключительно с целью обеспечивать «комфортные» условия работы МФПУ, то дисплей имеет основной задачей максимально «подстроиться» к особенностям зрения наблюдателя, чтобы он правильно воспринял смысловую информацию тепловизионного изображения конкретного сюжета. На практике стараются в максимальной степени приблизиться к качеству изображения цифрового телевидения высокой чёткости. Несмотря на то, что технических ограничений на облик дисплея значительно меньше, чем на другие функциональные блоки, а требования к изображению со стороны наблюдателя достаточно хорошо изучены (в том числе, и в телевидении), в действительности дисплеи могут ухудшать – и часто действительно ухудшают – качество конкретных ТВП в значительно большей степени, чем не очень удачные воплощения других его функциональных блоков.

Характеристики дисплеев оказывают влияние на время принятия решения оператором и на количество сделанных им ошибок: пропусков целей и ложных их обнаружений.

Чёткость тепловизионного изображения определяется несколькими факторами, главный из которых – количество чувствительных элементов в МФПУ – формат его матрицы. Наиболее дорогостоящие современные ТВП

обладают МФПУ такого же формата, как и современные цифровые телевизионные приборы. Основная масса современных промышленных ТВП строится с использованием МФПУ с форматами от 240×320 элементов до 640×480 элементов. Для того, чтобы в реальных условиях работы дисплея ТВП он не вносил бы дополнительных искажений и предъявлял оператору всю дошедшую до него информацию, требуется отображение сигнала от одного пиксела ИК матрицы увеличенным вдвое количеством светящихся пикселей на экране монитора (то есть кластером из 2×2 элементов). То есть для ТВП с МФПУ с форматами от 240×320 элементов формат дисплея должен быть не меньше 480×640 элементов. Нужно также отметить, что все варианты электронного увеличения тепловизионного изображения не увеличивают его информационное содержание, но лишь дают возможность комфортно наблюдать изображение с большего расстояния.

Динамический диапазон яркостей чёрно/белого изображения у современных светоизлучающих дисплеев существенно превышает диапазон электронно-лучевых мониторов. Однако в условиях реальной работы из-за естественной наружной освещённости экрана оператор ТВП воспринимает от 10 до 16 градаций «оттенков серого». На практике рассчитывать нужно на уверенное различие 8 градаций чёрно/белого изображения на дисплее ТВП, в пределах которых реализуется «температурное окно» на данном уровне фона. Обычно в распоряжении оператора представляется возможность вручную выбирать ширину и положение «температурного окна», но подобранные для одного сюжета режимы, как правило, не подходят для других сюжетов. Этим объясняется бросающееся в глаза различие качества тепловизионных изображений, приводимых в рекламных видеоматериалах, и видеозаписей, сделанных в реальной обстановке, например, боевого использования военных ТВП. Следует отметить, что цифровой сигнал в тепловизионном изображении содержит от 2^8 до 2^{12} градаций. Это намного превышает динамический диапазон воспринимаемых оператором градаций яркости на дисплее. Если не требуется оперативное принятие решений в реальном времени, то архивированные тепловизионные изображения могут анализироваться с изменяемыми шириной и положением «температурного окна», что позволяет выявить дополнительные подробности теплового поля объектов. На рис. 3.22 демонстрируется разная возможность выделения изображений окон на здании одновременно с выделением других деталей сюжета, если они отображаются в режимах «позитив»/«негатив». Подбором наиболее комфортного для оператора «уровня серого» и «температурного окна» можно уверенно обнаружить практически все детали ландшафта и строений. Однако сделать это в чёрно-белом изображении с ограниченным диапазоном «градаций серого» в большинстве ситуаций невозможно.

В промышленных ТВП часто используется представление оператору тепловизионного изображения в условных цветовых палитрах, за счёт псевдоцветовых изображений добиваются предъявления на экране дисплея более широкого «температурного окна», что повышает производительность

дистанционного зондирования с помощью ТВП. Используются разнообразные цветовые палитры, из которых считаются общепринятыми Rainbow (радуга) и Iron (цвета побежалости). Наибольшее количество градаций сигнала можно различить в палитре Rainbow. Палитра Iron позволяет различить меньше градаций, чем палитра Rainbow, но больше, чем в чёрно/белом изображении. Её достоинство в том, что в чёрно/белой распечатке изображений, полученных в палитре Iron, сохраняется соотношения градаций, позволяющих судить о температурных контрастах в тепловизионном изображении.



Рисунок 3.22 – Тепловизионное изображение диапазона 8 – 12 мкм здания в режимах «позитив» - «негатив»

Тепловизионные изображения в псевдоцветах используются при наблюдении объектов, образ которых оператору знаком (медицина, электроэнергетика) или когда нужно лишь обнаружить аномалию. При наблюдении незнакомых сюжетов и объектов операторы, как правило, выбирают чёрно/белое изображение. При использовании палитры Rainbow создаётся возможность различить пороговые контрасты в тепловом поле объекта, однако так же отчётливо будут видны и все помехи (рис. 3.23).

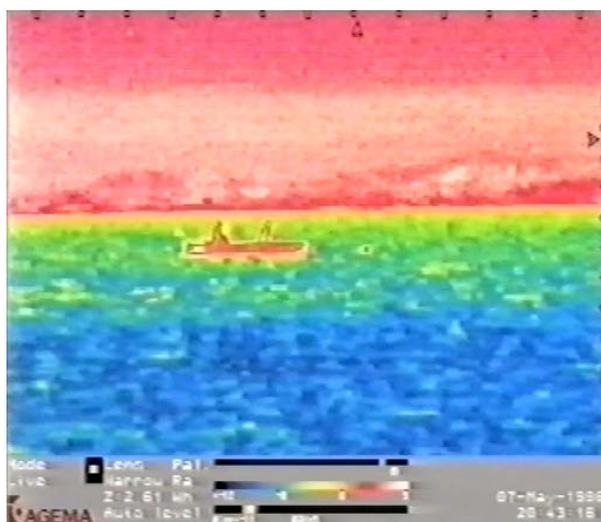


Рисунок 3.23 – Тепловизионное изображение получено с помощью ТВП диапазона 8 – 12 мкм фирмы AGEMA и отображается в палитре Rainbow, подчёркивающей фоновые помехи от бликов на морской поверхности

4 Определение характеристик ТВП

4.1 Расчётные оценки характеристик ТВП

Методики расчётов основных характеристик ИК приборов разрабатывались одновременно с появлением первых технических устройств регистрации ИК излучения. К настоящему времени накоплен чрезвычайно большой библиографический материал, посвящённый методикам расчётов чувствительности тепловизоров и тепловизоров всех типов: от приборов с оптико-механическим сканированием и модуляцией лучистого потока (для тепловых головок самонаведения) до тепловизионных приборов с «фокальными матрицами». Для установления единства терминологии и методов измерения основных технических параметров выработаны нормативные документы [11, 12]. Исчерпывающие сведения можно получить из работ [2-9, 13, 14] и приведённой в них библиографии. Целесообразно выделить две взаимно связанные группы методик расчётов параметров ИК приборов: энергетические расчёты (чувствительность) и расчёты эффективности их применения (дальность действия и вероятность решения поставленных задач).

4.1.1 Энергетические расчёты

Цель энергетических расчётов состоит в определении количественных связей между техническими характеристиками основных функциональных блоков и параметром чувствительности ИК прибора. Решаются две задачи: определяются конструктивные параметры всех составляющих прибора, позволяющих получить пороговую чувствительность ТВП нужного уровня, и обратная задача, состоящая в том, чтобы прогнозировать чувствительность прибора, созданного из функциональных блоков с известными параметрами.

Методологический подход расчётов основан на теоретических разработках радиолокационных систем первых поколений, адаптированных к оптико-электронным системам. В его основе лежит понятие отношения сигнала к шуму (ОСШ). Величина ОСШ может формулироваться разными способами, например:

$$\text{ОСШ} = (\text{амплитуда сигнала})/(\text{среднее квадратическое значение шума});$$

$$\text{ОСШ} = (\text{мощность сигнала})/(\text{мощность шума});$$

$$\text{ОСШ} = (\text{пиковое значение сигнала})/(\text{среднее квадратическое значение шума});$$

$$\text{ОСШ} = (\text{энергия сигнала})/(\text{энергия шума}).$$

Каждое из определений позволяет проводить численное моделирование и организовать процедуру инструментального измерения ОСШ, но хорошо применимо лишь для определённого типа сигналов и шумов. Наибольшее распространение на практике получило определение величины ОСШ (μ) как отношение квадрата пикового значения сигнала ($u_{\text{сигн}}^2$) к дисперсии шума ($D_{\text{шум}}$) на выходе электронного частотного фильтра (оптимального для данного вида сигналов) [2-5]:

$$\mu = u_{\text{сигн}}^2 / D_{\text{шум}}.$$

Выбор такого определения величины ОСШ связан с тем, что она, обеспечивая расчёт всех технических характеристик ИК приборов, ещё и является «связующим звеном» с характеристиками эффективности их использования – «тактическими характеристиками». Величина μ явным образом входит в уравнения для вероятности правильного обнаружения сигнала, вероятности пропусков и ложных тревог.

