

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ФИЛИППОВА ЕКАТЕРИНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**Тестирование информативных параметров
тепловизионных систем наблюдения**

**Специальность 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка
информации, статистика**

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н., доцент Акименко Татьяна Алексеевна

г. Тула, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	11
1.0. Введение	11
1.1. Структура тепловизионной системы наблюдения и известные решения на ее основе	12
1.2. Проблема контроля тепловизионных систем наблюдения	18
1.3. Существующие способы оценки качества тепловизионных систем наблюдения	22
1.3.1. Обзор зарубежных разработок для контроля тепловизионных систем наблюдения	38
1.4. Основы решения задач тестирования тепловизионных систем наблюдения	41
1.5. Постановка задачи исследования	44
1.6. Выводы	47
2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ЦИФРОВОГО ОБРАЗА СЦЕНЫ	48
2.0. Введение	48
2.1. Оптическая модуляция излучения в тепловизионной системе наблюдения	48
2.1.1. Источник излучения	48
2.2. Характеристики среды распространения	54
2.3. Формирование теплового цифрового образа сцены на приемнике теплового излучения	60

2.3.1. Фотометрические характеристики	60
2.3.2. Пространственная динамика сигнала	65
2.4. Динамика преобразования энергии теплового излучения	70
2.5. Выводы	74
3. ДЕФЕКТЫ ТЕПЛОВЫХ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВ СЦЕН, МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ И ОБРАБОТКИ	76
3.0. Введение	76
3.1. Информативность и потери информации в тепловизионных системах наблюдения	76
3.2. Потери вследствие неидеальности тепло-сигнальной характеристики	79
3.3. Потери информации вследствие дисторсии	91
3.3.1. Модели дисторсии	91
3.3.2. Идентификация дисторсии	94
3.3.3. Определение пространственных координат образов точечных источников	95
3.4. Оценка потерь вследствие пространственной динамики	100
3.5. Выводы	101
4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ	103
4.0. Введение	103
4.1. Описание генератора эталонных тестовых сигналов для оценки качества формируемого образа тепловой сцены	103
4.1.1. Генератор эталонных сцен для оценки тепло-сигнальной характеристики	103
4.1.2. Генератор эталонных сцен для оценки дисторсии	105

4.1.3. Генератор эталонных сцен для оценки тепло-сигнальной характеристики	106
4.2. Программный модуль управления устройством тестирования	108
4.3. Тестирование тепловизионной системы наблюдения	114
4.4. Выводы	121
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	123
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	126
ПРИЛОЖЕНИЕ	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

Системы наблюдения сцен в инфракрасном (ИК) диапазоне спектра достаточно широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, электроэнергетике, металлургии, химической промышленности, оборонной сфере, в системах экологического мониторинга и т.п. Основной задачей подобных систем является формирование модели наблюдаемой сцены, максимально близкой к оригиналу. Модель сцены включает ряд информативных параметров, каждый из которых передается соответствующим узлом/блоком тепловизионной системы наблюдения и вносит свой вклад в общий объем информации, формируемой устройством. Наблюдение сцены в ИК диапазоне сопровождается потерями информации, связанными с ее преобразованиями на аппаратном уровне тепловизионной системой наблюдения. Указанные потери являются безвозвратными, и не могут быть скомпенсированы при цифровой обработке электронных образов наблюдаемых сцен, поэтому важным этапом при вводе в эксплуатацию тепловизионной системы является этап тестирования и наладки, успешное прохождение которого гарантирует, что потери информации при наблюдении не превысят заданных показателей. Для проверки информативных параметров тепловизионной системы наблюдения применяются эталонные сцены, содержащие объекты, каждый из которых направлен на контроль одного из параметров тепловизионной системы, а именно: тепло-сигнальной характеристики, разрешающей способности в ИК диапазоне спектра и дисторсии. Задачей аппаратно-программного комплекса обработки информации является сравнение образа сцены, формируемого на выходе тепловизионной системы с эталонным образом, полученным в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, с реальным образом, формируемым тестируемой тепловизионной системой.

Это, в свою очередь, предъявляет высокие требования к эталонным сценам, наблюдаемым тестируемой тепловизионной системой наблюдения и программным средствам обработки тепловизионных образов, формируемых этой системой. С одной стороны, для каждого типа контроля должен формироваться эталонный сигнал с predetermined и достаточно высокими параметрами, соответствующими проводимому типу контроля, а с другой стороны, выявление отклонений параметров модели сцены от параметров образа, формируемых идеальным сканером должно производиться за приемлемое время. Поэтому создание комплексного устройства генерации тестовых сигналов и программного обеспечения, позволяющего на основании обработки образа наблюдаемой тепловизионной системой тепловой сцены определить параметры системы и классифицировать ее по принципу «годен/негоден» является актуальной задачей.

Все вышперечисленное, а именно потребности в создании универсального устройства тестирования тепловизионных систем наблюдения, обеспечивающего оценку критериев качества теплового изображения, а также технические параметры и характеристики аппаратуры объясняет необходимость и актуальность исследований, проведенных в диссертации.

Объектом исследования данной работы является аппаратно-программный комплекс управления генерацией эталонных тестовых сигналов и обработки цифровых образов эталонных сцен, формируемых генератором и наблюдаемых тепловизионной системой наблюдения.

Предметом исследования является потери информации на разных этапах формирования цифрового образа эталонных сцен и методы их идентификации.

Цель диссертации – повышение эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения за счет создания аппаратно-

программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой.

В соответствии с поставленной целью автором решены следующие задачи:

1) Построение модели преобразования наблюдаемой тепловой сцены в цифровой образ с разделением по этапам преобразования.

2) Разработка требований к элементам генератора эталонных образов сцен, используемым для контроля потерь информации на отдельных этапах преобразования.

3) Разработка методов выявления потерь информации вследствие неидеальности тепло-сигнальной характеристики, наличия дисторсии и ограниченности разрешающей способности тестируемой тепловизионной системы наблюдения.

4) Разработка обобщенной структуры генератора тепловых сцен, и требований к программному обеспечению по управлению процессом тестирования.

5) Разработка программного обеспечения обработки цифровых образов сцен и контроля параметров тестируемой системы.

6) Проведение экспериментальных исследований по верификации аппаратной части генератора эталонных сигналов и программного обеспечения;

Методы исследования. Проведенные исследования основаны на известных теориях и методиках, а именно: теория систем, теории подобия, теории теплового излучения, геометрической оптики, методы статистической обработки изображений. В основу работы положены достижения исследователей, работающих над аналогичными задачами: Дорфмана А. Ш., Кирпичева М. В., Дульнева Г. Н., Тарасова В. В., Якушенкова Ю. Г.

На защиту выносятся следующие положения, обладающие **научной новизной:**

1) Создание метода синтеза генератора эталонных тепловых сцен, отличающегося тем, что каждая генерируемая сцена предназначена для контроля потерь информации на соответствующем этапе преобразования, что позволяет повысить качество тестирования.

2) Предложена структура генератора эталонных сцен, обеспечивающего формирование образов для оценки тепло-сигнальной характеристики, дисторсии, контраста, отличающегося от известных тем, что содержит контроллер управления генерацией эталонных сцен и обработкой их цифровых образов, что позволяет сократить время и повысить качество тестирования.

3) Разработана методика и программа оценки параметров тестируемой тепловизионной системы на основании обработки сформированных ею цифровых моделей эталонных сцен, отличающаяся от известной тем, что из отдельных показателей качества формируется интегральный показатель, по которому оценивается система в целом и выдается заключение о пригодности ее к дальнейшей эксплуатации.

Работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика:

4. Разработка методов и алгоритмов системного анализа, ... принятия решений, обработки информации

12. Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.

17. Прикладные статистические исследования, направленные на выявление, измерение, анализ, прогнозирование, моделирование ... сложных систем.

Практическая ценность работы заключается в том, что методы, научные и технические решения, полученные в диссертации, могут быть использованы в инженерной практике разработки тестирующих систем

теповизионных средств наблюдения различного назначения без дополнительных затрат на проведение их натурных испытаний.

Достоверность полученных теоретических результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, а также экспериментальными исследованиями программно-аппаратного комплекса тестирования тепловизионных систем наблюдения.

Реализация и внедрение результатов. Предложенные в диссертации метод и средства тестирования тепловизионных систем наблюдения внедрены на ПАО «НПО «Стрела», а также в учебный процесс кафедры «Промышленная автоматика и робототехника» ФГБОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались на следующих конференциях и семинарах: 7th International Conference, FDM 2018, Lozenetz, Bulgaria, June 11-16; НПК «Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта», (II - 2020 г., III – 2021 г., IV – 2022 г.); НПК профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2019 - 2023 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 работы, основные из которых включены в список литературы, в том числе: 20 статей в сборниках, рекомендованных ВАК РФ; 5 статей в межвузовском сборнике; 3 статьи, представляющие собой материалы всероссийских научно-технических конференций; 1 статья, входящая в Scopus; 2 патента на полезную модель; 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 57 рисунков, 3 таблицы, список использованной литературы из 138 наименований и приложений. Объем основного текста диссертации 140 страниц.

Во введении показана актуальность выбора темы диссертационной работы, охарактеризован объект и предмет исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, дано краткое изложение результатов по основным разделам.

В первом разделе проведен системный анализ известных вариантов структур тепловизионных систем наблюдения, а также методов и программно-технических средств контроля их параметров.

Во втором разделе построены модели генераторов эталонных сцен и тепловизионной системы наблюдения, осуществляющей преобразование эталонной сцены в цифровой сигнал.

В третьем разделе исследованы доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала, произведена оценка таких характеристик тепловизионной системы наблюдения, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика). Определены требования к эталонным сценам, формируемым генератором эталонных сигналов.

В четвертом разделе представлен программно-аппаратный комплекс для генерации тестовых сигналов и контроля параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден».

В заключении сделаны выводы по работе в целом, а также указаны достижения, сделанные в результате решения поставленных задач.

Приложения содержат патенты на тест-объект для измерения разрешения, на устройство тестирования разрешения тепловизоров по контрасту; свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

1. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И УСТРОЙСТВ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕПЛОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

1.0. Введение

Тепловизионная система наблюдения (ТСН) представляет собой аппаратно-программный комплекс, осуществляющий двумерное преобразование теплового излучения в диапазоне длин волн 3-5 или 8-14 мкм от объекта и местности или фона в видимое изображение с представлением соответствующего двумерного образа температурного распределения наблюдаемых объектов на экране видеоконтрольного устройства (ВКУ). ТСН обладает рядом достоинств и присущих только ей возможностей: обнаружение удаленных излучающих тепло объектов (или целей) независимо от уровня естественной освещенности, а также до определенной степени - тепловых или других помех (встречной засветки, дыма, дождя, тумана, снега, пыли и т.п.). Однако она не лишена и недостатков, заключающихся в слабой детализации изображения и специфическом характере, а также сильной зависимости качества изображения от температурных контрастов объекта поиска и фона.

Работа тепловизионной системы наблюдения может быть описана следующим образом. Инфракрасное излучение, исходящее от объекта, фокусируется объективом на инфракрасном детекторе. Этот детектор передает сигнал в электронный блок для обработки изображения. Электронный блок преобразует сигналы, приходящие от детектора, в тепловой образ сцены, которая преобразуется в видимое изображение теплового поля объекта для его визуальной и количественной оценки на стандартных средствах отображения видеоинформации (жидкокристаллическом дисплее, электронно-лучевом приборе и т.п.)

1.1. Структура тепловизионной системы наблюдения и известные решения на ее основе

Тепловизионная система наблюдения, представленная на рис. 1.1, включает в себя: сканирующую систему; инфракрасный детектор, объектив O , которого фокусирует генерированный поток излучения $\Phi(x, y, z, \lambda)$ пространственной картины $Q(x, y, z, \lambda)$; инфракрасный датчик, с помощью которого распределенная функция облученности $E(Y, Z, \lambda)$ преобразуется в электрический сигнал, который вырабатывает напряжение $U(Y, Z, \lambda)$, и одновременно преобразует пространственное распределение облученности в дискретный сигнал $U(t)$; преобразователь, который после аналого-цифрового преобразования вводит $U(t)$ в виде последовательности цифровых кодов $D(t)$ через контроллер ввода данных в ЭВМ, после чего на мониторе ТСН мы видим значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения ТСН, отображённые согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной) [6].

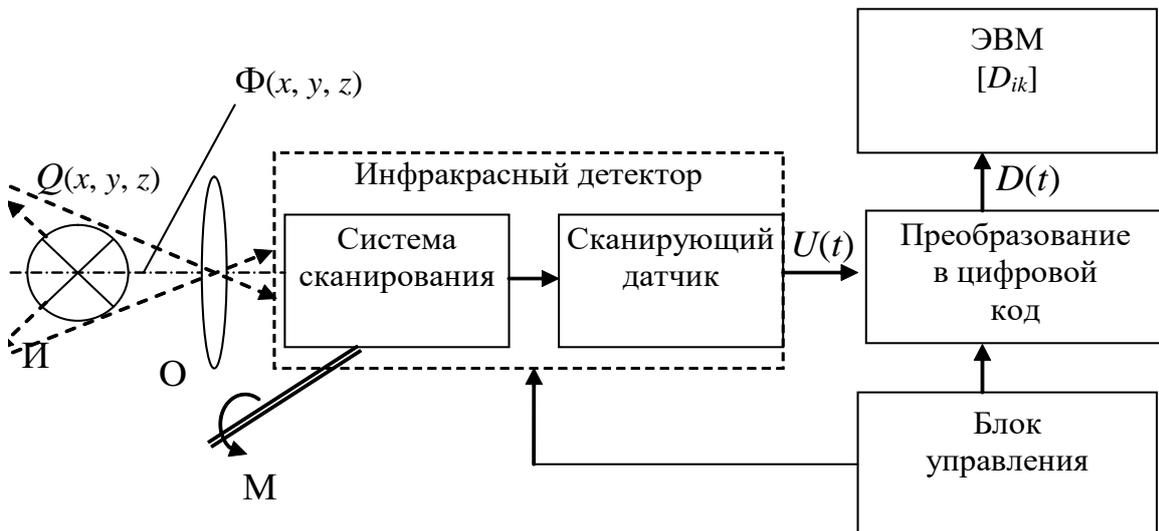


Рис. 1.1. Обобщенная функциональная схема тепловизионной системы наблюдения

Последовательность чисел, упорядоченная в матрицу $[D_{ik}]$, каждый элемент которой D_{ik} является результатом измерения и представления в виде

цифрового кода потока излучения, называется тепловым цифровым образом сцен (ТЦОС), представляющим собой матрицу пикселей. Система визуализации информации имеет цветовую палитру, в которой каждому коду матрицы $[D_{ik}]$ присваивается определённый цвет. После этого на мониторе появляется точка, цвет которой соответствует численному значению облученности точки инфракрасного детектора из конкретной точки наблюдаемой сцены, в результате получается видимая картина инфракрасного излучения объекта. Таким образом, на мониторе ТСН мы видим значения мощности инфракрасного излучения в каждой точке поля зрения ТСН, отображённые согласно заданной цветовой палитре (черно-белой или цветной).

Задача тепловизионной системы наблюдения заключается в создании теплового цифрового образа сцены (ТЦОС), максимально точно представляющей тепловой образ наблюдаемой сцены.

По способу использования излучения инфракрасные системы и приборы условно разделяются на активные (полуактивные) и пассивные. В системах активного типа наблюдаемый объект облучается источником инфракрасного излучения. В системах пассивного типа используется собственное или отраженное от естественных источников излучение наблюдаемого объекта.

Чувствительные элементы тепловизионных систем наблюдения по принципу действия разделяются на следующие основные группы (рис. 1.2) [49, 72, 95]:

боллометры, у которых при изменении температуры меняется электрическое сопротивление чувствительного элемента;

термоэлементы, использующие термоэлектрический эффект;

пироэлектрические приемники, основанные на изменении параметров сегнетоэлектриков под действием падающего лучистого потока;

оптико-акустические приемники, в основе которых лежит свойство

увеличения газа при повышении температуры.

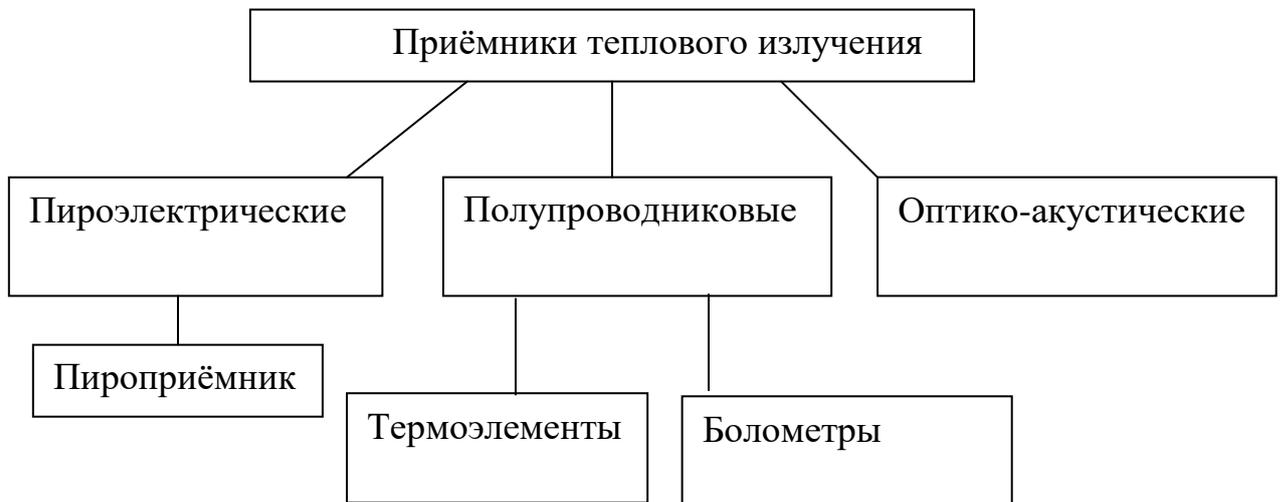


Рис. 1.2. Классификация приемников оптического излучения

Приемники могут быть: одноэлементными, линейными и матричными. Для получения полного теплового цифрового образа сцены в состав одноэлементных и линейных сканирующих систем вводят привод механического сканирования.

В ЭВМ данные могут храниться как в виде ТЦОС $[D_{ik}]$, так и в виде других упорядоченных совокупностей кодов. Здесь же данные могут подвергаться различного рода обработке, например фильтрации, классификации, преобразованию моделей одного вида в модели другого вида и т.п. Конечным продуктом обработки данных является тепловое изображение $[D'_{ik}]$, предназначенное для анализа в соответствии с заданными первоначальными условиями.

Вышеописанной обобщенной схеме может соответствовать много технических решений. Целесообразно сделать классификацию средств получения теплового изображения по различным признакам.

Возможны различные варианты классификаций по различным признакам, что отражено в таб. 1.1.

Сама по себе классификация – не цель, а одно из средств обобщения системного методологического подхода к созданию новых и модернизации имеющихся средств контроля тепловизионных систем наблюдения [87].

Варианты классификаций тепловизионных систем по различным признакам

1	Назначение и область применения	Визуализация (тепловизионные системы)			Радиометрия (измерение температур объектов, их яркости и других параметров)		
2	Сферы использования	Гражданского назначения			Военного назначения		
3	Метод работы	Пассивный метод – по собственному отражённому излучению наблюдаемых или контролируемых объектов и/или по отраженному от них излучению, создаваемому естественными источниками (без подсветки)		Активный метод – по отраженному или рассеиваемому объектом излучению, искусственно создаваемому специальным источником (с подсветкой)		Полуактивный метод – облучение (подсвечивание) сравнительно широкого углового поля, в котором находится не один, а несколько объектов.	
4	Спектральные поддиапазоны работы	Ближний 0,76..1,1	Коротковолновый 1,1..2,5	Средневолновой 3,0..5,0	Длинноволновой 8,0..14,0	Дальний 15,0..1000	
5	По типу чувствительных элементов	Одноэлементные		Линейные		Матричные	
6	По способу сканирования	Механическое		Электронно-механическое		Электронное	
7	По траектории сканирования	Строчное	Телевизионное	Спиральное		Розетчатое	Циклоидальное
8	Способ обработки информации	Аналоговый		Цифровой			Смешанный
9	Тип приемника-преобразователя оптического сигнала	Электронно-оптические преобразователи		Фотоэлектровакуумные передающие телевизионные трубки с накоплением или без накопления сигналов		Многоэлементные твердотельные приёмники оптического излучения	
						Тепловые и фотонные	

					Охлаждаемые и неохлаждаемые	
					Болометрические	
					Фотодиодные	
					Фоторезисторные	
10	По способу охлаждения	Охлаждаемые			Неохлаждаемые	
		Эффект Пельтье	Жидкий азот	Криогенные		Комбинированные
11	По поколениям	1		2		3
		ИКС с одноэлементным приёмником излучения и оптико-механическим мультиплексированием выходного сигнала		ИКС с оптико-механическим сканированием, приёмником в виде линейки чувствительных элементов и оптико-электронным мультиплексированием выходного сигнала		ИКС «смотрящего типа» с многоэлементным матричным приёмником оптического излучения - FPA
	Вид выходного устройства (системы отображения)	Телевизионная трубка		Дисплей		ЭВМ, компьютер

Привод линейного приемника может осуществлять сканирование изображения по различным траекториям [49], представленным на рисунке 1.3.

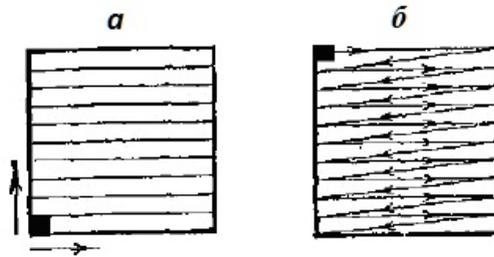


Рис. 1.3. Траектории сканирования а – строчное, б – телевизионное

Приемники без механического сканирования («смотрящего» типа), называемые FLIR (Forward Looking Infrared) системами, используют аналогию с органами зрения живых существ – многоэлементные матричные приемники оптического излучения (focal plane array - FPA) [46, 103].

1.2. Проблема контроля тепловизионных систем наблюдения

Каждый элемент функциональной схемы, приведенной на рис. 1.1. выполняет свою функцию преобразования теплового излучения, генерируемого наблюдаемой сценой, в тепловой образ $[D_{ik}]$. Этапы преобразования приведены на рис. 1.4.

На каждом этапе аппаратными средствами тепловизионной системы наблюдения вносятся искажения преобразуемый сигнал, что приводит к потерям информации, и в конечном итоге изменяет первичный тепловой образ сцены [90, 94].

Первым уровнем потерь является оптико-механический уровень $f_o(y, z)$. Кроме требуемой фокусировки светового потока в плоскости расположения фотоэлектронного преобразователя происходит его искажение (абберации оптической системы, виньетирование, боковые помехи от деталей

оптической системы, эффект Нарцисса). Источниками aberrаций являются: объектив (сферические и нелинейные aberrации), различного рода светофильтры, отражающие и преломляющие поверхности, среда распространения света.

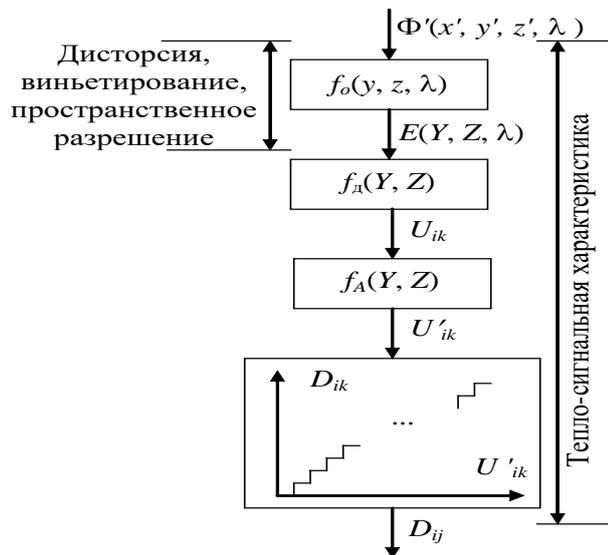


Рис. 1.4. Последовательность потерь информации в узлах и блоках тепловизионной системы наблюдения

Второй уровень потерь представляется приемником-преобразователем оптического сигнала $f_d(Y, Z)$, при прохождении через который наряду с погрешностями, связанными с конечными размерами дискретизирующих элементов и наличием кружка Эри объектива, возникают погрешности, связанные с неравномерностью статической тепло-сигнальной передаточной характеристики по площади приемника-преобразователя.

При механическом сканировании в непрерывном, а не старт-стопном режиме возникают потери, в виде «смаза» изображения за счет динамики протекающих механических процессов. Ухудшение пространственно-частотных характеристик сигнала возникают по той координате, по которой осуществляется механическое сканирование.

Аналого-цифровой преобразователь вносит шум преобразования, определяемый нелинейной характеристикой $D_{jk}(U_{jk})$. Возникают потери, связанные с настройкой нижнего и верхнего порогов преобразования.

В системе отображения – потери в разрешающей способности экрана при формировании изображения по горизонтали и вертикали, недостаточное разрешение дисплея, дисторсия изображения, ограничение контраста.

Общепринятый принцип контроля тепловизионных систем наблюдения показан на рис. 1.5.

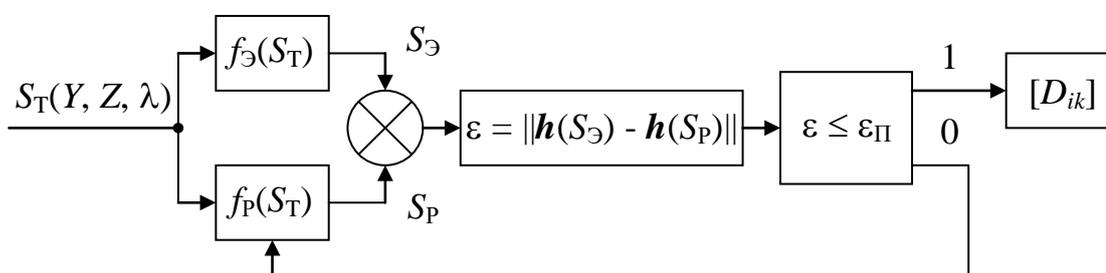


Рис. 1.5. Контроль тепловизионных систем наблюдения

В соответствии с принципом контроля:

1) формируется эталонный тестовый сигнал $S_T(Y, Z, \lambda)$, тестовым сигналом может служить тепловой тест-объект, представляющий собой теплоизлучающий объект с заданными пространственной частотой или формой, температурным контрастом на равномерно излучающем фоне с известным значением его температуры и излучательными способностями фона и объекта:

2) эталонный тестовый сигнал $S_T(Y, Z, \lambda)$ подается на входы реальной и эталонной систем, которые в результате функциональных преобразований $f_P(S_T)$ и $f_Э(S_T)$ формируют сигналы S_P и $S_Э$, соответственно;

3) определяется ошибка в виде нормы разности сходных характеристик сигналов на выходах реальной и эталонной систем

$$\varepsilon = \|\mathbf{h}(S_Э) - \mathbf{h}(S_P)\|, \quad (1.1)$$

где $\mathbf{h}(S_{\text{Э}})$ и $\mathbf{h}(S_{\text{Р}})$ - K -мерный вектор характеристик сигнала, вычисляемый как его векторная функция;

4) величина ошибки сравнивается с порогом $\varepsilon_{\text{П}}$, и в случае, если $\varepsilon \leq \varepsilon_{\text{П}}$, то картина эталонного тестового сигнала признается годной для дальнейшего использования, а тепловизионная система признается настроенной правильно;

5) в случае, если $\varepsilon > \varepsilon_{\text{П}}$, то картина эталонного тестового сигнала признается негодной для дальнейшего использования, тепловизионная система подлежит настройке.

К норме (1.1) применяются следующие требования:

1) функция $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\|$ должна быть неотрицательной, т.е. $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\| \geq 0$;

2) функция $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\| = 0$, тогда и только тогда, когда $S_{\text{Э}} = S_{\text{Р}}$;

3) функция является симметричной, т.е. $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\| = \|\mathbf{h}(S_{\text{Р}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Э}})\|$;

4) для функции $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\|$ выполняется свойство $\|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\| \leq \|\mathbf{h}(S_{\text{Э}}) - \mathbf{h}(S_0)\| + \|\mathbf{h}(S_0) - \mathbf{h}(S_{\text{Р}})\|$, где S_0 - некоторый сигнал.

Для вычисления ошибки можно использовать сумму квадратов расстояний

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^K [h_k(S_{\text{Э}}) - h_k(S_{\text{Р}})]^2 ; \quad (1.2)$$

где $h_k(S_{\text{Э}})$ - k -я составляющая вектора характеристик эталонного сигнала, $1 \leq k \leq K$; где $h_k(S_{\text{Р}})$ - k -я составляющая вектора характеристик реального сигнала, $1 \leq k \leq K$.

В том случае, если характеристики имеют разный вес в оценке близости функционирования реальной и эталонной информационных систем, то норма может быть вычислена по зависимости:

$$\varepsilon = \sum_{k=1}^K c_k \cdot [h_k(S_{\text{Э}}) - h_k(S_{\text{Р}})]^2 ; \quad (1.3)$$

где $0 \leq c_k \leq 1$ - «вес» k -й характеристики сигнала в общей оценке;

$$\sum_{k=1}^K c_k = 1. \quad (1.4)$$

Зависимости (1.2) и (1.3) выбраны в качестве наиболее приемлемых, поскольку являются гладкими дифференцируемыми функциями и не содержат вычисления квадратного корня.

Система, проводящая преобразование $f_3(S_T)$, может быть реальной физической системой, например, эталонная тепловизионная система из заданного класса, или она может быть реализована в виде виртуальной системы на ЭВМ, в которую вводится виртуальный тест-объект.

1.3. Существующие способы оценки качества тепловизионных систем наблюдения

Критерии качества работы тепловизионной системы наблюдения (ТСН), являясь мерой успешного выполнения основной задачи, стоящей перед системой, учитывают разнообразные технические, эксплуатационные и технико-экономические требования к ТСН [84].

Критерии качества тепловизионной системы наблюдения можно разделить на группы:

критерии качества теплового цифрового образа сцены (ТЦОС), сформированного ТСН (информативные свойства теплового изображения);

технические параметры и характеристики аппаратуры;

К показателям «теплового цифрового образа сцены ТСН» можно отнести:

- 1) разрешающая способность по температуре (или интенсивности),
- 2) разброс результатов измерения температуры;
- 3) разность между минимальной и максимальной измеряемой интенсивностью;
- 4) число передаваемых уровней интенсивности теплового излучения, или температуры;

5) дисторсия - отклонение местоположения пикселя от предполагаемого;

б) пространственное разрешение аппаратуры, оцениваемое по частотно-контрастной характеристике или по передаточным функциям.

К техническим параметрам относятся: отношение сигнал-шум; чувствительность (пороговая чувствительность); эквивалентная шумам обнаруживаемая или разрешаемая разность температур и ее зависимость от пространственной частоты (температурно-частотные характеристики); динамический диапазон принимаемых или регистрируемых сигналов; рабочий диапазон спектра; частота кадров; угловые поля (обзора и мгновенное); число элементов разрешения; однородность разрешения и чувствительность по кадру.

Для описания качественных параметров и характеристик тепловизионных систем наблюдения пользуются понятиями пространственное, временное, спектральное и энергетическое (амплитудное) разрешение. Для тепловизионных систем наблюдения, работающих в статическом режиме, т.е. при неограниченном времени наблюдения неподвижного поля объектов, наиболее важно обеспечить хорошее пространственное и энергетическое разрешение. Для тепловизионных систем наблюдения, работающих в динамическом режиме (при взаимном перемещении системы и пространства объектов) наряду с пространственным и энергетическим разрешением важным является и временное разрешение [84].

Пространственное разрешение тепловизионной системы наблюдения характеризует способность системы различать отдельные объекты или их детали в пространстве объектов или в плоскости изображений. Под мерой пространственного разрешения приемника излучения часто подразумевают угол в пространстве объектов, стягиваемый элементом чувствительного слоя приемника.

В качестве критериев пространственного разрешения используют предел углового разрешения $\Delta\varphi_H$, угловой разрешаемый интервал $\Delta\psi_{инт}$, угловую ширину разрешения $\Delta\xi$, эквивалентную шуму разрешаемую разность температур (как более объективный и представительный критерий). Общепринятым критерием качества тепловизионных систем наблюдения является частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) или модуляционная передаточная функция (МПФ), которая получается как результат наложения передаточных функций оптики, приемника, электроники тракта обработки и блока визуализации [27].

При определении ЧКХ ν пользуются Фурье-преобразованием от функции рассеяния линии или отношением контраста в изображении тест-объекта ν_{image} , получаемого с помощью тепловизионной системы наблюдения, к исходному контрасту изображаемого тест-объекта ν_{scene} , т. е.

$$\nu = \frac{\nu_{image}}{\nu_{scene}} = \left(\frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} - E_{min}} \right)_{image} / \left(\frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \right)_{scene}, \quad (1.5)$$

где E_{max}, E_{min} - максимальная и минимальная облученность изображения; L_{max} - максимальная интенсивность исходного тест-объекта. L_{min} - минимальная интенсивность исходного тест-объекта.

