

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«СИБИРСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ»

На правах рукописи

Фесько Юрий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ**

05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
кандидат технических наук,
профессор
Тымкул Василий Михайлович

Новосибирск – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
1 Аналитический обзор научно-технической и патентной литературы по оптическим и оптико-электронным методам, способам и устройствам измерения трехмерной геометрии объектов	13
1.1 Методы обработки изображений и образов	13
1.2 Анализ методик и способов определения формы на основе обработки отраженного поверхностью объекта оптического излучения	18
1.2.1 Применение лазерного канала видения для определения формы объектов	20
1.2.2 Определение формы трехмерных объектов методом проекции пространственно-модулированных структур оптического излучения.....	24
1.2.3 Способ получения трехмерного изображения объекта путем измерения интенсивности диффузного отражения света различными точками его поверхности	31
1.2.4 Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов посредством проецирования полос	40
1.3 Исследование теории и способов определения формы объектов на основе собственного инфракрасного излучения	52
1.3.1 Определение трехмерной формы объектов на основе четырех поляризационных тепловых изображений.....	52
1.3.2 Определение трехмерной формы объектов на основе трех поляризационных тепловых изображений.....	54
1.3.3 Определение трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных тепловых изображений.....	56
1.4 Выводы к главе 1.....	58

2	Теория и методы определения трехмерной формы объектов на основе оптических свойств собственного и отраженного излучения	61
2.1	Физико-математические основы формирования тепловизионного изображения. Проблемы классического тепловидения	61
2.2	Физическое обоснование поляризации собственного теплового излучения объектов.....	69
2.3	Получение и анализ свойств поляризационных тепловых изображений выпуклых объектов	73
2.4	Метод определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных тепловых изображений с учетом эллиптичности поляризации теплового излучения	77
2.5	Метод определения трехмерной формы объектов на основе одной поляризационной термограммы с комбинированным фильтром.....	86
2.6	Метод определения трехмерной формы объектов с направленно-рассеивающим покрытием на основе анализа яркости отраженного излучения элементов их поверхности	92
2.7	Выводы к разделу 2.....	95
3	Математическое моделирование и экспериментальное исследование методов определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм.....	97
3.1	Методика математического моделирования поляризационных тепловизионных изображений выпуклых объектов.....	97
3.2	Влияние оптических свойств материалов на поляризацию излучения объектов и их термограммы	107
3.3	Методика и результаты экспериментальных исследований поляризационных термограмм выпуклых объектов	112
3.4	Алгоритм, программа и результаты обработки поляризационных тепловизионных изображений объектов	118

3.4.1	Алгоритм и программа обработки поляризационных тепловизионных изображений объектов	118
3.4.2	Связь степени поляризации собственного излучения элементов поверхности объекта с углом наблюдения.....	124
3.4.3	Результаты обработки теоретических и экспериментальных термограмм	128
3.5	Методика и результаты исследования погрешности метода определения трехмерной формы на основе поляризационных термограмм	131
3.6	Методика учета излучения внешней помехи фона при формировании поляризационных тепловых изображений	137
3.7	Выводы к разделу 3.....	142
	Заключение	144
	Список использованных источников	147
	Приложение А	154
	Приложение Б	164
	Приложение В.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Насущной задачей современной науки, техники, промышленного производства и медицины является получение информации о трехмерной форме исследуемых объектов. Одна из основных проблем современного тепловидения состоит в том, что при использовании классических (работающих в неполяризованном свете) тепловизионных систем практически невозможно определить объемную форму наблюдаемого объекта, поскольку классические термограммы не обладают достаточной информативностью для того, чтобы определить трехмерную форму внутри теплового контура. Наличие неоднозначности и ограничение информативности классических тепловизионных изображений имеют место по причине зависимости их яркости, как от формы, так и от коэффициента излучения и температуры наблюдаемой поверхности объектов.

Существующие в настоящее время оптико-электронные комплексы наблюдения (ОЭКН) традиционно используют для выделения объектов наблюдения военной и транспортной техники тепловой или яркостный контраст, размеры и форму. Поэтому повышение пороговой чувствительности и углового разрешения остается приоритетным направлением развития ОЭКН. Однако, в настоящее время разработчики ОЭКН приближаются к тому уровню, когда прямое наращивание пороговой чувствительности и углового разрешения уже не дает пропорционального прироста эффективности комплекса. С другой стороны, на эти параметры ОЭКН наложены определенные принципиальные ограничения, а именно: пороговая чувствительность ограничена фотонным шумом приемника излучения, а угловое разрешение – дифракцией объектива. Поэтому резервы повышения эффективности перспективных ОЭКН логично искать в регистрации и привлечении к анализу дополнительных специфических

характеристик поля оптического излучения, претендующих на роль устойчивых демаскирующих признаков объектов.

Для увеличения информации о наблюдаемом объекте и повышения эффективности ОЭКН, может быть использован поляризационный контраст, обусловленный различием коэффициентов излучения объекта в спектральном рабочем диапазоне канала для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости выхода его из поверхности объекта и перпендикулярно ей соответственно.

Также следует отметить, что методы определения трехмерной формы объектов на основе анализа отраженного излучения их элементов поверхности, применимы только для поверхностей объектов с диффузным покрытием.

В этой связи, тема диссертационной работы, посвященной разработке и исследованию оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов на основе их оптических свойств собственного и отраженного излучения, представляется актуальной.

Степень разработанности темы. Целесообразно отметить следующие эффективные методы в решении указанной задачи определения геометрических параметров объектов:

1. Метод лазерного сканирования поверхности крупногабаритных объектов, основанный на пространственно-временном анализе импульсного излучения поверхности объектов.

2. Дифракционные методы в области лазерного трехмерного контроля объектов, размеры которых d соизмеримы или больше длины волны λ оптического излучения (д.т.н., профессор Чугуй Ю.В. с сотрудниками, Учреждение науки «КТИ НП СО РАН» [23]).

3. Методы на основе использования диффузного отражения излучения поверхностью крупногабаритных трехмерных объектов (д.т.н., профессор Н.Н. Красильников, к.т.н. О.И. Красильникова, ФГАОУ ВПО «Санкт-

Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения» [19].

4. Методы пространственно-временной модуляции оптического излучения и структурного освещения поверхности объектов (Учреждение науки «КТИ НП СО РАН» [23], Учреждение науки «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН» [9]).

5. Метод проекции полос, развитый Г.И. Вишняковым и К.Е. Лоциловым [4].

6. Методы получения и анализа стереоизображений.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка, развитие и исследование методов определения трехмерной формы выпуклых объектов на основе их оптических свойств собственного излучения и отражения, а также расширение информативности современных тепловизионных приборов.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

– разработать методику и схему оптического устройства неконтактного определения формы трехмерного объекта, которые позволяют выполнять измерение в реальном масштабе времени;

– исследовать и совершенствовать метод неконтактного определения трехмерной формы объекта на основе двух поляризационных термограмм с азимутами поляризации 45° и 90° ;

– совершенствовать метод определения трехмерной формы объекта на основе измерения яркости оптического излучения, отраженного его поверхностью для объектов с направленно-рассеивающим характером отражения;

– разработать методику и экспериментальный стенд получения поляризационных термограмм и провести экспериментальные исследования поляризационных термограмм объемных тел;

– разработать методику и алгоритм обработки поляризационных термограмм объекта с азимутами поляризации 45° и 90° с целью построения трехмерного изображения его поверхности;

– исследовать влияние оптических свойств материалов и погрешность определения формы объекта.

Объект и предмет исследования. Объектом настоящего исследования являются тепловизионные приборы и оптические системы, предназначенные для анализа и определения трехмерной формы наблюдаемых объектов по их собственному и отраженному излучению. Его предмет составляют насущные вопросы теории и методов исследования дистанционного определения трехмерной формы объектов на основе анализа поляризационных свойств собственного теплового излучения и отражательных свойств элементов поверхности при освещении с отдельных направлений и наблюдении с одного направления.

Научная новизна результатов исследования:

– разработаны и исследованы оптико-физические основы формирования и получения поляризационных тепловизионных изображений объектов, содержащие информацию о трехмерной форме;

– теоретически и экспериментально исследована и установлена функциональная связь интенсивности видеосигналов поляризационных тепловизионных изображений элементов поверхности объектов с их ориентацией по направлению наблюдения;

– разработан и исследован оптико-электронный метод определения трехмерной формы, основанный на термограмме объекта, полученной с использованием поляризационного комбинированного фильтра в виде последовательно расположенных ахроматической четвертьволновой пластинки и линейного ИК поляризатора. Технические решения указанного метода защищены двумя патентами РФ на изобретение.

– теоретически и экспериментально исследован и развит метод определения трехмерной формы объекта с произвольным состоянием поляризации его теплового излучения, основанный на обработке поляризационных термограмм с азимутами поляризации равными 45° и 90° ;

– разработан и исследован оптико-электронный метод определения трехмерной формы объектов с направленно-рассеивающим характером отражения, основанный на измерении с одного направления яркости отраженного поверхностью оптического излучения и раздельном освещении с двух направлений. Технические решения указанного метода защищены патентом РФ на изобретение.

Достоверность представленных результатов основывается на хорошо апробированных соотношениях, вытекающих из теории сигналов в тепловидении и оптоэлектронике, и феноменологической теории отражения Френеля, а математическая модель поляризационных тепловизионных изображений построена с использованием устойчивого формализма вектор–параметра Стокса и матриц Мюллера для анализа поляризации теплового излучения тел и поляризационных свойств оптических элементов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

– оптико-физическое обоснование формирования и получения поляризационных тепловизионных изображений объектов, содержащих информацию о трехмерной форме объектов;

– оптико-электронный метод определения трехмерной формы объектов, основанный на термограмме, полученной с использованием поляризационного комбинированного фильтра, который позволяет определить форму поверхности в реальном масштабе времени;

– результаты теоретических и экспериментальных исследований по развитию метода определения трехмерной формы объектов с произвольным состоянием поляризации теплового излучения, основанного на анализе поляризационных термограмм с азимутами поляризации, равными 45° и 90° ;

– оптико-электронный метод определения трехмерной формы объектов с направленно-рассеивающим покрытием, основанный на измерении с одного направления отраженного поверхностью оптического излучения и раздельном освещении с двух направлений.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

– разработанный метод и устройство определения трехмерной формы объекта, основанные на термограмме с применением поляризационного комбинированного фильтра, позволяет выполнять определение и воспроизведение формы объекта в реальном масштабе времени;

– предложенные способ и устройство, защищенные двумя патентами РФ на изобретение № 2431936 и № 2469265, могут быть использованы в практике разработок новых поляризационных тепловизоров и ИК систем наблюдения, позволяющие определить трехмерную форму объектов;

– предложенный метод определения трехмерной формы объектов на основе обработки поляризационных термограмм с базисными азимутами поляризации позволяет проводить исследования формы объектов как искусственного, так и естественного происхождения с произвольным состоянием поляризации;

– метод определения трехмерной формы объектов на основе регистрации яркости отраженного поверхностью оптического излучения согласно патенту РФ на изобретение № 2491503 может быть практически использован в лазерно-теповизионных системах наблюдения;

– на основе предложенных методов разработан стенд для поляризационно-теповизионных исследований, позволяющий производить экспериментальные исследования поляризационных термограмм объемных тел и физических моделей объектов;

– разработана и внедрена методика дистанционного измерения температуры сложных поверхностей.

Материалы диссертационной работы внедрены в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» для определения трехмерной формы и поля температур сложных поверхностей объектов авиационной техники; в отдел главного метролога ОАО «ПО «НПЗ» и в учебный процесс на кафедре наносистем и оплотехники ФГБОУ ВПО «СГГА», по дисциплинам «Теория и расчет ОЭП» и «Системы оплотехники» направления 200400 – «Оплотехника».

Личный вклад автора. Автором или при его непосредственном участии выполнен анализ методов дистанционного определения формы объектов, дано оптико-физическое обоснование информативности поляризационных тепловизионных изображений, разработаны и исследованы оптико-электронные методы определения формы объектов, математическая модель поляризационных тепловизионных изображений, а также проведены теоретические и экспериментальные исследования. Интерпретация результатов исследований осуществлялась совместно с соавторами публикаций.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них три статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях по перечню ВАК Минобрнауки РФ, четыре патента РФ на изобретение, одна статья в научно-техническом журнале «Вестник СГГА», три статьи в сборниках материалов VI, VII, VII Международных научных конгрессов «ГЕО-Сибирь» 2010-2011 гг. и «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», один материал доклада в сборнике докладов 21-ой Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Один отчет НИР № ГР 01200954352.