Расчёты μ заключаются в определении выражений для оценки значений сигналов и шумов в конкретных типах оптико-электронных систем. В зависимости от той точки структурной схемы ИК прибора, для которой определяется ОСШ, в её определении учитывается разный набор внутренних и внешних источников помех, искажений сигналов и передаточных характеристик отдельных узлов и блоков оптико-электронного тракта. Разнообразие расчётных моделей связано с разным составом учитываемых факторов, их приоритетами и формой представления в расчётных формулах. Первый из основных факторов, определяющих амплитуду полезного информационного сигнала $u_{\text{сигн}}$, связан с энергией лучистого потока от цели, которую вычлняет из окружающего пространства оптическая система прибора и направляет на его фотоприёмное устройство. Второй фактор связан с эффективностью преобразования энергии лучистого потока в электрический сигнал, то есть с вольт/ваттной чувствительностью ФПУ s_{λ} . Величина s_{λ} зависит как от квантового выхода материала чувствительного элемента, так и от схемотехнических и технологических особенностей построения канала трансляции фотогенерированных электрических зарядов в электрическую цепь обработки сигнала. Все дальнейшие уточнения в расчётных формулах связаны с попытками более или менее точно учесть спектральные характеристики приходящего лучистого потока, оптической системы и ФПУ. В оптической системе учитываются конструктивные особенности, спектральное пропускание и относительное отверстие оптики, размер чувствительного элемента ФПУ. Электрическая часть расчётов учитывает время экспозиции и считывания сигнала от чувствительного элемента ФПУ (время кадра), форму и положение полосы частот электронного тракта и т.д.

При оценке шумовой составляющей информации в расчёт принимается дисперсия флуктуаций шумов $D_{\text{шум}}$ как характеристика мощности переменной составляющей совокупного случайного процесса внутренних и внешних помех, препятствующих выделению полезного сигнала. Для вычисления внутренних шумов используется понятие пороговой чувствительности ФПУ (в форме его обнаружительной способности D^*), которое в совокупности с параметрами ширины полосы пропускания электронного тракта и данными о временном спектре шумов ФПУ позволяет определить значение внутреннего, «приборного» шума оптико-электронного тракта прибора. Для ТВП с матричными ФПУ необходимо дополнительно учитывать неоднородность параметров отдельных элементов чувствительного слоя и электронных схем трансляции сигнала в электронный тракт ТВП – «геометрический шум».

Этих данных достаточно, чтобы рассчитать значение ОСШ ИК прибора, которое можно измерить в условиях лабораторного стенда. Для оценки характеристик приборов в реальных условиях понятие ОСШ усложняют путём дополнительного учёта дисперсии флуктуаций излучения внешнего фона, которые могут преобладать в потоке информации, предъявляемой оператору ИК прибора для выявления её содержательной составляющей.

Инженерные методики расчёта качества ТВП с точки зрения его способности регистрировать малые приращения лучистой энергии на фоне шумов принято сводить к расчёту величины «эквивалентной шуму разности температур», или «разность температур, эквивалентная шуму», (РТЭШ) $\Delta T_{\text{пор}}$. Наиболее часто применяется следующее её определение: «величина $\Delta T_{\text{пор}}$ представляет разность температур объекта и фона, излучающих как чёрные тела в стандартном тест-объекте, при которой отношение пикового значения сигнала к среднеквадратичной величине шума на выходе стандартного эталонного электронного фильтра системы, рассматривающей тест-объект, равно единице» [5], стр. 163. Наиболее употребительное выражение для расчётов $\Delta T_{\text{пор}}$ [5], стр. 168 оперирует техническими параметрами основных функциональных блоков:

$$\Delta T_{\text{пор}} = [\pi \cdot (a \cdot b \cdot \Delta f)^{0.5}] / [\alpha \cdot \beta \cdot A_0 \int_{\Delta \lambda} \left\{ D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) \left[\frac{dW(\lambda, T)}{dT} \right] \right\} d\lambda,$$

где a, b – геометрические элементы чувствительной площадки фотоприёмника [м]; Δf – эффективная полоса пропускания частот стандартного эталонного электронного фильтра [Гц]; α, β – угловые размеры мгновенного поля зрения ТВП, определяемые как отношение величины размера чувствительного элемента ФПУ a, b к действующему значению фокусного расстояния оптической системы F : $\alpha = a / F$ [рад]; $\beta = b / F$ [рад]; A_0 – эффективная площадь входного зрачка оптической системы ТВП с учётом экранирования [м²]; $D^*(\lambda)$ – удельная спектральная обнаружительная способность фотоприёмника, определённая при электрической частоте, при которой спектр напряжения его шума приведён к единице [см·Гц^{0.5}/Вт]; $W(\lambda, T)$ – спектральная плотность потока излучения [Вт / см²·мкм] (определения из [5], стр. 165). Методологическая особенность величины $\Delta T_{\text{пор}}$ в том, что при её определении учитывается минимальный состав функциональных блоков ТВП, который достаточен для формирования измеряемого электрического отклика на контрастное излучение объекта. В формулы для вычисления $\Delta T_{\text{пор}}$ входят величины, которые можно измерить с высокой точностью: фокусное расстояние и диаметр входного зрачка оптической системы, чувствительность фотоприёмника и т.д. Исключением является величина эквивалентной шумовой полосы Δf , поскольку для её определения необходимо сделать дополнительные предположения о спектре шумов фотоприёмника, форме входного импульса и передаточной функции электронного тракта, которые могут отличаться от имеющих место в реальном приборе. Наиболее подробно эти особенности рассмотрены в [3] с. 542, однако сложности применения приведённых там

формулы возникают в реальных разработках из-за того, что полоса пропускания электронного тракта ТВП имеет сложную корректировку нижних и верхних частот, а спектр шумов МФПУ, работающих совместно с системами глубокого охлаждения, плохо поддаётся формальному описанию.

Если рассматривать те точки на структурной схеме ТВП, в которых можно количественно описать и инструментально измерить значение ОСШ, то первой такой точкой является «выход стандартного эталонного электронного фильтра», а определяемой величиной является $\Delta T_{\text{пор}}$. Следует отметить, что этот параметр ТВП в наибольшей степени подходит к определению «объективно измеряемого» параметра, поскольку роль эксперта сводится лишь к выбору метода измерения «пикового значения сигнала к среднеквадратичной величине шума» и определения, какой «электронный фильтр» является «стандартным» и «эталонным». Существующие неопределённости принято специальным образом оговаривать при начале испытаний или при описании методики расчётов, поэтому, строго говоря, даже в таком «объективном» параметре, как $\Delta T_{\text{пор}}$, присутствует определённая доля «договорных» условий. Исходными данными для расчёта $\Delta T_{\text{пор}}$ являются параметры, описывающие конструктивные особенности ТВП, которые чаще всего жёстко определяются условиями размещения прибора на объекте-носителе и условиями его эксплуатации. В первую очередь критичным является диаметр входного зрачка, из-за чего существует ряд методик определения объёма оптико-механического узла, его массы и стоимости как функции от размеров входного оптического элемента. Такие параметры, как частота кадров, элементарное поле зрения прибора, рабочий спектральный диапазон и т.д., выбираются при разработке исходя из решаемых с помощью ТВП задач, однако набор вариантов достаточно ограничен, поскольку существуют законченные исследования, свидетельствующие о наличии наилучших решений и дающие методики поиска таких решений [2–10, 13–15]. Несмотря на то, что $\Delta T_{\text{пор}}$ не является обобщённым показателем качества ТВП, она полезна тем, что позволяет анализировать влияние каждого из технических параметров по отдельности вне зависимости от субъективных свойств операторов, что требуется разработчику ТВП при выборе наиболее рационального варианта построения прибора из совокупности множества возможных технических решений.

Ещё одна область неопределённости присуща всем характеристикам чувствительности ИК приборов в единицах температур и связана с тем, что они в строгом смысле относятся лишь к тем температурам АЧТ, при которых измерялась обнаружительная способность ФПУ D^*_λ и для которой вычисляется W_λ . Методически эти параметры присутствуют в виде свёртки в члене $\{D^*(\lambda) \tau_o(\lambda) [dW(\lambda, T)/dT]\}$. В зависимости от ширины рабочего спектрального диапазона $\Delta\lambda$ результаты интегрирования могут либо нивелировать спектральные особенности, либо приводить к резким изменениям конечного результата $\Delta T_{\text{пор}}$ при изменении спектрального вида сомножителей в $\{D^*(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) [dW(\lambda, T)/dT]\}$.