При измерениях ЧКХ различных тепловизионных систем наблюдения используют черные тела – имитаторы объекта и фона, на котором наблюдается объект.

Пространственная частота, при которой ЧКХ снижается до некоторого допустимого уровня, например, до значения предельного минимального контраста, различаемого наблюдателем или всей системой, часто служит мерой пространственного разрешения.

По отношению к точечным объектам энергетическое разрешение тепловизионной системы наблюдения может оцениваться эквивалентной шуму (пороговой облученностью) E_n или эквивалентным шуму (пороговым)

поток, т.е. значениями облученностей или потоков на входе системы, при которых амплитуды сигналов равны средним квадратичным значениям шумов [84].

Для оценки энергетического разрешения тепловизионной системы наблюдения используют понятие удельная обнаружительная способность приемника излучения D^* , которая определяется для одного элемента матричного приемника излучения как:

$$D^* = S \sqrt{A_{\text{ПИ}} \Delta f_{\text{Э}}} / \sigma_{\text{Ш}} \quad (1.6)$$

где S – чувствительность приемника; $A_{\text{ПИ}}$ – площадь чувствительного слоя; $f_{\text{Э}}$ – эффективная (эквивалентная) полоса пропускания шумов; $\sigma_{\text{Ш}}$ – среднее квадратическое значение шума на выходе приемника.

Если $S = \Delta V / \Delta \Phi_{e\lambda}$, где ΔV – приращение сигнала на выходе приемника, соответствующее приращению монохроматического потока $\Delta \Phi_{e\lambda}$, падающего на чувствительный слой; а отношение сигнал-шум обозначить как $\mu = \Delta V / \sigma_{\text{Ш}}$, то

$$D^* = \mu \sqrt{A_{\text{ПИ}} \Delta f_{\text{Э}}} / \Phi_{e\lambda} \quad (1.7)$$

При контроле тепловизионной системы наблюдения должны быть использованы методы и эталонные сцены (тест-объекты), ориентированные на автоматизацию и кратчайшее время выполнения контрольных процедур. Все параметры должны оцениваться автоматически в результате наблюдения эталонной сцены, с помощью тепловизионной системы наблюдения, измерения параметров сигнала и сравнения параметров с эталонными значениями. Ниже под эталонной сценой будет пониматься сцена, состоящая из источников теплового излучения (эталонных (образцовых излучателей) с известными параметрами.

Методика поверки и контроля качества работы тепловизионных измерительных приборов регламентируется ГОСТ Р 8.619-2006 [29] и приведена в табл. 1.2.

Операции и средства поверки тепловизоров

Наименование операции	Средства поверки и их характеристики
Проверка работы тепловизора в различных условиях	<p>Эталонный (образцовый) протяженный излучатель для диапазона температур выше температуры окружающей среды на 10 °С, с излучательной способностью не менее 0,95.</p> <p>Доверительная граница погрешности излучателя 1,1 °С при вероятности 0,95. Нестабильность поддержания температуры не более $\pm 0,05$ °С/мин</p>
Определение угла поля зрения	<p>Эталонный (образцовый) протяженный излучатель; тепловой тест-объект с излучательной способностью не менее 0,95; измерительная линейка длиной 500 мм и ценой деления 1 мм; поворотный столик с точностью задания угла до 1°</p>
Определение пространственного (углового) разрешения	<p>Эталонный (образцовый) протяженный излучатель; тепловой тест-объект с излучательной способностью не менее 0,95, диапазоном измерений размера щели от 0 до 50 мм, шагом 1 мм.</p> <p>Высота щели от 140 мм, погрешность задания ширины щели</p>

		±0,1 мм
Проверка диапазона и определение основной погрешности измерения радиационной температуры		Эталонный (образцовый) протяженный излучатель для диапазона температур от минус 50 °С до плюс 80 °С. Доверительная граница погрешности излучения 0,6 °С при вероятности 0,95. Для диапазона от 0 °С до 2500 °С доверительная граница погрешности излучателя от 0,5 °С до 7,5 °С при вероятности 0,95
Определение порога температурной чувствительности		Эталонный (образцовый) протяженный излучатель
Определение неравномерности чувствительности тепловизора по полю		Эталонный (образцовый) излучатель
Определение сходимости показаний тепловизора		Эталонный (образцовый) протяженный излучатель

Эталонный (образцовый) излучатель – излучатель в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8.558, ГОСТ Р 8.566.

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

Тепловой тест-объект – устройство, предназначенное для создания картинной плоскости, содержащей теплоизлучающий объект с заданными пространственной частотой или формой, температурным контрастом на равномерно излучающем фоне с известным значением его температуры и излучательными способностями фона и объекта [29].

Вид теплового тест-объекта по ГОСТ 8.619-2006 приведен на рис. 1.6 и 1.7.

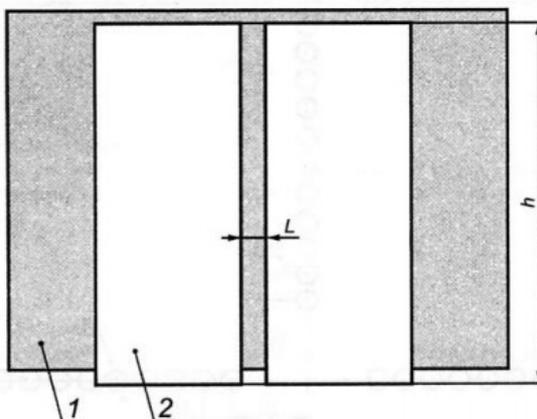


Рис. 1.6. Тепловой тест-объект с переменной щелью

1 – протяженный излучатель; 2 – тепловой тест-объект толщиной 1 мм с переменной щелью (высота шторки $h = \text{const}$, расстояние между шторками L меняется от 0 до 50 мм с шагом 1 мм). Рекомендуемый к использованию материал - с высокой теплопроводностью (например, медь).

d – диаметр отверстия (10 мм). Толщина тест-объекта 1 мм. Одна сторона полированная, другая подлежит чернению. Рекомендуется использовать материал с высокой теплопроводностью (например, медь).

Все предусмотренные режимы тепловизора подвергаются проверке и контролю. Если хотя бы на одном из режимов работы не выполняются указанные в паспорте на него функции, далее проверку не проводят [29].

Определение угла поля зрения

Выбор рабочего расстояния

Температурный режим протяженного излучателя устанавливают выше температуры окружающей среды на 10 °С. Перед протяженным излучателем на расстоянии от 1 до 3 см располагают тепловой тест-объект с переменной щелью.

В качестве рабочего расстояния R , мм, выбирают максимальное расстояние между объективом ТС и тепловым тест-объектом с переменной

щелью, которое обеспечивает максимальное значение температуры щели в термограмме при полном раскрытии щели.

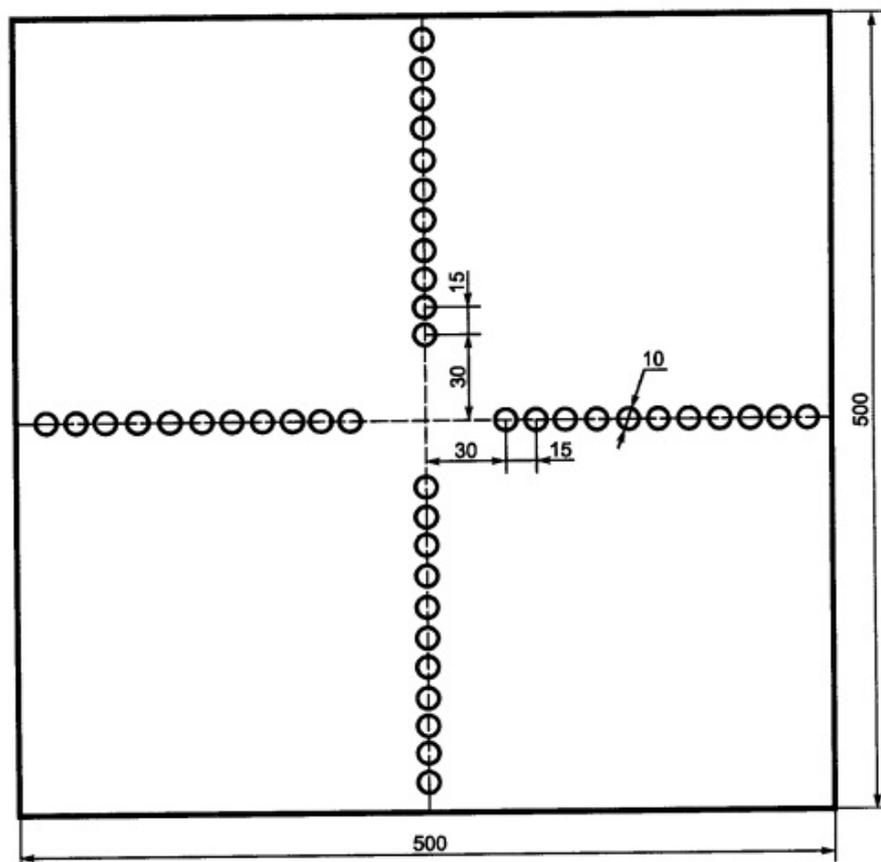


Рис. 1.7. Тепловой тест-объект с метками.

Определение угла поля зрения возможно осуществлять двумя способами:

1. Измерения проводят с помощью теплового тест-объекта и ТС, установленной на поворотном столике, обеспечивающем возможность поворота и регистрации угла поворота столика относительно неподвижного основания в двух плоскостях. Ось вращения должна совпадать с вертикальной плоскостью, проходящей через переднюю поверхность входного объектива ТС.

Поворачивая ТС с помощью поворотного столика в горизонтальной (вертикальной) плоскости, совмещают вертикальную (горизонтальную) ось

расположения меток на тепловом тест-объекте с краями термограммы и регистрируют соответствующие углы на шкале столика ϑ_{X1} и ϑ_{X2} град (ϑ_{Y1} и ϑ_{Y2} , град.)

Углы поля зрения по горизонтали φ_X и по вертикали φ_Y , град., рассчитывают соответственно по формулам:

$$\varphi_X = |\vartheta_{X1} - \vartheta_{X2}|, \quad (1.8)$$

2. Измеряют расстояние между крайними метками теплового тест-объекта в миллиметрах и расстояние между крайними метками теплового тест-объекта на термограмме в элементах разложения термограммы (далее – эл.).

Мгновенный угол зрения γ , рад., рассчитывают по формуле

$$\gamma = \frac{2}{a} \operatorname{arctg} \frac{A}{2R}, \quad (1.9)$$

где a – расстояние между крайними метками теплового тест-объекта на термограмме в элементах, эл.; A – расстояние между крайними метками теплового тест-объекта, мм; R – рабочее расстояние, определенное ранее мм.

Углы поля зрения по горизонтали φ_X и по вертикали φ_Y , град., рассчитывают соответственно по формулам:

$$\varphi_X = \gamma X \frac{180}{\pi}, \quad (1.10)$$

$$\varphi_Y = \gamma Y \frac{180}{\pi}, \quad (1.11)$$

где γ – мгновенный угол поля зрения, рад; X – количество элементов разложения термограммы по горизонтали; Y – количество элементов разложения термограммы по вертикали.

Определение пространственного (углового) разрешения

Определение масштабного коэффициента

Масштабный коэффициент k , эл./мм, определяют как отношение расстояния между соответствующими отверстиями на термограмме, эл., и тепловом тест-объекте, мм.

Определение пространственного (углового) разрешения по горизонтали и вертикали.

Тепловой тест-объект с переменной щелью в вертикальном положении (ось щели направлена вертикально – по высоте термограммы) или горизонтальном положении, соответственно.

По термограмме определяют максимальную температуру щели $t'_{\max}, ^\circ\text{C}$, и среднюю температуру шторок $t'_0, ^\circ\text{C}$. Регистрируют полученные результаты измерений. По результатам измерений рассчитывают контраст щели K_S на термограммах по формуле

$$K_S = \frac{t'_{\max} - t'_0}{t_s - t'_0}, \quad (1.12)$$

Где t'_{\max} - максимальное значение температуры щели, определяемое по термограмме, $^\circ\text{C}$; t'_0 - среднее значение температуры шторок, определяемое по термограмме, $^\circ\text{C}$; t_s - максимальное значение температуры щели, при максимальном раскрытии щели, определяемое по термограмме, $^\circ\text{C}$.

По зарегистрированным значениям ширины щели A , мм, рассчитывают ширину щели a , эл., приведенную в плоскость изображения (термограммы) по формуле

$$a = Ak \quad (1.13)$$

где A – ширина щели, мм; k – масштабный коэффициент, эл./мм.

Уменьшая и регистрируя ширину щели A , мм, проводят измерения и расчеты по (1.15) не менее пяти раз.

По полученным результатам измерений устанавливают зависимость контраста щели на термограммах K_S от ширины щели a , эл., - функцию реакции на щель (*FRS*):

$$FRS = K_s(a) \quad (1.14)$$

Пространственное разрешение F_X по горизонтали (по вертикали F_Y) определяется как ширина щели, при которой контраст на термограмме K_S равен 99% максимального значения.

Проверка диапазона и определение основной погрешности измерения радиационной температуры

Измерения проводят на расстоянии между эталонным (образцовым) излучателем и тепловизором, обеспечивающем перекрытие апертурой излучателя не менее 20% угла поля зрения ТС. Основную погрешность ТС определяют в пяти точках диапазона рабочих температур (нижней, верхней и трех точках внутри диапазона). Определяют среднее значение радиационной температуры эталонного излучателя по термограмме t'_{cp} , °С с учетом его излучательной способности и температуры радиационного фона.

Основную погрешность Δt , °С, для каждой температуры ИКС, рассчитывают по формуле

$$\Delta t = t'_{cp} - t_{cp} \quad (1.15)$$

Где t'_{cp} - среднее значение температуры по области, ограничивающей изображение апертуры излучателя на термограмме, °С; t_{cp} - среднее значение температуры эталонного (образцового) излучателя, °С.

Определение порога температурной чувствительности.

Записывают в запоминающее устройство ТС две термограммы через короткий промежуток времени.

Определяют разность температур Δt_j , °С, для каждого элемента разложения зарегистрированных термограмм с помощью программного обеспечения, прилагаемого к ИКС, или рассчитывают по формуле

$$\Delta t_j = t_j^{(1)} - t_j^{(2)} \quad (1.16)$$

где $t_j^{(1)}$ - температура элемента разложения первой термограммы с координатами $(i; j)$, °С; $t_j^{(2)}$ - температура элемента разложения второй термограммы с координатами $(i; j)$, °С;

Матрицу разностей температур Δt_j представляем в виде числового ряда Δt_i . Порог температурной чувствительности Δt_{nop} , °С, в этом случае рассчитывают по формуле

$$\Delta t_{nop} = 0,707 \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\Delta t_i - \Delta \bar{t})^2}{n}}, \quad (1.17)$$

где Δt_i - разность температур i -го элемента разложения термограмм, °С; $\Delta \bar{t}$ - средняя разность температур, °С; n – количество элементов разложения в термограмме.

Значение Δt_{nop} определяют для каждого диапазона ИКС

Определение действительного количества элементов разложения термограммы (чувствительных элементов)

Записывают в запоминающее устройство ТС термограмму и определяют неисправные чувствительные элементы. Отклонение показаний температуры каждого чувствительного элемента δt_i , °С от температуры протяженного излучателя t_s , °С не должно превышать значения порога температурной чувствительности Δt_{nop} , °С более, чем в шесть раз.

За действительное количество элементов разложения термограммы принимается число исправных чувствительных элементов.

Определение неравномерности чувствительности тепловизионной системы по полю

Неравномерность чувствительности ТС по полю определяют в пяти точках диапазона рабочих температур ТС (нижней, верхней и трех точках внутри диапазона). Проводят не менее пяти измерений на каждой температуре.

Неравномерность чувствительности тепловизора по полю δt_i , °С, рассчитывают по формуле

$$\delta t = \bar{t}_{\max} - \bar{t}_{\min}, \quad (1.18)$$

где \bar{t}_{\max} - максимальное значение из полученных средних температур, °С;
 \bar{t}_{\min} - минимальное значение из полученных средних температур, °С.

Определение сходимости показаний тепловизионной систем.

В течение 15 мин через каждые 10 – 15 с снимают термограммы.

Определяют средние арифметические значения температуры по результатам измерений в течение трех интервалов по 5 мин. Разность максимальных и минимальных средних арифметических значений температуры не должна превышать значения сходимости температуры.

Все результаты поверки тепловизора заносят в протокол.

Для количественного определения разрешающей способности и частотно-контрастной характеристики оптики и светочувствительного элемента служат *миры*, которые используются в качестве эталонного сигнала, представленные на рисунке 1.8.

Принцип формирования тестового сигнала основан на визуальной оценке различимости штрихов внутри группы. Миры имеют расположенные в одной плоскости группы прорезей, при этом группы отличаются пространственной частотой прорезей. Мишень равноудалена от теплового излучателя, при этом группы прорезей мишени размещены в строки с последовательным уменьшением от строки к строке горизонтального размера прорезей, соответствующих пространственной частоте. В начале каждой строки расположена опорная прорезь, размер которой фиксирован для всех строк и равен размеру соответствующих минимальной пространственной частоте прорезей первой строки, и, обращенная к тепловому излучателю сторона мишени имеет теплоотражающее покрытие, а внешняя ее сторона покрыта материалом с высоким коэффициентом излучения.

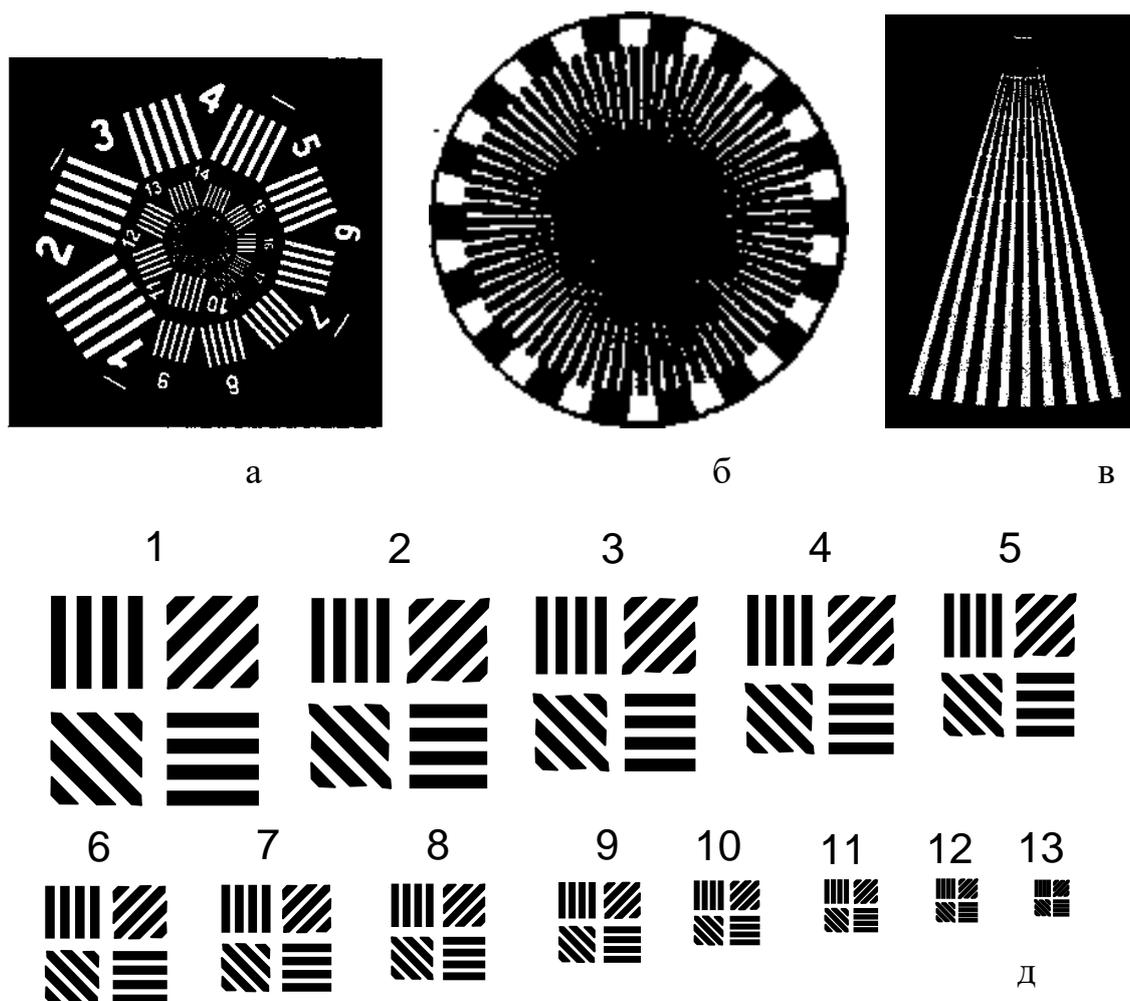


Рис. 1.8. Миры

а - Ащеулова; б - радиальная; в – веерообразная;

д - стандартная штриховая

Критерием для одновременной оценки температурной и пространственной разрешающей способности тепловизора является минимальная разрешаемая разность температур ΔT_p . Этот показатель учитывает возможные потери пространственной разрешающей способности в электронном тракте и в системе отображения. Он обычно определяется по разрешению с помощью тепловизора семиполосной миры, состоящей из равной толщины полос чередующихся четырех «горячих» и трех «холодных» с отношением высоты к ширине 7:1 (т.е. в целом мира представляет собой квадрат).

В качестве оценки температурно-пространственного (контрастного) разрешения используют набор мир (рис. 1.9) – равносторонних треугольников различного размера с различной ориентацией одной из вершин в прямоугольной системе координат: «вверх», «вниз», «налево», «направо». Данный способ является достаточно простым и позволяет устранить недостатки при оценке качества ТС с помощью ΔT_p .

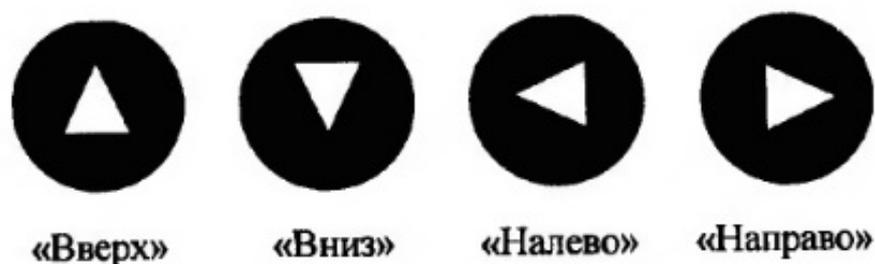


Рис. 1.9. Тест-объекты для оценки температурно-пространственного разрешения

Известен способ измерения основных параметров и характеристик тепловизионных систем наблюдения устройством контроля по патенту РФ 2549072 МПК⁸ F41G3/32, разработанный на базе Тульского государственного университета, представленный на рис. 1.10.

Устройство для контроля параметров тепловизионных систем представляет собой тепловой излучатель, выполненный в виде матрицы тепловыделяющих элементов (2), установленный на панель из материала с низкой теплопроводностью (1), цифровые датчики температуры (7), установленные на тепловыделяющих элементах, устройство управления на базе микропроцессора (6), обратная связь которого с тепловым излучателем осуществляется с помощью сигналов от цифровых датчиков температуры, а также источник питания (4). Линии (3) и (8) связывают матрицу тепловыделяющих элементов и датчиков с источником питания (4) и схемой выбора строк (9). Сигнал с выбранной строки по шине (10)

передается в микропроцессор. Панель имеет размеры реального наблюдаемого объекта

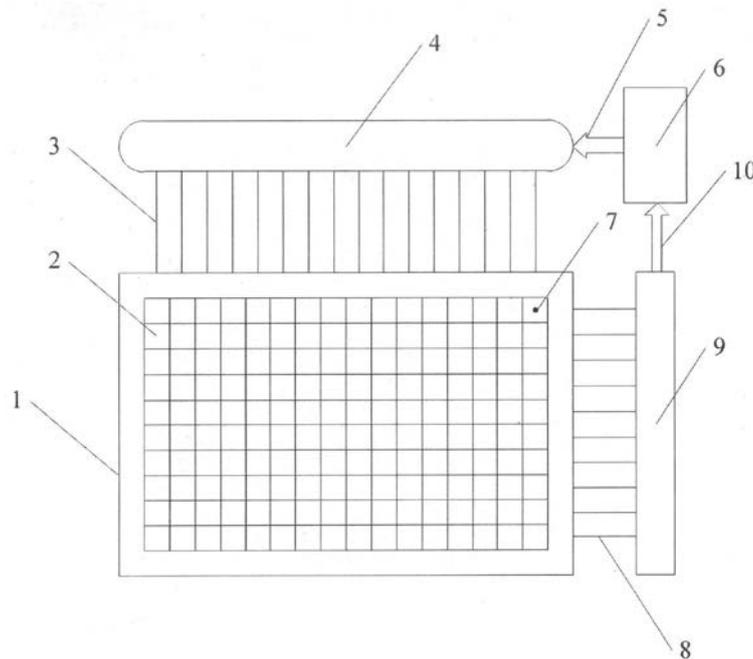


Рис. 1.10. Тепловой тест-объект

К недостаткам данного устройства относятся сложность конструкции, невозможность осуществления тестирования чувствительности тепловизионных систем наблюдения по контрасту [3].

Институтом автоматики и электрометрии СО РАН представлен макет экспериментального имитационно-моделирующего стенда (рис. 1.11). Функции стенда являются типичными для установок контроля инфракрасных детекторов [25]. Устройство содержит 1 – блок управления источником освещения; 2 – источник освещения; 3 – зеркальный лабиринт; 4 – линза; 5 – плоское зеркало; 6 – параболическое зеркало; 7 – оптический модулятор; 8 – интерфейс ЭВМ; 9 – оптическая система; 10 – тепловизионная матрица.

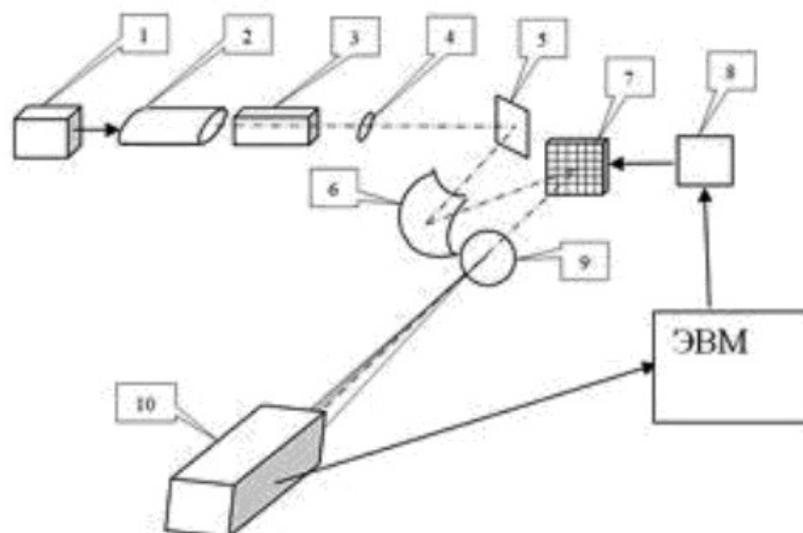


Рис. 1.11. Структура генератора тепловой сцены.

Функциями и основными параметрами приемников теплового излучения, подлежащими измерениям являются: среднеквадратичный временной шум; постоянный пространственный шум; чувствительность; обнаружительная способность; разность температур, эквивалентная шуму; динамический диапазон, линейность; коррекция неоднородности элементов; спектральная чувствительность; межэлементная связь, характеристики чувствительной площадки; частотно-контрастная характеристика;

1.3.1. Обзор зарубежных разработок для контроля тепловизионных систем наблюдения.

Зарубежный стандарт ISO 18251-1:2017 Non-destructive testing — Infrared thermography — Part 1: Characteristics of system and equipment описывает основные компоненты и их характеристики, входящие в состав инфракрасной (ИК) системы визуализации и сопутствующего оборудования, используемого при неразрушающем контроле. Он также призван помочь пользователю в выборе подходящей системы для конкретной измерительной задачи/

Национальным институтом Стандартов и Технологий США разработано Техническое примечание 1630 для тепловизоров, используемых пожарными службами. При помощи тепловой цели (рис. 1.12) предполагается оценивать неравномерность, пространственное разрешение, диапазон эффективных температур и температурную чувствительность тепловизионного оборудования.

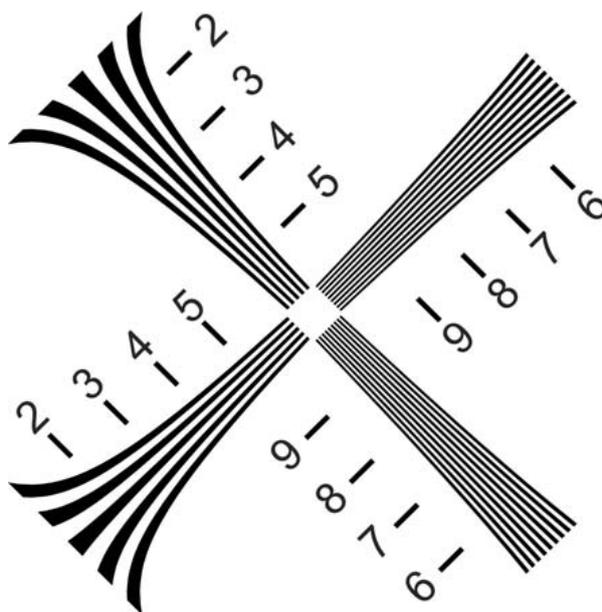


Рис. 1.12. Тепловая цель с пространственным разрешением.

Передний план (черные метки) удерживается на постоянной температуре на 3 °С выше окружающей среды. Размер мишени составляет 61 см, измеренный вдоль центральной линии каждого из двух наборов сходящихся линий [118].

Наиболее полно продукцию для тестирования инфракрасных приборов представляют зарубежные компании: Electro Optical Industries Inc (EOI, США), Santa Barbara Infrared Inc (SBIR, США), Diversified Optical Product Inc (DIOP, США), HGH Infrared (Франция), CI Systems (Израиль) [11, 25].

Американская компания Santa Barbara Infrared (SBIR) специализируется на разработке и выпуске стендов контроля

фотоприемников инфракрасного спектра, их отдельных компонентов, разработке мультиспектральных стендов контроля фотоприемников и оптики, а также специального программного обеспечения. Так, модульная тестовая станция SBIR RTB 3000 предназначена для измерений параметров ИК-детекторов: одноэлементных приемников, линейчатых и матричных многоэлементных фотоприемных устройств. Комплекс RTB 3000 может работать совместно с такими измерительными стендами как, например, Lumitron SVS 2000, SBRC David, а также системами, разработанными Pulse Instruments systems. Для комплексного тестирования тепловизионных приборов компания SBIR предлагает генератор динамической ИК-сцены Mirage-H. Генератор сцены имеет в основе массив размерности 512 x 512, выполненный из тонкопленочных резистивных излучателей площадью 48 мкм² каждый. Эффективный температурный диапазон массива излучателей составляет 285–675 К (3–5 мкм) и 285–500К (8–12 мкм). Температурное разрешение указывается производителем менее, чем 50 мК при температуре 320 К.

Французская компания HGH Infrared systems разрабатывает стенды для контроля фотодетекторов, лабораторных ИК-приборов, тепловизиоров. Стенд BIRD 210 разработан для измерения параметров ИК-фотодетекторов. В состав стенда, помимо оптико-механических компонентов, входят шкаф управления и персональный компьютер с платой видеозахвата и программным обеспечением для обработки и анализа данных.

Альтернативную генератору тепловой сцены SBIR MIRAGE-H конструкцию имеет генератор динамической тепловой сцены DSTS, разработанный OSC (Optical Sciences Corporation). В основе устройства лежит модуляция светового потока массивом микрозеркал, широко распространенная в видимом диапазоне спектра (DMD-технология). Кроме массива микрозеркал, адаптированного для инфракрасного спектра, генератор содержит источник освещения, коллимирующую оптику и

пользовательскую электронику. Массив содержит 848x600 микрозеркал, расположенных с шагом 17 мкм, каждое из которых способно переключаться в два положения («включено», «выключено») с частотой до 4 кГц. Использование DMD-технологии позволяет использовать описанный генератор динамической сцены в широком диапазоне спектра, выбор соответствующих источника освещения и коллимирующей оптической системы дает возможность получать тестовое изображение от УФ до дальнего ИК.

Проанализировав системы тестирования, выявлена необходимость проведения подготовки и выполнения множества настроек, для осуществления экспериментальных замеров, что занимает достаточно времени и ресурсов.

Имеется потребность расширить эти системы контроля и тестирования в рамках ГОСТа за счет тест-объектов так, чтобы в рамках одного эксперимента можно было определить частотно-контрастные характеристики тепловизионных систем наблюдения без дополнительных настроек.

1.4. Основы решения задач тестирования тепловизионных систем наблюдения

При проведении исследования целесообразно рассмотреть фундаментальные физические закономерности, образующие основу для решения задач контроля.

Ряд задач исследования систем контроля тепловизионных систем посвящен анализу тепловых процессов сопутствующих получению теплового изображения.