Апробация работы. Основные положения и практические результаты работы были представлены и обсуждены на научно-технических семинарах кафедры наносистем и оплотехники ФГБОУ ВПО «СГГА», научно-технических советах Института оптики и оптических технологии ФГБОУ ВПО «СГГА», Международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь-2010», «ГЕО-Сибирь-2011», «ГЕО-Сибирь-2012» (Новосибирск 2010-2012 гг.),

21-ой Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2010 г.) и научно-практической конференции «Современные тенденции и принципы построения авиационных оптико-электронных систем» (Екатеринбург, 2012 г.).

1 АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ И ПАТЕНТНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ ПО ОПТИЧЕСКИМ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ МЕТОДАМ, СПОСОБАМ И УСТРОЙСТВАМ ИЗМЕРЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ГЕОМЕТРИИ ОБЪЕКТОВ

В настоящее время существует ряд известных методов и способов неконтактного (дистанционного) определения линейных размеров и формы поверхности исследуемых объектов. Современные методы определения ориентаций поверхности и глубины (формы) по изображению, как правило, рассматривают отраженную интенсивность на непрозрачных материалах. Для расширения возможностей и повышения точности измерений необходимо расширять информативность опτικο-электронных приборов и систем, получающие информацию об объекте за счет различных свойств оптического излучения, то есть получить больше информации об объекте, не прибегая к дополнительным средствам, к примеру, за счет поляризации излучения. В разделе рассматриваются методы получения трехмерного изображения как отраженного, так и собственного инфракрасного излучения поверхности объекта.

1.1 Методы обработки изображений и образов

Изображение – специфическая форма получения, передачи и хранения информации. Различные изображения издавна играли большую роль в повседневной жизни человека, в культуре науке и технике. Поэтому, значительные усилия ученых и инженеров всегда были направлены на изучение изображений, способов их записи, закономерностей их формирования и получения, а также на выявление на изображениях элементов, по которым можно отнести выделенный фрагмент по ряду признаков к определенной группе объектов, направленных на решение ряда

задач, к примеру таких как обнаружение, классификация, распознавание и идентификация, то есть на решение задач извлечения максимальной информации об объекте, при наблюдении которого изображение было получено.

К числу наиболее распространенных задач, которые решают опико-электронные приборы и системы, являются задачи обнаружения, распознавания и классификации объектов. Причем, классификация, например, может производиться методами двух разных направлений. Во-первых, на основе анализа свойств изображений, обработки их, классификации и идентификации с эталоном (математическое направление), во-вторых, на основе использования свойств излучения, за счет которого строится изображение, анализа закономерностей формирования изображения, построения теории и новых способов распознавания на основе различных физических явлений формирования изображений (опико-математическое направление).

Исторически сложилось так, что большее развитие получили методы чисто математического направления, опирающиеся на математическую обработку готовых изображений и сравнение с эталоном. Это можно объяснить тем, что процесс обработки изображений невозможен без компьютерной техники, которой первыми овладели специалисты – математики. Несмотря на такой подход, существует большое число методов распознавания этого класса, которые позволяют решить поставленную задачу в конкретных ситуациях. К настоящему времени разработано множество методов, позволяющих средствами компьютерной обработки цифровых изображений и применению специализированных алгоритмов решать ряд задач, как общего, так и специализированного направления [6, 8, 34, 37].

Одной из основных задач этой области является определения признаков, по которым можно решить задачу распознавания. Блок-схема классической системы распознавания образов представлена на рисунке 1 [22].

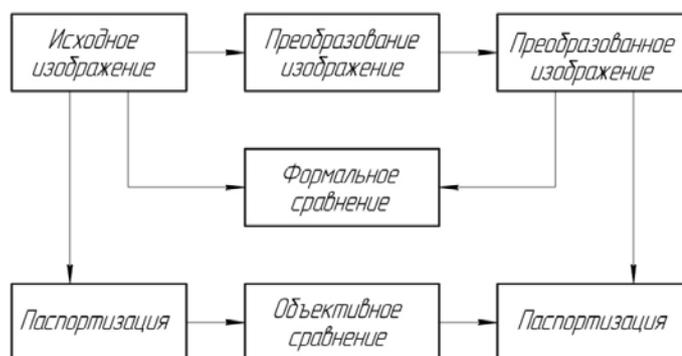


Рисунок 1 – Блок–схема классической системы распознавания

Системы распознавания образов предназначены для классификации входных изображений или их частей на несколько категорий. Например, в задаче определения мишени, то есть отнесение её к виду техники (наземная или воздушная), определение класса (гражданская или военная), а также выявление тех признаков, которые могут дать информацию является ли мишень ложной или реальной, то есть представляет собой объект техники или её имитацию.

Следует отметить, что выявление признаков объекта в массиве данных и классификация по полученным признакам объекта представляют собой самостоятельные задачи, по причине того, что, к примеру, определение типа транспортного средства в тепловом оптическом диапазоне можно осуществить до получения его тепловизионного изображения.

Однако практика анализа изображений мишеней, в том числе и тепловых изображений, показывает, что для увеличения вероятности решения поставленной задачи (обнаружение, классификация, идентификация) необходимо выполнять обработку исходного изображения, то есть применять к нему фильтрацию и осуществлять его коррекцию [8, 37, 38, 56].

Типичными признаками являются топологические (число связных компонент, число узлов и т.д.), метрические (длина, толщина, периметр, площадь, ширина, угол наклона и др.) и признаки формы (петли, дуги, кривизна, вогнутость, выпуклость и др.), а также характеристики взаимного

расположения структурных элементов и признаков объектов. Для выработки алгоритма распознавания образов (классификации) измеряются признаки специально подобранных фрагментов изображений, точная классификация которых известна. Результаты измерения признаков отображаются в пространство признаков, затем группируются в соответствии с принадлежностью к классам [5]. По причине того, что изображения могут иметь огромные размеры и во многих случаях число возможных классов очень велико, процесс поиска, нахождения и выделения признаков, определение характеристик взаимного расположения структурных элементов непосредственно на исходном изображении является сложным. Для упрощения процесса классификации и выбора признаков разрабатываются процедуры предварительной обработки и преобразования исходного изображения, приводящие их к линеаризованному виду и в то же время сохраняющие основные структурные свойства изображения, достаточные для анализа и распознавания [11]. В этом направлении используются как классические методы скелетизации [35], оценки сходства контурного представления [5], классификации на основе шаблонов [6], метод использования цифровых фильтров, методы структурного подхода [14] и так далее. Применение каждого из них обусловлено в каждом конкретном случае удобством и целесообразностью. Так, например, методы скелетизации были применены в предварительной обработке треков частиц рукописных и печатных знаков и кодировании изображений. Однако из-за отсутствия быстрых алгоритмов получения скелетных структур, неустойчивости скелетного преобразования и ряда других недостатков, повсеместное применение этого метода невозможно.

Метод оценки контурного сходства из-за необходимости наличия большого количества эталонов для учета изменений при смене ракурса, деформации перемещений также нельзя отнести к универсальному, хотя в ряде случаев его применение целесообразно, особенно, если использовать параметры, минимизирующие функцию ошибки сравнения [53].

Для методов распознавания математического направления очень важным является процедура структурирования, то есть процесс выделения заданной или требуемой структуры данных изображения [6, 8]. Это могут быть линейные списки, двумерные массивы, иерархические и рекурсивные структуры. Однако, единой методологии, которая бы позволила структурировать достаточно широкий класс изображений, нет, поэтому для каждого отдельного случая выбирается тот или иной подходящий вариант. Анализ методов распознавания математического направления дает возможность выделения общих недостатков: во-первых, сложный процесс поиска признаков изображения; во-вторых, необходимость предварительной обработки изображений с целью упрощения процесса классификации; в-третьих, необходимость хранения большого количества эталонов, учитывающих все возможные изменения изображения; в-четвертых, отсутствие универсальной методики описания структуры изображения; в-пятых, отсутствие универсальных и быстрых алгоритмов распознавания.

Другое направление – физико-математическое (или оптико-математическое) предполагает знание и использование оптико-физических закономерностей формирования изображений. Для распознавания образов на основе оптико-математических методов необходимы предварительные теоретические расчеты и выводы формул без участия конкретного изображения, но на основе моделей изображений тел простой формы, описываемые простыми математическими выражениями. На основе моделей изображений необходима разработка способов воспроизведения формы или распознавания. В таком случае конкретное изображение, полученное заранее или непосредственно в процессе распознавания, может обрабатываться вложенным в компьютер алгоритмом. Для этого необходимо устройство для ввода изображения в память компьютера или непосредственное соединение прибора наблюдения с ЭВМ.

Сканирование (или сбор данных) может идти по одной линии (например, по горизонтали) и форма объекта воспроизводится для каждой

линии сканирования. Наслоение линий даст в трехмерном графическом воспроизведении объемную картину объектов наблюдения.

Поскольку максимальная сложность обработки относится к предварительному этапу (вывод формул, моделирование, разработка способов распознавания), а непосредственно распознавание зависит только от результатов - способа распознавания - и алгоритм можно считать достаточно универсальным, то целесообразно уделить внимание развитию оптико-математического направления распознавания. Тем более, что все попытки разработки универсальных методов математического направления пока к желаемому результату не приводят, а являются либо «оттачиванием» уже существующих, либо разработкой новых методов, но для конкретной задачи.

В этой связи данная работа посвящена развитию второго направления, опирающегося на оптические свойства собственного и отраженного теплового излучения объекта, которые содержат информацию, необходимую для получения его трехмерной формы.

1.2 Анализ методик и способов определения формы на основе обработки отраженного поверхностью объекта оптического излучения

При разработке систем дистанционного определения параметров удаленного объекта одной из серьезных проблем является создание реалистичных трехмерных изображений сцен путем их трехмерного сканирования. Применяемые в настоящее время технологии трехмерного сканирования являются весьма трудоемкими и, как правило, требуют ручной доводки, получаемых в итоге их применения результатов. Для получения недостающей третьей координаты сканируемого объекта (глубины) используются либо время задержки отражений лазерного сканирующего луча от объекта, либо степень искажения проекций на сканируемый объект

специальной решетки, например решетки в виде полос (структурированный свет), либо смещение соответствующих точек сканируемого объекта на стереоизображениях, либо применяются методы вычисления третьей координаты, основанные на использовании эффекта размытия изображения, обусловленного конечностью глубины фокусировки оптической системы.

Перечисленные методы имеют следующие недостатки.

Лазерные сканеры в настоящее время применяются для сканирования только крупных объектов, таких как здания, вышки, башни, заводские территории, железнодорожные станции, аэропорты и т. д., поскольку погрешность измерения глубины при сканировании небольших объектов оказывается слишком большой.

Применение способа, при котором на сканируемый объект проецируется специальная решетка в виде полос (так называемый метод структурированного света), возникает проблема сшивания изображений, полученных по нескольким проекциям. Поскольку у реальных объектов различные части имеют сильно различающуюся детализацию, то в областях высокой детальности в создаваемую модель приходится вручную добавлять точки, что делает метод трудоемким. Кроме того, при использовании нескольких камер нужно предварительно провести их калибровку, т. е. определить взаимное расположение камер.

Технология способа основана на использовании стереоизображений, заключается в том, что при ее применении трудно обеспечить точное соответствие для пикселей на изображениях объекта, полученных с двух камер в бесструктурных областях, вследствие чего невозможно обеспечить достаточную точность получаемых трехмерных изображений. Недостатками технологии, основанной на вычислении глубины резкости, являются низкая точность получаемых результатов и высокая трудоемкость. Однако для подвижных ОЭКН создать необходимое пространственное разнесение (базу) оптико–электронных каналов практически невозможно.

Перечисленные выше методы не исчерпывают возможности получения (измерения) третьей координаты наблюдаемого объекта. Учитывая то, что информацию о форме наблюдаемого объекта (координате глубины) зрительная система получает разными способами. К ним относятся не только стереоскопический эффект и эффект, обусловленный конечностью глубины резкости оптики глаз, но также наличие перспективных искажений в проекциях изображаемой сцены на сетчатки глаз, а также ряд других эффектов, и главным образом распределение светотеней на изображениях объектов. Последнее обусловлено тем, что количество света, попадающего в глаза зрителя, зависит как от отражающих свойств поверхностей наблюдаемых объектов, так и от взаимного расположения этих поверхностей и источников света, что в конечном итоге позволяет судить о форме (рельефности) объектов.