Для некоторых приложений удобной является рассмотрение процессов регистрации сигналов в ТВП в фотонной форме. При этом необходимо учесть, что не все фотоны, попадающие на входной зрачок оптической системы ТВП,

формируют электрические заряды, которые транслируются в его электронную схему в качестве информационного сигнала. Нужно также учитывать поток «шумовых» фотонов, генерированных элементами оптической системы и конструкции прибора и также попадающих на ФПУ. Для выбранной формы фотонного представления ОСШ собственные шумы ФПУ с помощью известных соотношений выражаются также величиной дисперсии флуктуаций числа избыточных носителей электрических зарядов. Основываясь на [14], стр. 85, для упрощённой энергетической модели значение числа фотонов $n_{\text{сигн}}$, участвующих в формировании сигнала $u_{\text{сигн}}$ от ФПУ с конкретной «квантовой эффективностью» η , может быть представлена произведением значения разности потоков фотонов от цели и фона $N_{\text{сигн}} = N_{\text{цели}} - N_{\text{фона}}$ на значение квантовой эффективности ФПУ η и на время экспозиции (время накопления сигнала, время кадра и т.п.) $t_{\text{эксп}}$:

$$n_{\text{сигн}} = N_{\text{сигн}} \cdot \eta \cdot t_{\text{эксп}} = A_o \cdot t_{\text{эксп}} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \int_{\Delta\lambda} \eta(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot [N_{\text{цели}}(\lambda) - N_{\text{фона}}(\lambda)] d\lambda.$$

Дисперсия флуктуаций числа фотонов, попадающих на чувствительную площадку ФПУ за то же время $t_{\text{эксп}}$, определяется как сумма дисперсий флуктуаций числа фотонов, попадающих на неё от наблюдаемого сюжета и от совокупности всех элементов конструкции ТВП, включая собственное излучение оптической системы.

$$D(N_{\text{шум}}) = D(N_{\text{сигн}}) + D(N_{\text{внутр.шум}})$$

$$\mu = \frac{n_{\text{сигн}}^2}{D_{\text{шум}}} = \frac{\left\{ A_o \cdot t_{\text{эксп}} \cdot \alpha \cdot \beta \cdot \int_{\Delta\lambda} \eta(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot [N_{\text{цели}}(\lambda) - N_{\text{фона}}(\lambda)] d\lambda \right\}^2}{[D(N_{\text{сигн}}) + D(N_{\text{внутр.шум}})]}.$$

Значение μ имеет физический смысл максимально возможного для данного ТВП значения ОСШ при наблюдении конкретного сюжета, которое на каждом дальнейшем этапе обработки и преобразования сигналов в электронном тракте прибора уменьшается из-за тех ограничений, которые имеют все реальные блоки, выполняющие эту обработку. Не исключением является и «стандартный эталонный электронный частотный фильтр системы», на выходе которого измеряется сигнал при определении $\Delta T_{\text{пор}}$, поскольку он является оптимальным только для конкретного вида сигналов, а все сигналы с другими параметрами обрабатывает неоптимальным образом.

Выражение для расчёта $\Delta T_{\text{пор}}$ с использованием величин лучистых потоков в фотонной форме приводится в [24]:

$$\Delta T_{пор}(\lambda_m) = \frac{2F}{D} \cdot \frac{1}{\sqrt{A \cdot \tau_{\text{н}}}} \cdot \frac{\sqrt{\int_0^{\lambda_m} N_{\lambda} \cdot \delta(\lambda) d\lambda}}{\frac{\partial}{\partial T} \int_0^{\lambda_m} N_{\lambda} d\lambda},$$

здесь: λ_m – длинноволновая граница спектральной чувствительности МФПУ; D и F – диаметр и фокусное расстояние объектива; A – площадь одной фоточувствительной площадки; $\tau_{\text{н}}$ – время накопления фотоэлектронов;

$N_{\lambda} = \frac{2\pi \cdot c}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$ – спектральная плотность числа фотонов в излучении АЧТ с температурой T; c – скорость света; k – постоянная Больцмана; h – постоянная Планка; $\delta(\lambda) = e^{hc/kT\lambda} (e^{hc/kT\lambda} - 1)^{-1}$ – параметр вырождения флуктуаций потока фотонов в излучении АЧТ.

Дальнейшее приближение к определению чувствительности ТВП в реальных условиях их использования требует учёта ряда субъективных факторов, связанных с особенностями человеческого зрения и частотно-контрастной передаточной характеристики всего оптико-электронного тракта ТВП, включая свет/сигнальные характеристики дисплея. Наиболее употребляемой обобщённой характеристикой системы «ТВП – оператор» принято считать «минимально разрешаемую разность температур (МРРТ)» $\Delta T_{\text{разр}}$. По аналогии с определением $\Delta T_{\text{пор}}$ при определении $\Delta T_{\text{разр}}$ энергетической характеристикой информационного сигнала является контрастная разность температур фрагментов тестового объекта, а критерием достаточной величины сигнала от него выступает субъективная оценка «разрешения тепловизионного изображения» этого тестового объекта оператором на экране дисплея ТВП. Всё разнообразие конкретных формулировок и расчётных выражений для $\Delta T_{\text{разр}}$ обусловлено тем, что влияние на степень достоверности принятия решения оператором (например, распознавания объекта) каждого по отдельности таких факторов, как резкость, контраст, зашумлённость, искажение формы и структуры изображения объекта и т.д., можно описать достаточно повторяющимися и формализуемыми зависимостями при изменениях лишь одного из них. Достоверно предсказать поведение системы «прибор – оператор», когда изменяются несколько или сразу все показатели качества изображения, практически невозможно. Важнейшим фактором при этом является способность человеческого зрения адаптироваться к особенностям тепловизионного изображения при решении конкретной задачи со строгой целевой установкой в реальных условиях. Иллюстрацией этому служат видеозаписи использования ТВП в вертолётных прицельных системах, которые присутствуют в Интернете. Оператор принимает решения наивысшего иерархического уровня по тепловизионному изображению, качество которого в других областях применения ТВП было бы признано неудовлетворительным.

Величина МРРТ характеризует систему "ТВП - оператор", и поэтому в зависимости от сделанных предположений о характере его зрительного

восприятия получают различные формулы для МРРТ и строится её зависимость от пространственной частоты – температурно-частотная характеристика (ТЧХ). Наиболее просто учитываются интегрирующие свойства глаза, когда в формулу $\Delta T_{\text{разр}}$ включается сомножитель, равный времени интегрирования глаза $T_e^{-0.5}$ и наряду с временным учитывается и пространственное интегрирование (множителем $\rho^{0.5}$). Однако в любом случае появляются величины, определяемые с малой точностью и определённым разбросом значений в зависимости от условий наблюдения и договорных критериев. Влияние передаточной функции прибора может учитываться различными способами. ТЧХ обратно пропорциональна передаточной функции всего оптико-электронного тракта, поэтому обычно используется более сложная конструкция, учитывающая местоположение в системе источников шумов. Однако, если считать основным источником шумов МФПУ, то формулы в большинстве общеприменимых методик совпадают. В частности, из ссылок в [14]:

$$\Delta T_{\text{разр}}(f_x) = \text{MRT}(f_x) = \text{SNR} \frac{\pi^2}{4\sqrt{14}} \frac{\Delta T_{\text{пор}}}{\text{MTF}_{\text{tot}}(f_x)} \left[\frac{\Delta y \nu f_x Q(f_x)}{\Delta f_n F_r t_E \varepsilon_{\text{ovsc}}} \right]^{1/2};$$

SNR – ОСШ, необходимое для распознавания четырехшпальной миры; $\text{MTF}_{\text{tot}}(f_x)$ – общая модуляционная передаточная функция системы в горизонтальном (x) направлении; Δy – мгновенное поле зрения в вертикальном направлении в мрад; ν – скорость сканирования в мрад/сек; f_x – частота тестовой миры в периодах/мрад; Δf_n – полоса пропускания электронного шума кГц; F_r – частота кадров в “кадры/секунды”; $\varepsilon_{\text{ovsc}}$ – КПД сканирования; t_E – время интегрирования глаза; Q – коэффициент фильтрации шума;

$$Q = \int_0^x S(f_x) H_N^2(f_x) H_w^2(f_x) H_{\text{eye}}^2(f_x) df_x;$$

$S(f_x)$ – спектральная мощность шумов на выходе ФП; $H_w(f_x)$ – функция фильтрации пространственной частоты; $H_N(f_x)$ – функция фильтрации шума; $H_{\text{eye}}(f_x)$ – функция фильтрации глаза.

Вертикальная МРРТ ищется аналогично, но по направлению “у”. Двухмерная МРРТ определяется как 2D-частота $f = \sqrt{f_x f_y}$ в области, где существуют f_x и f_y частоты и они совпадают, то есть равны значения разностей температур. GSD – проекция пиксела детектора на поверхность, но перпендикулярно линии визирования детектора.