В работе используется совокупность фундаментальных теорий, позволяющая достаточно полно рассмотреть поставленные задачи.

Для автоматической оценки результатов преобразования эталонного сигнала реальной физической тепловизионной системой наблюдения

необходимо сравнение результатов термограммы тест-объекта с результатами термограммы того же объекта эталонной тепловизионной системой. В реальности необходима имитационная модель тепловизионной системы, по которой может быть произведена оценка основных параметров теплового изображения. Эта модель должна включать две составляющие: модель статических геометрических преобразований эталонного сигнала и модель, описывающая пространственную динамику преобразований, приводящую к потерям разрешения.

Для исследования статических характеристик тепловизионной системы будут использоваться геометрические соотношения, вытекающие из особенностей конструкции исследуемых элементов. При этом, поскольку речь идет об их пространственном расположении, они будут исследоваться в декартовой системе координат. При получении основных статических зависимостей будут использованы следующие системы координат (рис. 1.1):

система координат предметной плоскости $xOyz$, в которой ось x' совпадает с направлением главной оптической оси объектива O и направлена в сторону объектива, ось y направлена поперек сканируемого пространства («слева направо») и параллельна линейному приемнику излучения, который осуществляет электронное сканирование сцены, ось z направлена вдоль сканируемого пространства («сверху вниз») и параллельна направлению механического сканирования;

система координат $XO'YZ$, связана с приемником излучения, в которой определяются координаты пикселей и величины заднего отрезка объектива, ось X совпадает с главной оптической осью объектива и направлена от приемника излучения к объективу, ось Y проходит через центры фоточувствительных ячеек приемника излучения, и ее направление совпадает с направлением опроса ячеек при электронном сканировании, ось Z перпендикулярна осям X и Y .

Все системы координат являются правыми.

Плоскости Oyz , объектива и $O'YZ$ являются параллельными. Если точка A помещена в системе координат в точку с координатами $(0, y_A, z_A)$, то в соответствии с законами геометрической оптики, координаты проекции определяются по зависимости:

$$(0, Y_A, Z_A) = \frac{L'}{L}(0, y_A, z_A) = \frac{L-f}{f}(0, y_A, z_A) = \frac{f'}{L'-f'}(0, y_A, z_A), \quad (1.19)$$

где L - задний отрезок объектива; L' - передний отрезок объектива; f - задний фокус объектива; f' - передний фокус объектива.

Исследование пространственной динамики преобразований сигнала в сканирующих системах связано с решением дифференциальных уравнений вида

$$F(\Phi(y, z), E(Y, Z), \nabla E(Y, Z), \nabla^2 E(Y, Z), \dots) = 0, \quad (1.20)$$

где $\Phi(y, z)$ - оптический сигнал в предметной плоскости; $E(Y, Z)$ - оптический сигнал в плоскости расположения приемника излучения;

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial Y}, \frac{\partial}{\partial Z} \right); \quad \nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial Y^2}, \frac{\partial^2}{\partial Z^2} \right), \dots$$

Для решения дифференциальных уравнений существует метод Коши. Согласно этому методу уравнение (1.20) заменяется на алгебраическое уравнение с помощью применения к правой части равенства (1.20) интегрального преобразования вида

$$\tilde{F}(\varpi_y, \varpi_z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F(\Phi(y, z), E(Y, Z), \nabla E(Y, Z), \nabla^2 E(Y, Z), \dots) \phi(Y, Z, \varpi_y, \varpi_z) dY dZ = 0, \quad (1.21)$$

где $\phi(Y, Z, \varpi_y, \varpi_z)$ - двумерная базисная функция, называемая ядром преобразования; ϖ_y, ϖ_z - пространственные частоты сигнала по координатам Y и Z , соответственно; $\tilde{F}(\varpi_y, \varpi_z)$ - пространственный спектр сигнала по базису $\phi(Y, Z, \varpi_y, \varpi_z)$.

После разрешения получившегося алгебраического уравнения относительно $\tilde{E}(\omega_y, \omega_z)$, с помощью обратного преобразования

$$E(Y, Z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(\omega_y, \omega_z) \phi^{-1}(Y, Z, \omega_y, \omega_z) d\omega_y d\omega_z \quad (1.22)$$

где $\phi^{-1}(Y, Z, \omega_y, \omega_z)$ - ядро обратного преобразования, определяется вид сигнала $E(Y, Z)$.

В качестве ядра прямого и обратного преобразования ниже будут использованы гармонические функции вида

$$\phi(Y, Z, \omega_y, \omega_z) = \frac{1}{2\pi} \exp(-j\omega_y Y - j\omega_z Z); \quad (1.23)$$

$$\phi^{-1}(Y, Z, \omega_y, \omega_z) = \frac{1}{2\pi} \exp(j\omega_y Y + j\omega_z Z), \quad (1.24)$$

где $j = \sqrt{-1}$; $\omega_y = \frac{2\pi}{n_y}$, $\omega_z = \frac{2\pi}{n_z}$ - круговые пространственные частоты по координатам Y и Z , соответственно; n_y , n_z - линейные пространственные частоты в парах линий на миллиметр.

1.5. Постановка задачи исследования

Использование тепловых изображений включают в себе как наглядность в, практически, любых погодных условиях, так и информацию о тепловом поле исследуемого объекта.

В настоящее время актуальной задачей является снижение расходов на разработку и тестирование систем теплового видения, применяемых во многих отраслях народного хозяйства, электроэнергетике, металлургии, химической промышленности, оборонной сфере, в системах экологического мониторинга и т.п. Одним из направлений снижения расходов является контроль качества систем формирования тепловых картин наблюдаемых сцен при помощи устройств, позволяющих имитировать основные параметры

теплового излучения потенциальных объектов наблюдения (внешний вид, интенсивность излучения различных зон объекта, динамику изменения характеристик излучения и др.).

В результате обобщения материала данного раздела можно сделать следующий ряд заключений:

1. Среди существующих решений, позволяющих тестировать тепловизионные системы наблюдения, имеются удовлетворительные, однако, известные структуры могут быть использованы в качестве базовых для усовершенствования.

2. Известны фундаментальные теории, на основе которых возможно аналитическое моделирование процессов, обуславливающих создание тепловых образов наблюдаемых сцен.

3. Известны теоретические решения отдельных задач, связанных с процессами контроля формирования тепловых образов сцен.

Таким образом, актуальной задачей является создание системы контроля качества теплового изображения на основе известных прототипов, с внесением изменений в известные структуры, обеспечивающих удовлетворительное функционирование устройства.

При внесении изменений в известные структуры, для сокращения расходов на экспериментальные исследования, целесообразно провести предварительное аналитическое моделирование. Следовательно, необходимо построение математической модели процессов, протекающих в системах формирования теплового изображения. В основу модели могут быть положены как фундаментальные физические теории, так и имеющиеся решения отдельных задач, в комплексе образующих модель системы.

При исследовании способов контроля тепловизионных систем наблюдения необходимо построение аналитической модели протекающих в них процессов. Созданная модель должна быть наглядной, обозримой, легкой в оперировании.

В изучаемом объекте наблюдается совокупность большого числа процессов, имеющих разнообразный физический смысл. Таким образом, построение модели должно проходить в следующей последовательности:

1) Построение модели преобразования наблюдаемой тепловой сцены в цифровой образ с разделением по этапам преобразования.

2) Разработка требований к элементам генератора эталонных образов сцен, используемым для контроля потерь информации на отдельных этапах преобразования.

3) Разработка методов выявления потерь информации вследствие неидеальности тепло-сигнальной характеристики, наличия дисторсии и ограниченности разрешающей способности тестируемой тепловизионной системы наблюдения.

4) Разработка обобщенной структуры генератора тепловых сцен, и требований к программному обеспечению по управлению процессом тестирования.

5) Разработка программного обеспечения обработки цифровых образов сцен и контроля параметров тестируемой системы.

6) Проведение экспериментальных исследований по верификации аппаратной части генератора эталонных сигналов и программного обеспечения;

Решения описанных задач представляют собой методологию расчета систем формирования тепловых изображений основанных на принципе матричной организации носителя изображения. Однако описанным системам необходимо привести в соответствие техническое решение, удовлетворяющее полученным в результате использования методологии параметрам.

1.6. Выводы

1. На основании системного анализа проблемы тестирования тепловизионных систем наблюдения сделан вывод о том, что их

классификация по принципу «годен/не годен» может быть проведена с помощью аппаратно-программного комплекса генерации эталонных тестовых сигналов и обработки цифровых образов эталонных сцен, формируемых генератором и наблюдаемых тепловизионной системой наблюдения.

2. Сформулирована концепция физического моделирования генератора эталонных образов сцен, заключающаяся в том, что генерируемые тепловые образы должны быть ориентированы на тестирование отдельных протекающих в системе физических процессов, а их реализация должна быть достаточно простой.

3. На основании сформулированной концепции произведена постановка цели диссертации – повышение эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения за счет создания управляемого аппаратно-программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой.

2. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО ЦИФРОВОГО ОБРАЗА СЦЕНЫ

2.0. Введение

Как было показано в разделе 1, генератор эталонного теплового образа сцены является одним из важных элементов системы тестирования. При контроле тепловой сигнал, излучаемый генератором, воспринимается тепловизионной системой наблюдения. Далее образы сцены, полученные на выходах реального и виртуального сканирующих датчиков, сравниваются между собой, на основании чего производится определение годности или негодности сканирующего датчика. Для работы виртуальной системы необходима модель генератора тепловых сигналов, и модель формирования цифрового образа сцены, которая может быть построена на основании исследования физических явлений, протекающих в источниках излучения в ИК диапазоне, и узлах и блока сканирующей системы.

2.1. Оптическая модуляция излучения в тепловизионной системе наблюдения

2.1.1. Источник излучения

Источник излучения (излучатель) характеризуется температурой, которая представляет собой температуру такого абсолютно черного тела, которое имеет распределение энергии в спектре наиболее близкое к распределению энергии излучения источника.

Источники теплового излучения принято делить по принципу действия на источники, излучающие тепло при нагреве по принципу абсолютно черного тела и источники с квантовым выходом (лазерные, светодиодные) [4, 8, 49].

Будем считать, что абсолютно черное тело представляет собой плоскую излучающую поверхность, которая описывается уравнением

$$\Omega(x', y', z') = 0, \quad (2.1)$$

где x', y', z' - координаты системы координат, связанной с источником; Ω - некоторая скалярная функция.

Модель излучения положена в основу формирования структур эталонных генераторов тепловых сцен и приведена на рис. 2.1.

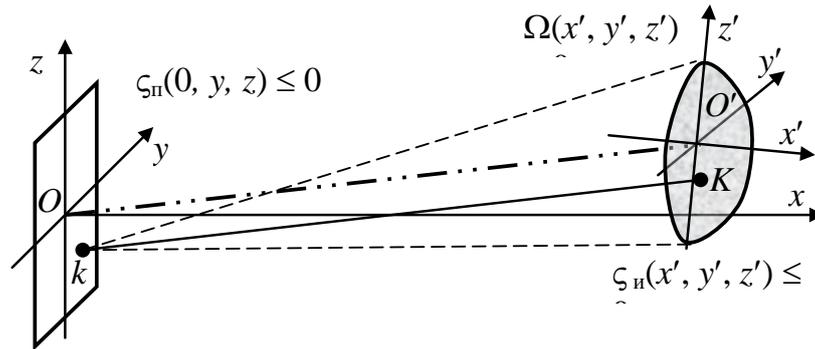


Рис. 2.1. Модель теплового излучения

Излучающая поверхность ограничена линией пересечения с поверхностью

$$\zeta_n(x', y', z') \leq 0. \quad (2.2)$$

Единичная нормаль к поверхности в точке K с координатами (x'_K, y'_K, z'_K) определяется направляющими косинусами

$$\begin{aligned} \mathbf{v}'_{\Omega K} &= (v'_{\Omega Kx}, v'_{\Omega Ky}, v'_{\Omega Kz}) = \\ &= \left(\frac{-\Omega_x}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}}, \frac{-\Omega_y}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}}, \frac{-\Omega_z}{\sqrt{\Omega_x^2 + \Omega_y^2 + \Omega_z^2}} \right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\text{где } \Omega_{Kx} = \frac{\partial \Omega}{\partial x'} \Big|_{\substack{x' = x'_K \\ y' = y'_K \\ z' = z'_K}}; \quad \Omega_{Ky} = \frac{\partial \Omega}{\partial y'} \Big|_{\substack{x' = x'_K \\ y' = y'_K \\ z' = z'_K}}; \quad \Omega_{Kz} = \frac{\partial \Omega}{\partial z'} \Big|_{\substack{x' = x'_K \\ y' = y'_K \\ z' = z'_K}}.$$

В частном случае можно считать излучающую поверхность полностью расположенной в плоскости $y'O'z'$. В этом случае:

сама поверхность описывается уравнением

$$x' = 0; \quad (2.4)$$

ограничивающая поверхность описывается неравенством

$$\zeta_{\text{и}}(0, y', z') \leq 0; \quad (2.5)$$

единичная нормаль к поверхности одинакова во всех точках и определяется направляющими косинусами

$$\nu'_{\Omega K} = (1, 0, 0). \quad (2.6)$$

В общем случае система координат $x'O'y'z'$ размещается в точке с координатами x_a, y_a, z_a и пересчет координат точки K из системы $x'O'y'z'$ в систему $xOyz$ осуществляется следующим образом:

$$\begin{pmatrix} x_K \\ y_K \\ z_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos_{x'x} & \cos_{y'x} & \cos_{z'x} \\ \cos_{x'y} & \cos_{y'y} & \cos_{z'y} \\ \cos_{x'z} & \cos_{y'z} & \cos_{z'z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x'_K \\ y'_K \\ z'_K \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

где $\cos_{x'x}, \cos_{x'y}, \cos_{x'z}$ - направляющие косинусы оси x' в системе $xOyz$;

$\cos_{y'x}, \cos_{y'y}, \cos_{y'z}$ - направляющие косинусы оси y' в системе $xOyz$;

$\cos_{z'x}, \cos_{z'y}, \cos_{z'z}$ - направляющие косинусы оси z' в системе $xOyz$;

x'_K, y'_K, z'_K - координаты точки K в системе координат $x'O'y'z'$; x_K, y_K, z_K - координаты точки K в системе $xOyz$.

Будем предполагать, что излучение из каждой точки поверхности (2.1), например, точки K , обладает осевой симметрией относительно нормали $\nu'_{\Omega K}$ к излучающей поверхности, причем интенсивность излучения из точки K с координатами (x'_K, y'_K, z'_K) в направлении угла $\alpha_{\text{и}}$ к нормали, определяется по зависимости $I_{\text{и}}(x'_K, y'_K, z'_K, \alpha_{\text{и}}, \lambda)$ (рис. 2.2) [8].

Произвольная прямая, исходящая из точки K , в параметрической форме описывается уравнением

$$\begin{aligned} x' &= \nu_{Kkx} \zeta + x'_K; \\ y' &= \nu_{Kky} \zeta + y'_K; \\ z' &= \nu_{Kkz} \zeta + z'_K, \end{aligned} \quad (2.8)$$

где $v_{Kkx}, v_{Kky}, v_{Kkz}$ - проекции единичного вектора, параллельного прямой Kk (направляющего вектора прямой) на оси $x'O'y'z'$; ζ - параметр.

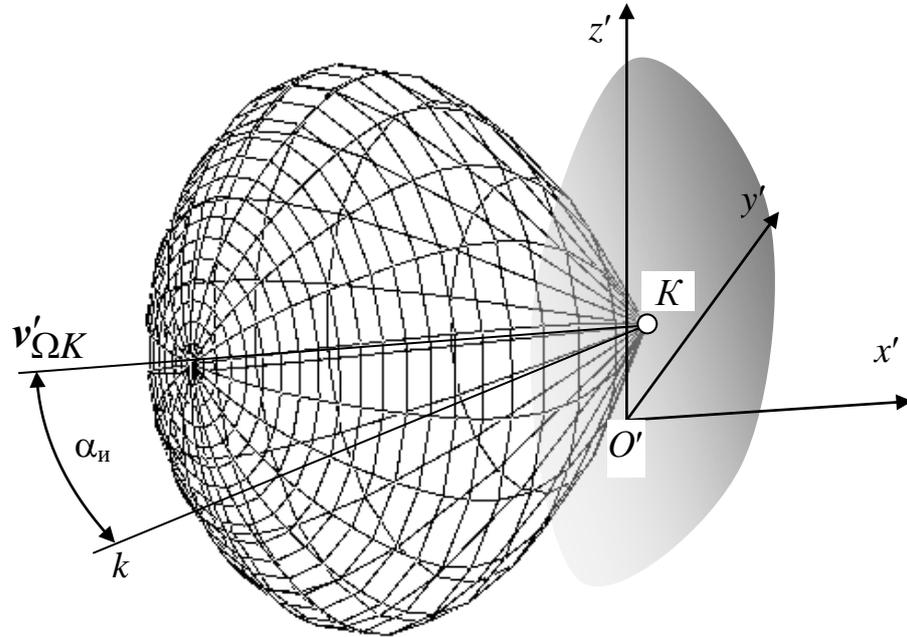


Рис. 2.2. Индикатриса излучения

Угол между нормалью к излучающей поверхности и прямой Kk , дает угол $\alpha_{и}$:

$$\alpha_{и} = \arccos \frac{v_{Kkx}v_{\Omega Kx} + v_{Kky}v_{\Omega Ky} + v_{Kkz}v_{\Omega Kz}}{\sqrt{v_{Kkx}^2 + v_{Kky}^2 + v_{Kkz}^2} \cdot \sqrt{v_{\Omega Kx}^2 + v_{\Omega Ky}^2 + v_{\Omega Kz}^2}}. \quad (2.9)$$

При построении уравнения поверхности наблюдаемой тепловой сцены будем считать, что центр O системы координат, связанной с наблюдаемой сценой помещен в геометрический центр сцены, ось x направлена по нормали к поверхности в сторону объектива, а сама сцена ограничена прямоугольником, который включает размеры наблюдаемой сцены, либо полосы, с которой изображение проецируется на линейку фоточувствительных элементов преобразователя теплового излучения. Ось y системы координат параллельна продольной оси симметрии фотоэлектронного преобразователя, а ось z направлена в сторону

механического сканирования (если сканирование производится матричным фотоэлектронным преобразователям, то оси x и y параллельны сторонам матрицы).

Таким образом, система уравнения и неравенств, описывающих поверхность сцены, имеет вид:

$$x = 0; \quad (2.10)$$

$$|y| \leq \Delta_y; \quad |z| \leq \Delta_z, \quad (2.11)$$

где $2\Delta_y \times 2\Delta_z$ - размеры области, которая в текущий момент сканируется.

Пусть в системе имеется N источников излучения, причем с n -м источником связана система координат $x'_n O'_n y'_n z'_n$, центр которой имеет координаты x_{an}, y_{an}, z_{an} . Тогда между точкой k поверхности объекта, имеющей координаты $0, y_k, z_k$, на которые накладываются ограничения $|y_k| \leq \Delta_y, |z_k| \leq \Delta_z$, и точкой K_n n -го источника, имеющего координаты $x'_{Kn}, y'_{Kn}, z'_{Kn}$ формируется луч, который описывается уравнениями в параметрической форме

$$\begin{aligned} x &= v_{Knkx} \zeta; \\ y &= v_{Knky} \zeta + y_k; \\ z &= v_{Knkz} \zeta + z_k, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где $v_{Knkx}, v_{Knky}, v_{Knkz}$ - направляющие косинусы луча;

$$\begin{aligned} & (v_{Knkx}, v_{Knky}, v_{Knkz}) = \\ & = \frac{1}{\sqrt{x_{Kn}^2 + (y_k - y_{Kn})^2 + (z_k - z_{Kn})^2}} \left[x_{Kn}, y_k - y_{Kn}, z_k - z_{Kn} \right] \end{aligned} \quad (2.13)$$

x_{Kn}, y_{Kn}, z_{Kn} - координаты точки K_n в системе координат $xOyz$, рассчитываемые по зависимости (2.7).

Этот луч составляет с нормалью к n -й ограниченной излучающей поверхностью

$$\hat{\Omega}_n(x, y, z) = 0, \quad \hat{i}(x, y, z) \leq 0 \quad (2.14)$$

определяемой направляющими

$$\mathbf{v}_{\Omega Kn} = (v_{\Omega Knx}, v_{\Omega Kny}, v_{\Omega Knz}) = \left(\frac{-\hat{\Omega}_{nx}}{\sqrt{\hat{\Omega}_{nx}^2 + \hat{\Omega}_{ny}^2 + \hat{\Omega}_{nz}^2}}, \frac{-\hat{\Omega}_{ny}}{\sqrt{\hat{\Omega}_{nx}^2 + \hat{\Omega}_{ny}^2 + \hat{\Omega}_{nz}^2}}, \frac{-\hat{\Omega}_{nz}}{\sqrt{\hat{\Omega}_{nx}^2 + \hat{\Omega}_{ny}^2 + \hat{\Omega}_{nz}^2}} \right), \quad (2.15)$$

угол

$$\alpha_n = \arccos \frac{v_{Knkx} v_{\Omega Knx} + v_{Kny} v_{\Omega Kny} + v_{Knkz} v_{\Omega Knz}}{\sqrt{v_{Knkx}^2 + v_{Kny}^2 + v_{Knkz}^2} \cdot \sqrt{v_{\Omega Knx}^2 + v_{\Omega Kny}^2 + v_{\Omega Knz}^2}}, \quad (2.16)$$

где $\hat{\Omega}_n(x, y, z)$ - зависимость, которая получается из левой части зависимости (2.1) для n -й излучающей поверхности подстановкой вместо координат x', y', z' их значений в системе x, y, z , выраженных через (2.7); $\hat{i}(x, y, z)$ - неравенство, полученной из левой части неравенства (2.2) для n -й излучающей поверхности подстановкой вместо координат x', y', z' их значений в системе x, y, z ;

$$\hat{\Omega}_{Knx} = \frac{\partial \hat{\Omega}_n}{\partial x} \Bigg|_{\substack{x = x_{Kn} \\ y = y_{Kn} \\ z = z_{Kn}}}; \quad \hat{\Omega}_{Kny} = \frac{\partial \hat{\Omega}_n}{\partial y} \Bigg|_{\substack{x = x_{Kn} \\ y = y_{Kn} \\ z = z_{Kn}}}; \quad \hat{\Omega}_{Knz} = \frac{\partial \hat{\Omega}_n}{\partial z} \Bigg|_{\substack{x = x_{Kn} \\ y = y_{Kn} \\ z = z_{Kn}}}, \quad (2.17)$$

В точке k , принадлежащей поверхности приемника теплового излучения, полезная облученность складывается из облученностей, создаваемых всеми элементарными источниками:

$$E_1(0, y_k, z_k, \lambda) = \sum_{n=1}^N \kappa_{1n} \int_{\substack{\hat{\Omega}_n(x, y, z) = 0 \\ \hat{\zeta}_n(x, y, z) < 0}} \iota_n[x, y, z, \alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k), \lambda] dx dy dz, \quad (2.18)$$

где $\iota_n[x, y, z, \alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k), \lambda]$ - индикатриса интенсивности излучения n -го источника из точки с координатами x, y, z в направлении угла $\alpha_n(x, 0, y, y_k, z, z_k)$ между нормалью к поверхности в указанной точке и лучом, направленным в точку k ; κ - коэффициент пропорциональности.

2.2. Характеристики среды распространения

При работе в реальных условиях показатель преломления среды по ходу лучей может изменяться. В частности, это происходит в системах, работающих на больших дальностях в реальной атмосфере. Изменение может происходить за счет разности температур и/или влажности воздушной массы в разных точках пространства.

При взаимодействии излучения со средой имеет место поглощение и рассеяние. Рассеяние инфракрасного излучения при прохождении через среду зависит от соотношения между длиной волны излучения и размером рассеивающих частиц, а также от концентрации частиц и их комплексного показателя преломления. Если размер частиц мал по сравнению с длиной волны излучения, а расстояние между частицами больше длины волны и частицы расположены беспорядочно, то имеет место рэлеевское рассеяние. Рассеянный лучистый поток характеризуют индикатрисой рассеяния, представляющей распределение силы рассеянного излучения в пространстве [8].

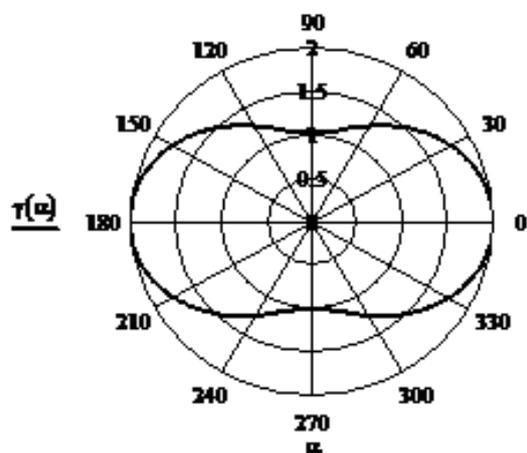


Рис. 2.3. Индикатриса рэлеевского рассеяния

Частными случаями рассеяния излучения являются отражение от поверхности раздела двух сред и преломление излучения через эту поверхность раздела [8, 49].

В первом приближении можно рассматривать неоднородность параметров воздушной массы при следующих допущениях:

существует четкая граница раздела параметров сред с различными скоростями прохождения теплового излучения через среду;

граница раздела сред представляет собой плоскость;

наличие неоднородности воздушной массы начинает сказываться, если нормаль к границе раздела сред имеет некоторый угол с направлением распространения излучения, если лучи падают перпендикулярно плоскости, то поверхность раздела сред не оказывает влияние на ход лучей.

Типичные случаи влияния неоднородности среды при распространении излучения на точность работы тепловизионной системы наблюдения приведены на рис. 2.4, где рассмотрены плоские случаи изломов осей.

Плоская преломляющая поверхность, наклоненная под углом α к падающему пучку излучения (рис. 2.4 а) дает излом направления луча, описываемый законом Снеллиуса (закон преломления):

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha'} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (2.19)$$

где α - угол падения; α' - угол преломления; n_1 - абсолютный показатель преломления воздушной среды падающего луча; n_2 - абсолютный показатель преломления воздушной среды преломленного луча.

Видимое смещение точки K определяется зависимостью:

$$y_{cK} - y_{cK'} = x_{cK1} \tan \left(\alpha - \arcsin \frac{n_1 \sin \alpha}{n_2} \right), \quad (2.20)$$

где x_{cK1} - расстояние от точки K до точки пересечения луча с границей раздела воздушной среды с разными абсолютными показателями преломления.

На практике вместо абсолютных показателей преломления n_1 и n_2 используют n_{21} - относительный показатель преломления среды

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.21)$$

С учетом (2.20), (2.21) смещение изображения точки K на плоскости фотоэлементов приемника излучения, вызванное неоднородностью воздушной среды, выражается в виде:

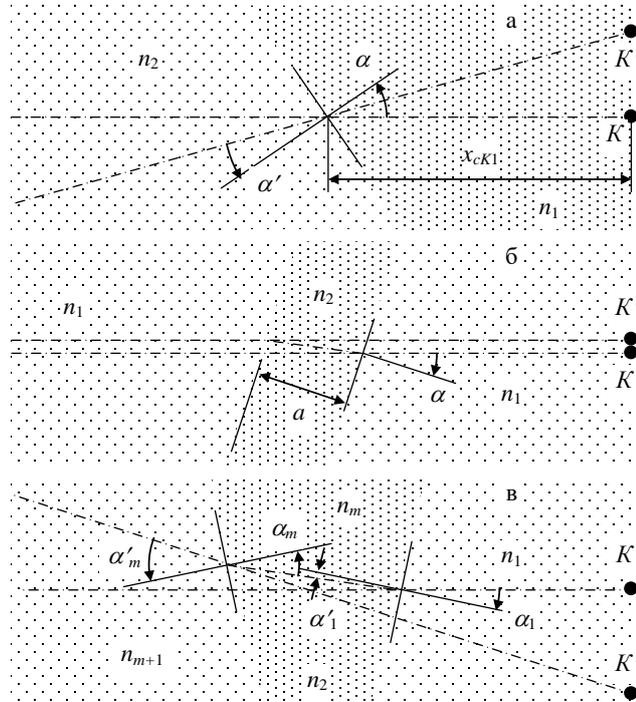


Рис. 2.4. Неоднородность среды распространения излучения: а - с одной границей; б - с плоскопараллельным объемом; в - общий случай

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\varepsilon}_{YK} = \frac{f'x_{cK1} \operatorname{tg} \left(\alpha_{yc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yc}}{n_{21}} \right)}{\tilde{\sigma}_{\tilde{n}\tilde{E}}}; \\ \tilde{\varepsilon}_{ZK} = \frac{f'x_{cK1} \operatorname{tg} \left(\alpha_{zc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zc}}{n_{21}} \right)}{\tilde{\sigma}_{\tilde{n}\tilde{E}}}. \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Таким образом, параметрами для расчета смещения являются: относительный показатель преломления n_{21} ; угол α_{yc} (α_{zc}); расстояние до границы x_{cK1} .

С учетом принятых параметров, выражение для учета неоднородности среды распространения излучения принимает вид:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{YK} &= \sigma_{xcK1Y} \varepsilon_{xcK1} + \sigma_{\alpha Y} \varepsilon_{\alpha Y} + \sigma_{n21Y} \varepsilon_{n21}; \\ \varepsilon_{YK} &= \sigma_{xcK1Z} \varepsilon_{xcK1} + \sigma_{\alpha Z} \varepsilon_{\alpha Z} + \sigma_{n21Z} \varepsilon_{n21},\end{aligned}\quad (2.23)$$

где

$$\begin{aligned}\sigma_{n21Y} &= \frac{f'x_{cK1} \sin \alpha_{yc}}{x_{cK} Y_c n_{21} \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc}} \cos^2 \left(\alpha_{yc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yc}}{n_{21}} \right)}; \\ \sigma_{xcK1Y} &= \frac{f'x_{cK1} \operatorname{tg} \left(\alpha_{yc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yc}}{n_{21}} \right)}{x_{cK} Y_c}; \\ \sigma_{\alpha Y} &= \frac{f'x_{cK1} \left(1 - \frac{\cos \alpha_{yc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc}}} \right)}{x_{cK} Y_c \cos^2 \left(\alpha_{yc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yc}}{n_{21}} \right)}; \\ \sigma_{n21Z} &= \frac{f'x_{cK1} \sin \alpha_{zc}}{x_{cK} Z_c n_{21} \sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc}} \cos^2 \left(\alpha_{zc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zc}}{n_{21}} \right)}; \\ \sigma_{xcK1Z} &= \frac{f'x_{cK1} \operatorname{tg} \left(\alpha_{zc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zc}}{n_{21}} \right)}{x_{cK} Z_c}; \\ \sigma_{\alpha Z} &= \frac{f'x_{cK1} \left(1 - \frac{\cos \alpha_{zc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc}}} \right)}{x_{cK} Z_c \cos^2 \left(\alpha_{zc} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zc}}{n_{21}} \right)}.\end{aligned}$$

Плоскопараллельный объем толщиной a , наклоненный под углом α к падающему пучку излучения (рис. 2.4 б), дает смещение координаты точки K , выражаемое зависимостью:

$$y_{cK} - y_{cK'} = a \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha}} \right), \quad (2.24)$$

Смещение теплового образа точки K на плоскости элементов приемника излучения, вызванное неоднородностью среды распространения излучения, выражается в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{\varepsilon}_{YK} = \frac{f'a_{xc} \sin \alpha_{yc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{yc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc}}} \right)}{x_{cK}}; \\ \tilde{\varepsilon}_{ZK} = \frac{f'a_{yc} \sin \alpha_{zc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{zc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc}}} \right)}{y_{cK}}. \end{array} \right. \quad (2.25)$$

Таким образом, параметрами для расчета смещения являются: относительный показатель преломления n_{21} ; угол α_{yc} (α_{zc}); толщина плоскопараллельного объема a_{yc} (a_{zc}).