1.2.1 Применение лазерного канала видения для определения формы объектов

Для формирования трехмерного изображения объекта и последующего распознавания его формы может использоваться также активно-импульсный дальностно-яркостный канал или ЛКВ (лазерный канал видения), длина волны излучения 1,06 мкм или 1,55 мкм, обеспечивающий возможность формирования как яркостных, так и дальностных изображений, яркость элементов которых пропорциональна расстоянию до соответствующих участков поля объектов. Эффективность этого канала не зависит от энергетического состояния объектов и определяется, главным образом, оптическими характеристиками объекта и фона, а также условиями локации. Выполненные в ОАО НПО «ГИПО» соответствующие эксперименты и анализ дальностных изображений свидетельствуют о возможности профилирования объектов по глубине сцены, благодаря чему информация об этих объектах принципиально отличается от информации, которую дают яркостные каналы ОЭС [1]. Это позволяет оператору быстрее и точнее

оценивать обстановку на местности, что существенно повышает эффективность использования ОЭС.

Рисунок 2 представляет яркостное изображение сюжета "техника-строения-фон", который демонстрирует также отличие использования ЛКВ от использования способа основанного на использовании пассивного канала ОЭС, это блик от ОЭС, который говорит о том, что ОЭС наблюдателя может быть обнаружена.

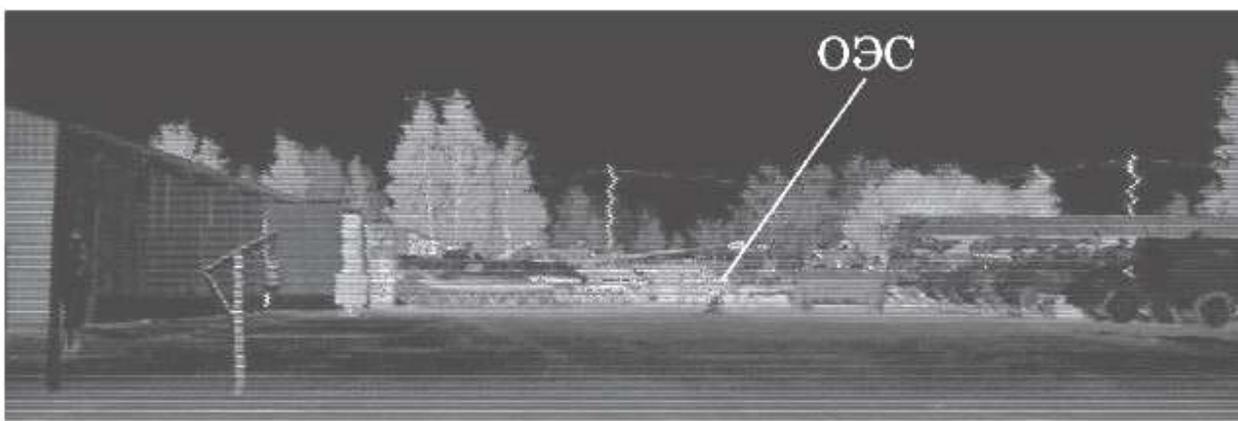
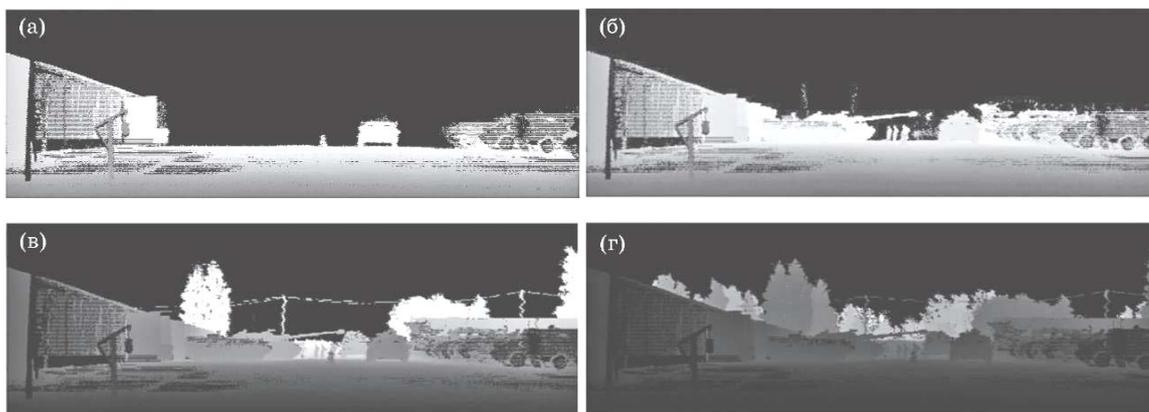


Рисунок 2 – Яркостное изображение сцены

Рисунок 3 иллюстрирует информационные возможности дальностных изображений, последовательно показывающих "продвижение" контролируемой оператором зоны наблюдения вглубь перспективы. При этом, как видно, предъявляются сюжеты, на которых исключен фон заднего плана, а в пределах выделенного диапазона дальностей последовательно выявляются новые фрагменты поля объектов – образцы ВТТ и люди, находящиеся на соответствующем удалении.



а) – D; б) – D + 26 м; в) – D + 73 м, г) – D + 326 м

Рисунок 3 - Дальностные изображения сцены

На рисунке 4 показан интегрированный ряд дальностных изображений, причем каждому диапазону дальностей присвоен определенный цвет изображения в соответствии с приводимой шкалой. Указанная технология электронной обработки видеосигналов существенно повышает дешифрируемость данных изображений [1].

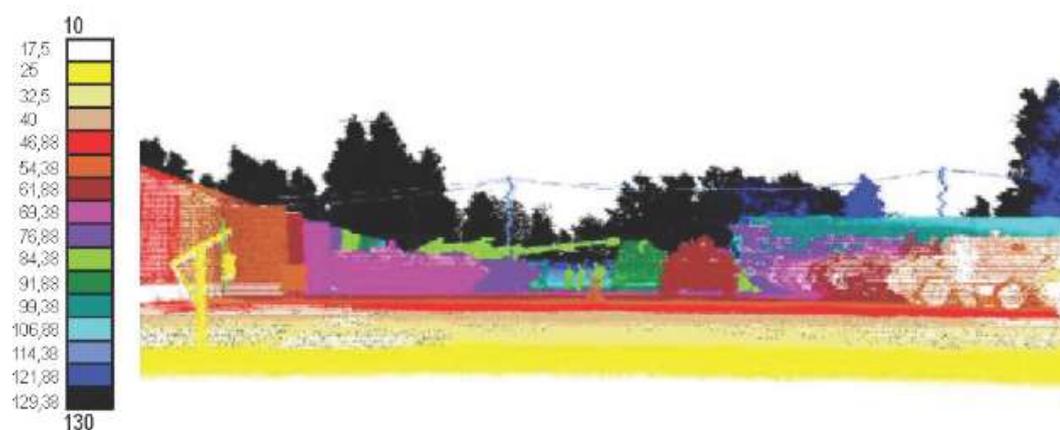


Рисунок 4 – Синтезированное дальностное изображение

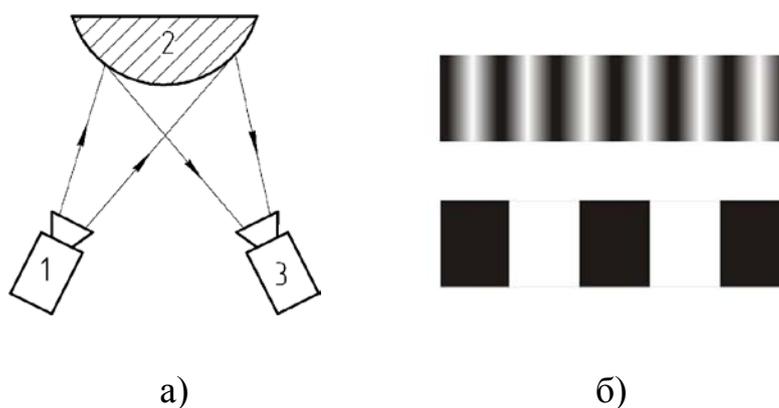
Основным перспективным достоинством ЛКВ является возможность воспроизведения объемной формы объектов, являющейся дополнительным демаскирующим их признаком. В практике создания ЛКВ указанное направление связывается и с успехами в создании так называемых флеш-приемников, пример результатов использования, которых в

отсутствия соответствующих достаточно полных и достоверных экспериментальных данных. Однако в качестве верхней границы показателей эффективности канала при восприятии объемной формы объектов, по-видимому, допустимо принять оценку, согласно которой номинальные значения критериев Джонсона, определяющих, например, по методике [13], вероятность обнаружения и распознавания объектов, должны быть уменьшены в два раза. Хотя, по мнению авторов [1], эффективность регистрации объемной формы объектов может быть даже выше ("3D-датчики дают многократное преимущество по дальности идентификации по сравнению с системами типа FLIR"), все же наиболее реальной, на наш взгляд, является оценка, в соответствии с которой дальность идентификации с вероятностью 0,9, например, вооруженного человека при восприятии его объемного профиля примерно на 30% больше, чем по плоскому изображению. Среднее значение критерия Джонсона (определяемое, как правило, для вероятности вскрытия 0,5) для объемных изображений при этом оказывается в 1,2-1,3 раза меньше, чем для плоских. Основным тактическим недостатком ЛКВ - отсутствие скрытности - может быть нивелировано сокращением времени использования канала, а также существенными трудностями при работе по малогабаритным объектам.

1.2.2 Определение формы трехмерных объектов методом проекции пространственно-модулированных структур оптического излучения

Для определения формы объекта существует способ измерения линейных размеров трехмерных объектов [28]. Данный способ заключается в многократном формировании на поверхности контролируемого объекта зондирующей структурированной подсветки путем освещения поверхности объекта пучком оптического излучения, каждый раз с управлением пространственной модуляцией интенсивности пучка оптического излучения, последовательной регистрации изображений искаженной рельефом

поверхности контролируемого объекта структуры зондирующей подсветки и определении высоты рельефа поверхности контролируемого объекта по степени искажения изображения структуры зондирующей подсветки, а двух других координат по положению искажений структуры подсветки в зарегистрированных изображениях. Для каждой точки контролируемого объекта определяется зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения, то есть положение пикселя в строке и кадре. Для определения высоты рельефа поверхности контролируемого объекта определяют расстояние от базовой поверхности до точки калибровочной поверхности, в которой зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости в исследуемой точке контролируемого объекта. Схема способа приведена на рисунке 6.

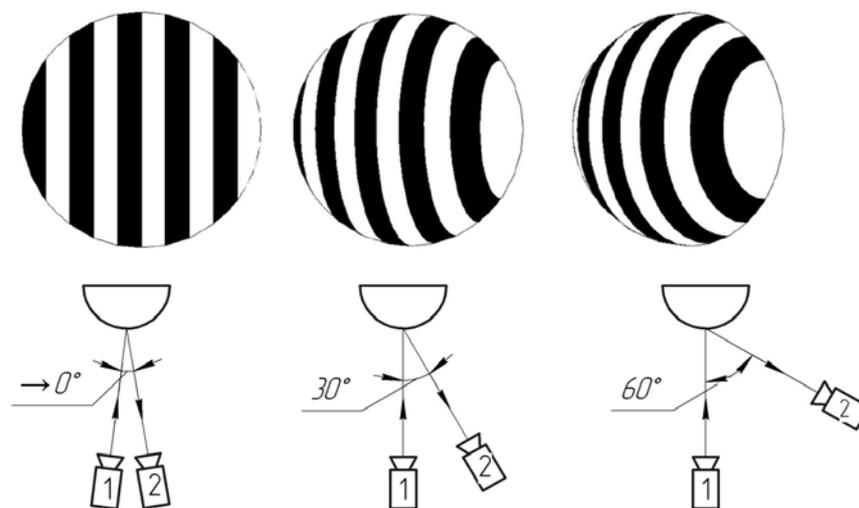


- а) – схема проекции и регистрации подсветки;
 б) – примеры пространственно-модулированной картины

Рисунок 6 – Способ проекции и регистрации пространственно-модулируемой картины

На рисунке 6: 1 – источник; 2 – исследуемый объект; 3 – регистратор. С помощью реализации данного способа можно достичь повышения точности контроля линейных размеров трехмерных объектов и расширение возможностей при проведении контроля. Примеры визуальной модели

искажения пространственно-модулированной картины виде черно-белых полос в зависимости от угла между направлениями проекции и регистрации картины приведены на рисунке 7.