Как вариант выражений для оценки зависимости $\Delta T_{\text{разр}}$ от пространственной частоты наблюдаемых тепловых штриховых мир приводятся расчётные конструкции из [17]:

$$\Delta T_{\text{разр}} = \frac{3\Delta T_{\text{пор}} \rho^{1/2} x_0^{1/2}}{\tau_a K_\Sigma(x)},$$

$$\Delta T_{\text{разр}} = \Delta T_{\text{пор}} \cdot \frac{m \cdot \delta_0}{4,5 \cdot \tau_{\text{ев}} \cdot \mu \xi \delta} E(x),$$

здесь: разрешение тепловой миры: $x = \nu \cdot \delta_0 = f \cdot \tau_0 = \frac{x \delta_0}{\delta}$; $x = \nu \delta$; ρ - коэффициент ширины полосы; $K_{\Sigma}(x)$ – результирующая функция передачи модуляции всей аппаратуры в зависимости от относительной частоты $x = \nu \delta$; $A = \Delta L/2$ - ширина штриха миры с периодом ΔL ; δ и δ_0 – эффективное и номинальное значение элементарного поля зрения ТВП;

$$\xi = \begin{cases} \sqrt{l/7A} = \sqrt{2lx/7q} & (l/q_0 < 20) \\ \sqrt{40q_0x/7q} & (l/q_0 \geq 2) \end{cases},$$

ξ – учитывает различие в длине штрихов данной миры от стандартной с форматом 1:7. Для трехшпальной миры с отношением сторон 5:1 и $P_{\text{разрешения}} = 0,8$ при $m = 4,05$; $\mu = 1$; $\nu = 1/2 \delta_0$ и $\delta_0 = \delta$ нормированное значение $\Delta T_{\text{разр}} = \Delta T_{\text{разр.норм}}$:

$$\Delta T_{\text{норм}} = 5,4 \cdot \Delta T_{\text{пор}}.$$

При наблюдении крупных объектов процесс разрешения можно рассматривать как процесс обнаружения границы, и тогда для $P_{\text{обн}} = 0,9$; $m = 4,5$; $k = \mu = 1$; $\tau_a = 1$; $l/q \rightarrow \infty$

$$\Delta T_{\text{предельн}} = 0,3 \Delta T_{\text{пор}},$$

$q_0 = H \cdot \delta_0 / \cos \gamma$ – элемент разложения изображения на местности [м]. При $b = q_0$ т.е. при равенстве размеров объекта и мгновенного поля зрения ТВП, соответствующем обнаружению точечной цели:

$$\Delta T_{\text{обн.точ.цель}} = 6,5 \cdot \Delta T_{\text{пор}}.$$

Основные характерные точки ТЧХ $\Delta T_{\text{разр}}$ совместно с аппроксимацией функции передачи модуляции ТВП в виде $y(x) = E(x) \sim \exp(-a \cdot x^2)$ дают приближенную оценку ТЧХ:

$$\Delta T_{\text{предельное}} = 0,3 \cdot \Delta T_{\text{пор}}; \Delta T_{\text{нормир}} = 5,4 \cdot \Delta T_{\text{пор}}; \Delta T_{\text{обн.точ.цель}} = 6,5 \cdot \Delta T_{\text{пор}}.$$

Во всех расчётных выражениях $\Delta T_{\text{разр}}$ ядром расчётов выступает выражение для $\Delta T_{\text{пор}}$. Обобщая разные методики расчётов $\Delta T_{\text{разр}}$, можно представить их в форме произведения величины $\Delta T_{\text{пор}}$ на несколько различных функций, учитывающих передачу сигналов с различными пространственно-временными частотами электронным трактом ТВП ($K_{\text{эл}}$), воспроизведение этих частот дисплеем ТВП ($K_{\text{диспл}}$) и субъективные характеристики оператора при решении задачи данного иерархического уровня: обнаружение, распознавание, сопровождение цели, измерение температуры и т.д. ($K_{\text{опер}}$).

$$\Delta T_{\text{разр}} = \Delta T_{\text{пор}} K_{\text{эл}} K_{\text{диспл}} K_{\text{опер}}.$$

Такое представление является упрощённым, поскольку на практике процесс адаптации качества тепловизионного изображения к потребностям оператора является мультипликативным, характеризуется нелинейными зависимостями и сложными обратными связями, например, входящий в выражения $\Delta T_{\text{разр}}$ коэффициент, определяемый как «отношение сигнала к шумам на дисплее ТВП, при котором оператор различает тестовый объект с заданной вероятностью». В формулах $\Delta T_{\text{разр}}$ с помощью этого сомножителя учитывается влияние фоновых помех. Пороговые значения ОСШ выбираются достаточно произвольно, хотя бы вследствие произвольного определения «вероятности правильного различения»: от вероятности в 50% до вероятности в 90%. Кроме того, вероятность различения тестового объекта зависит от расстояния между оператором и экраном ВКУ, освещённостью экрана, мерцаний, цветового тона изображения и договорного условия о том, что следует считать «различением тестового объекта». В некоторых методиках оговаривается, что тестовая мира "разрешена", если чётко видны все её элементы, в других же под "разрешением" понимается такое качество изображения, когда оператору достаточно вынести суждение о наличии в поле зрения ТВП некоторой неравномерной по яркости области и правильно указать пространственную ориентацию этих неравномерностей. В результате выбора столь различающихся критериев пороговые значения $\Delta T_{\text{разр}}$ могут различаться от 1,7 до 2 раз.

При сохранении всего вышесказанного движущиеся изображения требуют значения ОСШ в 7 раз меньше, чем для решения той же задачи по неподвижным изображениям, как это было показано в сопоставительных исследованиях восприятия кинематографических и фотографических изображений.

Практический опыт работы с ТВП в полевых условиях показывает, что оператору часто достаточно выявить несколько фрагментов из изображения, чтобы вынести о нём однозначное суждение. Например, не требуется видеть весь силуэт человеческой ростовой фигуры, чтобы отличить его от других отметок на экране. Так, достаточно зафиксировать 4–5 точек, расположенных в характерной последовательности (в частности, фронтальный ракурс наблюдения человека с разведёнными в стороны руками), чтобы распознать его в присутствии других объектов с тем же или большим количеством элементов изображения. Достоверное распознавание объектов по фрагментарному тепловизионному изображению свидетельствует о принципиальных ограничениях джонсоновского подхода и заставляет параллельно ему использовать дополнительные частные характеристики ТВП.

Необходимость иметь обобщённую характеристику ТВП как элемента единой системы «прибор – оператор» приводит к использованию параметра $\Delta T_{\text{разр}}$, несмотря на его ограничения и недостатки. В [2–11, 13, 14] в качестве тестового объекта назначается четырёхшпальная тепловая мира (рис. 4.1), у которой полосы и промежутки имеют прямоугольную конфигурацию, равны по ширине и излучают как АЧТ с различной, но постоянной температурой.

Высота полос в 7 раз больше ширины. Разность температур излучения полос и промежутков между ними изменяется от такого уровня, при котором на экране оператор видит лишь шумы ТВП, до такого уровня, при котором оператор уверенно видит количество и ориентацию штрихов.

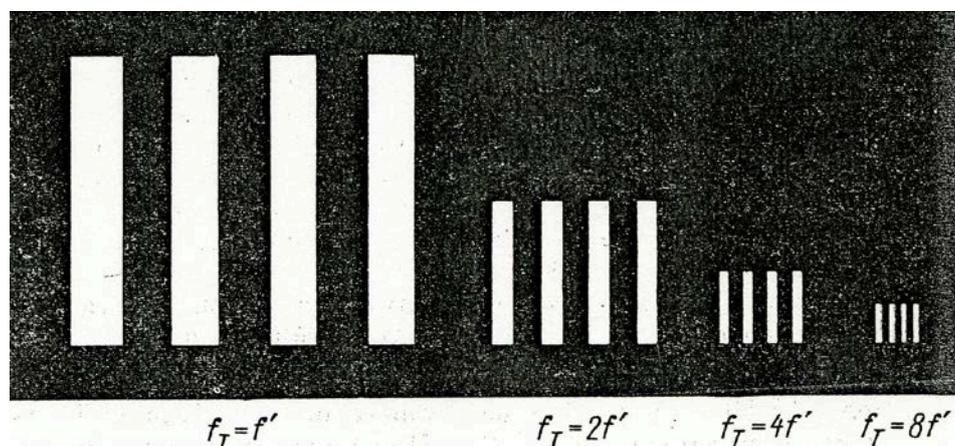


Рисунок 4.1 – Четырёхшпальная тепловая мира

Такой субъективный «договорной» критерий «распознавания» тестового объекта даёт возможность определить экспертным путём значение $\Delta T_{\text{разр}}$ для конкретной четырёхшпальной тепловой мира, которую при конкретных измерениях характеризуют параметром её «пространственной частоты». Параметр «пространственная частота четырёхшпальной тепловой мира» (ν [м^{-1}]) определяется отношением расстояния от тест-объекта до тестируемого ТВП к суммарной ширине пары «полоса плюс промежуток». Значение $\Delta T_{\text{разр}}$ представляет интерес как функция от пространственной частоты $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$, [$\text{К} \cdot \text{м}^{-1}$], поскольку позволяет в первом приближении сравнивать пригодность ТВП различных типов для решения определённого круга задач. Выбор прямоугольной формы тестовых мир прямым образом связан с используемым для оценки вероятности обнаружения и распознавания объектов «критерием Джонсона». Кроме того, часто применяемая величина «пространственная частота Найквиста» ($\nu_{\text{найкв}}$) также хорошо совпадает на практике с измерениями видимости прямоугольных тестовых мир. Для инженерных применений частоту Найквиста можно определять как величину, обратную мгновенному полю зрения оптической системы ТВП ($1/\alpha$; $1/\beta$ [рад^{-1}]).