С учетом принятых параметров, (2.25) принимает вид:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{YK} &= \sigma_{aY} \varepsilon_{aY} + \sigma_{\alpha Y} \varepsilon_{\alpha Y} + \sigma_{n21Y} \varepsilon_{n21}; \\ \varepsilon_{YK} &= \sigma_{aZ} \varepsilon_{aZ} + \sigma_{\alpha Z} \varepsilon_{\alpha Z} + \sigma_{n21Z} \varepsilon_{n21}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{aY} &= \frac{f'a_{yc} \sin \alpha_{yc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{yc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc}}} \right)}{x_{cK} Y_c}; \quad \sigma_{n21Y} = \frac{f'a_{yc} n_{21} \cos^2 \alpha_{yc}}{x_{cK} Y_c \sqrt{(n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc})^3}}; \\ \sigma_{\alpha Y} &= \frac{f'a_{yc}}{x_{cK} Y_c} \cdot \left[\cos \alpha_{yc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{yc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc}}} \right) - \sin^2 \alpha_{yc} \frac{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc} - \sin \alpha_{yc} \cos \alpha_{yc}}{\sqrt{(n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{yc})^3}} \right]; \\ \sigma_{aZ} &= \frac{f'a_{zc} \sin \alpha_{zc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{zc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc}}} \right)}{x_{cK} Z_c}; \quad \sigma_{n21Z} = \frac{f'a_{zc} n_{21} \cos^2 \alpha_{zc}}{x_{cK} Z_c \sqrt{(n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc})^3}}; \\ \sigma_{\alpha Z} &= \frac{f'a_{zc}}{x_{cK} Y_c} \cdot \left[\cos \alpha_{zc} \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha_{zc}}{\sqrt{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc}}} \right) - \sin^2 \alpha_{zc} \frac{n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc} - \sin \alpha_{zc} \cos \alpha_{zc}}{\sqrt{(n_{21}^2 - \sin^2 \alpha_{zc})^3}} \right]. \end{aligned}$$

В общем случае смещение определяется как сумма смещений на отдельных участках, определяемая в соответствии с (2.26):

$$\begin{cases} \tilde{\varepsilon}_{YK} = \frac{f'}{x_{cK}} \sum_{i=1}^m \frac{x_{cKi} \operatorname{tg} \left(\alpha_{yci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yci}}{n_{i+1,i}} \right)}{x_{cK}}; \\ \tilde{\varepsilon}_{ZK} = \frac{f'}{x_{cK}} \sum_{i=1}^m \frac{x_{cKi} \operatorname{tg} \left(\alpha_{zci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zci}}{n_{i+1,i}} \right)}{x_{cK}}. \end{cases} \quad (2.27)$$

где x_{cKi} - длина i -го участка, на которые разбивается путь луча при прохождении неоднородной среды; α_{yci} - угол падения луча на левую границу i -го участка; $n_{i+1,i}$ - относительный показатель преломления среды ($i+1$)-го участка относительно среды i -го участка.

Выражение для учета неоднородности среды распространения излучения принимает вид суммы погрешностей на каждом участке:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{YK} &= \sum_{i=1}^m \sigma_{xcKYi} \varepsilon_{xcKYi} + \sigma_{\alpha Yi} \varepsilon_{\alpha Yi} + \sigma_{n21Yi} \varepsilon_{n21i}; \\ \varepsilon_{YK} &= \sigma_{xcKZi} \varepsilon_{xcKZi} + \sigma_{\alpha Zi} \varepsilon_{\alpha Zi} + \sigma_{n21Zi} \varepsilon_{n21i}, \end{aligned} \quad (2.28)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{n21Yi} &= \frac{f' x_{cKi} \sin \alpha_{yci}}{x_{cK} Y_c n_{i+1,i} \sqrt{n_{i+1,i}^2 - \sin^2 \alpha_{yci}} \cos^2 \left(\alpha_{yci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yci}}{n_{i+1,i}} \right)}; \\ \sigma_{xcKZ} &= \frac{f' x_{cKi} \operatorname{tg} \left(\alpha_{zci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zci}}{n_{i+1,i}} \right)}{x_{cK} Z_c}; \quad \sigma_{xcKY} = \frac{f' x_{cKi} \operatorname{tg} \left(\alpha_{yci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yci}}{n_{i+1,i}} \right)}{x_{cK} Y_c}; \\ \sigma_{n21Zi} &= \frac{f' x_{cKi} \sin \alpha_{zci}}{x_{cK} Z_c n_{i+1,i} \sqrt{n_{i+1,i}^2 - \sin^2 \alpha_{zci}} \cos^2 \left(\alpha_{zci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zci}}{n_{i+1,i}} \right)}; \end{aligned}$$

$$\sigma_{\alpha_{Yi}} = \frac{f' x_{cKi} \left(1 - \frac{\cos \alpha_{yci}}{\sqrt{n_{i+1,i}^2 - \sin^2 \alpha_{yci}}} \right)}{x_{cK} Y_c \cos^2 \left(\alpha_{yci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{yci}}{n_{i+1,i}} \right)}; \quad \sigma_{\alpha_{Zi}} = \frac{f' x_{cKi} \left(1 - \frac{\cos \alpha_{zci}}{\sqrt{n_{i+1,i}^2 - \sin^2 \alpha_{zci}}} \right)}{x_{cK} Z_c \cos^2 \left(\alpha_{zci} - \arcsin \frac{\sin \alpha_{zci}}{n_{i+1,i}} \right)}.$$

2.3. Формирование теплового цифрового образа сцены на приемнике теплового излучения

2.3.1. Фотометрические характеристики

Качество формируемого сигнала в значительной мере определяется облученностью плоскости расположения чувствительных элементов приемника теплового излучения. Оценим неравномерность уровня облученности чувствительных ячеек по площади приемника теплового излучения. Определим облученность ячейки приемника теплового излучения $E_{k'}$ (рис. 2.5) [12, 28, 95].

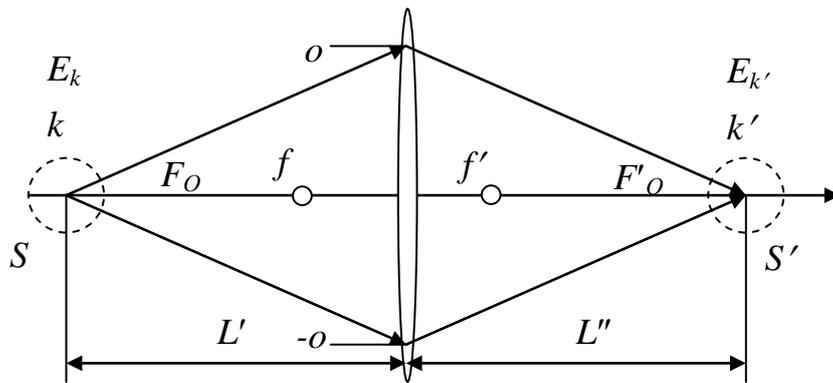


Рис. 2.5. Облученность чувствительной ячейки
приемника теплового излучения

Рассмотрим элементарный участок приемника излучения преобразователя S' , находящийся на оптической оси системы. Лучистый поток F_o , пришедший из точки k во входной зрачок объектива,

рассчитывается по зависимости (2.35). Лучистый поток F'_o , с учетом потерь в объективе определяется в виде

$$F_o = \kappa_o F'_o, \quad (2.29)$$

где κ_o - коэффициент пропускания оптической системы, $0 \leq \kappa_o \leq 1$.

Облученность определяется зависимостью

$$E_{k'} = \frac{\kappa_o F_o}{S'}. \quad (2.30)$$

Обозначим

$$k_o^2 = \frac{S}{S'}, \quad (2.31)$$

где k_o - кратность объектива.

Поток излучения F_o может быть выражен через облученность входного зрачка объектива $E_{зр}$, с учетом того, что он меняется мало, а источник излучения находится на главной оптической оси, перпендикулярной касательной плоскости к передней поверхности объектива в ее центральной точке,

$$F_o = \pi o^2 E_{зр},$$

где o - радиус входного зрачка объектива.

Пусть известны сила излучения I и энергетическая яркость B площадки Δ_s . Тогда

$$E_{зр} = \frac{I}{L^2},$$

где L' - передний отрезок объектива.

Так как $I = BS$, то

$$E_{зр} = \frac{BS}{L^2};$$

$$F_o = \frac{\pi o^2 E_{зр} \Delta_s}{L^2},$$

где B – энергетическая яркость участка S ; I – сила излучения.

С учетом кратности объектива (2.54) облученность

$$E_{K'} = \frac{\pi o^2 B S \kappa_o}{L'^2 S'} = \frac{\pi o_d^2 B \kappa_o}{L'^2 k_o^2}. \quad (2.32)$$

Вспользуемся уравнением Гаусса:

$$\frac{f}{L'} + \frac{f'}{L''} = 1. \quad (2.33)$$

С учетом того, что отношение диаметра входного зрачка $2o$ к фокусному расстоянию, называется относительным отверстием $\frac{2o}{f}$ объектива, окончательно получаем

$$E_{k'} = \frac{E_{k'} \kappa_o}{4(1 + k_o)^2} \left(\frac{2o}{f} \right)^2. \quad (2.34)$$

где κ_o - коэффициент пропускания объектива, $0 \leq \kappa_o \leq 1$; $\frac{2o}{f}$ - относительное отверстие объектива; k_o - кратность объектива.

Найдем облученность по полю в плоскости расположения элементов, если известна облученность в центре поля. При этом рассматривается выходной зрачок объектива диаметром $2o'$ и расстояние от выходного зрачка до плоскости элементов также считается неизменным (рис. 2.6) [12].

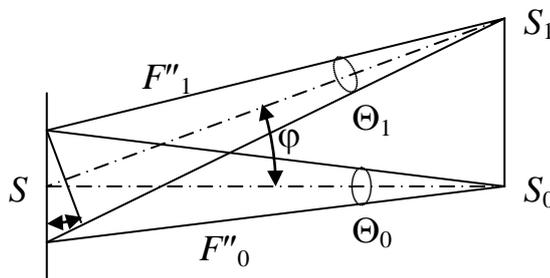


Рис. 2.6. Облученность ячеек, наблюдаемых под углом

Лучистый поток F''_1 распространяется внутри телесного угла Θ_1 и освещает ячейку площади чувствительного элемента S_1 , удаленную от

главной оптической оси. Облученности ячеек чувствительного элемента обратно пропорциональны квадратам расстояний, которые, в свою очередь, пропорциональны косинусу угла φ , под которым наблюдается ячейка S_1 . Площадь выходного зрачка наклонена к исходной площади под углом φ , так же, как и элемент. Следовательно, облученность чувствительного элемента в точке, удаленной от главной оптической оси, определяется по зависимости:

$$E_1 = E_0 \cos^4 \varphi, \quad (2.35)$$

где E_0 – облученность в центре; E_1 - облученность на периферии.

Данный процесс приводит к неравномерности изображения тепловой картины наблюдаемой сцены от центра к краям, что показано на рис. 2.7.

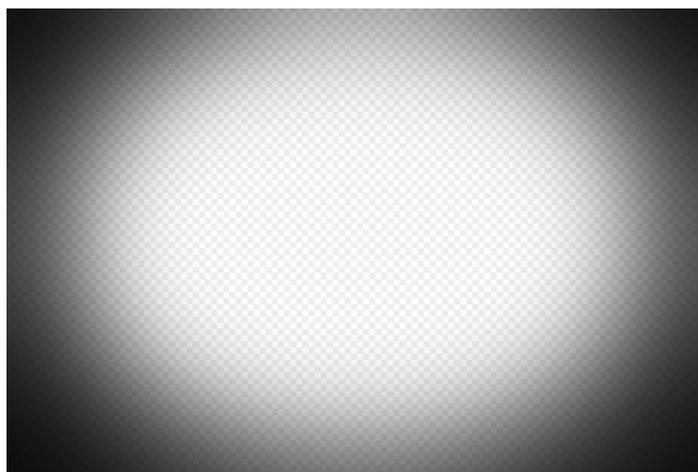


Рис. 2.7. Виньетирование

Вид зависимости (2.35) приведен на рис. 2.8.

Очевидно, что при тестировании оптических систем тепловизионных приборов следует учитывать возможную неравномерность уровня облученности чувствительных ячеек приемника излучения, которая может достигать 10÷15 % по площади входных окон чувствительного прибора.

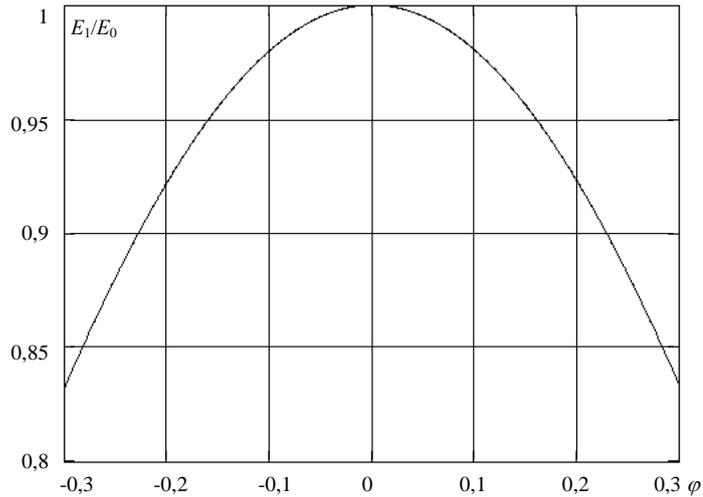


Рис. 2.8. Вид зависимости (2.35)

В тепловизионной системе при прохождении теплового луча через объектив происходит его отклонение, что приводит к смещению проекции точки. Данное явление вызывает искажения теплового цифрового образа, называемое дисторсией.

Рассмотрим облученность чувствительных ячеек на примере точки k (рис. 2.9).

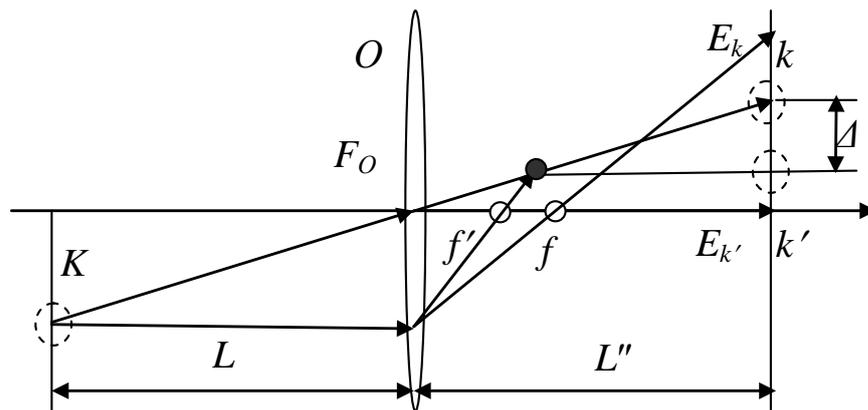


Рис. 2.9. Облученность ячеек в системе с дисторсией

В системе без дисторсии точка K , имеющая координаты $[y_K, z_K]$ проецируется в точку k с координатами $[Y_k, Z_k]$. Облученность в данной точке определяется: $E'(Y, Z)$.

В системе с дисторсией отклонение теплового луча приводит к смещению проекции точки K в точку k' с координатами $[Y_{k'}, Z_{k'}]$. Облученность в данной точке определяется как: $E''(Y + \varphi_Y(Y, Z), Z + \varphi_Z(Y, Z))$.

Коэффициент увеличения передачи:

$$\frac{Z_k}{z_K} = \frac{Y_k}{y_K}$$

$$\frac{Y_k + \varphi_Y(Y_k, Z_k)}{Z_k + \varphi_Z(Y_k, Z_k)}$$

Δ – коэффициент дисторсии тепловизионной системы. Если $\Delta > 0$, изображение вытягивается к краям поля и дисторсию называют подушкообразной (рис. 2.10). Если $\Delta < 0$, увеличение становится меньше к краям поля и дисторсию называют бочкообразной.

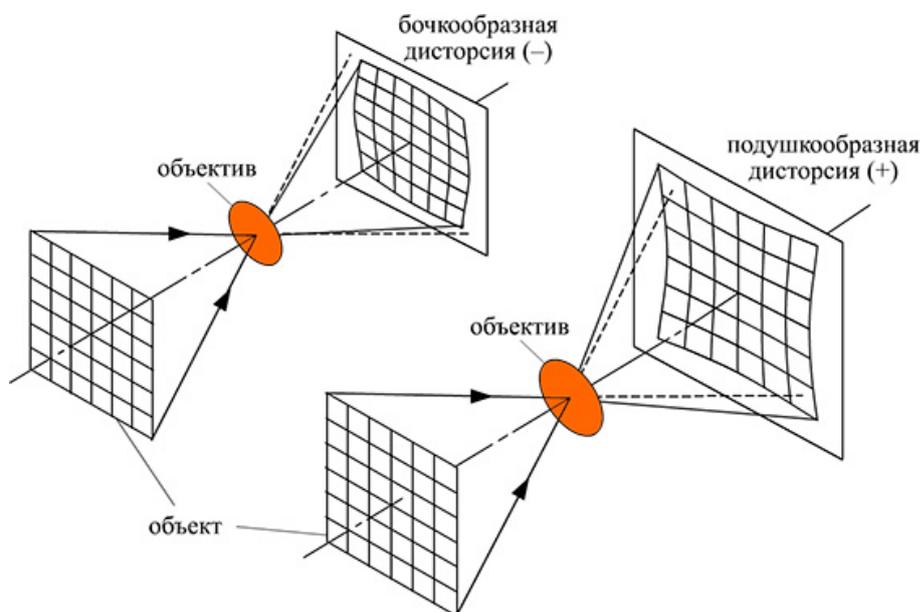


Рис. 2.10. Виды дисторсий

2.3.2. Пространственная динамика сигнала

Рассмотрим сигнал облученности в плоскости расположения чувствительных ячеек приемника теплового излучения. Пусть изображается точка k , которая проецируется в точку k' (рис. 2.5).

В идеальном случае изображение k' точки k можно представить в виде δ -функции Дирака с круговой симметрией (рис.2.11):

$$\hat{w}_\delta(\rho) = \Delta_{E'} \cdot \delta(\rho), \quad (2.36)$$

где $\Delta_{E'}$ - перепад облученности (динамический диапазон) в точке k' и ее окрестностях; $\delta(\rho)$ - δ -функция Дирака, имеющая вид

$$\delta(\rho) = \begin{cases} \infty & \text{при } \rho = 0, 0 \leq \gamma \leq 2\pi; \\ 0 & \text{при } \rho > 0, 0 \leq \gamma \leq 2\pi; \end{cases} \quad (2.37)$$

ρ и γ - линейная и угловая координаты полярной системы координат с центром в точке k' .

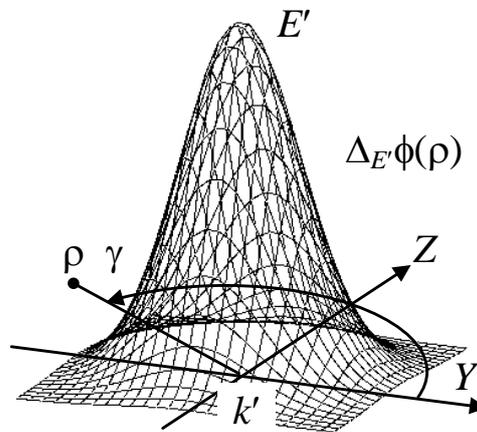


Рис. 2.11. Изображение точки в плоскости расположения приемника теплового излучения

В реальности изображение точки определяется кружком рассеяния объектива, который, в свою очередь, определяется такими параметрами, как глубина резкости δ_f и относительное отверстие $\frac{2o}{f}$ объектива.

Диаметр кружка рассеяния 2σ определяется по зависимости

$$2\sigma = \frac{\delta_f f}{2o}, \quad (2.38)$$

и является паспортной характеристикой объектива.

Отношение

$$\frac{\hat{w}_\delta(\rho)}{\Delta_{E'}} = w_\delta(\rho) = \delta(\rho) \quad (2.39)$$

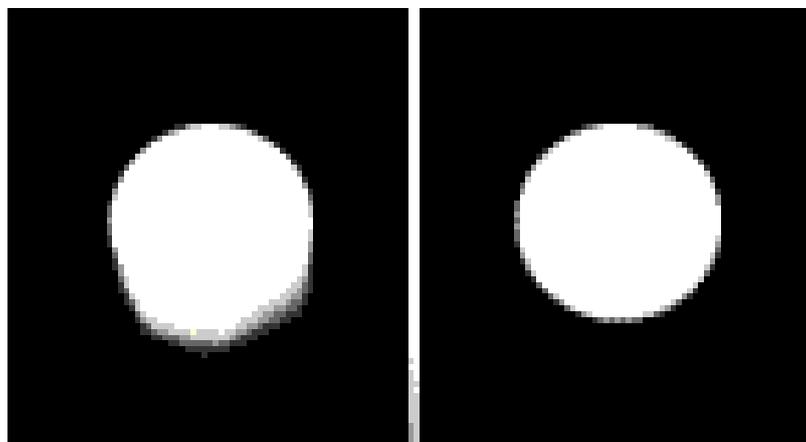
представляет собой идеальный двумерный пространственный импульсный отклик фильтра, нормированный по объему, поскольку для δ -функции выполняется условие:

$$\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} \delta(\rho) d\gamma d\rho = 1.$$

Для кружка рассеяния могут быть построены следующие модели пространственного импульсного отклика, нормированного по объему:

в виде цилиндра с диаметром 2σ (изображения кружка рассеяния с резкими границами);

в виде гауссиана (изображения кружка рассеяния с размытыми границами) (рис. 2.12)



а)

б)

Рис. 2.12. Кружок рассеяния

а) при наличии потерь; б) при отсутствии потерь

Цилиндр с диаметром 2σ , нормированный по объему, определяется зависимостью:

$$w_c(\rho) = \frac{1}{\pi\sigma^2} \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \rho \leq \sigma; \\ 0 & \text{при } \rho > \sigma; \end{cases} = \frac{1}{\pi\sigma^2} \begin{cases} 1 & \text{при } 0 \leq \sqrt{Y^2 + Z^2} \leq \sigma; \\ 0 & \text{при } \sqrt{Y^2 + Z^2} > \sigma; \end{cases} = w_c(Y, Z). \quad (2.40)$$

Гауссиан, нормированный по объему, определяется по зависимости:

$$w_G(\rho, \gamma) = \frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2b_G^2}\right) = \frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + Z^2}{2b_G^2}\right) = w_G(Y, Z), \quad (2.41)$$

где b_G - параметр, определяющий ширину функции Гаусса.

В данном случае следует воспользоваться методикой, основанной на минимуме квадрата расстояния между функциями.

Квадрат расстояния между функциями (2.40) и (2.41) определяется в полярной системе координат ρ, γ в виде:

$$\varepsilon_{Gc} = \int_0^\sigma \left[\frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2b_G^2}\right) - \frac{1}{\pi\sigma^2} \right]^2 \int_0^{2\pi} \rho d\gamma d\rho + \int_\sigma^\infty \left[\frac{1}{2\pi b_G^2} \exp\left(-\frac{\rho^2}{2b_G^2}\right) \right]^2 \int_0^{2\pi} \rho d\gamma d\rho. \quad (2.42)$$

Эквивалентные преобразования ε_{Gc} приводят к следующему математическому выражению:

$$\varepsilon_{Gc} = \frac{1}{4\pi b_G^2} - \frac{2}{\pi\sigma^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2b_G^2}\right) \right] + \left[\frac{1}{\pi\sigma^2} \right], \quad (2.43)$$

где b_G - искомый параметр, определяющий ширину функции Гаусса; σ - радиус кружка рассеяния.

Умножим обе части (2.43) на величину $\pi\sigma^2 \neq 0$, получим

$$\pi\sigma\varepsilon_{Gc} = \frac{\zeta^2}{4} + 2 \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2}\right) - 1 \rightarrow \min_\zeta, \quad (2.44)$$

где $\zeta = \frac{\sigma}{b_G}$.

Минимум функции $\pi\sigma\varepsilon_{Gc}$ достигается, когда

$$\frac{d(\pi\sigma\varepsilon_{Gc})}{d\zeta} = 0; \quad \frac{d^2(\pi\sigma\varepsilon_{Gc})}{d\zeta^2} > 0. \quad (2.45)$$

Вид функции (2.45) приведен на рис. 2.13 а. Вид первой и второй производных функции (2.45) приведен на рис. 2.13 б и в, соответственно.

Для расчета оптимального значения ζ^* необходимо решить уравнение

$$\left. \frac{d(\pi\sigma\varepsilon_{Gc})}{d\zeta} \right|_{\zeta=\zeta^*} = \frac{1}{2} - 2\zeta^* \cdot \exp\left[-\frac{(\zeta^*)^2}{2}\right] = 0. \quad (2.46)$$

Решение уравнения дает следующие три корня:

$\zeta^* = \frac{\sigma}{b_G^*} = (-1,65; 0; 1,65)$. В точке $\zeta^* = \frac{\sigma}{b_G^*} = 0$ имеет место максимум функции

$\pi\sigma\varepsilon_{Gc}$, а в точке $\zeta^* = \frac{\sigma}{b_G^*} = \pm 1,65$ - минимум указанной функции, откуда

$b_G^* = 0.606\sigma$, где σ - радиус кружка рассеяния объектива.

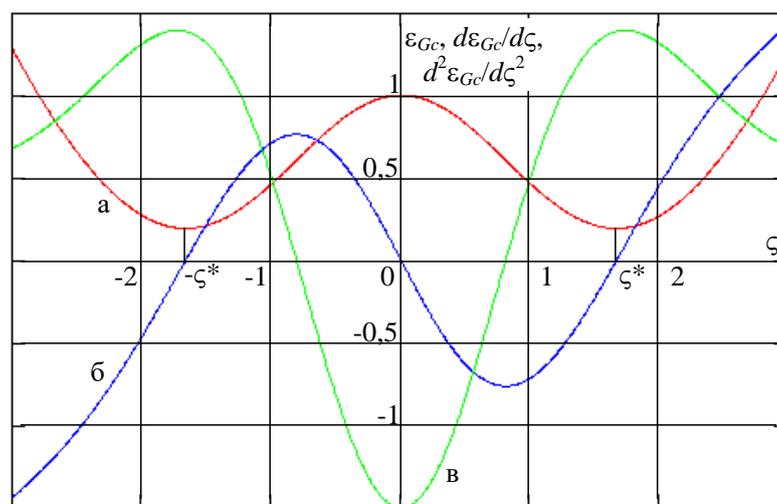


Рис. 2.13. Функция $\pi\sigma\varepsilon_{Gc}(\zeta)$ (а), ее первая (б) и вторая (в) производные

Таким образом, импульсный двумерный пространственный отклик объектива при формировании изображения в плоскости расположения чувствительных ячеек приемника излучения может быть представлен в виде следующей двумерной функции Гаусса:

$$w_G(Y, Z) = \frac{1}{2\pi(0,605\sigma)^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + Z^2}{2(0,605\sigma)^2}\right). \quad (2.47)$$

Преобразование Фурье от $w_G(Y, Z)$ дает

$$\begin{aligned}
 W_G(\omega_Y, \omega_Z) &= \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2\pi(0,605\sigma)^2} \exp\left(-\frac{Y^2 + Z^2}{2(0,605\sigma)^2}\right) \exp(-jY\omega_Y - jZ\omega_Z) dY dZ = \\
 &= \exp\left(-\frac{(\omega_Y \cdot 0,605\sigma)^2 + (\omega_Z \cdot 0,605\sigma)^2}{2}\right).
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

Как видно из (2.48) передаточная функция объектива представляет собой гауссиан, нормированный по амплитуде.

2.4. Динамика преобразования энергии теплового излучения

Как описано в п 1.1. в тепловизионных системах наблюдения используют в качестве приемника-преобразователя сигнала одноэлементные, линейные или матричные приемники излучения.

Работа матричного приемника излучения в последнее время основана на использовании неохлаждаемых микроболометрических детекторов.

Действие болометров основано на изменении сопротивления полупроводника или металла при изменении температуры, возванном воздействием лучистого потока. Схема работы микроболометрической матрицы представлена на рис. 2.14.

Помимо отсутствия требований к охлаждению, микроболометры существенное преимущество перед фотоэлектрическими сенсорами. Диаграмма их спектральной чувствительности имеет практически плоскую форму во всём диапазоне воспринимаемых ими ИК-лучей [135].

Динамика облученности пикселя описывается уравнением:

$$C \frac{d(\Delta T)}{dt} + G(\Delta T) = \eta P = \eta P_0 \exp(j\omega t), \tag{2.49}$$

где C – теплоемкость чувствительной области пикселя, G – теплопроводность несущей конструкции, P_0 – амплитуда модулированной мощности теплового излучения, падающего на пиксель; η – поглощение

излучения теплочувствительными пленками; ω - угловая частота модуляции излучения; ΔT - увеличение температуры чувствительной области пикселя.

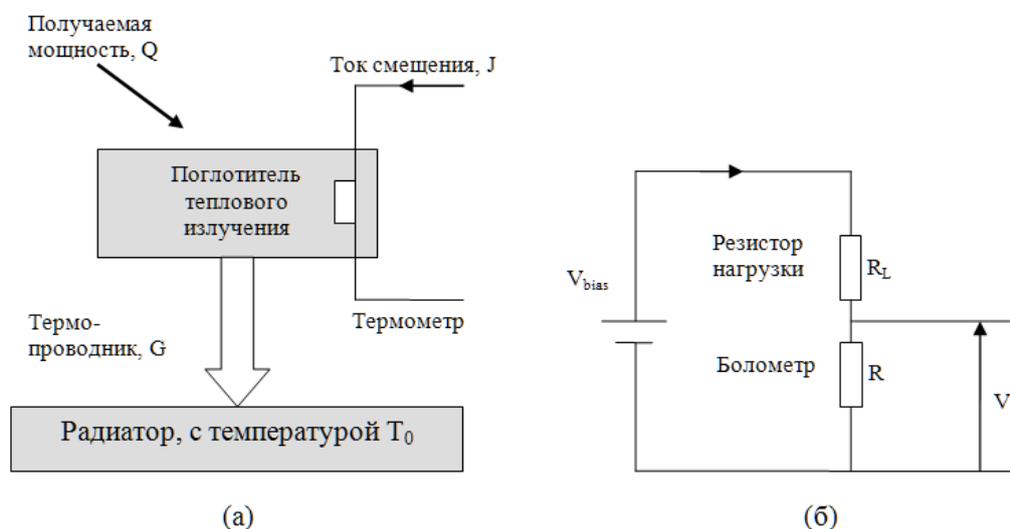


Рис. 2.14. Схема работы микроболометра
(а) – функциональная, (б) - принципиальная

Рассеиванием мощности из-за приложенного электрического смещения можно пренебречь в чувствительной области. Решение уравнения (2.49):

$$\Delta T = \frac{\eta P_0 \exp(j\omega t)}{G + j\omega C} = \frac{\eta P_0}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (2.50)$$

где τ - время теплового отклика.

Измерение температуры упрощается, если сопротивление имеет линейную зависимость от температуры, что справедливо для большинства металлов. Для такого материала сопротивление может быть выражено как:

$$R = R_0 \{1 + \alpha(T - T_0)\} \quad (2.51)$$

где R_0 - сопротивление при температуре T_0 ; α - температурный коэффициент сопротивления.

Изменение температуры $\Delta T = T - T_0$ за счет поглощения излучения достаточно мало. Изменение сопротивления пропорционально изменению температуры: $\Delta R = \alpha R \Delta T$, где $\alpha = (1/R)dR/dt$.

Чувствительность R_v пикселя определяется как выходной сигнал (напряжение или ток), разделенный на входную мощность излучения, падающего на пиксель. Пусть выходной сигнал — напряжение V_s , тогда

$$V_s = I_b \Delta R = I_b \alpha R \Delta T, \quad (2.52)$$

где I_b - ток смещения через пиксель.

Из уравнений (2.50) и (2.52) получается,

$$V_s = \frac{I_b \alpha R \eta P_0}{G(1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2}} \quad (2.53)$$

Чувствительность R_v определяется следующим соотношением.

$$R_v = V_s / P_0 \quad (2.54)$$

Следовательно

$$R_v = \frac{I_b \alpha R \eta}{G(1 + \omega^2)} \quad (2.55)$$

Уравнение (2.55) показывает, что чувствительность прямо пропорциональна температурному коэффициенту сопротивления (α) и обратно пропорциональна теплопроводности G . Оба параметра важны для неохлаждаемых резистивных болометров.

Значение G может колебаться в пределах нескольких порядков величины, тогда как диапазон возможных значений α гораздо меньше. Уравнение (2.50) является основным для тепловых матриц. Это описывает повышение температуры резистивной области пикселя при излучении амплитудой мощности P_0 , синусоидально модулированной с угловой частотой ω , падающей на чувствительную область. Температура пикселя увеличивается и уменьшается по мере возрастания и падения мощности падающего излучения колебательным образом.

Переход между низкочастотными и высокочастотными областями характеризуется тепловой постоянной времени t или тепловым временем отклика, которое определяется как:

$$\tau = C / G \quad (2.56)$$

Другой важный параметр – разрешающая способность:

$$D^* = (R_v \sqrt{A \Delta f}) / V_n \quad (2.57)$$

где Δf - ширина полосы шума детектора (Гц), V_n - общий шум детектора, A - площадь детектора. Эквивалентная шуму разница температур (NETD - noise equivalent temperature difference) определяется:

$$NETD = \frac{4F^2 V_n}{\tau_0 A R_v (\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}}, \quad (2.58)$$

где F - светосила оптики, τ_0 - коэффициент пропускания оптики, $(\Delta P / \Delta T)_{\lambda_1 - \lambda_2}$ - изменение мощности на единицу площади, излучаемой сценой (или черным телом) при температуре T , относительно T , измеренной в спектральной полосе от λ_1 до λ_2 . Меньший результат NETD указывает на лучшую производительность.

Кроме того, что приемник излучения выполняет функцию преобразователя облученности $E(Y, Z)$ в плоскости расположения чувствительных ячеек приемника теплового излучения электрический сигнал, указанный прибор также является дискретизатором в системе.

При определении импульсного отклика и передаточной функции матрицы термочувствительных элементов (рис. 2.15) будем предполагать, что шаг их расположения равен их размерам 2β , причем по координате Z сканирование осуществляется с тем же шагом.