1 – проектор; 2 – регистратор.

Рисунок 7 – Искажение полусферой пространственно-модулированной картины

Отличительная черта рассматриваемого способа в том, что для каждой точки контролируемого объекта определяют зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения, используют полученные калибровкой калибровочной поверхности зависимости интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения для точек калибровочной поверхности при ее различных расстояниях до поверхности, определенной как базовая, и для определения высоты рельефа поверхности контролируемого объекта, определяют расстояние от базовой поверхности до точки калибровочной поверхности, в которой зависимость интенсивности освещения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости в исследуемой точке контролируемого объекта.

По словам автора, способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов является промышленно применимым существующими средствами.

Устройство, посредством которого реализуется способ, представлено на рисунке 8 и содержит источник оптического излучения 1, пространственный модулятор интенсивности 2, фоторегистратор 3, цифровой электронный блок 4, блок регистрации 10 результатов 5. Вход цифрового электронного блока 4 соединен с выходом фоторегистратора 3, а выход соединен с управляющим входом модулятора 2.

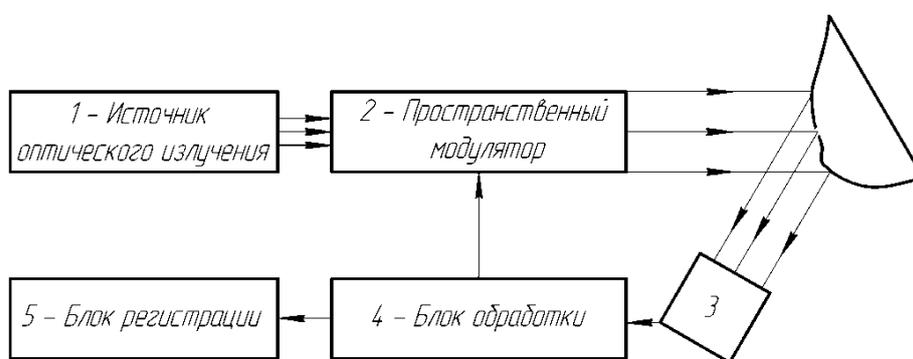


Рисунок 8 – Схема устройства

Измерение линейных размеров трехмерных объектов осуществляют следующим образом. Интенсивность оптического излучения, выходящего из источника 1, модулируется пространственным модулятором света 2. Созданная таким образом структурируемая подсветка проецируется на поверхность контролируемого объекта, рельеф которой известным образом искажает изображение структурируемой подсветки. Фоторегистратор 3 регистрирует изображение контролируемого объекта и передает на вход электронного блока 4. Электронный блок 4 преобразует сигнал с выхода фоторегистратора 3 и записывает очередное изображение структурируемой подсветки во внутреннее запоминающее устройство. Одновременно в памяти электронного блока 4 записывается изображение структурированной подсветки, созданной пространственным модулятором 2. Перечисленная выше последовательность повторяется второй раз, но при этом по сигналу с

выхода цифрового электронного блока 4 модулятор 2 формирует структурированную подсветку, соответствующую второй реализации. Число повторений вышеописанного цикла и количество реализации структурированных подсветок устанавливаются в зависимости от требуемой точности определения линейных размеров контролируемого объекта и, практически, ничем не ограничены. Направления освещения и наблюдения устанавливаются различными. Профиль поверхности восстанавливается из величины искажений наблюдаемых изображений структурируемых подсветок. Расположение функциональных узлов комплекса приведено на рисунках 9 и 10 [9].

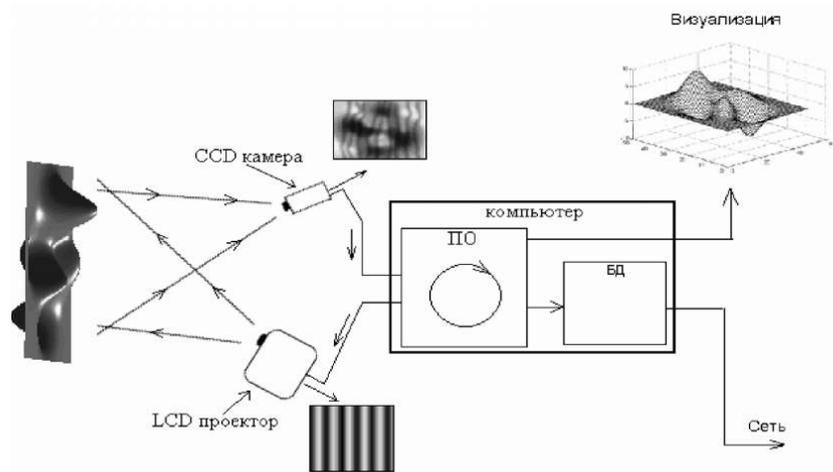


Рисунок 9 – Расположение функциональных узлов комплекса

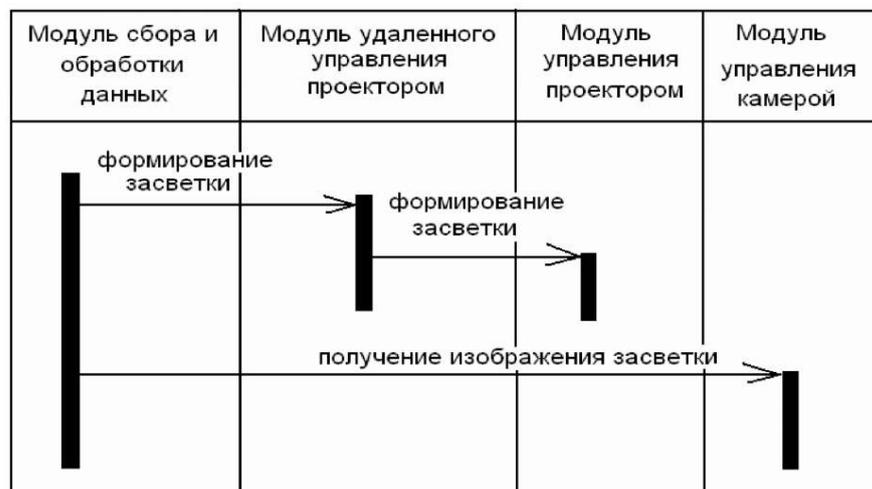


Рисунок 10 – Схема взаимодействия модулей

Для увеличения точности контроля перед проведением измерения контролируемого объекта необходимо выполнять калибровку калибровочной поверхностью, на которую нанесены координатные метки. Калибровка заключается в проведении вышеописанного цикла измерений калибровочной поверхности, в результате которого во внутреннем запоминающем устройстве электронного блока 4 формируется набор изображений поверхности. Далее проводится серия аналогичных измерений для калибровочной поверхности, параллельно смещаемой по направлению от источника освещения на некоторые интервалы с сохранением результатов в электронном блоке 4. Самая удаленная поверхность определяется как базовая. Поскольку зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения однозначно определяет высоту рельефа поверхности контролируемого объекта, а две другие координаты определяются по положению искажений структуры подсветки в зарегистрированных изображениях, то для каждой точки измеренной поверхности определяется точка на базовой поверхности, в которой зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения была аналогичной.

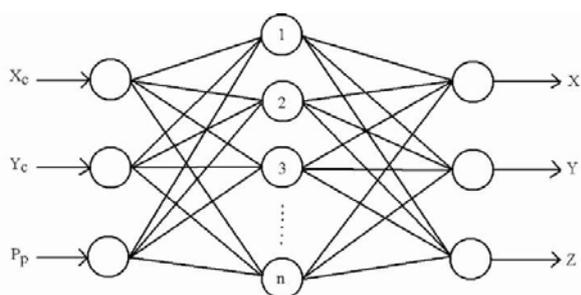


Рисунок 11 – Топология нейронной сети для задачи калибровки измерительной системы

После получения изображений контролируемого объекта для каждой точки на изображениях контролируемого объекта определяются точки на изображениях калибровочной поверхности, соответствующие различным расстояниям от измеряемой поверхности до базовой, в которых была

аналогичная зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения. С помощью интерполяции определяется расстояние от базовой поверхности до поверхности, на которой в исследуемой точке зависимость интенсивности зарегистрированного излучения от номера изображения в наибольшей степени подобна зависимости интенсивности от номера изображения в исследуемой точке контролируемого объекта. По координатам исследуемой точки с помощью координатных меток, нанесенных на калибровочную поверхность, определяются координаты точки в двумерном пространстве, определенном калибровочной поверхностью. С помощью линейного преобразования определяются 2 декартовы координаты в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности. Таким образом, для каждой исследуемой точки изображения определяются 3 декартовы координаты: одна в направлении перемещения калибровочной поверхности и 2 в плоскости, перпендикулярной направлению перемещения калибровочной поверхности. Использование функции зависимости интенсивности освещения от номера изображения, устойчивой к ошибке определения интенсивности, обеспечивает устойчивость способа к определению поля координат контролируемого объекта. Способ позволяет определять линейные размеры трехмерных объектов независимо от отражательных свойств поверхности и наличия глубоких впадин. На рисунках 12 и 13 изображены исследуемый объект и результат исследования одной из его поверхностей.

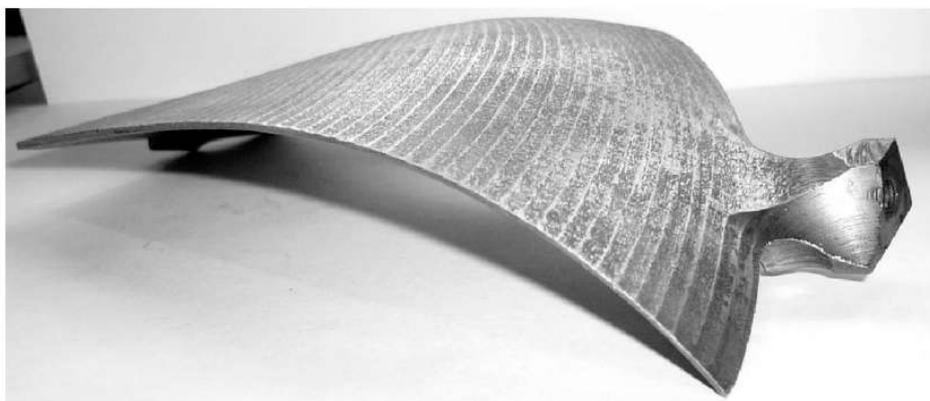


Рисунок 12 – Измеряемый объект (лопатка турбины)

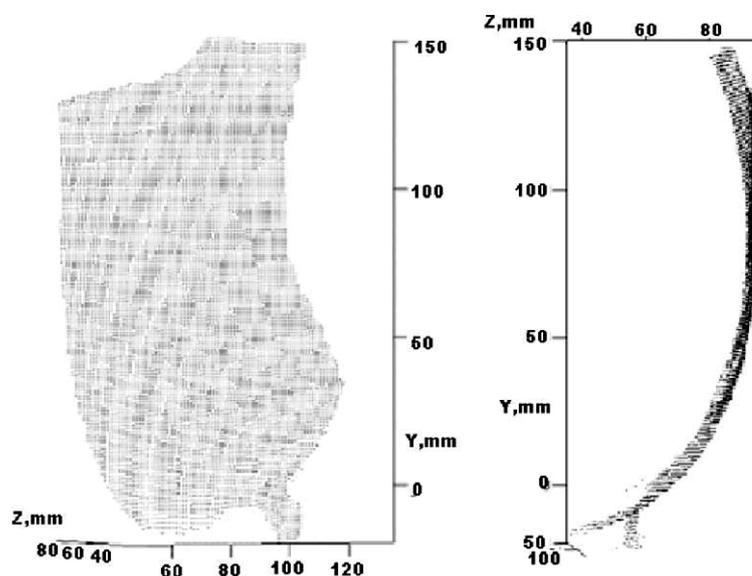


Рисунок 13 – Воспроизведенная на ЭВМ поверхность лопатки турбины

1.2.3 Способ получения трехмерного изображения объекта путем измерения интенсивности диффузного отражения света различными точками его поверхности

При наблюдении трехмерной сцены можно легко отличить цилиндрическую колонну от колонны, имеющей прямоугольное сечение. У зрителя не возникает трудности в различении плоского диска и шара. Можно привести множество других примеров. Эта особенность изображений давно известна и используется в живописи. В большинстве случаев информации, содержащейся в распределении светотени в проекциях трехмерных объектов

на сетчатки глаз, оказывается достаточно для определения третьей недостающей координаты (глубины). Этот метод определения глубины можно реализовать и в сканерах. Особенно просто этот метод реализуется при сканировании объектов, поверхность которых диффузно отражает падающий на нее свет [19].