Зависимость $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$ монотонно увеличивается от минимальных значений при низких пространственных частотах наблюдаемого тест-объекта (рис. 4.2) до максимальных (наихудших) значений при наблюдении тест-объекта на частоте Найквиста $\Delta T_{\text{разр}}(\nu_{\text{найкв}})$. Особенности зрительного восприятия операторов, связанные с пространственным интегрированием сигналов, обуславливают, что измеренные количественные значения $\Delta T_{\text{пор}}$ и количественные измеренные значения $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$ существенно различаются: для низких пространственных частот $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$ меньше (лучше) значения $\Delta T_{\text{пор}}$. Условно, если значение $\Delta T_{\text{пор}} = 1,0$, то $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$ может составлять 0,7 – 0,6 тех же единиц. Для того же ТВП на частоте Найквиста количественное значение

$\Delta T_{\text{разр}}(\nu_{\text{найкв}})$ в тех же единицах может быть в 5–7 раз больше (хуже) значения $\Delta T_{\text{пор}}$. То есть значение совокупной передаточной функции, описывающей систему «ТВП-оператор», лежит в пределах $0,6 \leq (K_{\text{эл}} K_{\text{диспл}} K_{\text{опер}}) \leq 7,0$ в зависимости от пространственной частоты наблюдаемого сюжета. Для ТВП с дискретными фотоприёмниками (МФПУ) в области пространственных частот $\nu_{\text{найкв}}$ на изображении наблюдаются различного рода артефакты, причём в тем большей степени, чем меньше значение величины fill-factor. Зависимость $\Delta T_{\text{разр}}$ от пространственной частоты ν принято называть «температурно-частотной характеристикой» ТВП (ТЧХ ТВП). Её физический смысл заключается в том, что она показывает, насколько требуется увеличить температурный контраст объекта по мере уменьшения его наблюдаемого размера, чтобы различалась («разрешалась») его форма.

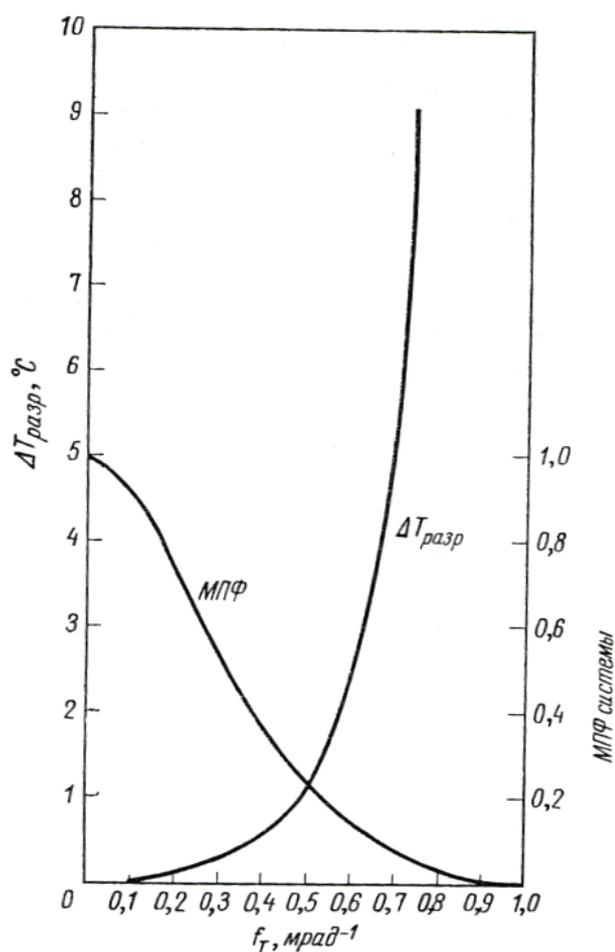


Рисунок 4.2 – Зависимость $\Delta T_{\text{разр}}$ и модуляционной передаточной функции (МПФ) ТВП от пространственной частоты [5]

Применительно к определению информационных характеристик тепловизионных изображений следует заключить, что в тех задачах, где содержательная информация содержится в тонкой пространственной структуре изображения (в области высоких пространственных частот), преимущество имеют ТВП с улучшенным значением $\Delta T_{\text{разр}}(\nu_{\text{найкв}})$. Этого можно добиться на стадии первичной или вторичной обработки сигнала за счёт разнообразных

алгоритмов подчёркивания контрастов. Однако при этом ухудшается воспроизведение изображения крупноразмерных объектов (низкие пространственные частоты), к примеру, областей пространства вблизи линии морского горизонта. Поэтому для ТВП, сюжеты наблюдения которых заранее не известны, выбираются компромиссные параметры их передаточных характеристик $K_{эл}$ и $K_{диспл}$, которые позволяют сохранить определённую универсальность применения приборов.

Существует ещё ряд параметров чувствительности ТВП, используемых для оценки эффективности его применения при решении более специфических задач, в частности, величина «минимально обнаруживаемой разности температур, МОРТ» $\Delta T_{обн}$. Её отличие от величины $\Delta T_{разр}$ – в использовании тест-объекта в виде одного прямоугольника, имеющего контраст излучения по отношению к окружающему его фону. Величина $\Delta T_{обн}$ применяется для оценки способности оператора обнаружить на тепловизионном изображении одиночный объект в присутствии внутренних шумов и естественных помех. Выражение для расчёта $\Delta T_{обн}$ также состоит из основного множителя $\Delta T_{пор}$ и коэффициентов передачи и предъявления оператору на дисплее сигнала от объекта прямоугольной формы и субъективных характеристик зрительного аппарата человека.

Распознавание или классификации объектов по их тепловизионному изображению включает в себя субъективные факторы и до настоящего времени формализуется лишь с использованием ряда эмпирических закономерностей. Широко распространённый подход к оценке возможности оператора принимать решения более высокого уровня, чем простое обнаружение (распознавание, классификация, идентификация), состоит в определении количества штрихов некоторой «эквивалентной» тепловой миры («джонсоновские миры»), которые различает оператор ТВП. При этом размеры и тепловой контраст штрихов определённым образом связываются с размерами и тепловым полем наблюдаемого объекта (рис. 4.3).

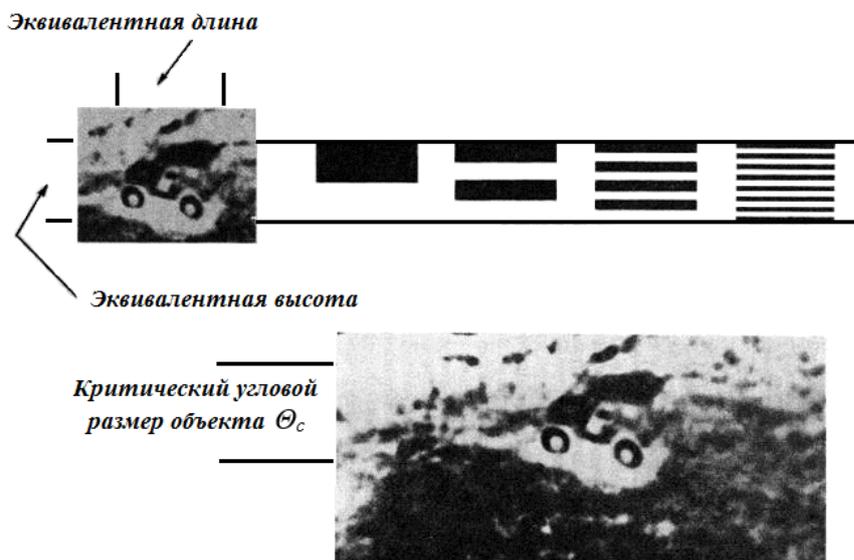


Рисунок 4.3 – Джонсоновские эквивалентные штриховые миры и изображение наблюдаемого объекта [5]

Регистрация необходимых и достаточных для распознавания элементов более близка по характеру к обнаружению аperiодических тестовых объектов, то есть той характеристике ТВП, которая традиционно оценивается таким его параметром, как МОРТ. Более того, достоверное распознавание объектов по фрагментарному тепловизионному изображению свидетельствует от принципиальных ограничениях джонсоновского подхода и заставляет параллельно ему использовать МОРТ как рабочую характеристику ТВП.