Импульсный отклик множества ячеек, обеспечивающих дискретизацию изображения, может быть определен как импульсный отклик реального мультипликативного интегрирующего дискретизатора в виде:

$$w(Y, Z) = \frac{1}{4\beta^2} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{J-1} \{\eta(Y - 2\beta i) - \eta[Y - 2\beta(i+1)]\} \{\eta(Z - 2\beta n) - \eta[Z - 2\beta(n+1)]\}, \quad (2.59)$$

где $\eta(Y - \Xi_Y)$, $\eta(Z - \Xi_Z)$ - смещенные единичные функции Хевисайда; $N \times J$ размер области сканирования в пикселях; i - индекс для подсчета пикселей в строках (номера столбцов); n - индекс для подсчета пикселей в столбцах (номера строк)).

$$\eta(Y - \Xi_Y) = \begin{cases} 0 & \text{при } Y \leq \Xi_Y; \\ 1 & \text{при } Y > \Xi_Y; \end{cases} \quad \eta(Z - \Xi_Z) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z \leq \Xi_Z; \\ 1 & \text{при } Z > \Xi_Z; \end{cases} \quad (2.60)$$

где Ξ_Y , Ξ_Z - смещение по осям Y и Z , соответственно.

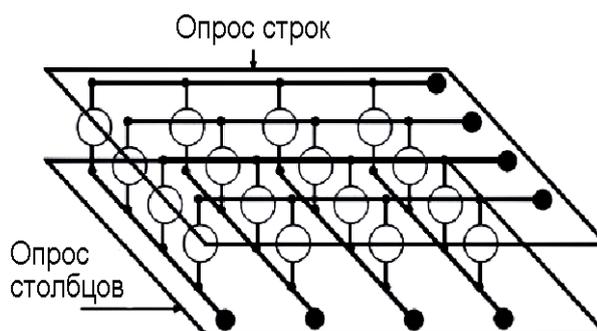


Рис. 2.15 Схема подключения микроболометров

2.5. Выводы

1. Разработана модель генерации теплового излучения, положенная в основу формирования структур эталонных генераторов тепловых сцен и исследовано взаимодействие теплового излучения со средой.

2. Разработана модель формирования теплового образа наблюдаемой точки в плоскости расположения фоточувствительных элементов термоэлектронного преобразователя тепловизионной системы наблюдения.

3. Определены закономерности образования искажений, вносимых элементами тестируемой системы на каждом этапе формирования теплового

образа сцены, такие как виньетирование (неравномерность тепло-сигнальной характеристики), дисторсия, контраст (разрешающая способность).

4. Исследовано преобразование теплового излучения многоэлементными матричными приемниками излучения, в частности, болометрического типа.

3. ДЕФЕКТЫ ТЕПЛОВЫХ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВ СЦЕН, МЕТОДЫ ИХ КОНТРОЛЯ И ОБРАБОТКИ

3.0. Введение

Для выявления доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала, производится оценка таких характеристик тепловизионной системы наблюдения, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика).

3.1. Информативность и потери информации в тепловизионных системах наблюдения

В тестирующей системе эталонный тестовый сигнал, включающий информативные признаки $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$ поступает с наблюдаемой сцены реальной и виртуальной тепловизионной системой наблюдения. В реальном приборе преобразование сигнала $\varphi(x^1, \dots, x^m, \dots, x^M)$ осуществляется узлами и блоками на физическом уровне, вследствие чего формируются реальные вторичные информативные признаки $X_R^1, \dots, X_R^m, \dots, X_R^M$. В виртуальном приборе на основании информативных признаков $x^1, \dots, x^m, \dots, x^M$ формируются желаемые значения вторичных информативных признаков $X_V^1, \dots, X_V^m, \dots, X_V^M$, которые соответствуют идеально настроенной тепловизионной системе. Нормы разностей виртуальных и реальных вторичных признаков и сравниваются с допустимыми значениями $\|X_R^m - X_V^m\| < \varepsilon_m, 1 \leq m \leq M$, и если неравенство выполняется для всех информативных параметров, то тепловизионная система наблюдения считается пригодной к эксплуатации. Если не выполняется хотя бы одно неравенство, то требуется настройка прибора [52].

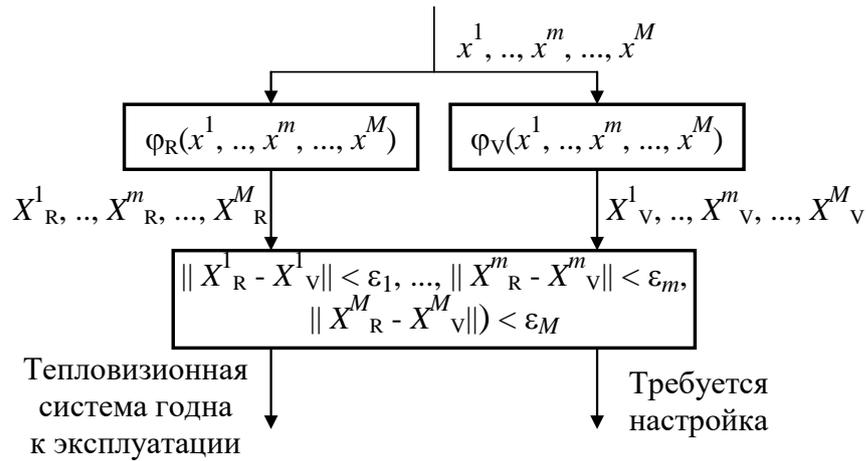


Рис. 3.1. Тестирующая система

Потери информации заключаются в уменьшении значения энтропии информативного параметра H_X на выходе тепловизионной системы по сравнению со значением энтропии информативного параметра, формируемого наблюдаемой сценой. Эти потери могут возникать по одной из следующих причин:

- сокращение области определения функции $X = \varphi(x)$;
- сокращение области значений функции $X = \varphi(x)$;
- отклонение функции $X = \varphi(x)$ от линейного вида

Типовая передаточная характеристика с выделением различных случаев потерь информации показана на рис. 3.2., где X - информативный параметр, формируемый на выходе системы наблюдения; D - цифровое значение информативного параметра.

Энтропия участка, расположенного под углом 45° ($\pi/4$):

$$H_{\pi/4} = -\sum_i p_i \log p_i, \quad (3.1)$$

где p_i - вероятность попадания информативного параметра X в интервал значений $X_i \leq X < X_{i+1}$. Это означает, что система без потерь информации.

Текущий угол наклона кривой $X = \varphi(x)$ определяется производной

$\alpha = \arctg \frac{d\varphi(x)}{dx}$, и может быть как меньше, так и больше 45° (рис. 3.2 б).

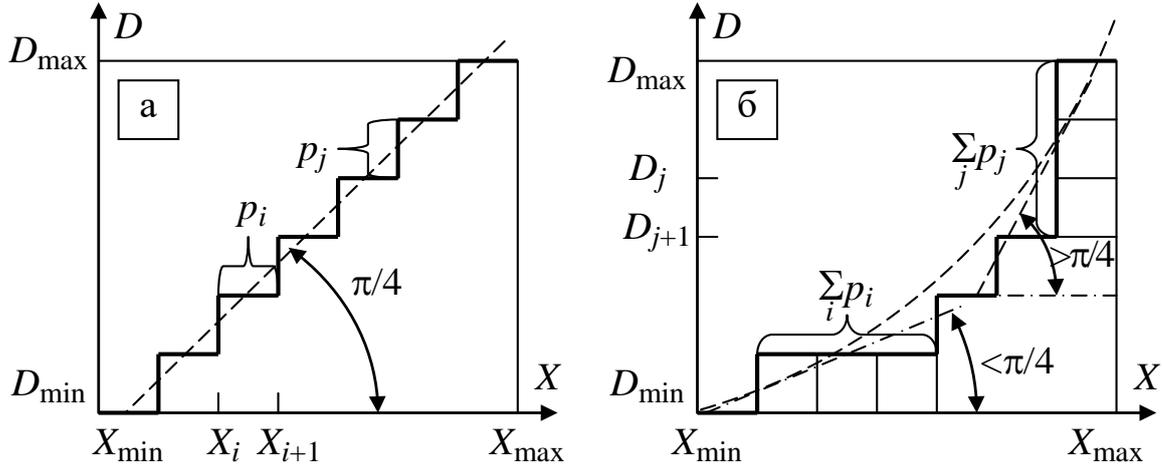


Рис. 3.2. Преобразование информативных параметров

Энтропия участка, расположенного под углом $<45^\circ$ ($<\pi/4$):

$$H_{<\pi/4} = -\left(\sum_i p_i\right) \log\left(\sum_i p_i\right), \quad (3.2)$$

где $\sum_i p_i$ - сумма вероятностей попадания информативного параметра X в соседние участки, которые преобразуются в один и тот же код.

Разность

$$\begin{aligned} H_{\pi/4} - H_{<\pi/4} &= -\sum_i p_i \log p_i + \left(\sum_i p_i\right) \log\left(\sum_i p_i\right) = \\ &= \sum_i p_i \left[-\log p_i + \log\left(\sum_j p_j\right) \right] = \sum_i p_i \log\left(\frac{\sum_j p_j}{p_i}\right) > 0. \end{aligned}$$

Это означает, что $H_{\pi/4} > H_{<\pi/4}$, т.е. в системе имеются потери информации.

Энтропия участка, расположенного под углом $>45^\circ$ ($>\pi/4$): в этом случае $\sum_j p_j = p_i$, т.е. на один и тот же интервал информативного параметра приходится несколько интервалов цифрового кода, его представляющего. Энтропия в этом случае равна:

$$H_{>\pi/4} = -\tilde{p}_i \log \tilde{p}_i, \quad (3.3)$$

где \tilde{p}_i - вероятность попадания информативного параметра в интервал, на который приходится несколько интервалов цифрового кода.

Это, в свою очередь, означает, что общее количество цифровых кодов, представляющих информативный параметр, уменьшается, а следовательно, $H_{\pi/4} > H_{>\pi/4}$, т.е. в системе также имеются потери информации.

В системе без информационных потерь $X = x$, и эта зависимость представляется на рис. 3.2 (а) прямой, имеющей угол наклона 45° . В системе с потерями зависимость выходного значения параметра от исходного значения определяется в виде $X = \varphi(x)$ (рис. 3.2 б).

3.2. Потери вследствие неидеальности тепло-сигнальной характеристики

Статическое тестирование должно выявлять потери информации вследствие нелинейности тепло-сигнальной характеристики. Обозначим тепло-сигнальную характеристику $D(T^\circ)$. Для оценки потерь информации ε_{T° , связанных с нелинейностью тепло-сигнальной характеристики, в генератор тестовых сигналов должен быть включен плоский площадной объект, располагаемый ортогонально главной оптической оси пары «объектив/термоэлектронный преобразователь», и генерирующий тепловое излучение с равномерным распределением стабилизированной температуры по площади тест-объекта. Целью тестирования должно быть построение термограммы $D(T^\circ)$. При этом оценка значений кода осуществляется за счет набора статистики (табл. 3.1.) по измерениям температуры пластины элементами термоэлектронного преобразователя, находящимися в прямоугольнике $j_{\min} \leq j \leq j_{\max}$, $k_{\min} \leq k \leq k_{\max}$, где j_{\min} , j_{\max} , k_{\min} , k_{\max} - границы образа плоского площадного объекта, внутри которых не

сказываются краевые эффекты, возникающие при разогреве/охлаждении пластины.

Границы должны быть выбраны в пределах области стабильной температуры площадного объекта (рис. 3.4).

Вследствие естественного оттока энергии по краям площадного объекта температура на краях спадает по экспоненте. Размеры области краевых эффектов могут быть определены экспериментально.

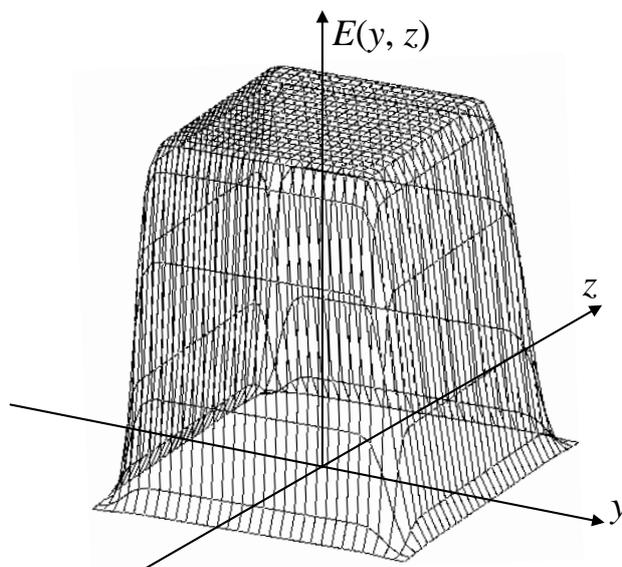


Рис. 3.4 Типовое распределение теплового излучения по площади эталонного излучателя

В том случае, если шкала измеряемых температур является линейной, температура T_m° тест объекта должна устанавливаться от T_{\min}° до T_{\max}° с интервалом $\Delta T^\circ = \frac{T_{\max}^\circ - T_{\min}^\circ}{M}$, где M - количество кодов, представляющих измеряемую температуру; $T_{\min}^\circ \leq T^\circ \leq T_{\max}^\circ$ - диапазон измеряемых температур. Если тепловизионная система наблюдения работает в экспоненциальной шкале измеряемых температур (логарифмической шкале результатов измерения), m -е значение измеряемой температуры T_m° , которой должен соответствовать код d_m должно определяться как $T_m^\circ = a^m T_{\min}^\circ$, где

$a = \sqrt{M T_{\max}^{\circ} / T_{\min}^{\circ}}$. Математическое ожидание $\tilde{D}(T_m^{\circ})$ результатов измерения температуры T_m° определяется по зависимости

$$\tilde{D}(T_m^{\circ}) = [(j_{\max} - j_{\min} + 1)(k_{\max} - k_{\min} + 1)]^{-1} \sum_{j=j_{\min}}^{j_{\max}} \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} D(j, k, l).$$

Вследствие виньетирования статическая передаточная тепло-сигнальная характеристика тепловизионной системы наблюдения будет иметь разные значения в центре и по краям кадра. Для выявления и идентификации подобных случаев элементы эталонного генератора, контролирующие статическую передаточную характеристику, должны быть размещены в нескольких областях предметной плоскости, в частности, в центре и по краям области тепловизионного наблюдения. В этом случае параметры κ_Q и D_{\min} в дополнение к проверкам (3.1) и (3.2) должны проходить контроль вида

$$(\kappa_{Qi} - \kappa_{Qn})^2 \leq \varepsilon_{Q\kappa in}; i, n = 1, 2, 3, 4, i < n; \quad (3.1)$$

$$(D_{\min i} - D_{\min n})^2 \leq \varepsilon_{QD in}; i, n = 1, 2, 3, 4, i < n, \quad (3.2)$$

где i, n - индексы, обозначающие номер элемента, контролирующего статическую передаточную характеристику, размещенную в i -й (n -й) области тепловизионного наблюдения; $\varepsilon_{Q\kappa in}, \varepsilon_{QD in}$ - допустимый разброс параметров статической передаточной характеристики в разных областях тепловизионного наблюдения (рис. 3.5).

В том случае, если оценка статической передаточной характеристики температуры осуществляется по статической и средней статической чувствительности, оценка должна производиться по параметрам

$$(\kappa'_{Qaci} - \kappa'_{Qacn})^2 < \varepsilon_{\kappa' in}; (\kappa'_{Qai} - \kappa'_{Qai})^2 < \varepsilon_{\kappa' in}; i, n = 1, 2, 3, 4, i < n; \quad (3.3)$$

$$(\kappa''_{Qaci} - \kappa''_{Qacn})^2 < \varepsilon_{\kappa'' in}; (\kappa''_{Qai} - \kappa''_{Qai})^2 < \varepsilon_{\kappa'' in}; i, n = 1, 2, 3, 4, i < n, \quad (3.4)$$

где $\varepsilon_{\kappa'in}$ - допустимый разброс статической передаточной характеристики в точке a' ; $\varepsilon_{\kappa''in}$ - допустимый разброс передаточной характеристики в точке a'' .

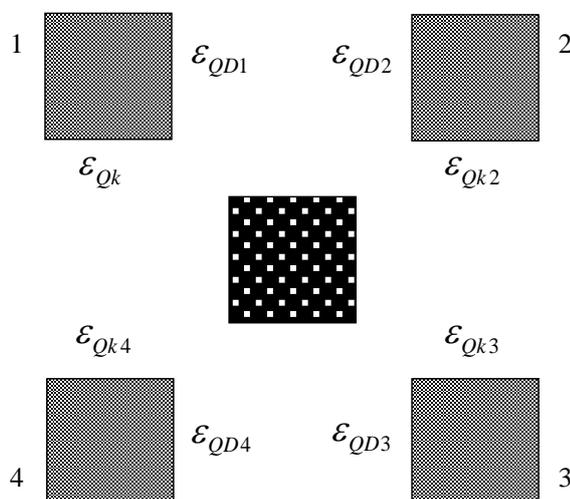


Рис. 3.5. Виньетирование образа эталонного площадного объекта

В идеальном случае статическая передаточная характеристика представляет собой ступенчатую функцию, которая описывается зависимостью квантования с равномерным шагом. Указанная зависимость изображается на рис. 3.2 а. Ступенчатая статическая передаточная характеристика может быть представлена прямой линией. В случае, представленном на рис. 3.2 б, передаточная характеристика представляет собой ступенчатую линию, аппроксимируемую прямой, расположенной под углом $\pi/4$ к оси абсцисс.

Величина U может быть получена из величины M по зависимости:

$$U = U_{\min} + \kappa_Q M . \quad (3.5)$$

В реальных тепловизионных системах характеристика $u(m)$ не является линейной. Основным источником нелинейности являются этапы термоэлектронного преобразования и динамической оцифровки. В общем случае нелинейную статическую передаточную характеристику

теповизионной системы можно представить в виде кривой на рис. 3.2 а, характеризующейся зависимостью $X = X(x)$.

В результате заводской настройки тепловизионной системы стремятся получить такую кривую $X = X(x)$, у которой

$$Q'_{\min} = Q_{\min}; D'_{\min} = D_{\min}; Q'_{\max} = Q_{\max}; D'_{\max} = D_{\max}, \quad (3.6)$$

где $Q = \frac{T^{\circ}}{T_{\max}^{\circ} - T_{\min}^{\circ}}$ - обобщенный безразмерный параметр; является аналогом величины x ; $Q_{\max} = 1$; $Q_{\min} = 0$.

D'_{\min} , D'_{\max} - соответственно, минимальное и максимальное значение кода формируемого теплового цифрового образа сцены в тепловизионной системе с нелинейной статической передаточной характеристикой, является аналогом величины X ; Q'_{\min} Q'_{\max} - соответственно, минимальное и максимальное обобщенного параметра, характеризующего температуру, статической передаточной характеристикой.

По нелинейной статической передаточной характеристике, представленной на рис. 3.2 б, может быть найдена средняя статическая чувствительность в точке a' :

$$k'_{Qac} = \frac{D_{a'} - D_{\min}}{Q_{a'} - Q_{\min}}, \quad (3.7)$$

где $Q_{a'}$ и $D_{a'}$ - значение температуры в точке характеристики a' и код его представляющий, соответственно; Q_{\min} и D_{\min} - значение температуры в начальной точке характеристики и код, его представляющий, соответственно; k'_{Qac} - средняя статическая чувствительность тепловизионной системы в точке a' по модулирующему фактору Q .

Кроме того, по нелинейной статической передаточной характеристике (рис. 3.2 б) может быть найдена статическая чувствительность k'_{Qa} канала измерения температуры в точке a' :

$$\kappa'_{Qa} = \left. \frac{dD(Q)}{dQ} \right|_{Q=Q_{a'}}. \quad (3.8)$$

Для κ'_{Qac} и κ'_{Qa} во всем диапазоне $Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max}$ должны выполняться условия:

$$\left(\kappa'_{Qac} - \kappa_Q\right)^2 < \varepsilon_{\kappa}; \quad \left(\kappa'_{Qa} - \kappa_Q\right)^2 < \varepsilon_{\kappa}. \quad (3.9)$$

При некачественной настройке, деградации параметров узлов и блоков тепловизионной системы наблюдения, наличии внешних воздействий реальная статическая передаточная характеристика может отличаться также от кривой на рис. 3.2 б. Изменения сводятся к тому, что концевые точки кривой на рис. 3.2 б, а именно, точка (Q''_{\min}, D''_{\min}) и точка (Q''_{\max}, D''_{\max}) смещаются относительно своих исходных положений, а именно, (Q_{\min}, D_{\min}) и (Q_{\max}, D_{\max}) , соответственно. Кроме того, может изменяться вид кривой, причем не только за счет растяжения/сжатия по осям Q и D . Любой выход концевых точек за пределы прямоугольника, построенного на отрезке $(Q_{\min}, D_{\min})/(Q_{\max}, D_{\max})$, как на диагонали, либо попадание указанных точек внутрь прямоугольника означает дополнительные потери информации.

По нелинейной статической передаточной характеристике также может быть найдена средняя статическая чувствительность канала измерения температуры в точке a' :

$$\kappa''_{Qac} = \frac{D_{a''} - D''_{\min}}{Q_{a''} - Q''_{\min}}, \quad (3.10)$$

где $Q_{a''}$ и $D_{a''}$ - значение температуры в точке характеристики a'' и код его представляющий, соответственно; Q''_{\min} и D''_{\min} - значение температуры в начальной точке характеристики и код, его представляющий, соответственно; κ''_{Qac} - средняя статическая чувствительность тепловизионной системы в точке a'' .

Кроме того, по нелинейной статической передаточной характеристике может быть найдена статическая чувствительность κ''_{Qa} канала измерения температуры в точке a'' :

$$\kappa''_{Qa} = \left. \frac{dD(Q)}{dQ} \right|_{Q=Q_{a''}}. \quad (3.11)$$

Для $\kappa''_{Q_{ac}}$ и κ''_{Qa} во всем диапазоне $Q''_{\min} \leq Q \leq Q''_{\max}$ должны выполняться условия:

$$\left(\kappa''_{Q_{ac}} - \kappa_Q \right)^2 < \varepsilon_{\kappa Q}; \quad \left(\kappa''_{Qa} - \kappa_Q \right)^2 < \varepsilon_{\kappa Q}, \quad (3.12)$$

где $\varepsilon_{\kappa Q}$ - допустимая ошибка изменения коэффициента передачи по каналу измерения температуры.

Статистический ряд при измерении температуры пластины элементами термоэлектронного преобразователя приведен в табл. 3.1.

Табл. 3.1.

Статистический ряд

$< D^{1[n(Q)]}$	$D^{2[n(Q)]}$	-	$D^{3[n(Q)]}$	-	...	$D^{m[n(Q)]}$	-	...				$> D^{M[n(Q)]}$
	$D^{3[n(Q)]}$		$D^{4[n(Q)]}$			$D^{m[n(Q)]+1}$						
$P^*_{1[n(Q)]}$	$P^*_{1[n(Q)]}$		$P^*_{2[n(Q)]}$...	$P^*_{m[n(Q)]}$...				$P^*_{M[n(Q)]}$

В табл. 3.1 применены следующие обозначения: $m[n(Q)]$ - обозначение m -го разряда $n(Q)$ -й гистограммы; $D^{m[n(Q)]} - D^{m[n(Q)]+1}$ - границы $m[n(Q)]$ -го разряда $n(Q)$ -й гистограммы; $P^*_{m[n(Q)]}$ - частота результатов измерения, попавших в $m[n(Q)]$ -й разряд; $M[n(Q)]$ - число разрядов.

Гистограмма должна строиться для каждого $n(Q)$ -го уровня градаций температуры при формировании теплового изображения, однако разряды, приведенные в табл. 3.1, должны формироваться по всему диапазону измерения соответствующей температуры. Если увеличивать количество

разрядов гистограммы, то она будет приближаться к плотности распределения величины D . Однако увеличение числа разрядов приводит к усложнению процедуры обработки, поэтому при построении гистограммы должно выполняться условие, что $M[n(Q)] \approx 10 \div 15N(Q)$.

Для гистограмм, соответствующих каждому из значений $\{Q^0, Q^1, \dots, Q^{n(Q)}, \dots, Q^{N(Q)-1}\}$, должно быть найдено статистическое среднее величины D :

$$\bar{D}^{n(Q)} = \frac{\sum_{m[n(Q)]=1}^{M[n(Q)]} D_{m[n(Q)]}}{M[n(Q)]}, \quad (3.13)$$

где $D_{m[n(Q)]}$ - $m[n(Q)]$ -й результат измерения модулирующего фактора, при задании номинального значения самого моделирующего фактора равном $Q^{n(Q)}$; $M[n(Q)]$ - общее количество измерений номинального значения модулирующего фактора $Q^{n(Q)}$.

Дисперсия случайной величины $Q^{n(Q)}$ определяется по зависимости

$$\Delta^{n(Q)} = \frac{\sum_{m[n(Q)]=1}^{M[n(Q)]} [D_{m[n(Q)]} - \bar{D}^{n(Q)}]^2}{M[n(Q)]}. \quad (3.14)$$

При увеличении числа наблюдений, очевидно, указанные статистические характеристики будут сходиться по вероятности к соответствующим математическим характеристикам и при достаточно большом $M[n(Q)]$ могут быть приняты приближенно равными им.

Следует отметить, что математические ожидания $\bar{D}^{n(Q)}$, в общем случае, могут отличаться от эталонных значений $Q^{n(Q)}$, определяемых по зависимости (3.15) на величину $\Delta_{Q,n(Q)}$, равную

$$\varepsilon_{n(Q)} = \left\{ \bar{D}^{n(Q)} - [D_{\min} + \kappa_Q Q^{n(Q)}] \right\}^2. \quad (3.15)$$

Указанная ошибка при тестировании канала измерения модулирующего фактора не должна превышать заданного значения, т.е.

$$\varepsilon_n(Q) \leq (\bar{\varepsilon}_Q). \quad (3.16)$$

Обобщенный безразмерный параметр Q и результат его измерения D связаны функциональной зависимостью

$$D = \varphi(Q, a_1, a_2, \dots, a_k), \quad (3.17)$$

где φ - некоторая функция, в общем случае нелинейная; a_1, a_2, \dots, a_k - параметры, определяющие вид кривой φ и ее положение в пространстве.

Задача заключается в том, чтобы подобрать такие значения параметров a_1, a_2, \dots, a_k , которые дают наилучшее приближение кривой результатам экспериментальных измерений модулирующего фактора. Общепринятым при решении подобных задач методом является метод наименьших квадратов, при котором минимизируется сумма квадратов разностей величин. Метод приводит к сравнительно простому способу определения параметров a_1, a_2, \dots, a_k .

Согласно указанному методу необходимо выбрать функцию $\varphi(Q, a_1, a_2, \dots, a_k)$ таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений D_1, \dots, D_n от теоретических значений функции $\varphi(Q_1), \dots, \varphi(Q_M)$ была бы минимальной, т.е.

$$\sum_m^M [D_m - \varphi(Q_m)]^2 \rightarrow \min_{\{a_1, a_2, \dots, a_k\}}. \quad (3.18)$$

Дифференцирование левой части выражения по a_j дает:

$$\sum_m [D_m - \varphi(Q_m, a_1, \dots, a_k)] \frac{\partial [D_m - \varphi(Q_m, a_1, \dots, a_k)]}{\partial a_i} = 0, \quad i = 0, 1, \dots, k. \quad (3.19)$$

Система (3.19) включает k уравнений и содержит k неизвестных. Решение системы определяется видом функции $\varphi(Q_m, a_1, \dots, a_k)$.

В нашем случае целесообразно аппроксимировать статическую передаточную характеристику канала измерения температуры прямой вида:

$$D = D_{\min} + \kappa_Q Q. \quad (3.20)$$

При этом в качестве значений обобщенного безразмерного параметра, при которых производились измерения значений величины D , следует брать значения множества $\{Q^0, Q^1, \dots, Q^{n(Q)}, \dots, Q^{N(Q)-1}\}$, а в качестве измеренных значений величины D - значения $\bar{D}_{n(Q)}$. Неизвестными в данном случае являются значения κ_Q и D_{\min} .

Система уравнений в (3.19) для этого случая принимает вид:

$$\begin{cases} \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} \left\{ \bar{D}_{n(Q)} - [\kappa_Q Q^{n(Q)} + D_{\min}] \right\} Q^{n(Q)} = 0; \\ \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} \left\{ \bar{D}_{n(Q)} - [\kappa_Q Q^{n(Q)} + D_{\min}] \right\} = 0. \end{cases} \quad (3.21)$$

Решение системы (3.21) относительно κ_Q и D_{\min} дает

$$\kappa_Q = \frac{N(Q) \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} Q^{n(Q)} \bar{D}^{n(Q)} - \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} Q^{n(Q)} \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} \bar{D}^{n(Q)}}{N(Q) \sum_{i=1}^n [Q^{n(Q)}]^2 - \left[\sum_{i=1}^n Q^{n(Q)} \right]^2}; \quad (3.22)$$

$$D_{\min} = \frac{\sum_{i=1}^n [Q^{n(Q)}]^2 \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} \bar{D}^{n(Q)} - \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} Q^{n(Q)} \sum_{n(Q)=0}^{N(Q)-1} Q^{n(Q)} \bar{D}^{n(Q)}}{N(Q) \sum_{i=1}^n [Q^{n(Q)}]^2 - \left[\sum_{i=1}^n Q^{n(Q)} \right]^2}. \quad (3.23)$$

На величины κ_Q и D_{\min} при оценке тепловизионных систем наблюдения должны быть наложены ограничения:

$$(\kappa_Q - \bar{\kappa}_Q)^2 \leq \varepsilon_{Q\kappa}; \quad (3.24)$$

$$(D_{\min} - \bar{D}_{\min})^2 \leq \varepsilon_{QD}, \quad (3.25)$$

где $\bar{\kappa}_Q$ - эталонное значение κ_Q ; $\varepsilon_{Q\kappa}$ - допустимая ошибка в установке статического коэффициента передачи по каналу измерения модулирующего фактора; \bar{D}_{\min} - эталонное значение D_{\min} ; ε_{QD} - допустимая ошибка в установке начального значения статической передаточной характеристики по каналу измерения температуры.

Оценка значения выходного кода для каждого цифрового отсчета ступенчато-линейной характеристики, показанной на рис. 3.2, приводит к неоправданно длительной процедуре испытаний инфракрасного детектора, и кроме того, не позволяет оценивать такой важный параметр, как тепловое разрешение прибора, определяемого разбросом измеренных значений интенсивности относительно среднего измеренного значения.

Поэтому предложено сокращать количество тестирующих значений температуры \tilde{M} в кратное число раз и строить гистограммы для прореженных значений тестирующего сигнала. Типовая гистограмма распределения измеренных тепловизионной системой наблюдения значений $\hat{D}(j,k,l)$ интенсивностей теплового излучения относительно тестирующих прореженных значений D_m приведена на рис. 3.6.

В результате многократных измерений формируется простой статистический ряд, в котором результаты измерения неупорядочены. Для придания статистическому ряду большей компактности по результатам измерения должна быть построена гистограмма, которая имеет вид, представленный на рис. 3.6, где показаны ΔD_m - номинальная ширина разряда гистограммы; $\Delta \tilde{D}_m$ - реальная ширина области ненулевых значений распределения интенсивностей относительно заданного значения D_m ; \tilde{t}_{m-1}° , \tilde{t}_m° - области перекрытия ненулевых значений распределений интенсивностей.

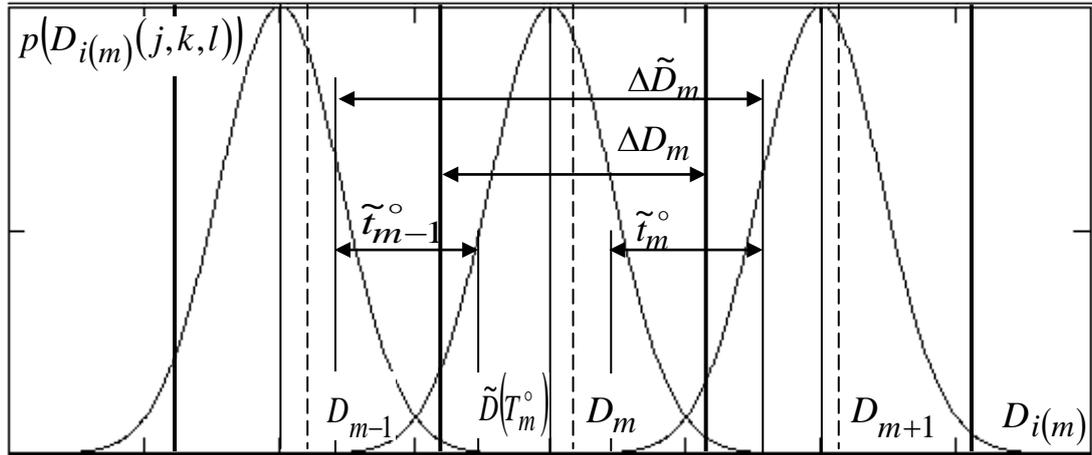


Рис. 3.6. Гистограмма распределения интенсивностей

Основными причинами потерь информации возникающих при тестировании инфракрасного детектора сигналом D_m , являются:

- 1) отклонение сглаженной ступенчатой линии, формируемой по математическим ожиданиям $\tilde{D}(T_m^\circ)$, от значений ступенчато-наклонной линии 1, $\tilde{D}(T_m^\circ) = D_m$;
- 2) перекрытие соседних разрядов гистограммы.