При использовании закона диффузного отражения света сканируемыми объектами для получения их трехмерных изображений необходимо рассмотреть процесс образования светотеней на изображении объекта, при этом будем считать, что объект диффузно отражает падающий на него свет. Согласно закону Ламберта сила света I_1 , отраженного диффузно отражающей поверхностью, при одинаковой яркости во всех направлениях, равна

$$I_1 = IK \cos \Theta, \quad (1)$$

где I – сила падающего света, K – коэффициент отражения поверхности ($0 < K < 1$), Θ – угол между нормалью N к отражающей поверхности и направлением на источник света. Сам факт зависимости силы диффузно отраженного света от углового положения отражающей поверхности по отношению к направлению, откуда происходит ее освещение, дает принципиальную возможность определять угловую ориентацию отражающей поверхности в различных точках пространства, а по ним и всю поверхность. Это обстоятельство используется зрительной системой и может быть использовано в целях получения трехмерных изображений при сканировании реальных объектов.

Для того, чтобы проанализировать данный способ, рассмотрим рисунок 14 [19].

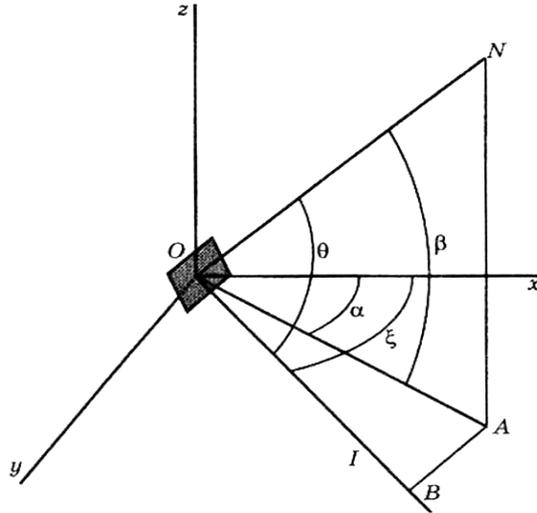


Рисунок 14 – Диффузно отражающая свет поверхность, произвольно ориентированная в пространстве

На этом рисунке показана диффузно отражающая свет поверхность, которая помещена в начало координат, а также нормаль к этой поверхности N , составляющая с направлением на источник света угол α . Источник света расположен на одной из координатных плоскостей, а камера на оси x .

Угол Θ не определяет однозначно угловое положение в пространстве нормали к отражающей поверхности. Для того чтобы однозначно задать угловое положение в пространстве этой нормали, необходимо задать два угла, а именно угол α – азимут, и угол β – угол места. При этом имеет место соотношение:

$$\cos\Theta = \cos\beta\cos(\xi - \alpha). \quad (2)$$

Это соотношение может быть получено путем последовательного проецирования нормали ON сначала на координатную плоскость XOY , а затем проецирования проекции нормали OA на ось I . При этом будем иметь

$$OB = ON \cos\beta\cos(\xi - \alpha) = ON \cos\Theta. \quad (3)$$

Делая подстановку $\cos\Theta$ из формулы (2) в формулу (1) и выполнив некоторые преобразования, соотношение примет вид:

$$I_1 = IK \cos(\xi - \alpha) \cos \beta, \quad (4)$$

где ξ – угол между осью x и направлением на источник света. В этом выражении известными величинами считаются сила света I , которым освещается диффузно отражающая поверхность; сила света I_1 , диффузно отраженного этой поверхностью, а также угол, поскольку они могут быть измерены. Неизвестными величинами являются углы α , β и коэффициент отражения поверхности K . При наличии всего одного уравнения и трех неизвестных, невозможно определить эти неизвестные. Однако проблема может быть легко решена, если при измерениях воспользоваться дополнительными источниками света. Действительно, расположив дополнительный источник параллельных лучей света, например, на оси x и измерив силу света I_0 , отраженного рассматриваемой поверхностью от этого источника, можно составить дополнительное уравнение

$$I_0 = IK \cos \alpha \cos \beta. \quad (5)$$

Аналогичным образом можно получить еще одно недостающее уравнение, если дополнительный источник света поместить так, чтобы он располагался на линии, лежащей в координатной плоскости XOZ :

$$I_2 = IK \cos(\zeta - \beta) \cos \alpha, \quad (6)$$

где ζ – угол между осью x и направлением на этот дополнительный источник света. Решая совместно уравнения (4)-(6), получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{I_1 / I_0 - \cos \xi}{\sin \xi}; \quad (7)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{I_2 / I_0 - \cos \zeta}{\sin \zeta}; \quad (8)$$

$$K = \frac{I_0}{I \cos \alpha \cos \beta}. \quad (9)$$

Формулы (7) и (8) полностью определяют угловое положение нормали к диффузно отражающей поверхности объекта в каждой ее точке.

Процедура построения поверхности видимой части объекта состоит в следующем. Вначале назначается плоскость, относительно которой будет отсчитываться третья координата (глубина). С этой целью берется любая произвольная точка поверхности сканируемого объекта с координатами y_0, z_0 и координата x_0 этой точки приравняется нулю. Поскольку целью сканирования является определение формы объекта (его оболочки), а не его расположение в пространстве, то такой выбор не повлияет на конечный результат. Затем, перемещаясь по произвольному пути из точки с координатами x_0, y_0, z_0 в точку с координатами y_1, z_1 путем наращивания координаты x , определяется координата глубины x_1 в этой точке в соответствии с выражением

$$x_1 = \int_{y_0}^{y_1} \frac{dy}{\operatorname{tg} \alpha(y, z_1)} + \int_{z_0}^{z_1} \frac{dz}{\operatorname{tg} \beta(y_1, z)}. \quad (10)$$

В случае дискретных изображений интегралы в формуле (9) заменяются суммами, а координаты y и z – номерами столбцов и строк, в которых расположены пиксели исходных двумерных изображений, и (9) принимает вид:

$$M = \sum_{n_0}^N \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha(L, n)} + \sum_{l_0}^L \frac{1}{\operatorname{tg} \beta(l, N)}. \quad (11)$$

В этой формуле приняты следующие обозначения: l и n – текущие номера строки и столбца изображения, полученного посредством камеры; l_0 и n_0 – номера строки и столбца начальной точки поверхности, для которой

координата глубины принята равной нулю; K и N – номера строки и столбца пикселя, для которого измеряется третья дискретная координата M . Шаг дискретизации третьей координаты M равен шагу дискретизации исходных двумерных изображений.

Таким образом, для того чтобы определить третью координату (глубину) любой точки сканируемого объекта, необходимо в общем случае измерить яркость этой точки при трех различных расположениях источника освещения. Однако, при измерениях ни одна точка сканируемого объекта не должна быть затенена какими-либо частями самого объекта. В случае сканирования простейших объектов достаточно каждую их точку поочередно осветить с одних и тех же трех позиций. Более сложные объекты, например лицо человека, потребуют уже большего количества источников света, используемых попеременно для освещения различных его частей, так как при некоторых расположениях источников освещения отдельные его участки могут быть затенены другими частями объекта.

Выше речь шла об определении третьей координаты той части объекта, которая видна камере, т. е. только части всего объекта. В рассмотренном случае камера располагалась на оси x . Для получения трехмерного изображения всего объекта необходимо провести его съемку со всех сторон и затем сшивку всех полученных при этом трехмерных изображений его частей. В отличие от рассмотренных ранее методов сканирования проблема сшивки в данном случае намного проще, что является серьезным достоинством этого метода. Это обусловлено тем, что в отличие от методов, упомянутых выше, третья координата сканируемого объекта (глубина) в данном методе определяется для каждого пикселя исходных двумерных изображений, благодаря чему при сшивке отдельные фрагменты трехмерного объекта легко совмещаются.

Недостатком рассмотренного метода, как и других методов трехмерного сканирования, использующих свет, является то, что он ориентирован на работу с объектами, диффузно отражающими свет. Для сканирования

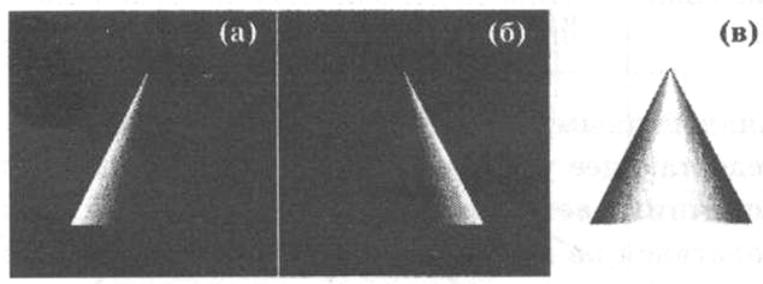
объектов, имеющих блестящие зеркальные поверхности, как, например, окрашенный кузов автомобиля или прозрачные поверхности (к примеру, изделия из стекла), их необходимо покрывать антибликовым составом, создающим белую матовую поверхность.

При экспериментальной проверке описанного метода трехмерного сканирования был выбран сравнительно простой объект, а именно конус, поверхность которого диффузно рассеивала свет. Конус располагался таким образом, что его вертикальная ось совпадала с координатной осью z . Простота объекта и его расположение позволили при определении третьей координаты обойтись освещением каждой точки его поверхности только двумя, а не тремя источниками света, например фронтальным и боковым, как это показано на рисунке 15. Так можно было поступить потому, что в данном случае яркость пикселей на контурах объекта априори постоянна. При боковом освещении слева яркость левого контура максимальна и постоянна, при боковом освещении справа яркость правого контура максимальна и постоянна, а при фронтальном освещении яркость левого и правого контуров равна нулю. В данном случае для расчета третьей координаты (глубины) трехмерного изображения можно было воспользоваться сокращенным вариантом формулы (11):

$$M = \sum_{n_0}^N \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha(L, n)}. \quad (12)$$

При этом задавали на контуре изображения конуса, показанного на рисунке 15б, одно и то же, заранее известное значение интенсивности, в рассматриваемом случае равное нулю, а затем перемещались вдоль строки изображения в точку, координату глубины которой определяли. При выполнении эксперимента вначале были получены двумерные цифровые изображения конуса при трех различных положениях источников освещения (спереди, слева и справа), которые показаны на рисунке 15. Эти изображения

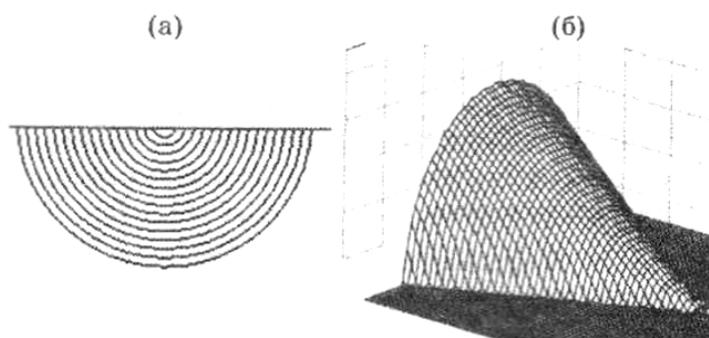
различались между собой только типом освещения, поскольку съемка велась при неизменном положении камеры и объекта. Изображение конуса, показанное на рисунке 15а, было получено при боковом освещении слева, а изображение, показанное на рисунке 15б, – при боковом освещении справа.



(а) – боковое освещение слева, (б) – боковое освещение справа,
(в) – фронтальное освещение.

Рисунок 15 – Изображения конуса, сделанные при неизменном положении камеры и объекта, различающиеся между собой типом освещения

На этих изображениях фон, на котором виден конус, оставался неосвещенным, поскольку лучи от источников света по нему скользили, не освещая его. Изображение конуса, показанное на рисунке 15в, было получено при фронтальном освещении. В этом случае фон, на котором виден конус, освещен. Далее, для каждого пикселя изображения, показанного на рисунке 15а, и соответствующего ему пикселя изображения, показанного на рисунке 15в, а также для соответствующих пар пикселей изображений, доказанных на рисунках 15б и 15в, измерялись интенсивности, значения которых прямо пропорциональны силам диффузно рассеянного света. После этого по формуле (7) определялся сначала тангенс угла α , а затем по формуле (12) находилась координата глубины M . Дискретные координаты L , N и M были использованы для построения трехмерного изображения сканируемого объекта, которое показано на рисунке 16б. На рис. 16а приведены линии постоянной высоты, представляющие собой окружности, радиус которых линейно убывает по мере приближения к вершине конуса.