Необходимо подчеркнуть, что во всех выражениях, призванных характеризовать энергетические параметры ТВП - чувствительность к контрастному ИК излучению объектов различной формы – присутствует величина $\Delta T_{\text{пор}}$, играющая роль формального «масштабного коэффициента». В выражении для самой величины $\Delta T_{\text{пор}}$ параметром, имеющим в настоящее время физические ограничения, является величина удельной обнаружительной способности фотоприёмника $D^*(\lambda)$. Другие конструктивные параметры ТВП могут изменяться в широких пределах, в то время, как значения $D^*(\lambda)$ ограничены флуктуациями теплового излучения окружающей среды и не позволяют превысить предел чувствительности ФПУ лучше «VLIP»-режима. Вместе с тем, при использовании современных МФПУ существует возможность «обменять» их высокую чувствительность на снижение требований к параметрам других функциональных блоков ТВП. Примером может служить ТВП FLIR ONE, у которого диаметр входного зрачка оптики составляет всего 4 мм при сохранении высокого значения $\Delta T_{\text{пор}} \sim 0,1$ К.

Для ИК приборов, оптимизированных для обнаружения точечных целей в присутствии сложных помех (теплопеленгаторов), решения об обнаружении по специальным алгоритмам принимает устройство автоматической обработки сигналов. Отказ от универсальности и специализация только на одной процедуре (обнаружение) только одного типа сигналов (изображение цели занимает только один пиксель) даёт существенное преимущество ТП перед ТВП в способности регистрировать малые значения контрастного лучистого потока на частоте Найквиста (такова пространственная частота точечной цели). Особенности формирования изображения точечных и протяжённых целей в плоскости ФПУ обуславливают вывод, который, с определёнными оговорками, состоит в том, что эффективность обнаружения точечных целей (режим теплопеленгации) прямым образом зависит от площади входного зрачка оптической системы. Чувствительность ТВП к контрасту ИК излучения объектов, занимающих несколько элементов, прямым образом зависит от относительного отверстия его оптической системы. Этим объясняется, в частности, невозможность миниатюризировать оптику и необходимость использовать оптические системы с большим диаметром входного зрачка в теплопеленгационных приборах, призванных обнаруживать точечные цели на больших дистанциях. Для ТВП, предназначенных для наблюдения окружающей обстановки и объектов крупных размеров, миниатюризация оптики вполне себя оправдывает, если обеспечивается большая апертура оптики (от 1:0,7 до 1:1,2).

4.1.2 Расчётные оценки эффективности использования ИК приборов

В практике приборостроения эффективность использования ИК приборов относится к категории «тактических характеристик». Используются две взаимно связанные группы параметров:

- дальность решения задачи определённого иерархического уровня (обнаружение, распознавание, классификация) при заданных значениях вероятности их правильного решения и вероятности ложных решений - дальность действия;
- вероятность правильного решения задачи определённого иерархического уровня (обнаружение, распознавание, классификация) при заданных значениях вероятности ложных решений на конкретном расстоянии от объекта наблюдения.

Наиболее надёжным способом определения тактических характеристик ИК приборов был бы набор представительной экспериментальной базы. Однако первые же попытки реализовать этот метод натолкнулись на то обстоятельство, что слишком много неподконтрольных природных и антропогенных факторов разнонаправленно влияют на результат измерений любой из тактических характеристик. Кроме того, на основании результатов измерений, полученных в одних условиях, сделать прогнозы для других условий можно лишь с большой погрешностью.

Расчётные оценки эффективности ТВП в терминах дальности действия или вероятности решения задачи обнаружения и распознавания (по [14]) основаны на эмпирических критериях достаточного для принятия решения данного иерархического уровня числа деталей в тепловизионном изображении цели. Дополнительные усложнения методик связаны со способами учёта ослабления излучения атмосферой и присутствия фоновых помех.

Потребность априорной оценки дальности действия ТВП на стадии его разработки для выбора, например, параметров оптической системы, диктует необходимость выработки методик расчётных оценок зависимостей тактических характеристик от характеристик каждого их функциональных блоков прибора или от его обобщённых технических характеристик (типа $\Delta T_{\text{разр}}(\nu)$, $\Delta T_{\text{обн}}(\nu)$ и т.п.). Наибольший опыт в тепловидении накоплен для использования «теории, связывающей разрешение эквивалентной штриховой миры с видением объекта. Качество видения можно предсказать, определив максимальную разрешаемую частоту эквивалентов штриховой миры, имеющей ту же разность температур ΔT и наблюдаемую в тех же условиях, что и объект» [2–5, 7–10, 13, 14]. «Джонсон определил число разрешаемых штрихов, соответствующих критическому размеру объекта, для восьми типов военных машин и стоящего человека. Широко известные теперь критерии Джонсона, усреднённые по всем классам объектов, имеют следующие значения» (Табл.4.1):

Таблица 4.1 – Усреднённые по всем классам объектов значения критерия Джонсона

Качество видения	Число разрешаемых штрихов, требуемых для обеспечения 50% вероятности правильного решения
Обнаружение	$1 \pm 0,25$
Определение ориентации	$1,4 \pm 0,35$
Различение	$4,0 \pm 0,8$
Опознавание	$6,4 \pm 1,5$

В дальнейшем методологический подход использования эквивалентных штриховых мир был развит в широком спектре направлений и служит основой при составлении прогнозов эффективности использования ТВП при решении различного круга задач [2, 5, 7, 14]. Основным субъективным фактором является договорной критерий достаточного количества штрихов эквивалентной тепловой миры, достаточного для обнаружения, распознавания и идентификации объектов, зависящий от их ракурса, помех и динамики наблюдения.

4.1.3 Расчётные оценки дальности действия при заданной вероятности правильного решения задачи

Расчёт «дальности распознавания» для ТВП с МФПУ связан с определением достаточного числа элементов изображения по двум направлениям при обеспечении необходимого $\Delta T_{\text{пор}}$ для каждого элемента. Такой подход даёт более близкое совпадение с натурными данными при наблюдении объектов, изображение которых более соответствует аperiодическому объекту, чем объекту с выраженной структурой. Кроме того, на практике оказалось, что такой подход удобнее при оценках ситуаций, когда наблюдаемый объект занимает 2–5 элементов изображения, а решение об обнаружении одновременно означает принятие решения и о его распознавании. Особенности определения ОСШ с учётом структурного и флуктуационного размытия зон элементов изображения с использованием ТВП позволяют формально учесть высокочастотные составляющие флуктуаций фоновых помех. Однако такой подход неприменим в тех ситуациях, когда тепловизионное изображение объекта представляет собой его контур. При полной определённости распознавания такой цели реальное количество элементов изображения существенно меньше, чем требуемое. Например, для распознавания ростовой фигуры человека требуется от 25 до 55 элементов, хотя на практике достаточно иметь 4–5 характерных точек его силуэта. Для надводного корабля вместо 300–500 элементов на площадь изображения

бортовой проекции достаточно видеть несколько основных фрагментов силуэта, причём их взаимное расположение является отличительным признаком, достаточным для принятия правильного решения.

Характеристика «вероятность распознавания» объекта служит основой для оценок эффективности применения ТВП более высокого иерархического уровня, например, в общей системе комплексного оптико-электронного оснащения носителя, или для оценок обеспеченности решения конкретных задач в конкретных регионах в соответствии с характерными для этих регионов повторяемостями сочетаний фоноцелевых ситуаций. В наиболее распространённых методиках расчёта вероятности распознавания объектов по тепловизионному изображению в качестве параметров используются величины необходимого значения ОСШ, числа элементов разложения изображения и некоторый пороговый критерий этого числа, определяющий достаточность для распознавания цели при наличии фоновых помех в изображении или в их отсутствии. Наибольшее распространение получили выражения, позволяющие оценить вероятность правильного обнаружения и распознавания объектов в зависимости от ТЧХ ТВП [2, 5, 7]. Они оказались наиболее удобными на практике из-за того, что те зависимости вероятностей правильного решения $P_{\text{обн, расп}}$, которые первоначально традиционно связывались с интегральными выражениями, авторы смогли аппроксимировать и полиномом, и экспонентой с приемлемой погрешностью аппроксимации. В этих аппроксимациях аргумент N представляет собой отношение количества тепловизионных линий, приходящихся на минимальный размер изображения объекта, к некоторому пороговому значению ($N_{50\%}$), определённое для каждого из уровней принятия решений. Прослеживается определённая аналогия с известными формулами для вероятности принятия решения о правильном обнаружении сигналов по превышению его амплитуды над пороговым уровнем с той разницей, что вместо соотношения амплитуд сигналов рассматриваются отношение количества элементов в тепловизионном изображении объекта:

$$P_{\text{расп}}(N) = \left\{ \left(\frac{N}{N_{50\%}} \right)^{2,7 + 0,7 \left(\frac{N}{N_{50\%}} \right)} \right\} / \left\{ 1 + \left(\frac{N}{N_{50\%}} \right)^{2,7 + 0,7 \left(\frac{N}{N_{50\%}} \right)} \right\},$$

$$P(N) = 1 - \exp \left\{ - 0,7 \left(\frac{N}{C N_{50\%}} \right)^2 \right\},$$

где N – количество элементов тепловизионного изображения, формирующих изображение наблюдаемого объекта в “критическом” (минимальном) направлении; значения $N_{50\%}$ представляют собой число элементов объекта в направлении его минимального размера, необходимое для его различения с заданной вероятностью 50% при условии, что все $N_{50\%}/2$ штрихов замещающей этот объект эквивалентной тепловой штриховой миры уверенно различаются оператором; C - коэффициент сложности принимаемого решения, зависящий от иерархического уровня решения, фоновых помех, квалификации оператора и т.п.