При равных значениях $\Delta \tilde{T}^\circ = \frac{T_{\max}^\circ - T_{\min}^\circ}{\tilde{M}}$, или $\tilde{a} = \tilde{M} \sqrt{T_{\max}^\circ / T_{\min}^\circ}$

отклонение ступенчато-наклонной линии определяется среднеквадратичной ошибкой:

$$\left\{ \frac{1}{\tilde{M}} \sum_{m=1}^{\tilde{M}} [\tilde{D}(T_m^\circ) - D_m]^2 \right\}^{1/2}, \quad (3.26)$$

а потери информации при этом – как:

$$\varepsilon_{T^\circ, 1} = \log \tilde{M} + \sum_{m=1}^{\tilde{M}} [(p_m + \Delta_{p,m}) \log(p_m + \Delta_{p,m})], \quad (3.27)$$

где $\Delta_{p,m}$ - приращения вероятностей появления, возникающие вследствие отклонения ступенчато-наклонной линии от номинального значения, на

которые накладывається отграничение $\sum_{m=1}^{\tilde{M}} \Delta_{p,m} = 0$.

3.3. Потери информации вследствие дисторсии

3.3.1. Модели дисторсии

Для определения статических передаточных характеристик канала измерения координат и оценки потерь вследствие дисторсии необходимо иметь $J \times K$ точечных источников теплового сигнала, каждый из которых проецируется в свой термочувствительный элемент. При тестировании источники должны включаться последовательно, для того, чтобы не создавать помех один другому. Вследствие сложности технической реализации подобной методики предложено для практического применения использовать оценки, получаемые при расположении точечных источников в определенных зонах поля зрения тепловизионной системы наблюдения. Для определения мест установки точечных источников исследуется два типовых вида дисторсии: «подушка» (увеличение обратного коэффициента передачи $\frac{\beta_n}{R_n}$, где β_n - угол между главной оптической осью и направлением на n -й точечный источник; R_n - расстояние между центром образа точечного источника и геометрическим центром термоэлектронного преобразователя, при увеличении угла β_n), «бочка» (уменьшение указанного коэффициента при увеличении угла β_n), трапеция.

На рис. 3.7 изображена проекция элемента термоэлектронного преобразователя на сцену, где: YOZ - декартова система координат, связанная с центром термоэлектронного преобразователя; $(Y_1, Z_1) \div (Y_4, Z_4)$ - линейные координаты углов термочувствительного элемента в системе координат YOZ ; $\psi O \vartheta$ - сферическая угловая система координат, связанная с центром объектива тепловизионной системы; $(\psi_1, \vartheta_1) \div (\psi_4, \vartheta_4)$ - угловые

координаты проекций углов термочувствительного элемента в системе координат $\psi O \vartheta$; R_1, R_2, R_3, R_4 - линейные расстояния от углов термочувствительного элемента до центра термоэлектронного преобразователя; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ - угловые расстояния от ребер телесного угла до главной оптической оси системы; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - направления на углы термочувствительного элемента в системе координат YOZ , совпадающие с направлениями, на которые проецируются углы термочувствительного элемента в системе координат $\psi O \vartheta$.

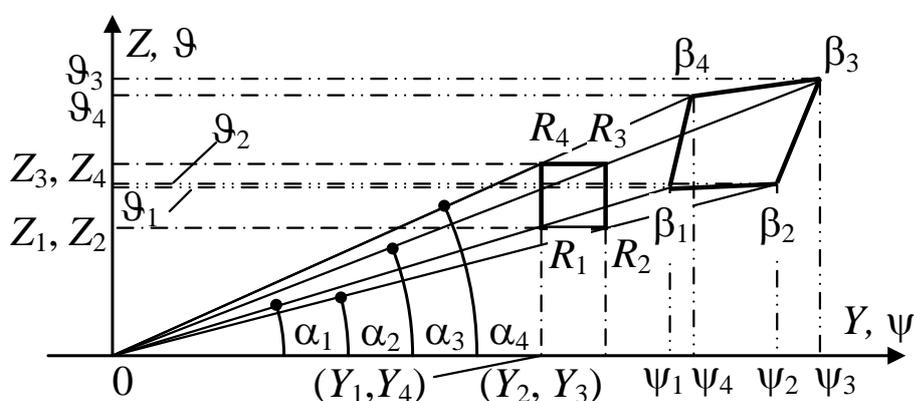


Рис. 3.7. Проекция элемента термоэлектронного преобразователя на сцену

Зависимости для расчета площади проекции (j, k) -го термочувствительного элемента, (Y, Z) координаты углов которого равны, соответственно

$$(Y_{j,1}, Z_{k,1}) = [\zeta(2j - J), \zeta(2k - K)] \quad (3.28)$$

$$(Y_{j,2}, Z_{k,2}) = [\zeta(2j + 2 - J), \zeta(2k - K)], \quad (3.29)$$

$$(Y_{j,3}, Z_{k,3}) = [\zeta(2j + 2 - J), \zeta(2k + 2 - K)] \quad (3.30)$$

$$(Y_{j,4}, Z_{k,4}) = [\zeta(2j - J), \zeta(2k + 2 - K)]: s_{j,k} = d_{j,k,1} \cdot d_{j,k,2} \cdot |\sin(d_{j,k,1}, d_{j,k,2})|, \quad (3.31)$$

где $d_{j,k,1}, d_{j,k,2}$ - угловые величины диагоналей проекций; $\sin(d_{j,k,1}, d_{j,k,2})$ - синус угла между диагоналями;

$$d_{j,k,1} = \left[(\psi_{j,k,1} - \psi_{j,k,3})^2 + (\vartheta_{j,k,1} - \vartheta_{j,k,3})^2 \right]^{1/2}, \quad d_{j,k,2} = \left[(\psi_{j,k,2} - \psi_{j,k,4})^2 + (\vartheta_{j,k,2} - \vartheta_{j,k,4})^2 \right]^{1/2};$$

$$\sin(d_{j,k,1}, d_{j,k,2}) = \left[(\vartheta_{j,k,1} - \vartheta_{j,k,3})(\psi_{j,k,4} - \psi_{j,k,2}) - (\vartheta_{j,k,2} - \vartheta_{j,k,4})(\psi_{j,k,3} - \psi_{j,k,1}) \right] \times$$

$$\times \left[(\psi_{j,k,1} - \psi_{j,k,3})^2 + (\vartheta_{j,k,1} - \vartheta_{j,k,3})^2 \right]^{-1/2} \left[(\psi_{j,k,2} - \psi_{j,k,4})^2 + (\vartheta_{j,k,2} - \vartheta_{j,k,4})^2 \right]^{-1/2}.$$

$$\psi_{k,j,i} = Y_{k,j,i} \left(\kappa_R \sqrt{Y_{k,j,i}^2 + Z_{k,j,i}^2} + f^{-1} \right); \quad (3.32)$$

$$\vartheta_{k,j,i} = Z_{k,j,i} \left(\kappa_R \sqrt{Y_{k,j,i}^2 + Z_{k,j,i}^2} + f^{-1} \right), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (3.33)$$

Таким образом, потери информации вследствие дисторсии для тепловизионной системы наблюдения в целом определяются по зависимости

$$\varepsilon_{dis} = \log JK + \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{J-1} s_{j,k} \left(\sum_{m=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{J-1} s_{i,m} \right)^{-1} \cdot \log s_{j,k} \left(\sum_{m=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{J-1} s_{i,m} \right)^{-1}. \quad (3.34)$$

Из (3.34) может быть получена зависимость для потерь информации в любом столбце и/или в любой строке термочувствительных элементов. При этом вследствие наибольшего изменения размеров проекции угловых элементов, оценивать потери можно по измеренному отклонению положения центрального точечного источника от линии, соединяющей угловые источники, создающие опорную декартову систему координат.

При аффинных абберациях потери информации оценивают как следствие сужения поля зрения системы. При этом предполагается, что точечный источник может быть размещен, в том числе и в области наблюдаемой сцены, проекция которой выходит за границы области расположения термочувствительных элементов. Из сделанного предположения получена следующая зависимость для потерь информации вследствие аффинных аббераций:

$$\varepsilon_{af_ab}(\gamma) = - \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{j=0}^{J-1} p_{j,k} \log p_{j,k} -$$

$$\left[- \cos \gamma \cdot \sum_{k=1}^{K-1} \sum_{j=0}^{J-1} p_{j,k} \log(\cos \gamma \cdot p_{j,k}) - (1 - \cos \gamma) \cdot \log(1 - \cos \gamma) \right], \quad (3.35)$$

где $p_{j,k} = s_{j,k} \left(\sum_{m=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{J-1} s_{i,m} \right)^{-1}$ - вероятности попадания точечного источника

в неискаженное поле зрения тепловизионной системы наблюдения; γ - угол наклона плоскости расположения термочувствительных элементов относительно плоскости, ортогональной главной оптической оси.

$$\varepsilon_{af_ab}(\gamma) \geq 0, \lim_{\gamma \rightarrow 0} \varepsilon_{af_ab}(\gamma) = 0.$$

3.3.2. Идентификация дисторсии

Вследствие того, что дисторсия сводится к нарушению ортогональности и изменению размеров декартовой системы координат, создаваемой опорными точечными источниками, в качестве упорядочения может быть предложена структура, приведенная на рис. 3.8. Сплошными линиями на рисунке показаны связи между точечными источниками, размещенными в углах квадрата в системе без дисторсий. Штрих пунктирными - в системе с дисторсиями - аффинные (прямые линии) и «подушка/бочка» (отрезки кривых линий).

Величину дисторсии предложено определять путем оценки размеров диагоналей, проведенных из центра образа левого верхнего точечного источника (Y_1, Z_1) в центр правого нижнего источника (Y_5, Z_5) , $[(Y_1 - Y_5)^2 + (Z_1 - Z_5)^2]$, и из центра правого верхнего источника (Y_3, Z_3) в центр левого нижнего (Y_7, Z_7) , $[(Y_3 - Y_7)^2 + (Z_3 - Z_7)^2]$ а также угла между этими диагоналями [10], определяемыми по зависимостям, которые получаются из (3.31) путем пересчета угловых координат в координаты цифрового образа сцены. Длины диагоналей определяются по зависимостям:

$L_{1-5} = \sqrt{(Y_1 - Y_5)^2 + (Z_1 - Z_5)^2}$; $L_{3-7} = \sqrt{(Y_3 - Y_7)^2 + (Z_3 - Z_7)^2}$. Разность длин диагоналей равна $\Delta_{diag} = |L_{1-5} - L_{3-7}|$. Угол между диагоналями равен

$\varphi = \arctg \left| \frac{A_{1-5}B_{3-7} - B_{1-5}A_{3-7}}{A_{1-5}A_{3-7} + B_{1-5}B_{3-7}} \right|$, где $A_{1-5}, A_{3-7}, B_{1-5}, B_{3-7}$ - параметры

прямых, определяемые по конечным точка диагоналей по следующим зависимостям: $A_{1-3} = Y_1 - Y_3$; $A_{5-7} = Y_5 - Y_7$; $B_{1-3} = Z_3 - Z_1$;
 $B_{5-7} = Z_7 - Z_5$;

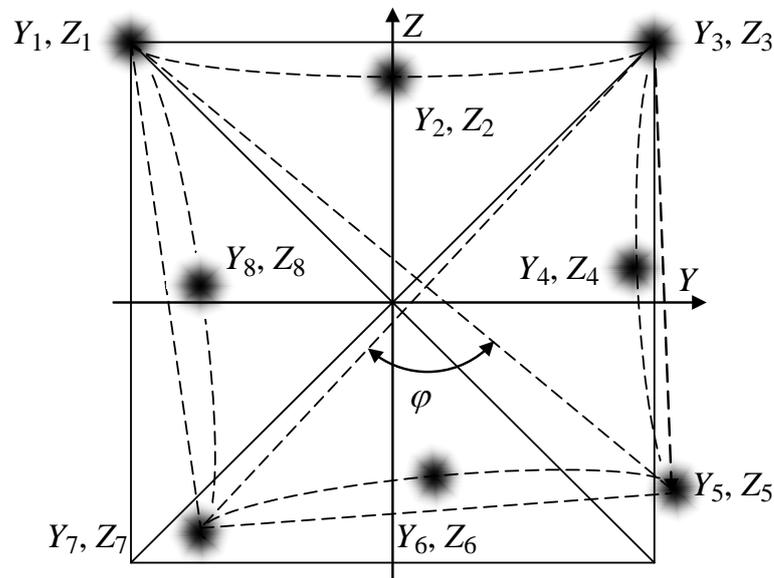


Рис. 3.8. Структура тест-объекта для определения дисторсии

Аберрации при «подушке»/»бочке» оцениваются как:

$$\Delta_1 = |0,5(Z_1 + Z_3) - Z_2|; \quad \Delta_2 = |0,5(Y_3 + Y_5) - Y_4|;$$

$$\Delta_3 = |0,5(Z_5 + Z_7) - Z_6|; \quad \Delta_4 = |0,5(Y_7 + Y_1) - Y_8|.$$

3.3.3. Определение пространственных координат образов точечных источников

Как следует из методов оценки дисторсии, они сводятся к поиску образов точечных источника на цифровой модели теплового образа сцены, определению местоположений центров образов на цифровой модели сцены и оценке расстояний между ожидаемыми и реальными расположениями центров образов. эталонных точечных источников.

Поиск может быть произведен с помощью операции амплитудной дискриминации, проводимой после снятия тепло-сигнальной характеристики на предыдущем этапе тестирования, в результате которой может быть

получено минимальное D_{\min} и максимальное D_{\max} значение кода интенсивности теплового излучения, формируемого аппаратными средствами. амплитудная дискриминация проводится по всему цифровому образу сцены согласно зависимости:

$$D_{j,k} = \begin{cases} D_{\max}, & \text{when } D_{j,k} \geq \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}; \\ D_{\min}, & \text{when } D_{j,k} < \frac{D_{\max} + D_{\min}}{2}. \end{cases} \quad (3.35)$$

В результате порогового разделения формируется гистограмма распределения интенсивностей, подобная показанной на рис. 3.6. В гистограмме имеется всего два разряда, первый - со значениями кодов интенсивностей из диапазона $D_{\min} \leq D_{j,k} < \frac{D_{\min} + D_{\max}}{2}$, и второй - со значениями $\frac{D_{\min} + D_{\max}}{2} \leq D_{j,k} \leq D_{\max}$. Перекрытие разрядов гистограммы (рис. 3.6) возникает за счет случайных факторов, присутствующих в каналах формирования и преобразования тепловых сигналов. Поэтому в окрестности границы образа точечного источника всегда имеются пиксели, относящиеся к фону, но пространственно расположенные внутри границы образа, а также пиксели, относящиеся к образу точечного источника, но пространственно расположенные вне границы. Это, в свою очередь, означает, что в бинарном образе точечного источника присутствует пространственный шум типа «соль с перцем» [26], и поэтому необходима фильтрация образа.

Методика 3.1. Фильтрация образа точечного источника

Эффективно подавить пространственный шум указанного типа позволяет медианный фильтр, относящийся к разряду нелинейных, нерекурсивных. Схема фильтрации представлена на рис. 3.9.

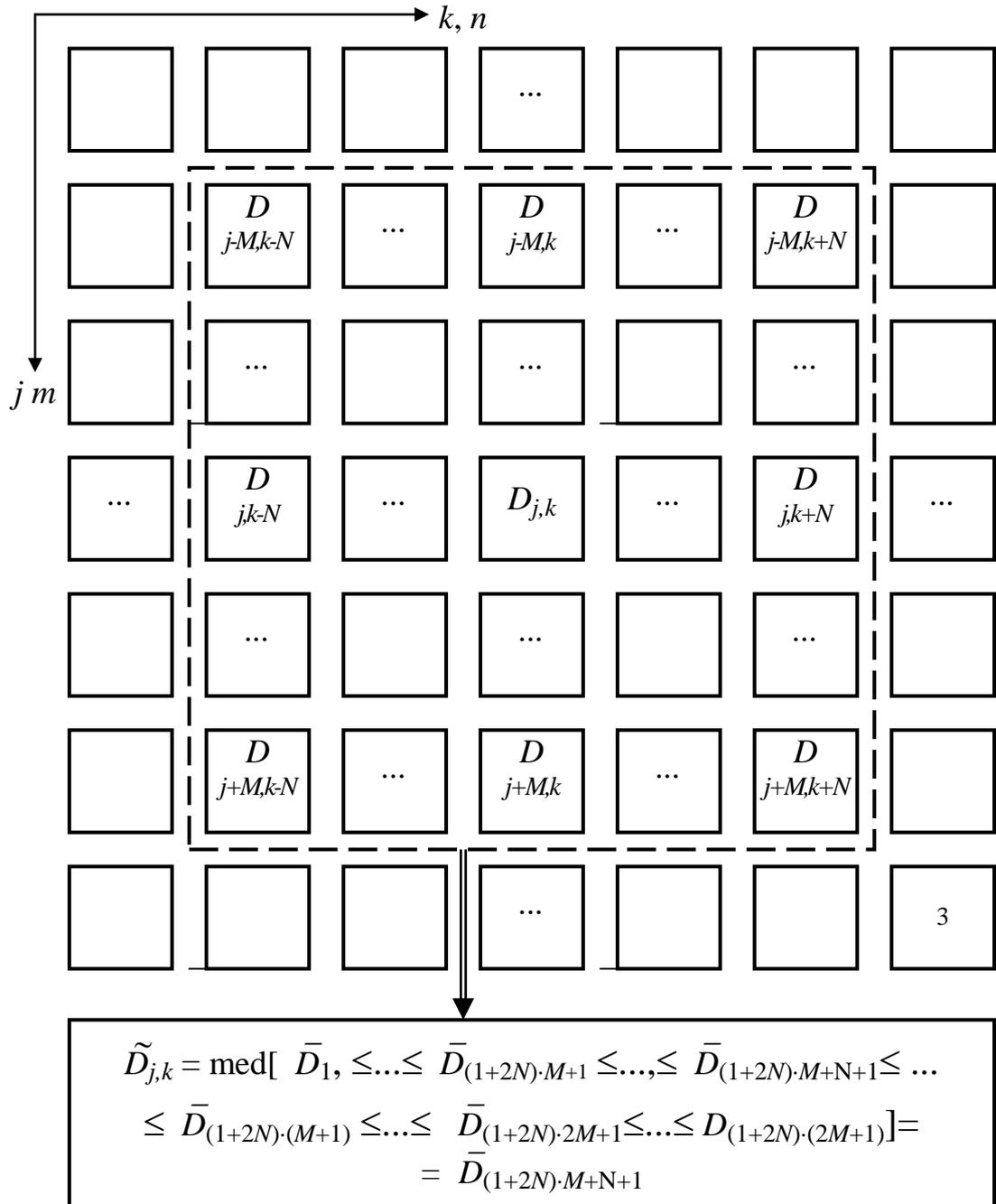


Рис. 3.9. Схема медианной фильтрации

Медианный фильтр, имеет апертуру размером $(2M + 1) \times (2N + 1)$, где A и B - целые числа. Апертура перемещается по строкам j и столбцам k цифрового образа сцены в направлениях возрастания соответствующих индексов $-M \leq m \leq M$, $-N \leq n \leq N$. Коды теплового цифрового образа сцены, попавшие в апертуру фильтра, преобразуются следующим образом:

1) Из кортежа кодов, $D = [D_{j-M,k-N}, \dots, D_{j-M,k}, \dots, D_{j-M,k+N}, \dots, D_{j,k-N}, \dots, D_{j,k}, \dots, D_{j,k+N}, \dots, D_{j+M,k-N}, \dots, D_{j+M,k}, \dots, D_{j+M,k+N}]$, упорядоченного упорядоченных по возрастанию индексов j (m), k (n), формируется кортеж, упорядоченный по возрастанию значений кодов

$$\bar{D} = [\bar{D}_1, \dots, \bar{D}_{N+1}, \dots, \bar{D}_{2N+1}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot M+1}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot M+N+1}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot (M+1)}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot 2M+1}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot 2M+N+1}, \dots, \bar{D}_{(2N+1) \cdot (2M+1)}],$$

такой, что $\forall \bar{D}_{\dots} \in D$ и

$$\bar{D}_1 \leq \dots \leq \bar{D}_{N+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{2N+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot M+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot M+N+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot (M+1)} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot 2M+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot 2M+N+1} \leq \dots \leq \bar{D}_{(2N+1) \cdot (2M+1)}.$$

2) Из кортежа \bar{D} выбирается средний элемент $\bar{D}_{(2N+1) \cdot M+N+1}$, который представляет собой отфильтрованное значение интенсивности теплового излучения от точечного источника, т.е.

$$\tilde{D}_{j,k} = \text{med}(\bar{D}).$$

В более общем случае в качестве фильтрованного значения может быть выбран не средний элемент множества \bar{D} , а элемент имеющий другой индекс в кортеже, а следовательно фильтр позволяет заменять значения кодов, не укладывающихся в требуемую статистику, на значения соответствующие выбранной статистике.

Другим обобщением медианного фильтра является размер и форма его апертуры. Кроме апертуры прямоугольной формы, рассмотренной выше, могут быть применены апертуры, показанные на рис. 3.10, которые применяются для фильтрации приграничных областей образов эталонных точечных источников.

В результате фильтрации формируется бинаризованное изображение $[d'_{m,j}]$, все коды которого равны нулю (образы фона), или единице (образы излучателя) (рис. 3.11).

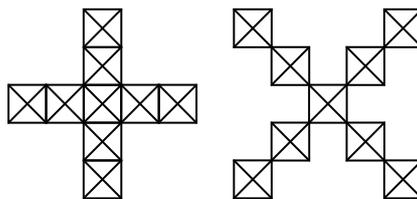


Рис. 3.10. Варианты формы апертуры медианного фильтра

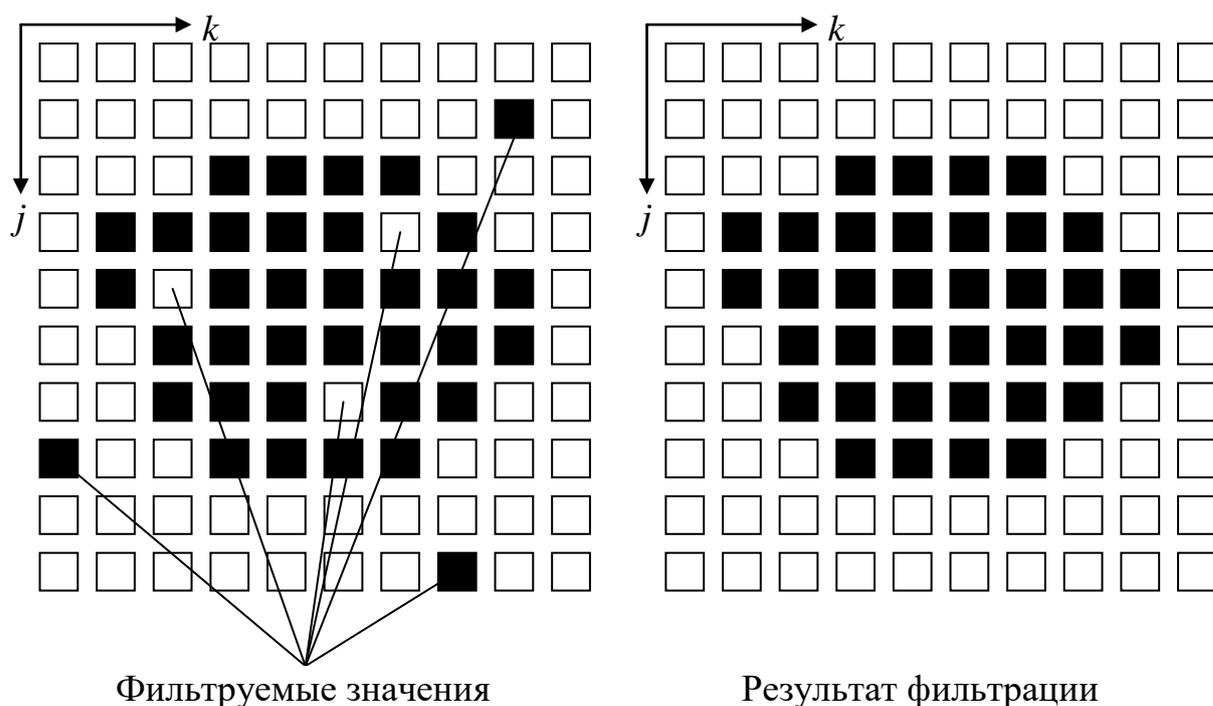


Рис. 3.11. Бинаризованный образ теплового точечного источника

а) исходный, б) после фильтрации медианным фильтром

Методика 3.2. Определение координат центра образа точечного источника

Поскольку все коды, входящие в образ излучателя, имеют одинаковый вес, координаты центра излучателя могут быть определены как координаты геометрического центра. Обозначим дискретные координаты, лежащие в j -й строке, как m_j , а координаты, лежащие в m -том столбце, как j_m . После медианной фильтрации изрезанность границ устраняется, поэтому можно считать, что в каждой строке образа излучателя количество связанных цепочек кодов равно единице и выполняется условие [17]:

$$m_{j \min} \leq m_j \leq m_{j \max}; j_{m \min} \leq j_m \leq j_{m \max}. \quad (3.36)$$

Координаты рассчитываются по следующим зависимостям:

$$m^\circ = \frac{1}{\max(j_{m \max}) - \min(j_{m \min}) + 1} \sum_{j=\min(j_{m \min})}^{\max(j_{m \max})} \frac{m_{j \min} + m_{j \max}}{2}; \quad (3.37)$$

$$j^\circ = \frac{1}{\max(m_{j \max}) - \min(m_{j \min}) + 1} \sum_{j=\min(m_{j \min})}^{\max(m_{j \max})} \frac{j_{m \min} + j_{m \max}}{2}; \quad (3.38)$$

3.4. Оценка потерь вследствие пространственной динамики.

Пространственная динамика формируется парой объектив/тепло-сигнальный преобразователь и зависит от ширины суммарного импульсного отклика, который имеет вид функции Гаусса с коэффициентом передачи $D(Y, Z)$ и фактором, определяющим ширину, равным b_Q (рис. 3.12).

Для определения пространственно-динамических потерь информации включать в тест-объект элемент с управляемой пространственно-частотной характеристикой [11]. В качестве подобного элемента может служить пара пластин нагреваемых до заданной температуры T_t° с изменяемым зазором ζ между ними, размещенная над пластиной с температурой T_b° , создающей разностно-температурный фон. Вследствие того, что пространственная динамика тепловизионной системы определяется пространственно-частотной характеристикой, показанной на рис. 3.12, сигнал, формируемый тепловизионной системой наблюдения при поперечном зазоре сканировании подобной сцены, будет иметь вид (ξ - вспомогательный аргумент):

$$D(Y, Z) = \int_{-\infty}^{Y, Z} \frac{\kappa_d}{\sqrt{2\pi} b_{d, Y, Z}} \exp\left(-\frac{(\xi + \zeta)^2}{2(b_{d, Y, Z})^2}\right) d\xi + \int_{-\infty}^{Y, Z} \frac{\kappa_d}{\sqrt{2\pi} b_{d, Y, Z}} \exp\left(-\frac{(\xi - \zeta)^2}{2(b_{d, Y, Z})^2}\right) d\xi \quad (3.39)$$

Отношение ширины зазора ζ к параметру b , от которого зависит полоса пропускания тепловизионной системы, определяет глубину модуляции

выходного кода $\alpha(\xi/b) = D_{\max}(Y, Z)$. В свою очередь, уменьшение глубины модуляции приводит к потере информации, которая определяется

зависимостью по (3.1) $\varepsilon_a = \sum_{m=a}^M -p_m \cdot \log p_m$.

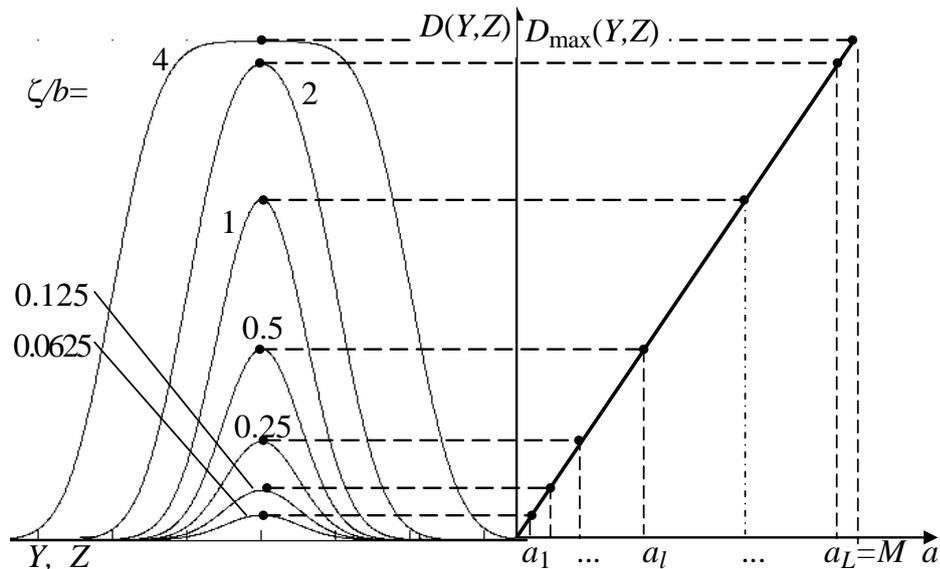


Рис. 3.12. Пространственно-частотная характеристика тепловизионной системы наблюдения

Суммарная потеря информации на статических и пространственно-динамических передаточных характеристиках звеньев определяется как:

$$\varepsilon = \varepsilon_{T^{\circ},1} + \varepsilon_{T^{\circ},2} + \varepsilon_{dis} + \varepsilon_{af_ab} + \varepsilon_a, \quad (3.40)$$

где $\varepsilon_{T^{\circ},1} + \varepsilon_{T^{\circ},2}$ - потери на тепло-сигнальной характеристике; $\varepsilon_{dis} + \varepsilon_{af_ab}$ - потери на дисторсии и аффинных абберациях; ε_a - потери на сокращении динамического диапазона.

3.5. Выводы

1. Разработана модель распространения теплового излучения от объектов наблюдаемой сцены; произведено моделирование процесса формирования теплового образа наблюдаемой сцены системой от генерации

до получения цифровой модели, моделирование потерь при формировании теплового образа наблюдаемой сцены тепловизионной системой наблюдения.

2. Разработаны модели оценки таких характеристик теплового цифрового образа сцены, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика) при рассмотрении доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала.

3. Определен модулирующий фактор для тепло-сигнальной характеристики и сформулированы понятия средней статической чувствительности и статической чувствительности этого фактора.

4. Показана связь потерь информации в канале измерения пространственных координат с абберациями, вносимыми парой объектив/термоэлектронный преобразователь.

5. В результате исследования принципов оценки тепловизионной системы наблюдения определены основные объекты эталонной сцены и формирования проблемно ориентированных моделей излучения тепловых сигналов, каждый из которых предназначен для контроля заданного параметра тепловизионной системы наблюдения, предложена структура устройства тестирования тепловизионных систем наблюдения, которая позволяет повысить качество тестирования при одновременном сокращении времени обработки тепловых образов сцен.

6. Сформулированы требования к программному продукту статистической обработки тепловых образов эталонных сцен.

4. АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕСТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

4.0. Введение

Теоретические положения, принципы тестирования, рассмотренные в предыдущих главах, учтены и реализованы в программно-аппаратном комплексе для генерации тестовых сигналов и контроля параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден», который допустимо использовать в полевых и лабораторных условиях при испытаниях.

4.1. Описание генератора эталонных тестовых сигналов для оценки качества формируемого образа тепловой сцены

4.1.1. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки тепло-сигнальной характеристики

Для оценки тепло-сигнальной характеристики разработан генератор эталонных тепловых сигналов (ГЭТС), излучатели которого представлены в виде двух площадных элементов Пельтье, расположенных параллельно с контролируемым зазором по границе между ними [2, 8, 99].

Структурная схема, представленная на рис. 4.1, демонстрирует способ работы генератора эталонных тепловых сигналов таким образом: от источника питания (1) к блоку управления (2) подается питание. Блок управления (2) через усилители мощности (3) и (4) подает команду нагрева или охлаждения параллельно расположенным элементам Пельтье (5) и (6). Цифровые датчики температуры (8) и (9), имеющие тепловой контакт с элементами Пельтье (5) и (6), отслеживают значения температур каждого из элементов Пельтье (5) и (6). Значения температур подают на вход блока управления (2), где сравнивают с заранее заданными значениями. При

помощи связи блока управления (2) с элементами Пельтье (5) и (6) через цифровые датчики температуры (8) и (9) создают необходимый нагрев и охлаждение элементов Пельтье (5) и (6). Температуру каждого из элементов Пельтье (5) и (6) поддерживают в соответствии со значениями, установленными блоком управления (2). Теплоизоляцию элементов Пельтье (5) и (6) осуществляют за счет расположения между элементами Пельтье (5) и (6) термоизолятора (7).