(а) – Линии постоянной высоты;
 (б)– аксонометрическое изображение объекта.

Рисунок 16 – Результат эксперимента

В описанном методе определения трехмерной формы показано, что в общем случае для определения всех трех координат объекта необходимо получить для каждой его точки интенсивность диффузно отраженного света при трех различных направлениях световых лучей, освещающих этот объект. Эти направления в общем случае могут быть выбраны произвольно, совсем не обязательно, чтобы они совпадали с направлениями координатных осей x , y , z , как это было сделано. Однако имеющаяся априорная информация о наблюдаемом объекте может снизить это требование до двух источников света, как, например, в описанном выше эксперименте, а если еще априорно известны значения коэффициента отражения в каждой точке объекта, то и до одного источника света. Зрительная система человека, судя по всему, широко использует это обстоятельство, благодаря чему зритель легко воспринимает изображенные на фотографии трехмерные объекты как объемные и рельефные, даже при наличии одного источника света. Существенно заметить также, что чувствительность нашего зрения к восприятию погрешности представления размеров наблюдаемого объекта по глубине много ниже чувствительности восприятия погрешности представления его размеров по двум другим координатам. Так, если трехмерное изображение шара сплюснуть по ширине, то уже погрешность в 4% будет замечена зрителем, в то время как если его сплюснуть по глубине, то даже

существенно большие искажения остаются незаметными. Толерантность зрительной системы к погрешности, с которой воспринимается координата глубины объекта, делает распределение светотени в его изображении (в проекции его на сетчатки глаз), по-видимому, основным источником информации о координате глубины.

1.2.4 Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов посредством проецирования полос

При решении различных задач проектирования, дизайна, безопасности, промышленного контроля, метрологии требуются данные о геометрической форме и размерах объектов в трехмерном пространстве. Одними из самых распространенных бесконтактных методов получения данных о форме трехмерных объектов являются методы, основанные на оптической триангуляции [4].

Принцип действия любого бесконтактного профилометра, в основе которого лежит метод оптической триангуляции, заключается в проецировании на объект точки, линии или системы полос и регистрации полученного изображения объекта. Причем направления проецирования и регистрации изображения составляют некоторый угол, за счет чего возможно получить данные о высоте объекта.

Простейшими устройствами такого типа являются профилометры, которые проецируют на объект точку или линию. При этом данные о высоте объекта получаются, соответственно, только в этой точке или вдоль линии. Для получения всей топограммы поверхности необходимо сканирование объекта. Это является основным недостатком сканирующих профилометров, так как для измерения всей поверхности объекта требуется значительное время. Другим недостатком является сложность конструкции сканирующего узла.

При измерении динамических объектов, как правило, применяют профилометры, в которых для освещения используется структурированный

свет в виде системы параллельных черно-белых, полутоновых или цветных полос. Информация о высоте (глубине) объекта в этом случае заключена в деформации системы полос. Для извлечения этой информации требуются математические выражения, связывающие поперечные отклонения полос с высотой объекта, которые зависят от геометрии оптической схемы.

Возможны четыре варианта оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации его изображения. Их объединяет то, что источник освещения и регистратор изображения находятся на одном расстоянии от некоторой базовой плоскости, на которой находится объект. Различие заключается в оптических схемах проецирующего и регистрирующего каналов. Показано, что только два варианта оптической схемы позволяют использовать алгоритмы расшифровки интерферограмм для реконструкции топограмм поверхности объекта.

Возможны следующие варианты:

1. освещение и регистрация изображения объекта в параллельных пучках;
2. освещение и регистрация изображения объекта в конусных пучках;
3. освещение объекта в конусных пучках, и регистрация изображения объекта в параллельных пучках;
4. освещение объекта в параллельных пучках, а регистрация изображения объекта в конусных пучках.

Предполагается, что в схемах с конус–пучками используются обычные объективы, а в схемах с параллельными пучками – афокальные или телескопические оптические системы, состоящие из двух объективов с общей фокальной плоскостью.

Далее приведены варианты оптических схем объекта и регистрации его изображения. Для каждого варианта оптической схемы выведены формулы, связывающие отклонения полос с высотой объекта.

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации его изображения в конусных пучках показана на рисунке 17.

Здесь и далее предполагаем, что центры выходных зрачков объективов источника освещения O'' и регистратора O' расположены на одном расстоянии l от плоскости XU (ось U перпендикулярна плоскости рисунка) и на расстоянии d друг от друга. Оптические оси освещающего и регистрирующего каналов расположены под углом Θ относительно друг друга.

Выбирается из конуса лучей, исходящих из точки O'' , произвольный луч $O''B$. Первые измерения проводят без объекта, показанного на рисунке 17 в виде дуги.

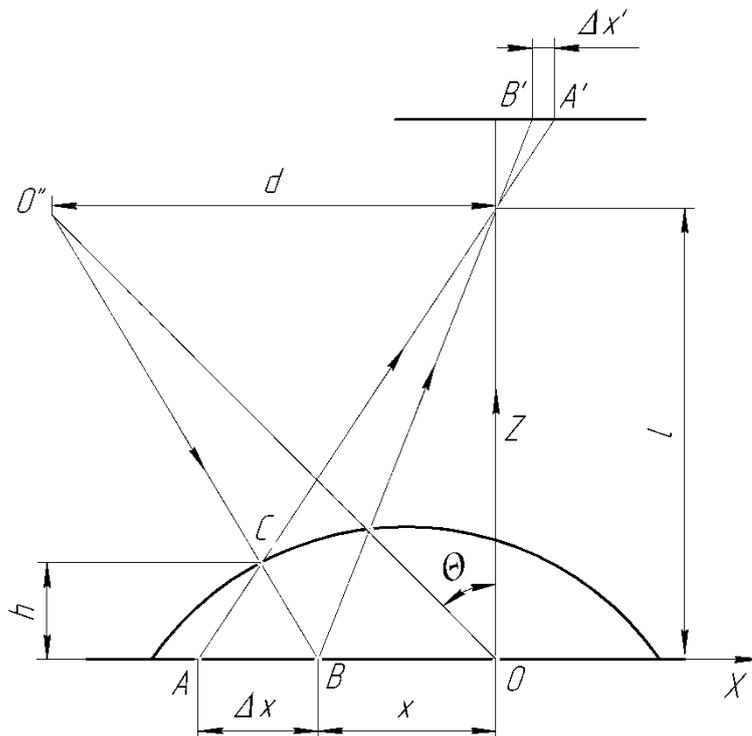


Рисунок 17 – Схема освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта в конусных пучках

Объект находится на некоторой плоскости XU , которая называется базовой. Предполагаем, что объект и базовая плоскость являются диффузно-отражающими поверхностями, поэтому луч, попадая на базовую плоскость

XU , создает светящуюся точку B . Объектив O' формирует изображение данной точки на светочувствительной площадке регистратора в точке B' . При наличии объекта луч $O''B$ создает на его поверхности другую светящуюся точку C . Изображение данной точки на чувствительной площадке регистратора сместится на $\Delta x'$ в точку A' . Отсюда видно, что информация о высоте h точки C относительно базовой плоскости содержится в поперечном смещении ее изображения. В этом заключается суть метода триангуляции.

Выведем выражение, связывающее высоту объекта h в точке C с размером отрезка $\Delta x' = B'A'$.

Из подобия треугольников $O''O'C$ и ABC следует

$$\frac{\Delta x}{h} = \frac{d}{l-h}. \quad (13)$$

Тогда высота объекта h будет

$$h = \frac{\Delta x}{d/l + \Delta x/l}. \quad (14)$$

Из треугольника $OO'O''$ следует

$$\operatorname{tg} \Theta = d/l. \quad (15)$$

Подставляя выражение (15) в выражение (14), получим

$$h = \frac{\Delta x}{\operatorname{tg} \Theta + \Delta x/l}. \quad (16)$$

Из подобия треугольников ABO' и $A'B'O'$ следует

$$\Delta x = \beta \Delta x', \quad (17)$$

где β является фактически коэффициентом увеличения оптической системы.

Таким образом, окончательная формула для высоты объекта при схеме освещения объекта и регистрации его изображения в конусных пучках будет представлена в следующем виде:

$$h = \frac{\beta \Delta x'}{\operatorname{tg} \Theta + \beta \Delta x' / l}. \quad (18)$$

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта в параллельных пучках показана на рисунке 18.

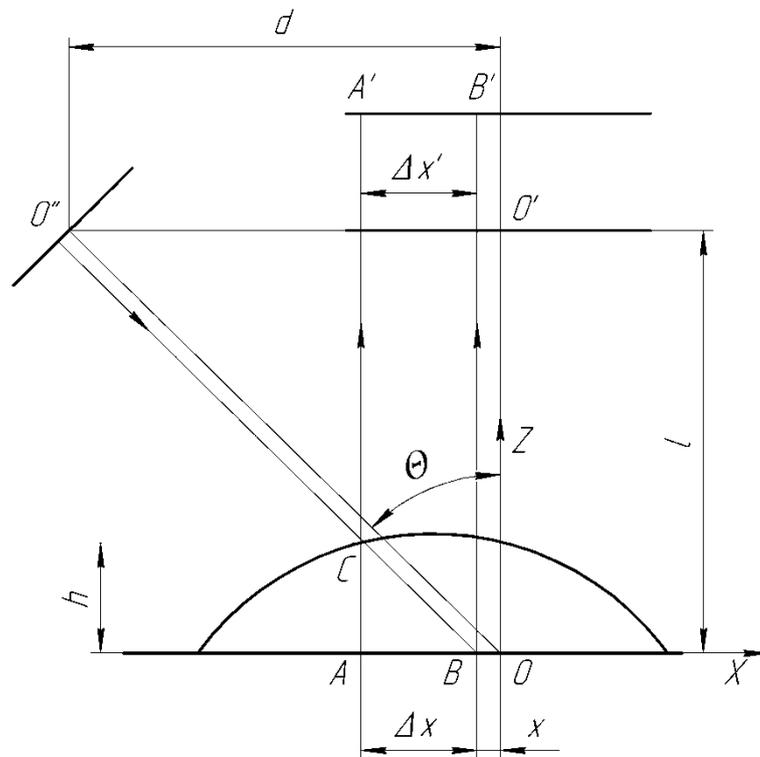


Рисунок 18 – Схема освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта в параллельных пучках

Схема формирования структурированной картины на поверхности объекта и ее регистрации аналогична схеме в конусных пучках, описанной выше.

Из треугольника ABC следует

$$\operatorname{tg} \Theta = \Delta x / h. \quad (19)$$

Так как $\Delta x = \Delta x'$, то окончательная формула для высоты объекта при схеме освещения объекта и регистрации его изображения в параллельных пучках будет рассчитываться как

$$h = \Delta x' / \operatorname{tg} \Theta. \quad (20)$$

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом в конусных пучках и регистрации изображения объекта в параллельных пучках показана на рисунке 19.

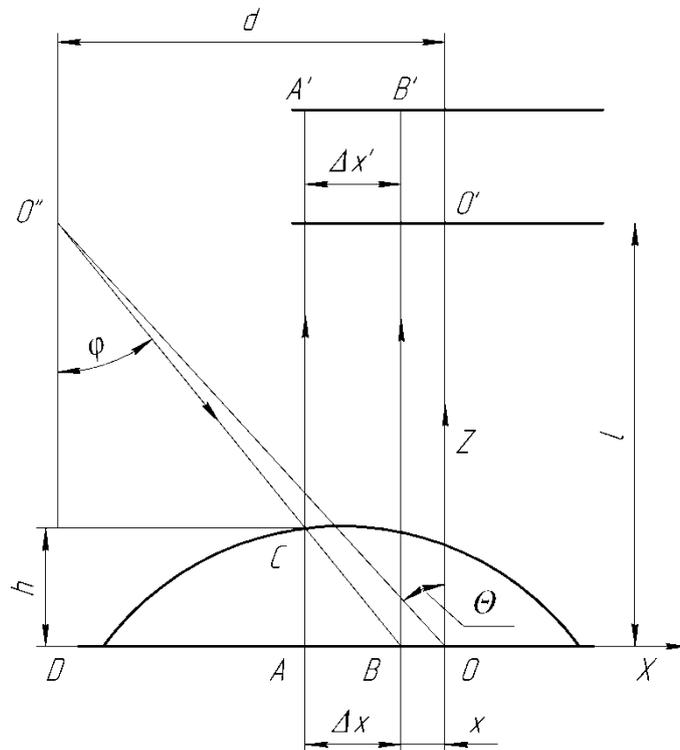


Рисунок 19 – Схема освещения объекта структурированным светом в конусных пучках и регистрации изображения объекта в параллельных пучках

Схема формирования структурированной картины на поверхности объекта и ее регистрации аналогична схемам, описанным выше.