Основная проблема применения указанных формул на практике заключается в том, что существует общепринятая договорённость относительно значений $N_{p,o}$ лишь для очень узкого круга тестовых объектов, и в то же время

расхождения для других объектов наблюдения очень велики. В частности, для распознавания неподвижной полуростовой фигуры человека разброс параметра N_p составляет 1000%. Поэтому традиционные оценки исследователей до сих пор, так или иначе, основываются на личном опыте наблюдения оператором соответствующих тепловизионных изображений. Тем не менее, использование результатов [13] в тех границах применимости, для которых они были первоначально получены, даёт возможность достаточно уверенно прогнозировать если не точные значения вероятности распознавания целей в конкретной ситуации, то тенденции и степень влияния характеристик фоноцелевой обстановки и изменения параметров ТВП на эффективность их использования. На этом основании можно выработать рекомендации по построению основных функциональных узлов ТВП и алгоритмам их работы.

В соответствии с современными представлениями о процессах интерпретации тепловизионных изображений для правильного распознавания необходимо выполнение двух условий одновременно: превышение сигналом некоторого порогового уровня и наличие в тепловизионном изображении минимально необходимого количества элементов разложения изображения. Существует некоторая возможность вариаций в количестве требуемых элементов разложения изображения в зависимости от того, являются ли изображаемые фрагменты "устойчивыми отличительными признаками" наблюдаемого объекта для данного оператора, или же их можно добавлять или убирать из изображения объекта без изменения вероятности правильного его распознавания. Основные различия в имеющихся в известной литературе данных касаются классификации уровней различения объектов и требуемого для этого количества элементов разложения изображения. Чтобы «отнести объект к определённом классу, например, танк, грузовик, человек» или «различить объект с достаточной ясностью», требуемое количество полупериодов на минимальный линейный размер может составлять от $8_{-1,4}^{+1,6}$ до 4 ± 2 . При уменьшении ОСШ требуется увеличение количества деталей и фрагментов изображения, и при пороговых ОСШ_{воспр} при наличии фоновых помех требуемое количество штрихов может возрасти вдвое [13].

Вместе с тем, практика применения метода эквивалентных штриховых мир выявила достаточно большой круг условий, в которых оценки дают слишком большое расхождение с экспериментальными данными или же неприменимы вовсе. Поэтому выработаны [2, 5, 14] другие подходы к прогнозированию тактических характеристик ТВП, оправдывающие себя при условиях, для которых они выработаны, но также не обладающие универсальным характером. Наиболее простое из применяющихся в настоящее время, обобщённое выражение, связывающее энергетическую и пространственную разрешающие способности ТВП с вероятностью правильного распознавания объекта, получено на основании экспериментальных данных и является аппроксимацией более сложных зависимостей:

$$P_{\text{распозн.}} = \exp \{- [C B A/a]^2\},$$

где B – коэффициент распознавания формы $B = (G R/S)^{0.5}$. Для круга $B = 1,4$. G – периметр объекта, $R = (R_{\text{описанный}} + R_{\text{вписанный}})/2$ – среднее значение радиусов вписанной в контур и описанной вокруг контура окружностей, S – площадь объекта; a – «критический» размер объекта распознавания, определяется некоторыми исследователями как «минимальный габаритный размер», а по другим – как «эквивалентный» размер, равный $a = S^{0.5}$, A – разрешение на местности, соответствует наименьшей ширине штриха разрешаемой эквивалентной миры с пространственной частотой ν при диаметре входного зрачка оптики D и её фокусном расстоянии f : $A = D/2f\nu$.

Наиболее подробные их описания можно найти в [2, 5]. Часто используемой величиной выступает число периодов N_p пространственной структуры (миры), приходящейся на «критический размер» обнаруживаемого или распознаваемого объекта (число Джонсона). «Критическим» в [2, 5] называется такой размер объекта, вдоль которого ведётся анализ его изображения для выявления характерных геометрических признаков объекта. Часто за критический принимают минимальный видимый под данным ракурсом размер объекта. Например, критическим размером для танка, наблюдаемого с земли, может быть его высота, а наблюдаемого с воздуха – ширина или длина [14], стр. 66. Для расчётных оценок тактических характеристик матричных ТВП требуется корректировка критериев Джонсона, поскольку оператор анализирует изображение, сформированное МФПУ одновременно в двух ортогональных плоскостях. В [14], стр. 69 рекомендуется использовать усреднённые значения N_p (таблица 4.2) при двумерном анализе тепловизионных изображений и 50% вероятности решения задачи

Таблица 4.2 – Значения числа периодов пространственной миры, приходящейся на «критический размер» объекта N_p

Решаемая задача	Обнаружение	Классификация	Распознавание	Идентификация
N_p	0,75	1,5	3,0	6,0

До настоящего времени нет единого критерия качества изображения, необходимого для перехода от одного иерархического уровня решения задачи к другому для всех объектов, например, от обнаружения к их распознаванию. Общее мнение состоит в том, что с улучшением разрешающей способности ТВП (его ТЧХ) повышается потенциальная возможность обнаружения и распознавания с его помощью. Эта возможность реализуется в той степени, насколько высока квалификация оператора и целенаправленность его действий. Иллюстрацией служит способность оператора распознавать объекты только по изображению их фрагментов.

4.2 Измерение характеристик ТВП

4.2.1 Измерение энергетических характеристик ТВП

Измерение технических характеристик ТВП производится в лабораторных условиях с использованием стандартной оснастки и процедур. Стандартизация важна, поскольку измеряются предельно высокие (пороговые) параметры ИК приборов, значения которых зависят от совокупности разнонаправленных факторов. Измерения $\Delta T_{\text{пор}}$, $\Delta T_{\text{разр}}$, $\Delta T_{\text{обн}}$ и ТЧХ подробно описаны в [14] и производятся в соответствии с ГОСТами и нормативными документами [11, 14]. Основным противоречием при разработке стендов для измерения чувствительности ИК приборов является то, что испытуемые ИК приборы являются наиболее чувствительным элементом из всей совокупности устройств, применяемых для формирования измерительной «цепочки». Создание и измерение необходимых уровней термодинамической температуры в современных условиях можно обеспечить с очень высокой точностью, удовлетворяющей процедуры измерения энергетических параметров ТВП, однако обеспечение и контроль оптических характеристик излучающих поверхностей тестовых объектов (тепловых мир) решается с большим трудом.

В частности, заявленная пороговая чувствительность к перепаду радиационных температур современных ТВП охлаждаемыми МФПУ диапазона 8–12 мкм составляет $\Delta T_{\text{пор}} \sim 50$ мК. Это значение $\Delta T_{\text{пор}}$ на уровне $T = 300$ К соответствует контрасту энергетической лучистости $10,1$ мкВт/см². Такой же контраст энергетической лучистости $10,1$ мкВт/см² имеют два фрагмента поверхности тела, имеющие общую температуру 300 К, но различающиеся по коэффициенту излучения на $\Delta \varepsilon = 8,1 \cdot 10^{-4}$, например, от $\varepsilon_1 = 0,96000$ до $\varepsilon_2 = 0,96081$. На практике чрезвычайно сложно создать, измерить и обеспечить сохранность оптических характеристик тестовых объектов, имеющих однородность двухмерных индикатрис оптических характеристик поверхностей реальных тест-объектов лучше $\Delta \varepsilon \leq 0,002$. Дополнительно к этому нужны особые (криовакуумные) стенды, чтобы обеспечить уменьшение вклада отражённого излучения окружающего фона в суммарное излучение тестовых объектов, если их температуры опускаются ниже температуры точки росы при проведении измерений чувствительности ТВП для низкотемпературных объектов наблюдения.

Реальные измерения $\Delta T_{\text{пор}}$ проводятся при контрастном излучении тестовых объектов $\Delta T_{\text{измеренная}}$, в несколько (P) раз превышающих предельно достижимые значения чувствительности ТВП: $\Delta T_{\text{измеренная}} = \Delta T_{\text{пор}} P$. Измеренные значения сигнала $u_{\text{сигн.измерен}}$ делятся затем на значение P , а полученный результат $u_{\text{сигн. порог}} = u_{\text{сигн.измерен}} / P$ используется для вычисления $\Delta T_{\text{пор}}$, которое принимается за паспортизируемое для данного ТВП значение. При этом предполагается, что в области пороговых значений (в области собственных шумов) функция вольт/ваттной передаточной характеристики оптико-электронного тракта ТВП сохраняет такую же линейность и крутизну, какой она обладает в области проводимых измерений $\Delta T_{\text{измеренная}}$. Такое

предположение не соответствует экспериментальным данным. Однако приемлемого и свободного от недостатков инженерного способа прямого измерения пороговой чувствительности современных ТВП на уровне $\Delta T_{\text{пор}} \sim 50 \text{ мК}$ до настоящего времени не предложено. Поэтому методологическая погрешность (неопределённость) измерений величины $\Delta T_{\text{пор}}$ присутствует в паспортизируемых характеристиках современных ТВП.