Установленные параллельно элементы Пельтье (5) и (6) нагревают и охлаждают при помощи блока управления (2) до заданных блоком управления (2) температур. Корректировку и поддержание заданных температур элементов Пельтье (5) и (6) осуществляют при помощи цифровых датчиков температуры (8) и (9) и блока управления (2).

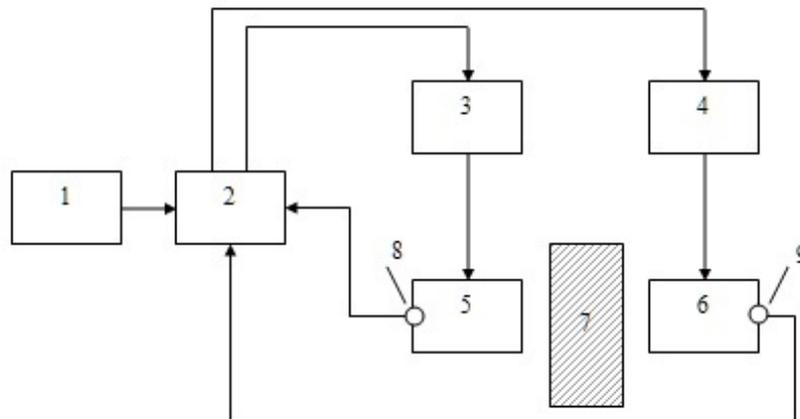


Рис. 4.1. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки тепло-сигнальной характеристики

Управление излучающими элементами осуществляется при помощи AVR 8-bit RISC microcontroller ATmega8 (8 MHz). Температурный диапазон излучателей – 5-40°C.

Управление температурой элемента Пельтье от цифрового контроллера позволяет повысить точность установки температуры эталонной сцены для

каждого отсчета тепло-сигнальной характеристики и сократить время на набор статистики по всей характеристике в целом.

4.1.2. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки дисторсии

В качестве источника эталонного образа для оценки дисторсии разработан генератор эталонных тепловых тестовых сигналов, выполненный в виде матрицы излучающих элементов, каждый из которых проецируется в свой термочувствительный элемент тепловизионной системы (рис. 4.2). Расчет интенсивности излучения, необходимой для проведения экспериментов по тестированию тепловизионной системы, проводился по модели, разработанной в разделе 2 диссертации. На принципиальной схеме, показанной на рис. 4.2, изображена матрица SMD (Surface Mount Device) резисторов.

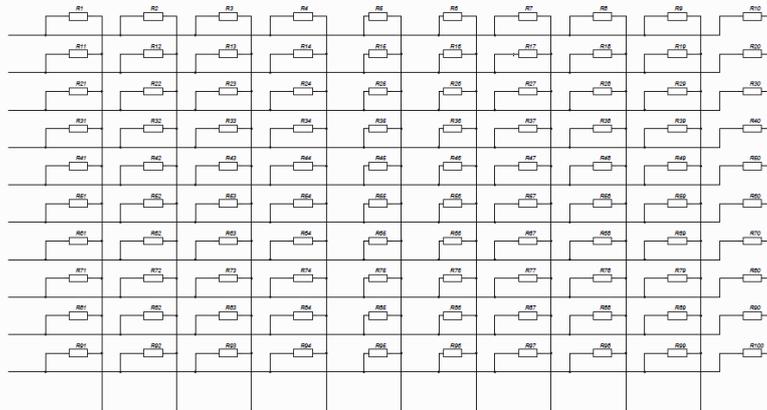


Рис. 4.2. Принципиальная схема генератора эталонных тестовых сигналов для оценки дисторсии

Для сокращения времени контроля источник эталонного образа располагается по краям наблюдаемой сцены в точках, определенных рис. 8., при этом включается один из резисторов (в правом (левом) верхнем (нижнем) углу – правый (левый) верхний (нижний), в середине правого (левого) столбца правый (левый), а в середине правой (левой) строки – правый (левый)). Включение и выключение излучающих элементов в нужных

координатах осуществляется благодаря блоку управления, модель которого представлена на рис. 4.3.

Раздельное включение излучающих тепло резисторов позволяет сократить время на проведение тестирования и последующую обработку цифрового образа сцены, с учетом потерь времени на физическое перемещение эталонного генератора в требуемую точку наблюдаемой сцены.

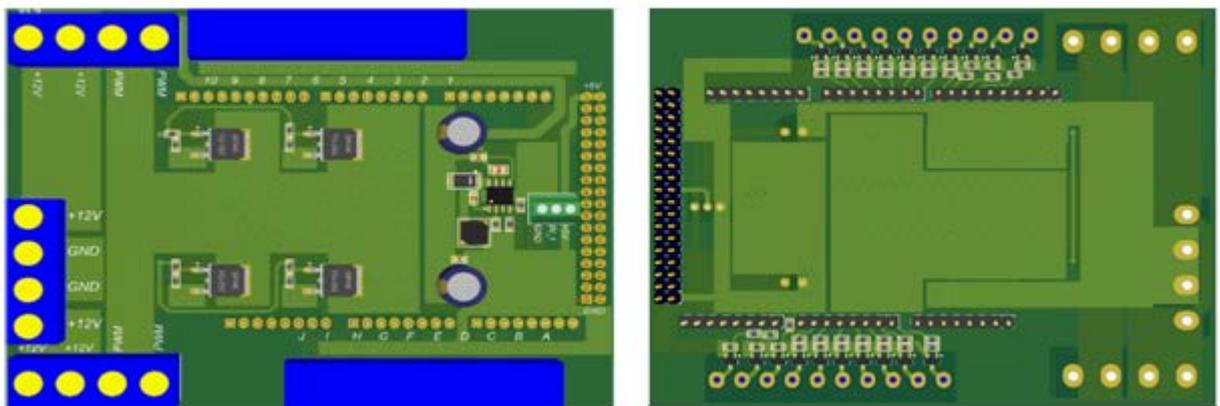


Рис. 4.3. Блок управления генератором эталонных сигналов

4.1.3. Генератор эталонных тестовых сигналов для оценки разрешающей способности

В качестве источника эталонного тестового сигнала для оценки динамических потерь и разрешающей способности тепловизионной системы наблюдения разработан генератор эталонного тестового сигнала, выполненный в виде тепловыделяющих элементов – пластин, расположенных под углом друг к другу, структурная схема которого представлена на рис. 4.4 [3, 11].

Принцип работы такого генератора осуществляется таким образом: цифровые датчики температуры (3), установленные на пластинах теплового излучателя, подают значения температур пластин на вход устройства управления (4) на базе микропроцессора, обратная связь которого с источником питания (1) осуществляется с помощью сигналов от цифровых

датчиков температуры. Блок охлаждения (5), вход которого соединен с устройством управления, позволяет поддерживать и корректировать значения тестовых сигналов.

За счет управляемой установки угла расположения пластин достигается экономия времени на тестирование разрешения.

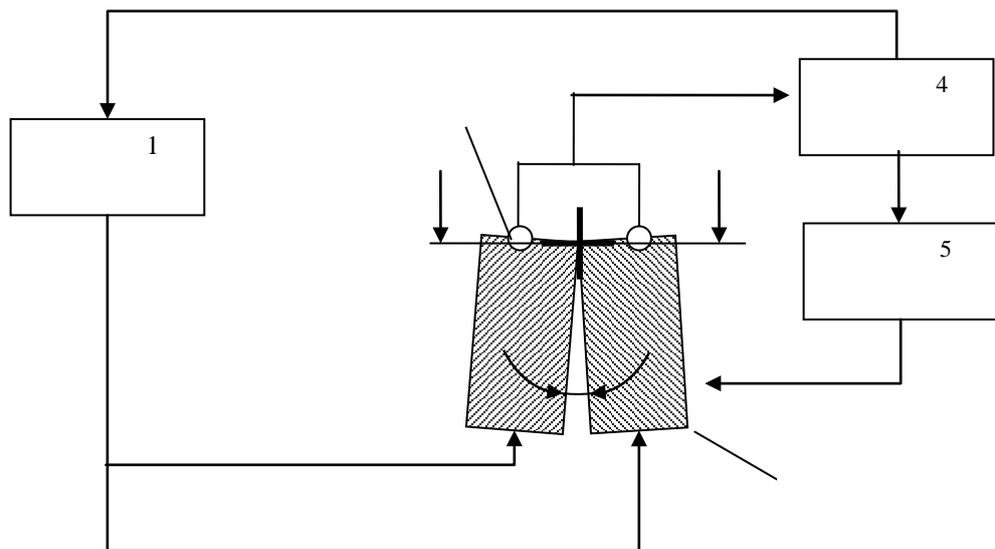


Рис. 4.4. Тест-объект для измерения разрешения тепловизионной системы наблюдения

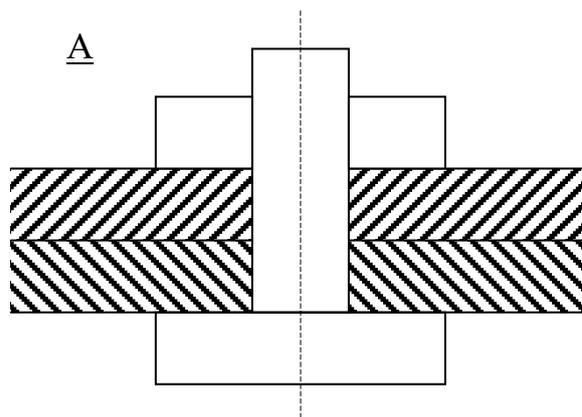


Рис. 4.4. Крепление пластин тест-объекта для измерения разрешения тепловизионной системы наблюдения

Программный комплекс обработки полученной информации производит сравнение образов сцен, формируемых на выходе

тепловизионной системы с эталонными образцами, полученными в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, с реальными образцами, формируемыми тестируемой тепловизионной системой на основании методов обработки информации, предложенных в третьей главе данной диссертации. Если не выполняется хотя бы одно условие, то требуется настройка тепловизионной системы.

Для получения тепловых образов эталонных сцен в системе была использована тепловая камера болометрического типа UTi260B с приведенными ниже характеристиками:

ИК-разрешение	49,152 пикселей (256 × 192);
Инфракрасный спектральный диапазон	8 мкм ~ 14 мкм;
Температурная чувствительность	< 60mK;
Пространственное разрешение	3,8mrad.

4.2. Программный модуль управления устройством тестирования

Для управления устройством тестирования с целью проведения экспериментов и получения стабильного во времени температурного режима элементов тепловой картины разработан программный модуль [5, 97]. Реализация произведена на AVR 8-bit RISC microcontroller ATmega8 (8 MHz); Язык: C++. Объем программы: 27 Кб.

Расчетный модуль позволяет определить температуру элементов тепловой картины, требуемые мощности каналов для стабильного во времени поддержания заданных температур элементов тепловой картины.

Структурная схема цифровой системы поддержания заданной разности температур, приведена на рис. 4.4.

В цифровой системе DC - цифровой контроллер; $\Delta T^{\circ}(t)$ - заданная разность температур, которую должен поддерживать тест-объект; $u_o(t)$ - сигнал управления, подаваемый на охлаждающий элемент; $w_{п}(t)$ - импульсный отклик охлаждающего элемента; $T^{\circ}_o(t)$ - температура

охлаждающего элемента; $w_{п}(t)$ - импульсный отклик охлаждаемой пластины на воздействие со стороны охлаждающего элемента; $T_{п1}^{\circ}(t)$, $T_{п2}^{\circ}(t)$ - температура первой (неохлаждаемой) и второй (принудительно охлаждаемой) пластины; $w_{д1}(t)$, $w_{д2}(t)$ - импульсные отклики датчиков температуры; $u_{д1}(t)$, $u_{д2}(t)$ - сигналы с выходов соответствующих датчиков температур; Interface - интерфейс между контроллером и собственно тест объектом.

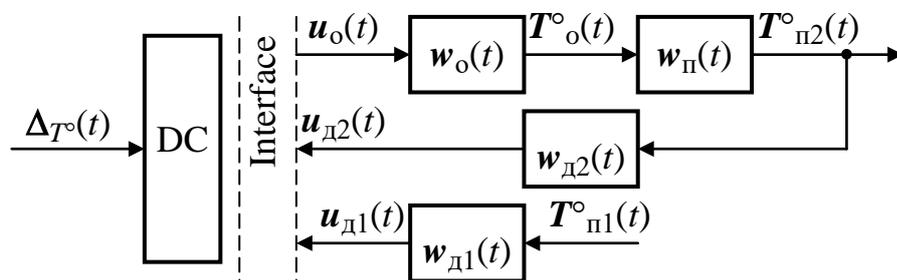


Рис. 4.4. Структура системы поддержания заданной разности температур

Задача установки и поддержания температур элементов тепловой картины блоком управления решена использованием пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора для каждого из элементов тепловой картины [90, 94].

Основными шагами алгоритма являются:

1. задание температур излучающих элементов;
2. определение установленных температурных режимов элементов;
3. вычисление ПИД-коэффициентов;
4. организация и управление ходом расчета, сохранение текущего состояния;

Такое структурирование алгоритма программного модуля дает возможность определять температуру излучающих элементов и требуемые мощности каналов для поддержания блоком управления заданных температур каждого из излучающих элементов устройства тестирования.

В устройстве на нагревательный элемент подается электрический сигнал до достижения заданного значения температуры, после чего подача сигнала прекращается. Несмотря на это, разогретый нагреватель продолжает отдавать тепло и температура излучающего элемента какое-то время продолжает нарастать, что приводит к перегреву, иногда значительному. При последующем остывании излучающего элемента, по достижении заданного значения температуры, на нагреватель вновь подается электрический сигнал. Нагреватель сначала разогревает себя, затем окружающие области, и, таким образом, охлаждение будет продолжаться до тех пор, пока волна тепла не достигнет датчика температуры. Избежать значительных колебаний температуры около заданного значения, нарушения теплового баланса излучающего элемента, обеспечить как высокую скорость повышения температуры излучающего элемента, так и его корректную работу в стационарном режиме позволяет применение пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования для каждого из элементов устройства тестирования разрешения тепловизоров по контрасту.

ПИД-регулятор предполагает уменьшение мощности, подаваемой на излучатель, по мере приближения температуры объекта к заданной температуре. Кроме того, в установившемся режиме регулирования по ПИД закону находится величина тепловой мощности, необходимой для компенсации тепловых потерь и поддержания заданной температуры. Пропорционально - интегрально-дифференциальный закон регулирования обеспечивает высокую точность поддержания температуры [82, 96, 100, 138].

Мощность N , которая должна выделяться нагревателем, выраженная в процентах от его максимальной мощности, рассчитывается по формуле:

$$N = \frac{100}{K_p} \left(\Delta T + \frac{1}{K_i} \int_0^t \Delta T dT - K_d \frac{dT}{dt} \right) \quad (4.1)$$

где t - время, K_p - пропорциональный коэффициент регулирования, K_i -

интегральный коэффициент регулирования, K_d - дифференциальный коэффициент регулирования.

Первое слагаемое в выражении (пропорциональная составляющая) прямо пропорционально «невязке» $\Delta T = T_{yc} - T$ - разности температурной уставки T_{yc} и измеренного значения температуры T . Его смысл состоит в том, что при «невязке» $\Delta T = K_p$ (в °C) регулятор начнет снижать мощность.

Второе слагаемое в установившемся режиме регулирования равно величине тепловой мощности, необходимой для компенсации тепловых потерь при $\Delta T = 0$.

Третья составляющая пропорциональна скорости изменения температуры с обратным знаком и должна препятствовать резким изменениям температуры объекта (дифференциальная составляющая).

При увеличении K_p увеличивается скорость выхода на установленное значение, увеличивается управляющий сигнал. Система не может прийти ровно к заданному значению, так как при приближении к установке K_p составляющая пропорционально уменьшается. При дальнейшем увеличении K_p реальная система теряет устойчивость, и начинаются колебания.

При увеличении K_i растёт скорость компенсации накопившейся ошибки, что позволяет вывести систему точно к заданному значению с течением времени. Если система медленная, а K_i слишком большой - интегральная сумма сильно вырастет и произойдёт перерегулирование, которое может иметь характер незатухающих колебаний с большим периодом. Поэтому интегральную сумму в алгоритме регулятора часто ограничивают, чтобы она не могла увеличиваться и уменьшаться до бесконечности.

При увеличении K_d растёт стабильность системы, она не даёт системе меняться слишком быстро. В то же время K_d может стать причиной неадекватного поведения системы и постоянных скачков управляющего

сигнала, если значение с датчика шумит. На каждое резкое изменение сигнала с датчика K_d составляющая будет реагировать изменением управляющего сигнала, поэтому сигнал с датчика нужно фильтровать.

Для достижения высокого качества регулирования температуры необходимо правильно настроить регулятор – задать три коэффициента. В данном устройстве произведен подбор ПИД - коэффициентов по методу Циглера - Никольса, а также ручной подстройкой.

Для анализа поведения системы произведено следующее:
 задано целевое значение 30°C , ожидание стабилизации системы;
 задано целевое значение 40°C , ожидание стабилизации системы;
 построен график зависимости температуры датчика от времени, анализ полученных значений.

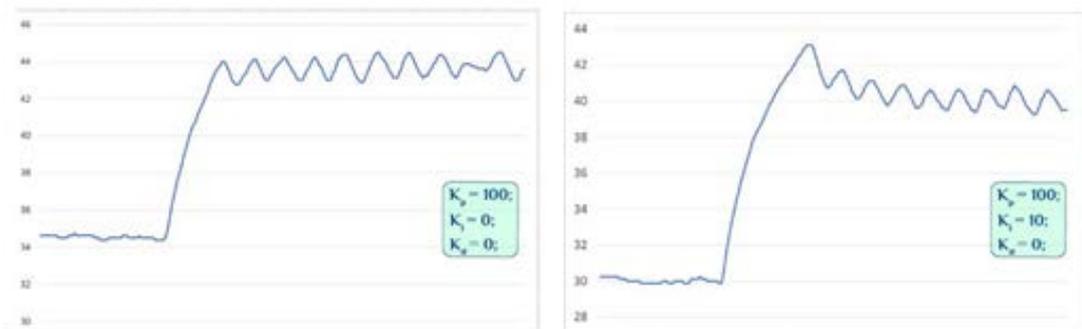


Рис. 4.5. Установка пропорциональной (а) и интегрирующей (б) составляющих

Из рисунка 4.5 (а) видно, что при использовании только пропорциональной составляющей система не может выйти на требуемые значения из-за статической ошибки. Добавлена интегрирующая составляющая, что показано на рис. 4.5 (б), через задание некоторого значения K_i .

По графику видно, что целевое значение установить удастся, но при подходе к установленному значению имеется выброс. Необходимо

увеличение коэффициента усиления дифференцирующей составляющей (рис. 4.6).

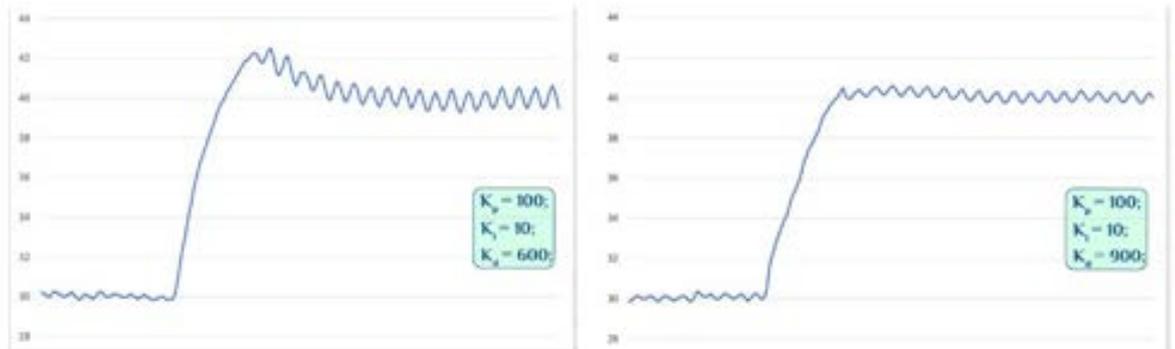


Рис. 4.6. Установка дифференцирующей составляющей

По графику на рисунке 4.6 видно, что амплитуда выброса уменьшилась, необходимо увеличить K_d

Для более быстрого выхода на нужное значение необходимо увеличить коэффициент усиления пропорциональной составляющей K_p (рис. 4.7).

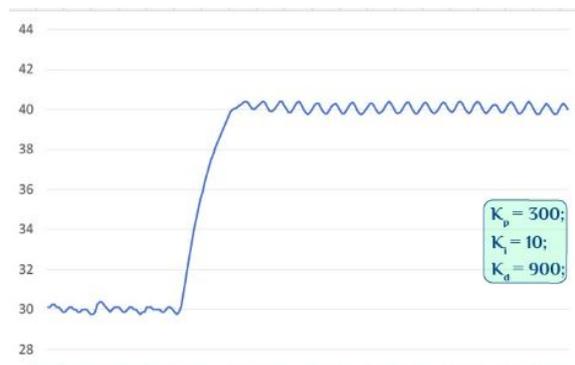


Рис. 4.7. Подбор коэффициента пропорциональной составляющей

Таким образом, корректно и стабильно во времени реализовано поддержание заданных температур излучающих элементов устройства тестирования разрешения тепловизоров по контрасту при температуре окружающей среды в пределах 10° - 40° С и относительной влажности не более 65%.

4.3. Тестирование тепловизионной системы наблюдения

Для проведения тестирования тепловизионной системы наблюдения при разработке оболочки модели было учтено множество влияющих факторов. Это выполняет требование к доступности изменения тестирующих значений.

На рисунке 4.9 представлен прототип устройства тестирования разрешения тепловизионных систем наблюдения по контрасту.



Рис. 4.9. Прототип устройства тестирования разрешения тепловизионных систем по контрасту

Установленные температуры каждого из излучающих элементов отражаются на дисплее OLED 128x64, интерфейс подключения - I2C (рис. 4.10).

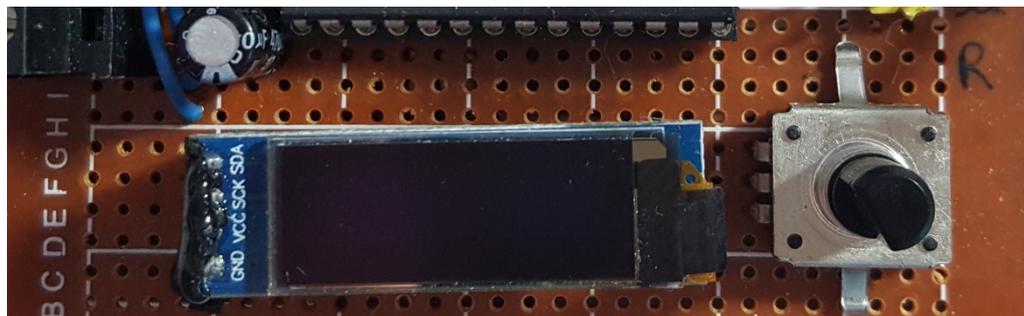


Рис. 4.10. Реализация установки и отображения температур излучающих элементов

Цифровые датчики температуры, имеющие тепловой контакт с излучающими элементами, отслеживают значения температур каждого из элементов, что отображается на дисплее (рис. 4.11).



Рис. 4.11. Отображение установленных температур

Пример реальных образов генератора тестовых сигналов, включающего площадной тест-объект для оценки неидеальности тепло-сигнальной характеристики, сформированные на выходе тепловизионной системы для сравнения с эталонными образцами, полученными в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, представлен на рисунке 4.12.

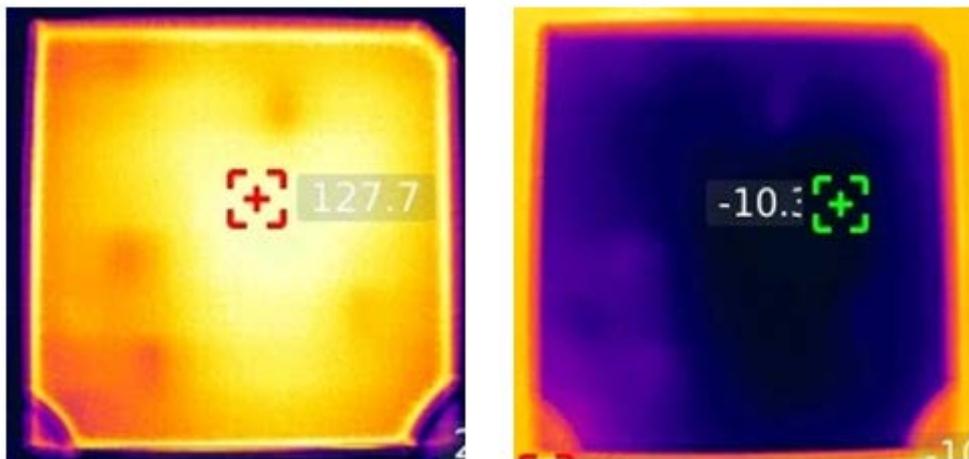


Рис. 4.12. Тепловая картина площадных излучающих элементов с установленными температурными режимами

В результате измерений температур построены гистограммы для различных значений T° , представленные на рисунке 4.13.

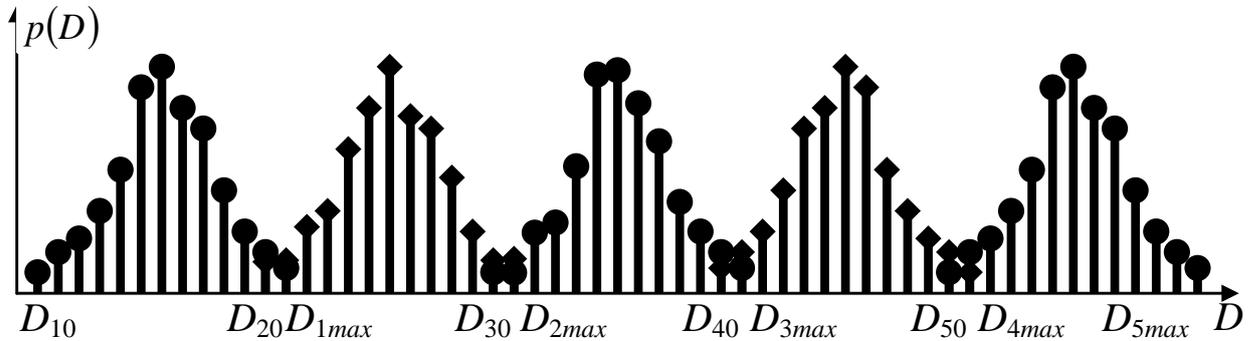


Рис. 4.13 Гистограммы интенсивностей измеряемых температур

Отклонение от значений ступенчато-наклонной линии сигнализирует о наличии потерь информации при работе термоэлектронного преобразователя, усилителя, цифро-аналогового преобразователя тестируемой тепловизионной системой наблюдения при формировании тепловых картинах наблюдаемых сцен.

Для реализации предложенного в 3 главе метода оценки дисторсии формируется образ тепловой сцены, на основании которого производится извлечение информации о местоположении излучающего точечного источника из общего теплового цифрового образа сцены. Пример реального теплового образа, включающего точечный источник излучения, представлен на рис. 4.14.

В устройство в виде алгоритма заложена методика определения локализации точечного источника излучения на тепловом образе наблюдаемой сцены.

Для работы по методике требуется бинарный образ сцены, который формируется в результате амплитудной дискриминации и фильтрации медианным фильтром. Образ сцены представляет собой множество пикселей, относящихся к образу точечного источника, закодированных логической

единицей, что соответствует коду D_{\max} , и множество пикселей, относящихся к образу фона, закодированных логическим нулем, что соответствует коду D_{\max} .

Локализация точечного источника проводится в несколько этапов.

На первом этапе на основании паспортных данных на исследуемый прибор пространственного расположения прибора и генератора эталонной сцены по законам геометрической оптики оценивается грубо местоположение точки K (см. рис. 2.1 и рис. 2.2) пространства, в которой располагается центр точечного источника (рис. 4.14)

$$j_K = \psi_K fr_Y; k_K = \vartheta_K fr_Z, \quad (4.2)$$

где ψ - угол курса между главной оптической осью и направлением на точечный источник K ; ϑ - угол места между главной оптической осью и направлением на точечный источник K ; f - фокусное расстояние (расстояние от задней поверхности объектива до термоэлектронного преобразователя); r_Y, r_Z - разрешение термоэлектронного преобразователя в термочувствительных ячейках на миллиметр по координатам Y и Z , соответственно; $r_Y = \frac{N_Y}{L_Y}$; $r_Z = \frac{N_Z}{L_Z}$; N_Y, N_Z - количество ячеек в строках и столбцах, соответственно; L_Y, L_Z геометрические размеры термоэлектронного преобразователя.

На втором этапе относительно найденных значений j_K, k_K определяются размеры области поиска центра образа точечного источника $j_K - M \leq j \leq j_K + M$, $k_K - N \leq k \leq k_K + N$, где M и N - паспортные максимально допустимые значения смещения образа точки от ее теоретического местоположения. Ситуация I означает, что точка K лежит вне границ, определенных паспортом на прибор, следовательно, он непригоден к эксплуатации.

На третьем этапе производится предварительное сканирование образа сцены с целью поиска образа точечного источника. Здесь возможны три ситуации, показанные на рис. 4.14.

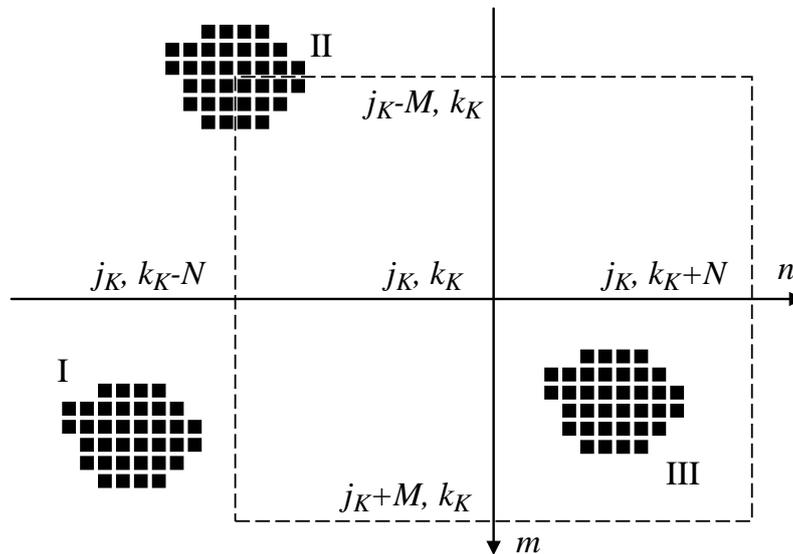


Рис. 4.14. Грубая оценка области расположения точечного источника

Ситуация II означает, что образ точечного источника лежит в левом верхнем угле области поиска, и мы попадаем в этот образ в самом начале сканирования. В этом случае должно производиться сканирование по координате j (m) до тех пор, пока не встретится пиксель, относящийся к фону. Далее делается возврат к предыдущему пикселю и обход образа по границе, который возвращает значения $j_{\min}, j_{\max}, k_{\min}, k_{\max}$ области локализации точечного источника. В ситуации III вначале сканирование производится в области фона. Если при сканировании происходит последующее попадание в область образа источника, то производится обход образа по границе, который возвращает значения $j_{\min}, j_{\max}, k_{\min}, k_{\max}$ области локализации точечного источника.

Для обхода образа точечного источника по контуру применен известный алгоритм Т. Павлидиса [70, 131], который был доработан следующим образом. В множество данных, используемых в алгоритме,

включены значения j_{\min} , j_{\max} , k_{\min} , k_{\max} . На каждом шаге по координате m в сторону убывания очередное полученное значение j сравнивается со значением, хранимым в ячейке j_{\min} . Если текущее значение j меньше сохраненного, то оно сохраняется, в противном случае операция сохранения игнорируется. На каждом шаге по координате m в сторону возрастания очередное полученное значение j сравнивается со значением, хранимым в ячейке j_{\max} . Если текущее значение j больше сохраненного, то оно сохраняется, в противном случае операция сохранения игнорируется. На каждом шаге по координате n в сторону убывания очередное полученное значение k сравнивается со значением, хранимым в ячейке k_{\min} . Если текущее значение k меньше сохраненного, то оно сохраняется, в противном случае операция сохранения игнорируется. На каждом шаге по координате n в сторону возрастания очередное полученное значение k сравнивается со значением, хранимым в ячейке k_{\max} . Если текущее значение k больше сохраненного, то оно сохраняется, в противном случае операция сохранения игнорируется.

В результате после окончания работы алгоритм обхода границы образа точечного источника, возвращает область локализации точечного источника.