Из треугольника ABC следует

$$h = \Delta x / \operatorname{tg} \varphi. \quad (21)$$

Из треугольника BDO'' следует

$$\operatorname{tg} \varphi = (d - x) / l. \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в выражение (21), получим высоту объекта

$$h = \frac{\Delta x}{d / l - x / l}. \quad (23)$$

Из треугольника $OO'O''$ следует

$$\operatorname{tg} \Theta = d / l. \quad (24)$$

Так как $\Delta x = \Delta x'$, то окончательная формула для высоты объекта при схеме освещения объекта в конусных пучках и регистрации его изображения в параллельных пучках примет следующий вид:

$$h = \frac{\Delta x'}{\operatorname{tg} \Theta - x / l}. \quad (25)$$

Геометрия оптической схемы освещения объекта структурированным светом в параллельных пучках и регистрации изображения объекта в конусных пучках показана на рисунке 20.

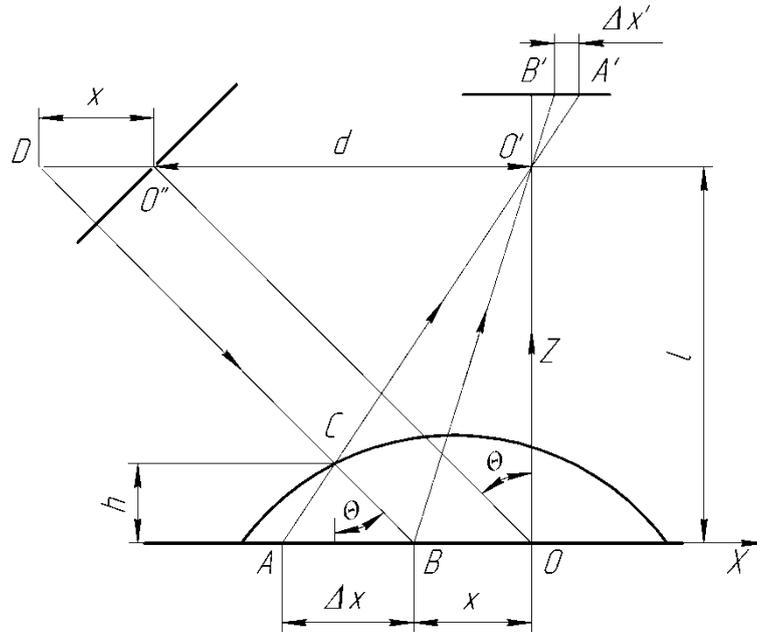


Рисунок 20 – Схема освещения объекта структурированным светом в параллельных пучках и регистрации изображения объекта в конусных пучках

Схема формирования структурированной картины на поверхности объекта и ее регистрации аналогична схемам, описанным выше.

Из подобия треугольников DCO' и ABC следует

$$\frac{\Delta x}{h} = \frac{d + x}{l - h}. \quad (26)$$

Тогда высота объекта будет

$$h = \frac{\Delta x}{d/l + x/l + \Delta x/l}. \quad (27)$$

Из подобия треугольников ABO' и $A'B'O'$ следует

$$\Delta x = \beta \Delta x'. \quad (28)$$

С учетом выражений (27) и (28) окончательная формула для высоты объекта при схеме освещения объекта в параллельных пучках и регистрации его изображения в конусных пучках примет окончательный вид

$$h = \frac{\beta \Delta x'}{\operatorname{tg} \Theta + x/l + \beta \Delta x'/l}. \quad (29)$$

Из формул для высоты объекта (18), (20), (25) и (29) следует, что в схемах 3 и 4 смещение полосы на объекте зависит от ее координаты x в плоскости XU , поэтому для этих схем необходимо каким-либо образом маркировать полосы например, цветом, прерывистыми или пунктирными линиями и др.). Для автоматической расшифровки системы таких полос необходимы алгоритмы распознавания полос и вычисления отклонения полос от своего первоначального положения. Это во многом усложняет задачу обработки регистрируемых изображений и измерения поверхности объекта в целом.

Из треугольника $OO'O''$ следует:

$$\operatorname{tg} \Theta = d/l. \quad (30)$$

Лишь в схемах 1 и 2 высота h независима от координаты полосы x , а зависит только от сдвига полосы. На практике, при освещении объекта структурированным светом, искаженная система полос на изображении объекта напоминает интерферограмму, полученную в полосах конечной ширины. Распределение фазы такой интерферограммы несет информацию о высоте объекта. В том случае, когда нет зависимости от координаты полосы, можно использовать хорошо разработанные алгоритмы автоматической расшифровки интерферограмм. При этом фаза интерферограммы $\varphi(x,y)$ связана с отклонением полос Δx следующим соотношением:

$$\varphi(x, y) = 2\pi \Delta x / p, \quad (31)$$

где p – период решетки на базовой плоскости.

Полученные выводы можно проиллюстрировать наглядно следующим примером. Известно, что прообразом метода проекции полос был муаровый метод [4]. С современной точки зрения можно сказать, что муаровый метод

является аналогом интерферометрии в полосах бесконечной ширины, так как муаровые полосы представляют собой изолинии равной высоты объекта. В методе же проекции полос информация о высоте объекта закодирована в величине отклонения полос, т. е. данный метод является аналогом интерферометрии в полосах конечной ширины.

Если на рисунке (рисунок 21) отобразить в виде прямых линий лучи проекционного и отображающего каналов, соответствующие светлым или темным штрихам решетки, то получившаяся картина пересечений лучей напоминает муаровую картину.

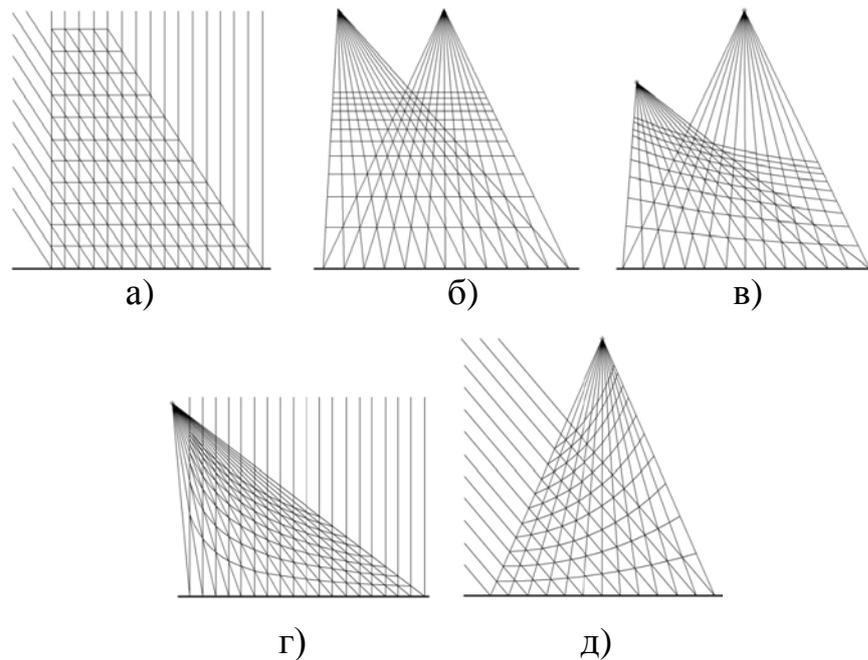


Рисунок 21 - Поверхности постоянной фазы в схеме освещения объекта структурированным светом и регистрации изображения объекта

На рисунке 21 поверхности постоянной фазы: (а) – в параллельных пучках, (б) – в конусных пучках, (в) – в конусных пучках при различных высотах осветителя и регистратора относительно базовой плоскости, (г) – в схеме освещения объекта структурированным светом в конусных пучках и регистрации изображения объекта в параллельных пучках, (д) – в схеме освещения объекта структурированным светом в параллельных пучках и регистрации изображения объекта в конусных пучках.

Причем поверхность равной фазы проходит через точки пересечения лучей проекционного и отображающего каналов. На рисунках 21а и 21б эти точки лежат на горизонтальных прямых, параллельных базовой линии. Расстояние между базовой линией и этими прямыми, по аналогии с интерферометрией в полосах бесконечной ширины, можно принять за эффективную длину волны, эквивалентную длине волны света в интерферометрии.

Из рисунка 21а следует, что для схемы проекции и отображения полос в параллельных пучках эта эффективная длина волны $\lambda_{эфф}$ не зависит от координат x , y , z и равна

$$\lambda_{эфф} = p / \operatorname{tg}\Theta, \quad (32)$$

где p – период решетки на базовой плоскости, Θ – угол между направлениями проецирования и отображения.

В схеме проекции и отображения полос в конусных пучках (рисунок 21б) эффективная длина волны также постоянна для поперечных координат x , y , но уже зависит от продольной координаты z . Но главная особенность данной схемы состоит в том, что поверхности равной фазы также параллельны базовой плоскости, как и в предыдущем случае. Это означает, что все точки в плоскости (x, y) могут обрабатываться одинаково. В отличие от схемы в параллельных пучках, из рисунка 21б видно, что масштаб изображения меняется в зависимости от высоты z , поэтому для восстановления истинной картины необходима операция трансформации координат по законам проективной оптики.

Следует отметить, что в схеме с конусными пучками очень важно, чтобы центры входных зрачков объективов проекционного и отображающего каналов находились на одном расстоянии от базовой плоскости. Если это условие не выполняется, то, как видно из рисунка 21в, изолинии постоянной

фазы становятся изогнутыми и эффективная длина волны зависит не только от координаты z , но и от (x,y) .

Аналогичная картина с изогнутыми линиями равной фазы возникает и для двух оставшихся схем проекции и наблюдения полос, изображенных на рисунках 21г, 21д.

Таким образом, только в схемах в параллельных и конусных пучках (рисунки 21а и 21б) поверхности равной фазы представляют собой плоскости, параллельные базовой плоскости. Во всех остальных случаях на рисунках 21в, 21г и 21д поверхность постоянной фазы не является плоскостью, что усложняет преобразование фазы в высоту при реконструкции формы поверхности трехмерного объекта. При таком распределении фазы требуется сложная процедура калибровки оптической системы для построения зависимости высоты объекта от фазы.

Самым простым случаем при преобразовании фазы в высоту является оптическая схема в параллельных пучках на рисунке 21а, так как распределение фазы вдоль оси Z является линейным. Линейное распределение фазы позволяет использовать измерения фазы только в двух определенных по высоте точках для получения масштабных коэффициентов перевода радиан в единицы длины.

В оптической схеме в конусных пучках на рисунке 21б распределение фазы вдоль оси Z является нелинейным, поэтому процедура калибровки усложняется, так как для построения зависимости высоты объекта от фазы требуется измерение фазы в нескольких определенных по высоте точках.

Если высота объекта превышает эффективную длину волны, то необходима операция сшивки фазы. Поэтому приведенный анализ можно также применять для выбора параметров оптической схемы, при которой можно проводить измерения без сшивки фазы.

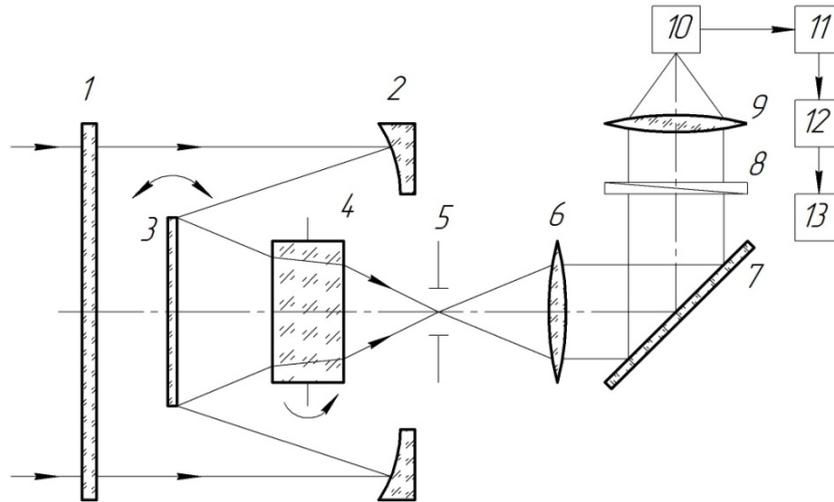
1.3 Исследование теории и способов определения формы объектов на основе собственного инфракрасного излучения

1.3.1 Определение трехмерной формы объектов на основе четырех поляризационных тепловых изображений

Известен способ определения трехмерной формы объектов, суть которого заключается в сканировании поверхности объекта по строке и кадру, причем поляризуют оптический тепловизионный сигнал, преобразуют полученный поляризационный тепловизионный сигнал в электрический с последующим запоминанием и формируют 4 поляризационных тепловизионных изображения с азимутами поляризации 0° , 45° , 90° , 135° соответственно для определения формы объекта внутри контура по формулам, основанных на значениях полученных видеосигналов каждого элемента разложения кадра [25]. Таким образом, по четырем поляризационным тепловизионным изображениям можно определить угол наклона $\psi(N,K)$ каждого элемента поверхности объекта по отношению к направлению наблюдателя.