При стендовых измерениях величин $\Delta T_{\text{разр}}$ и ТЧХ необходимо дополнительно оговаривать ряд условий проведения экспертных оценок. Практика показывает, что существенными являются следующие варианты процедуры формирования неподвижного тестового сигнала (штриховой тепловой миры):

- тёплые штрихи на холодном фоне;
- холодные штрихи на тёплом фоне;
- штрихи появляются на равномерном фоне, то есть эксперимент начинается с наблюдения равномерного фона и заканчивается, когда оператор различает все 4 штриха и правильно определяет их ориентацию;
 - хорошо различаемые штрихи уменьшают свой контраст и «исчезают» на равномерном фоне;
 - изображение тепловой миры появляется всегда в одном месте экрана;
 - изображение тепловой миры появляется в произвольном месте экрана;
 - ориентация штрихов одинакова для всего цикла измерения ТЧХ;
 - ориентация штрихов для каждого из измерений $\Delta T_{\text{разр}}$ изменяется случайным образом в процессе всего цикла измерения ТЧХ;
 - измерения проводятся с возможностью оператора подбирать режим работы дисплея или с первоначально установленными его настройками, включая выбор палитры изображения, яркость, контрастность и «уровень серого».

Зафиксирована разница до 3,8 раза в измеренных разными указанными способами значениях $\Delta T_{\text{разр}}$. Наилучшие (минимальные) значения $\Delta T_{\text{разр}}$ фиксировались для чёрно/белого изображения штрихов, исчезающих на равномерном фоне по мере уменьшения их теплового контраста.

4.2.2 Измерения тактических характеристик ТВП

Современные тепловизионные приборы в своей технической основе универсальны. Эффективность их применения для решения различных задач зависит дополнительно от квалификации оператора и совокупности тех устройств, с которыми ТВП объединяется в систему дистанционного наблюдения. В решении задач, где ТВП является ключевым звеном, необходимым образом участвуют и во многом определяют полезность применения всего комплекса в целом, например, гиросtabilизированные платформы и системы слежения за целью, эталоны ИК излучения, приборы определения параметров атмосферы и т.д. Поэтому практика экспериментальной оценки вероятности правильного обнаружения и

распознавания целей, дальности действия и т.п. носит характер экспертных оценок, проводимых при контроле факторов, поддающихся инструментальным измерениям. Для военных комплексов создаются специальные полигоны, оснащаемые эталонными объектами и средствами измерения их тепловых полей и параметров атмосферной трассы. Специальные методики разрабатываются для обеспечения возможности прогнозирования, например, дальности действия ТВП, в произвольных условиях его применения на основании результатов, полученных при конкретном сочетании влияющих факторов.

Заключение

Объём и качество информации, получаемой при дистанционном зондировании с помощью ТВП, в полной мере зависят от его устройства, которое, в свою очередь, целиком определяется используемой элементной оптико-электронной базой. Ключевую позицию в перечне основных функциональных блоков ТВП занимает фотоприёмное устройство. Современный этап развития тепловидения характеризуется применением матричных многоэлементных ИК ФПУ, что позволяет унифицировать с телевидением максимальное количество технических узлов и алгоритмов обработки сигналов. Логически неизбежный этап совмещения телевизионных и тепловизионных изображений пока не дал синергетического эффекта, в результате которого должен был бы появиться оптико-электронный комплекс, информация от которого давала бы более содержательную информацию, чем даёт каждый из каналов. Тем не менее, даже простое объединение тепловидения с другими техническими средствами (вибродиагностика, радиолокация, химический анализ, телевидение и т.д.) даёт выигрыш в получении качественно более информативной картины наблюдаемой обстановки. Для некоторых применений тепловидение остаётся единственным способом дистанционного определения энергетического состояния объектов по динамике теплового их поля поверхности. «Платой» за возможность дистанционно измерять характеристики теплового поля объектов является достаточно высокая неопределённость в содержательной структуре измеряемых величин, включающих, помимо собственного излучения объекта, ещё и отражённое излучение фона, и собственное излучение атмосферной трассы и элементов конструкции прибора. Выражается это в использовании таких договорных характеристик, как радиационная и яркостная температура, связанных с термодинамической температурой достаточно сложным образом, требующим учёта оптических характеристик поверхности наблюдаемого объекта и пространственно-временного и спектрального распределения излучения сюжета, в котором производится измерение с помощью ТВП. Поэтому для достоверной интерпретации тепловизионных изображений требуется как знание особенностей регистрации и предъявления информации оператору, так и представления о закономерностях формирования природных образований, подстилающих поверхности, на фоне которых наблюдаются объекты, и связь между условиями наблюдения и характеристиками тепловизионного изображения, влияющими на интерпретацию результатов дистанционного зондирования.

Список контрольных вопросов

№	Вопрос
1	Почему в тепловизионных изображениях часто наблюдаются фрагменты, «чернее чёрного» и «белее белого»?
2	Почему один и тот же прибор показывает разные значения величины «минимально разрешаемая разность температур – МРРТ - $\Delta T_{\text{разр}}$ » при её измерениях с использованием тестовых объектов разных размеров?
3	Что такое «частота Найквиста»?
4	Что такое «критерии Джонсона» и как они применяются при определении характеристик ТВП?
5	Чем отличаются величины цветовой, яркостной и радиационной температуры друг от друга?
6	Можно ли точно измерить температуру выхлопных газов автомобиля с помощью ТВП с микроболометрическим МФПУ?
7	Что такое «красная граница» чувствительности фотоприёмника и чем она объясняется ?
8	Какие материалы применяются для создания ИК линз диапазона 3 – 5 мкм и 8–12 мкм?
9	В чём заключается метод формирования «температурного окна»?
10	Как можно компенсировать погрешности, вызванные недостаточной оптической фокусировкой (размытость тепловизионного изображения)?
11	Что такое МРРТ и ТЧХ и как они связаны между собой?
12	Как измеряется ТЧХ?
13	Какие составляющие участвуют в расчётных выражениях для ОСШ?
14	Каков физический смысл величины «обнаружительная способность» D^* ?

Литература

1. Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть I. Особенности формирования и распространения ИК излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. 82 с.
2. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г., Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход, М., Университетская книга, 2016 г. 486 с.
3. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. М., Машиностроение, 1983 г., с. 696.
4. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988 г., с.400
5. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М., Мир, 1978, с. 414.
6. Поскачей А.А., Чубаров Е.П., «Оптико-электронные системы измерения температуры», Москва, Энергоатомиздат, 1988 г, 248 с.
7. Балоев В.А., Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Эффективность, помехозащищённость и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем, Казань, Издательство Казанского Гос. Тех. университета, 2015 г., 424 с.
8. Тарасов В.В. Якушенков Ю.Г., Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения М, Университетская книга, Логос, 2007 г. – 192 с.
9. Тарасов В.В. Торошина И. П., Якушенков Ю.Г., Инфракрасные системы 3-го поколения М., Логос, 2011 г. – 240 с
10. Справочник по ИК технике. Под ред. У. Волфа, Г. Цисиса: М.: Мир, 1995, с.606.
11. ГОСТ 27675-88. Приборы тепловизионные. Термины и определения. М. Издательство стандартов, 1989 г.
12. ГОСТ 7601 – 78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин, М., Издательство стандартов, 1979 г.
13. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов, Казань, «Отечество», 2006 г., 594 с.
14. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г., Инфракрасные системы «смотрящего» типа, М., Логос, 2007 г. 178 с.
15. Филачёв А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А., Твёрдотельная фотоэлектроника, в 3-х томах, М. Физматкнига, 2005 – 2012 г.г.
16. Ишанин Г. Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П., Приёмники излучения, «Изд. Папирус», 2003 г., 528 с.
17. Овсяк В.Н., Курьшев Г.Л., Сидоров Ю.Г. и др., Матричные фотоприёмные устройства ИК диапазона, Новосибирск, Наука, 2001 г. 376 с.
18. Цыцулин А.К., Адамов Д.Ю., Манцетов А.А., Зубакин И.А., Твёрдотельные телекамеры: накопление качества информации, СПб, Изд-во СПб ГЭТУ «ЛЭТИ», 2014 г., 272 с.

19. Латыев С.М., Конструирование точных (оптических) приборов, Изд. «Лань», 2015 г., 554 с.
20. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Яцык В.С.Ю Атмосфера и моделирование оптико-электронных устройств в динамике внешних условий, Казань, Изд-во Казанского университета, 2015 г., 630 с.

Белоусов Юрий Иванович
Постников Евгений Сергеевич

Инфракрасная фотоника
Часть II

Особенности регистрации и анализа тепловых полей

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49