Результат обработки образа сцены по методике и локализация области нахождения точечного источника показаны на рис. 4.15

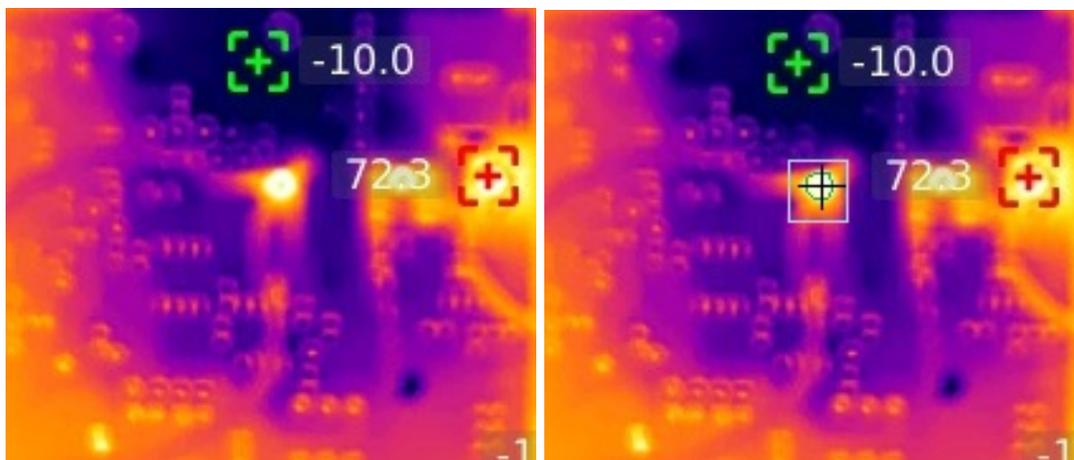


Рис. 4.15. Локализация расположения области точечного источника

Наличие искажений, вносимых дисторсией тепловизионной системы при формировании реальных тепловых образов наблюдаемых сцен, показано на рисунке 4.16.



Рис. 4.16. Тепловой образ сцены с наличием дисторсии

В качестве источника реального тестового сигнала для оценки разрешающей способности тепловизионной системы наблюдения использован генератор в виде пластин с изменяемым зазором между ними и нагреваемых до заданной температуры T_t° , создающий разностный температурный фон. Тепловой образ сцены представлен на рисунке 4.17.

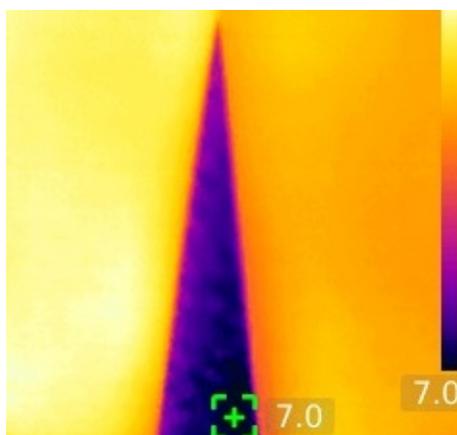


Рис. 4.17. Тепловой образ для измерения разрешения

В результате испытаний представленным излучателем, сформирована пространственно-частотная характеристика тестируемой тепловизионной системы наблюдения, рис. 4.18. Вследствие наблюдаемого уменьшения глубины модуляции реальной пространственно-частотной характеристики по сравнению с эталонной происходят пространственно-динамические потери информации при формировании теплового образа тестируемой системой.

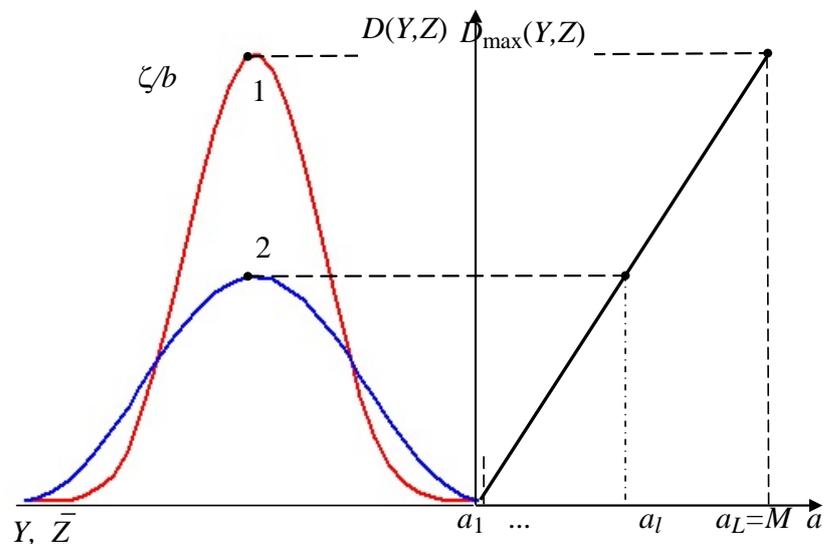


Рис. 4.18. Пространственно-частотная характеристика тепловизионной системы наблюдения

На основании проведенного тестирования можно классифицировать тестируемую тепловизионную систему наблюдения как «не годную» или отнести к классу «годных» с ограничениями в области применения в связи невысокой точностью.

4.4. Выводы

1. Предложен вариант реализации аппаратно-программного комплекса для генерации эталонных тепловых образов и контроля параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден».

2. Показана эффективность методов обработки тепловых образов сцен, получаемых на выходе генератора при решении задач построения тепло-сигнальной и абберационной характеристик, а также оценки разрешающей способности тестируемой тепловизионной система наблюдения.

3. Показана работоспособность метода тестирования путем сравнения образов сцен, формируемых на выходе тепловизионной системы с эталонными образами, полученными в результате моделирования прохождения сигнала через эталонную тепловизионную систему, с реальными образами, формируемыми тестируемой тепловизионной системой.

4. Подтвержден подход к тестированию за счет формирования тепловых образов реально наблюдаемых сцен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По проведенным исследованиям могут быть сделаны следующие выводы.

1. На основании системного анализа проблемы тестирования тепловизионных систем наблюдения сделан вывод о том, что их классификация по принципу «годен/не годен» может быть проведена с помощью аппаратно-программного комплекса генерации эталонных тестовых сигналов и обработки цифровых образов эталонных сцен, формируемых генератором и наблюдаемых тепловизионной системой наблюдения.

2. Сформулирована концепция физического моделирования генератора эталонных образов сцен, заключающаяся в том, что генерируемые тепловые образы должны быть ориентированы на тестирование отдельных протекающих в системе физических процессов, а их реализация должна быть достаточно простой.

3. На основании сформулированной концепции произведена постановка цели диссертации – повышение эффективности проверки тепловизионных систем наблюдения за счет создания управляемого аппаратно-программного комплекса генерации тепловой сцены и контроля параметров образа сцены, формируемого тестируемой системой.

4. Разработана модель генерации теплового излучения, положенная в основу формирования структур эталонных генераторов тепловых сцен и исследовано взаимодействие теплового излучения со средой.

5. Разработана модель формирования теплового образа наблюдаемой точки в плоскости расположения фоточувствительных элементов термоэлектронного преобразователя тепловизионной системы наблюдения.

6. Определены закономерности образования искажений, вносимых элементами тестируемой системы на каждом этапе формирования теплового

образа сцены, такие как виньетирование (неравномерность тепло-сигнальной характеристики), дисторсия, контраст (разрешающая способность).

7. Разработана модель распространения теплового излучения от объектов наблюдаемой сцены; произведено моделирование процесса формирования теплового образа наблюдаемой сцены системой от генерации до получения цифровой модели, моделирование потерь при формировании теплового образа наблюдаемой сцены тепловизионной системой наблюдения.

8. Разработаны модели оценки таких характеристик теплового цифрового образа сцены, как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, разрешающая способность (частотно-контрастная характеристика) при рассмотрении доли потерь от каждого вида погрешностей в общей потере информативности теплового сигнала.

9. Определен модулирующий фактор для тепло-сигнальной характеристики и сформулированы понятия средней статической чувствительности и статической чувствительности этого фактора.

10. Показана связь потерь информации в канале измерения пространственных координат с абберациями, вносимыми парой объектив/термоэлектронный преобразователь.

11. В результате исследования принципов оценки тепловизионной системы наблюдения определены основные объекты эталонной сцены и сформированы проблемно ориентированные модели излучения тепловых сигналов, каждый из которых предназначен для контроля заданного параметра тепловизионной системы наблюдения, предложена структура устройства тестирования тепловизионных систем наблюдения, которая позволяет повысить качество тестирования при одновременном сокращении времени обработки тепловых образов сцен.

12. Предложен вариант реализации аппаратно-программного комплекса для генерации эталонных тепловых образов и контроля

параметров тепловизионной системы наблюдения с целью классификации её по принципу «годен/негоден».

13. Разработано программное обеспечение по управлению процессом тестирования и обработке тепловых образов эталонных сцен, позволяющее решать задачи оценки потерь информации в тепловизионных системах наблюдения.

14. Методы, научные и технические решения, полученные в диссертации, были использованы при разработке прототипа тестирующей системы тепловизионных средств наблюдения различного назначения.

15. Теоретические результаты диссертации внедрены в учебный процесс, а практические (устройство генерации эталонных тепловых образов и программное обеспечение управления тестированием) в промышленность с техническим эффектом – сокращение времени тестирования при одновременном повышении его качества.

16. Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в создании эталонного генератора и метода обработки цифровых моделей сцен для идентификации информационных потерь, возникающих при наблюдении динамически перемещающихся в пространстве тепловых объектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Особенности реализации устройства тестирования разрешения тепловизоров по контрасту с программным модулем управления. Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Сборник статей. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2021. С. 194-195.
2. Акименко Т. А., Ларкин Е. В., Лучанский О. А., Филиппова Е. В. Устройство тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Патент на полезную модель RU 191285 U1, 01.08.2019. Заявка № 2019117661 от 06.06.2019.
3. Акименко Т. А., Ларкин Е. В., Филиппова Е. В. Тест-объект для измерения разрешения тепловизоров. Патент на полезную модель RU 176316 U1, 16.01.2018. Заявка № 2017126695 от 25.07.2017.
4. Акименко Т. А., Рыбалкина Ю. С., Филиппова Е. В. Оптическая модуляция излучения в тепловизионной системе. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 4.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 472-478.
5. Акименко Т. А., Филиппов А. Е., Филиппова Е. В. Программный модель управления устройством тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2019661213, 22.08.2019. Заявка № 2019619993 от 12.08.2019.
6. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Исследование статических характеристик и пространственной динамики тепловизионной системы наблюдения. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 497-500.
7. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Математические модели источников сигналов для тепловизионных систем. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-1.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 202-208.

8. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Особенности реализации излучающего устройства тестирования тепловизионных систем при взаимодействии с внешней средой. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 245-250.

9. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Особенности тестирования систем наблюдения. 59-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием. Сборник докладов конференции. В 2-х частях. Под редакцией М. С. Воротилина. Тула, 2023. С. 294-298.

10. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Построение статических передаточных характеристик по элементам тест-объекта для канала измерения пространственных координат. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 62-66.

11. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Тест-объект для контроля параметров тепловизоров. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 12.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. С. 308-311.

12. Акименко Т. А., Филиппова Е. В. Формирование изображения на приемнике теплового излучения. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-1.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 13-20.

13. Акименко Т. А., Филиппова Е. В., Кобышева Е. А. Особенности реализации стендов контроля фотоприемников инфракрасного спектра. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 77-79.

14. Акименко Т. А., Филиппова Е. В., Кобышева Е. А. Построение статических передаточных характеристик по элементам тест-объекта для канала измерения моделирующего фактора. Инновационное развитие техники и технологий наземного транспорта. Сборник статей. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Уральский

федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2022. С. 132-133.

15. Акименко Т. А., Филиппова Е. В., Кобышева Е. А. Тестирование объектов тепловизионной системой наблюдения. Сборник статей. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2023. С. 234-237.

16. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Основы теории анализа и синтеза воздушной тепловизионной аппаратуры. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 2000. 252 с.

17. Андросов А. Ю. Трассировка движений операторов в тренажерах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. 155 с.

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

19. Бакланов М.Р., Демьяненко М.А. и др. Фотоприемники ИК-диапазона на основе многослойных квантовых ям GaAs/AlGaAs. Оптический журнал, 1992, №12, с.45-48.

20. Балоев В.А., Курт В.И., Щипунов А.Н. Направления совершенствования отраслевой системы метрологического обеспечения инфракрасных оптико-электронных приборов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 3. С. 5 – 13.

21. Богомоллов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК-систем.- М.: Радио и связь, 1987. – 208 с.

22. Бугаенко А.Г., Белозеров А.Ф., Митряйкин В.И. Опытный учебно-тренировочный и научный центр по тепловидению // Оптический

вестник. Бюллетень оптического общества им. Д.С. Рождественского. СПб. 2002. № 105. - С. 8 - 11.

23. Бураковский Т., Гизинский Е., Саля А. Инфракрасные излучатели. – Л.: Энергия, 1978. – 408 с.

24. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. С. 544.

25. Гибин И. С., Колесников Г. В.. Современные устройства измерения параметров и комплексного тестирования инфракрасных ФПУ и приборов. Успехи прикладной физики, 2014, том 2, № 3. – 293-302.

26. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2005. 1072 с.

27. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: Пер. с франц. – М.: Мир, 1988. – 416 с., ил.

28. ГОСТ 26148-84.

29. ГОСТ Р 8.619-2006.

30. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в РЭА. – Л.: Энергия, 1968. – 360 с.

31. Ерофеенко В.Г., Козловская И.С. Основы математического моделирования. - Минск: БГУ, 2002. - 195 с.

32. Ерофейчев В.Г., Мирошников М.М. Перспективы использования ИК матриц в тепловидении. Оптический журнал, том 64, No2, 1997, с.5-12.

33. Залманзон Л.А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара. - М.: Наука, 1989. - 496 с.

34. Зарубин В.С. Математическое моделирование в технике. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2001. - 496 с.

35. Зуев В.Е. Распространение видимых и инфракрасных лучей в атмосфере. - М.: Советское Радио, 1970. - 496 с.

36. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов . — Казань: Образовательные технологии, 2006.
37. Информационно-измерительная техника и технологии / В.И.Калашников, С.В. Нефедов, А.Б. Путилин и др. Под ред. Г.Г. Раннева. - М.: Высшая школа, 2002. - 454 с.
38. Инфракрасная термография в энергетике. Т 1. Основы инфракрасной термографии / Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева, авт.: А. В. Афонин, Р. К. Ньюпорт, В. С. Поляков и др. — СПб.:Изд. ПЭИПК, 2000. — 240 с.
39. Испытательные таблицы для измерения качества цифрового и аналогового телевизионного вещания // «625». 1999. № 8. С. 36 – 42.
40. Каллианпур Г. Стохастическая теория фильтрации. - М.: Наука, 1987. - 320 с.
41. Катус Г.П. Восприятие и анализ оптической информации автоматической системой. - М.: Машиностроение, 1986. - 416 с.
42. Кашкаров А.П. Фото- и термодатчики в электронных сферах. - М.: Альтекс-А, 2004. - 224 с.
43. Кирпичев М.В. Теория подобия. Изд. АН СССР, 1953. – 356 с.
44. Колбин М.Н., Романов О.Г. Фотоприемники на основе примесного германия для тепловидения. Оптический журнал, 1992, №12, с.49-51.
45. Колючкин В. Я., Мосягин Г. М. Тепловизионные приборы и системы. Учебное пособие. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 59 с., ил.
46. Коротаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И.. Основы тепловидения – СПб: НИУ ИТМО, 2012 – 122 с.
47. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображений.- М.: Радио и связь, 1986.

48. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с., ил.
49. Криксунов Л. З., Усольцев И.Ф. Инфракрасные системы обнаружения, пеленгации и автоматического сопровождения движущихся объектов. - М.: Советское Радио, 1968. - 320 с.
50. Кулакова Н.А., Насыров А.Р., Несмелова И.М. Современные тенденции создания оптических систем для инфракрасной области спектра // Оптический журнал. - 2010. - Т. 77. - №5. - С. 36 - 44.
51. Купер Дж., Макгиллем Н. Вероятностные методы анализа сигналов и систем. - М.: Мир, 1989. - 379 с.
52. Ларкин Е.В., Титов Д.В., Акименко Т.А., Ширабакина Т. А. Тестирование ИК-сенсоров с использованием генератора эталонных тестовых сигналов. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2023. Т. 66. № 3. С. 210-222.
53. Латыев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. - СПб. - Политехника, 2007. - 579 с.
54. Ллойд Дж. Системы тепловидения: Пер. а англ. – М.: Мир, 1978. – 414 с., ил.
55. Методика оценки качества функционирования сканирующих систем // Будков С.А., Клецарь С.Н., Котов В.В., Котова Н.А. - Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 1. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. - С. 299 - 306.
56. Методы анализа и синтеза модульных информационно-управляющих систем / Н.А. Кузнецов, В.В. Кульба, С.С. Ковалевский, С.А. Косяченко. - М.: Физматлит, 2002. - 800 с.
57. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Сойфера. - М.: Физматлит, 2003. - 784 с.
58. Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.

59. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов / В.П.Иванов, В.И.Курт, В.А.Овсянников, В.Л. Филиппов. Казань: Образовательные технологии, 2006. – 594 с.
60. Наука из первых рук. № 3-4 (57-58)/2014 Голицын А. А.
61. Новоселов О.Н., Фомин А.Ф. Основы теории и расчета информационно-измерительных систем. - М.: Машиностроение, 1991. - 336 с.
62. Овсяк, В.Н. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 243 с.
63. Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л. Оценка и повышение эффективности применения тепловизионных приборов наземного базирования в динамическом режиме работы // Оборонная техника. 2015. № 7. С. 49–63.
64. Определение характеристик излучения имитатора тепловой картины объектов/Канунников М.И.; Тул. гос. ун-т. - Тула, 2004. - 6 с.: ил. - Библиогр.: 2 назв. - Рус. - Деп. в ВИНТИ 24.05.04 № 877-В2004.
65. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И.Козицев и др. Под ред. В.Н. Рождествина. - М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2002. - 528 с.
66. Оптическая обработка информации / Ред. Д. Кейсента. - М.: Мир, 1980. - 252 с.
67. Оптоэлектронные и электронно-оптические информационные устройства и системы / В.И. Осадчий, А.Я. Паринский, Ю.М. Агафонов, В.А. Еропкин. Под ред. В.И. Осадчего и А.А. Яшина. - Тула: ТулГУ, 1999. - 291 с.
68. Основы инфракрасной термографии / А.В.Афонин, Р.К.Ньюпорт, и др. Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева. - СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2004. 240 с.
69. Основы инфракрасной термографии / А.В.Афонин, Р.К.Ньюпорт, и др. Под ред. Р. К. Ньюпорта, А. И. Таджибаева. - СПб.: Изд-во ПЭИПК, 2004. 240 с.

70. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. - М.: Радио и связь, 1986. - 400 с.
71. Павлов А.В. Оптико-электронные приборы: основы теории и расчета. - М.: Энергия, 1974. - 359 с.
72. Павлов А.В., Черников А.И. Приемники излучения автоматических оптико-электронных приборов. - М.: Энергия, 1972. - 240 с.
73. Папулис А. Теория систем и преобразований в оптике / Под ред. Алексеева В.И. - М.: «Мир», 1971. - 496 с.
74. Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н. Оптико-электронные квантовые приборы. - М.: Радио и связь, 1982. - 456 с.
75. Порфирьев Л.Ф. Основы теории преобразования сигналов в оптико-электронных системах. - Л.: Машиностроение. ЛО, 1989. - 392 с.
76. Проектирование оптико-электронных приборов / Ред. Ю.Г. Якушенкова. - М.: ЛОГОС, 2000. - 487 с.
77. Пытьев Ю.П. Методы математического моделирования измерительно-вычислительных систем. - М.: Физматлит, 2004. - 400 с.
78. Рогальский А.И. Инфракрасные детекторы. - Новосибирск: Наука, 2003. - 636 с.
79. Савиных В.П., Соломатин В.А. Оптико-электронные системы дистанционного зондирования. - М.: Недра, 1995. - 315 с.
80. Системы технического зрения: Справочник /Под ред. В.И.Сырямкина, В.С. Титова. - Томск: МГП «РОСКО», 1992. - 376 с.
81. Справочник по инфракрасной технике: в 4-х т./Л. Биберман, У. Волф, Г. Герсон и др.; Ред. У. Волф, Г. Цисис; Пер. с англ. под ред.Н.В. Васильченко, В.А. Есакова, М.М. Мирошникова. – М.: Мир. Т. 4: Проектирование инфракрасных систем, 1999. – 470 с.
82. Стефании Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов. – М.: Энергия, 1972. – 376 с.

83. Таблицы физических величин: Справочник/В.Г. Аверин, Б.А. Арозон, Н.С. Бабаев и др.; Под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1996. – 1008 с.
84. Тарасов В. В., Якушенков Ю. Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 444 с. + 8 с. цв. вкл.
85. Турыгин И.А. Прикладная оптика: Геометрическая оптика и методы расчета оптических систем. – М.: Машиностроение., 1965. – 364 с.
86. Филиппова Е. В. Алгоритм формирования теплового изображения. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 107-111.
87. Филиппова Е. В. Общая структура тепловизоров и варианты их классификаций. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 11-2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 348-351.
88. Филиппова Е. В. Пропускание атмосферой теплового излучения человека. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 261-265.
89. Филиппова Е. В. Системы тепловидения. Приборы и управление: сборник статей. Вып. 19/под общ. ред. Е. В. Ларкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. С. 95-99.
90. Филиппова Е. В. Способы оценки качества систем тепловидения. Приборы и управление: сборник статей. Вып. 20/под общ. ред. Е. В. Ларкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 130-134.
91. Филиппова Е. В. Структурные схемы ФПУ с матричными многоэлементными приемниками излучения. Приборы и управление: сборник статей. Вып. 17/под общ. ред. Е. В. Ларкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 87-91.
92. Филиппова Е. В. Тепловой тест-объект для оценки тепловизионных систем. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-1.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 199-203.

93. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Настройка ПИД-регулятора в системе управления устройством тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 218-222.
94. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Оценка качества тепловизионной системы. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 229-236.
95. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Приемники излучения тепловизионных приборов. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. С. 203-207.
96. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Принцип формирования теплового излучения. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-1.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. С. 115-119.
97. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Программно-аппаратная реализация модуля контроля разрешения тепловизионных систем наблюдения по контрасту. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 6267-272.
98. Филиппова Е. В., Акименко Т. А. Эффективность работы инфракрасных систем и критерии качества. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 2.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. С. 291-295.
99. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Лучанский О. А. Способ тестирования разрешения тепловизоров по контрасту. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 10.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2019. С. 400-404.
100. Филиппова Е. В., Акименко Т. А., Смирнов А. Ю. Параллельная обработка сигналов тепловизором. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 9-1.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 276-281.
101. Филиппова Е. В., Кобышева Е. А. Устройство тепловизоров. Приборы и управление: сборник статей. Вып. 18/под общ. ред. Е. В. Ларкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. С. 146-150.

102. Филиппова Е. В., Кобышева Е. А., Акименко Т. А. Генерирование инфракрасного излучения. Приборы и управление: сборник статей. Вып. 21/под общ. ред. Е. В. Ларкина. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. С. 87-90.
103. Филиппова Е. В., Филиппов А. Е. Системы тепловидения. Известия ТулГУ. Серия Технические науки. Вып. 4.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. С. 151-154.
104. Хряпов В.Т., Пономаренко В.П., Буткевич В.Г. и др. Пороговые фотоприемники и матрицы ИК-диапазона. Оптический журнал, 1992, No12, С. 33-44.
105. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. - 352 с.
106. Цифровое преобразование изображений / Р.Е. Быков, Р. Фрайер, и др. Под ред. Р.Е.Быкова. - М.: Горячая линия - Телеком, 2003. - 228 с.
107. Шмидт Д. Оптоэлектронные сенсорные системы. - М.: Мир, 1991. - 96 с.
108. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. - Л.: Машиностроение, 1980. - 207 с.
109. Юшин А.М. Оптоэлектронные приборы и их зарубежные аналоги. - М.: Радио и связь. - Т. 1. - 2000. - 512 с.: Т. 2. - 2001. - 544 с.: Т. 3. - 2002. - 512 с.: Т. 4. - 2003. - 512 с.
110. Якушенко Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник для вузов. - М.: Логос, 2004. - 472 с.
111. Akimenko, T.A. Mathematical Model of Heating the Surface of the Laser Beam. Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 877, 2019, Pages 361-370. International Symposium on Computational Science and Computing, ISCSC 2018; Huangshan; China; 28 July 2018 до 29 July 2018; ISSN: 21945357. ISBN: 978-303002115-3. DOI: 10.1007/978-3-030-02116-0_42.

112. Akimenko, T.A., Gorbunova, O.Y. Evaluation of the influence of the properties of inhomogeneous media in the formation of the image in technical vision systems. // 2019 6-th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019 April 2019, Pages 652-656 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019; Le Conservatoire National des Arts et Metiers (Cnam) Paris; France; 23 April 2019 до 26 April 2019; ISBN: 978-172810521-5. DOI:10.1109/CoDIT.2019.8820452.

113. Akimenko T.A., Dunaev, V.A. Larkin, E.V. Computer simulation of the surface heating process by the movable laser. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017. V International Workshop on Mathematical Models and their Applications 2016 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 173 (2017) 012002 doi:10.1088/1757-899X/173/1/012002. (WOS:000398966100002)

114. Akimenko, T.A., Dunaeva, I.V. Calculation of Target Heating by a Moving Source of Heat by the Finite Element Method Using the Splitting Scheme. Advances in Intelligent Systems and Computing. Volume 877, 2019, Pages 351-360. International Symposium on Computational Science and Computing, ISCSC 2018; Huangshan; China; 28 July 2018 до 29 July 2018; Код 221029. ISSN: 21945357. ISBN: 978-303002115-3. DOI: 10.1007/978-3-030-02116-0_41.

115. Akimenko T., Filippova E. Computer modeling of control the thermal imaging system surveillance. Lecture Notes in Computer Science. 2019. T. 11386 LNCS. P. 129-136.

116. Boiangiu C.A., Dvornic A.I. Methods of bitonal image conversion for modern and classic documents // WSEAS Transactions on Computers. 2008. Vol. 7. № 7. P. 1081 - 1090.

117. Evaluation of Image Quality of Thermal Imagers used by the Fire Service. NIST Technical Note 1630, Francine Amon, Andrew Lock. Building and

Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, February, 2009.

118. Forrai D., Bertke S., Fisher R., Back T. Test techniques for high performance thermal imaging system characterization, Proceedings of SPIE 6207, 2006, p. 62070Q.

119. Gerald C. Holst Electro-Optical Imaging System Performance, Fifth edition. N.Y.: JCD Publishing and SPIE Press, 2008. V. PM187.

120. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital image processing. Prentice Hall. 2002. - 1040 p.

121. Gray R.M. Entropy and information theory. Springer. 2011. 409 p.

122. Holst G. C. Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems, JCD Publishing Company, 2008.

123. ISO 12653-1:2000, Electronic imaging - Test target for the black-and-white scanning of office documents. Part 1: Characteristics.

124. ISO 12653-2:2000, Electronic imaging - Test target for the black-and-white.

125. ISO 12653-3:2014, Electronic imaging - Test target for scanning of office documents. Part 3: Test target for use in lower resolution applications.

126. Jaynes E.T. Probability theory: The logic of science / Ed. G.L.Bretthorst. - Cambridge University Press, 2003. 753 p.

127. Keikhosrow Irani, Theory and construction of blackbody calibration sources, Proceedings of SPIE 4360, 2001, pp. 347–362.

128. Krzysztof Chrzanowski, Xianmin Li. Configuration of systems for testing thermal imagers. Optica Applicata, Vol. XL, No. 3, 2010.

129. Larkin E.V., Kotov, V.V., Kotova N.A., Privalov A.N. Method of Estimation of Scanning System Quality / E.V/Larkin, V.V/Kotov, N.A.Kotova, A.N.Privalov // 10th International Conference on Machine Vision (ICMV). Proceedings of SPIE 2018. Vol. 10696. Article Number: UNSP 106962N.

130. Maronna R.M., Victor J., Yohai V.J. Robust functional linear regression based on splines // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2013. Vol. 65. P. 46-55.
131. Muler N., Yohai V.J. Robust estimation for vector autoregressive models // *Computational Statistics & Data Analysis*. 2013. Vol. 65. Pp. 68 – 79
132. Pavlidis T. Algorithms for graphics and image processing. – Springer VerlagL Berlin, Heidelberg, 1982. 448 p.
133. RTB 3000 Detector test bench. Santa Barbara Infrared. Heico company. Specification rev. 319– 000–310.
134. Testing Image Synthesis for Skanners Verification / E.Larkin, V.Kotov, N.Kotova, A.Privalov // 2nd International Ural Conference on Measurements (URALCON). South Ural State University/ Chelyabinsk, RUSSIA, 2017. P. 221-226.
135. Uncooled Infrared Microbolometer Arrays and their Characterisation Techniques. R.K. Bhan, R.S. Saxena, C.R. Jalwania, and S.K. Lomash. *Defence Science Journal*, Vol. 59, No. 6, November 2009, pp. 580-589.
136. Volimer M., Mollman K. *Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications*. N.Y.: Wiley, 2010.
137. Witus G., Gerhard G., Ellis R.D. Contrast Model for Three-dimensional Vehicles in Natural Lighting and Search Performance Analysis // *Optical Engineering*. 2001. V. 40. № 9. P. 1858–1868.
138. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. // *Transactions of the ASME*, Vol.64, 1942. P. 759-768.

ПРИЛОЖЕНИЕ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 176316

**ТЕСТ-ОБЪЕКТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ
ТЕПЛОВИЗОРОВ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Акименко Татьяна Алексеевна (RU), Ларкин Евгений Васильевич (RU), Филиппова Екатерина Вячеславовна (RU)*

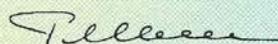
Заявка № 2017126695

Приоритет полезной модели 25 июля 2017 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 16 января 2018 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 25 июля 2027 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018616727

**Программный модуль вычисления показателей теплового
состояния мишени**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Тульский
государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Акименко Татьяна Алексеевна (RU),
Дунаева Инна Валерьевна (RU)*



Заявка № 2018614008

Дата поступления 23 апреля 2018 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 июня 2018 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 191285

УСТРОЙСТВО ТЕСТИРОВАНИЯ РАЗРЕШЕНИЯ ТЕПЛОВИЗОРОВ ПО КОНТРАСТУ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Акименко Татьяна Алексеевна (RU), Ларкин Евгений Васильевич (RU), Лучанский Олег Алексеевич (RU), Филиппова Екатерина Вячеславовна (RU)*

Заявка № 2019117661

Приоритет полезной модели 06 июня 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 01 августа 2019 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 06 июня 2029 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Назиев Г.П. Назиев





УТВЕРЖДАЮ
 Проректор по учебной работе
 Котов В. В.
 « 28 » сентября 2023 г.

АКТ

использования научных результатов диссертации на соискание
 ученой степени кандидата технических наук в учебном процессе

Комиссия Тульского государственного университета в составе: председатель – канд. техн. наук, и.о. зав. кафедрой Ерзин О.А., члены – канд. техн. наук, доцент, доцент Пантюхина Е.В., канд. техн. наук, доцент Кузнецова Т.Р. рассмотрела материалы диссертации Филипповой Екатерины Вячеславовны на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Комиссия констатирует, что в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» используются следующие научные результаты кандидатской диссертации Филипповой Е. В.:

в дисциплине «Системы технического зрения и обработки информации» направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника - методика и программа оценки параметров тестируемой тепловизионной системы на основании обработки сформированных ею цифровых моделей эталонных сцен;

в дисциплине «Основы научных исследований и планирование эксперимента» направления 15.03.06 Мехатроника и робототехника - метод синтеза генератора эталонных тепловых сцен для контроля потерь информации на соответствующем этапе преобразования.

Председатель комиссии

О.А. Ерзин

Члены комиссии

Е.В. Пантюхина
 Т. Р. Кузнецова

АО «КОНЦЕРН ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»



**ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ
ОБЪЕДИНЕНИЕ «СТРЕЛА»
ПАО «НПО «СТРЕЛА»**

М. Горького ул., д. 6, г. Тула, 300002
Тел./факс (4872) 43-64-00 / 43-65-27
e-mail: office@npostrela.net
ОКПО 07502868; ОГРН 1027100517256
ИНН/КПП 7103028233/710301001

№ 490

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный конструктор
ПАО «НПО «Стрела»

С.В. Марков

2023 г.



АКТ

использования научных результатов диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук в производстве

Настоящий Акт составлен о том, что при разработке стенда Т.55.90 АВИМ.468364.155, предназначенного для контроля изготовления тепловизионного канала оптико-электронных средств разведки, были использованы научные материалы диссертации Филипповой Екатерины Вячеславовны на соискание ученой степени кандидата технических наук.

А именно:

- метод синтеза генератора эталонных тепловых сцен, с целью упрощения обработки цифрового образа;
- структура генератора эталонной сцены, обеспечивающего оценку таких параметров тепловизионных систем наблюдения как тепло-сигнальная характеристика, дисторсия, контраст, что позволило сократить время и повысить качество тестирования.
- программа оценки параметров тестируемой оптико-электронной системы, формирующая интегральный показатель, по которому выдается заключение о пригодности оптико-электронной системы для дальнейшей эксплуатации.

Использование перечисленных результатов диссертации позволило получить технический эффект, заключающийся в сокращении сроков и повышении качества тестирования тепловизионного канала оптико-электронных средств разведки за счет автоматизации процесса формирования результатов испытаний.

Заместитель главного конструктора

П.Н. Булгаков