На рисунке 22 представлено устройство для реализации предлагаемого способа, где приведены следующие обозначения:

Линейный ИК-поляризатор 8 устанавливается в схеме с возможностью вращения вокруг оптической оси и фиксации положения его азимута поляризации под углами 0° , 45° , 90° и 135° относительно плоскости референции.



1 – защитное окно; 2 – сферическое зеркало со слепым пятном; 3 – плоское качающееся зеркало; 4 – вращающаяся призма; 5 – диафрагма; 6 – окуляр телескопической системы; 7 – плоское зеркало; 8 – линейный ИК поляризатор; 9 – конденсор; 10 – ИК приемник излучения; 11 – запоминающее устройство (ЗУ); 12 – блок обработки информации (БОИ); 13 – видеоконтрольное устройство (ВКУ).

Рисунок 22 – Функциональная схема тепловизионного устройства для определения формы объекта на основе четырех базисных поляризационных тепловизионных изображений

Если азимут ИК поляризатора 8 имеет значение $t_{\text{п}}=0^{\circ}$, то на выходе приемника 10 в течении кадра формируется $N \times K$ сигналов $U_0(N, K)$. Аналогично формируются сигналы $U_{45}(N, K)$ при $t_{\text{п}}=45^{\circ}$, $U_{90}(N, K)$ при $t_{\text{п}}=90^{\circ}$ и $U_{135}(N, K)$ при $t_{\text{п}}=135^{\circ}$ от всех элементов разложения тепловизионного кадра. В запоминающем устройстве 11 все эти 4 кадра запоминаются, и в блоке обработки информации 12 вся информация обрабатывается и выводится на экран ВКУ форма поверхности наблюдаемого объекта внутри его контура вдоль произвольной линии сканирования [25].

Суть способа тепловизионного определения формы объектов заключается в следующем: с помощью тепловизионной системы с поляризационной насадкой (рисунок 25) наблюдается объект произвольной формы, тогда можно получить видеосигналы U_0 , U_{45} , U_{90} , U_{135} , с помощью которых можно определить трехмерную геометрию формы объекта внутри теплового контура на основе формулы:

$$\psi(N, K) = \arccos \left\{ 1 - \frac{\frac{U_0(N, K) - U_{90}(N, K)}{U_0(N, K) + U_{90}(N, K)}}{a \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{U_{45}(N, K) - U_{135}(N, K)}{U_0(N, K) - U_{90}(N, K)} \right]} \right\}, \quad (33)$$

где a – постоянная, зависящая от материала и шероховатости поверхности объекта.

Таким образом, по четырем поляризационным тепловизионным изображениям можно определить угол наклона $\psi(N, K)$ каждого элемента поверхности объекта по отношению к направлению наблюдения. Тогда для произвольной линии, сканируемой по поверхности объекта, искомые уравнения формы поверхности можно записать в виде:

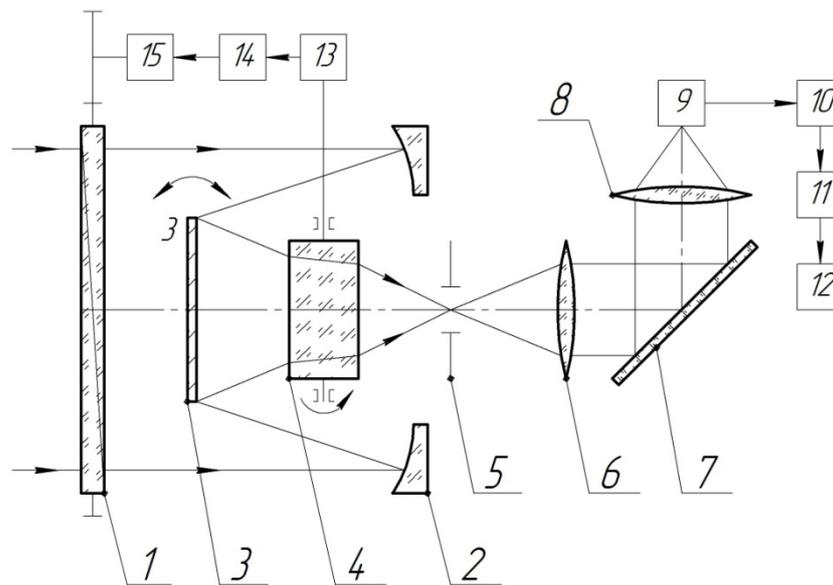
$$x(N, K) \Big|_{y=\text{const}} = z(N, K) \operatorname{tg} \psi(N, K); \quad (34)$$

$$x(N, K) \Big|_{z=\text{const}} = y(N, K) \operatorname{tg} \psi(N, K). \quad (35)$$

1.3.2 Определение трехмерной формы объектов на основе трех поляризационных тепловых изображений

Поскольку одним из недостатков тепловизионного способа определения, основанного на четырех базисных поляризационных тепловизионных изображениях, является длительность цикла определения формы, которая складывается из времени сканирования четырех поляризационных кадров и времени, требующегося для изменения направления азимута поляризации, то с целью уменьшения времени обработки, предлагается тепловизионный способ определения трехмерной формы для организации непрерывного процесса обработки. В этом случае непрерывно формируются три кадра поляризационного тепловизионного изображения объекта, каждый элемент которых построен со сдвигом азимута поляризации на угол 60° . Для уменьшения времени обработки изображения будем непрерывно менять

азимут поляризации t_p , определенным способом так, чтобы за время его поворота на 180° сформировались три поляризационных кадра.



1-вращаемый линейный ИК-поляризатор; 2-сферическое зеркало со слепым пятном; 3-плоское качающееся зеркало кадровой развертки; 4-вращающаяся призма строчной развертки; 5-диафрагма, расположенная в фокальной плоскости телескопического объектива, состоящего из элементов 2 и 3; 6-окуляр; 7-плоское зеркало; 8-конденсор; 9-приемник теплового излучения; 10-запоминающее устройство; 11-блок обработки информации; 12-видеоконтрольное устройство; 13-привод призмы и качающегося зеркала; 14-устройство сопряжения вращения призмы и качающегося зеркала; 15-привод поляризатора.

Рисунок 23 – Функциональная схема тепловизионного устройства для определения формы на основе трех базисных поляризационных тепловизионных изображений

Собственное ИК излучение от наблюдаемого объекта проходит через вращающийся поляризатор 1 и отражается от зеркала 2, далее качающееся плоское зеркало 3 осуществляет сканирование поверхности по кадру, а вращающаяся призма 4-по строке. ИК излучение от объекта проходит диафрагму 5, окуляр 6, отражается от зеркала 7, проходит через конденсор 8 и попадает на приемник излучения 9. Устройство сопряжения 14 синхронизирует вращение сканирующего механизма 3 и 4 и вращение поляризатора 1 таким образом, что за время формирования полного кадра

$N \times K$ элементов поляризатор поворачивается на 60° . Таким образом, после сканирования первого кадра происходит сканирование второго кадра, для каждого элемента которого азимут поляризации сдвинут на 60° [27].

Выражение для определения угла наблюдения для элементов изображения имеет вид:

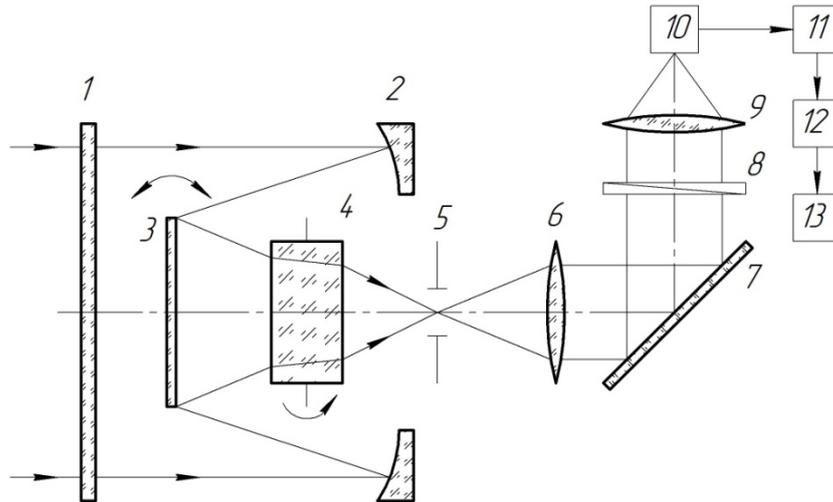
$$\psi(N, K) = \arccos \left\{ \begin{array}{l} 1 - \frac{3[U_{60}(N, K) - U_{120}(N, K)]}{a[U_0(N, K) + U_{60}(N, K) + U_{120}(N, K)]} \times \\ \times \frac{1}{\sin \left\{ \arctg \left(\frac{3[U_{60}(N, K) - U_{120}(N, K)]}{2U_0(N, K) + U_{60}(N, K) + U_{120}(N, K)} \right) \right\}} \end{array} \right\}. \quad (36)$$

1.3.3 Определение трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных тепловых изображений

В способе определения трехмерной формы объекта предполагается формировать два поляризационных тепловизионных изображения с азимутами 0° , 45° с последующей обработкой полученных сигналов, а устройство, реализующее данный способ, снабжено вращающейся ИК-поляризационной насадкой, установленной перед приемником излучения. Изобретение относится к области тепловизионной техники и может быть использовано в оптико-электронных системах обработки информации и воспроизведение трехмерного изображения. Задачей предполагаемого способа является сокращение времени определения формы объекта внутри его контура путем формирования двух поляризационных изображений.

Поставленная задача достигается за счет того, что в способе тепловизионного определения формы объекта, заключающемся в сканировании поверхности объекта, преобразовании поляризационного тепловизионного сигнала в электрический с последующим запоминанием и анализом электрического тепловизионного изображения объекта, согласно изобретению, формируют два поляризационных тепловизионных

изображения с азимутами поляризации 0° , 45° . Это говорит о том, что для успешного использования таких оптических свойств излучения, как степень, азимут и эллиптичность поляризации, тепловизионное устройство должно быть снабжено поляризационной насадкой, которая устанавливается по ходу излучения перпендикулярно оптической оси устройства [31]. Устройство способа представлено на рисунке 24.



1 - защитное окно; 2 - сферическое зеркало со слепым пятном; 3 - плоское качающееся зеркало; 4 - вращающаяся призма; 5 - диафрагма; 6 - окуляр телескопической системы; 7 - плоское зеркало; 8 - линейный ИК поляризатор; 9 - конденсор; 10 - ИК приемник излучения; 11 - запоминающее устройство (ЗУ); 12 - блок обработки информации (БОИ); 13 - видеоконтрольное устройство (ВКУ)

Рисунок 24 – Функциональная схема тепловизионного устройства для определения формы на основе двух базисных поляризационных тепловизионных изображений

Нормированные сигналы в изображении для каждой элементарной площадки объекта определяются по формулам:

$$U_1^H(N, K) = 1 + P(N, K) \cos 2t(N, K); \quad (37)$$

$$U_2^H(N, K) = 1 + P(N, K) \sin 2t(N, K). \quad (38)$$

При решении этих уравнений как системы, можно выразить через сигналы U_1 и U_2 , степень и азимут поляризации:

$$2t = \operatorname{arctg} \left(\frac{U_2^H - 1}{U_1^H - 1} \right); \quad (39)$$

$$P = \frac{U_1^H - 1}{\cos \left(\operatorname{arctg} \frac{U_2^H - 1}{U_1^H - 1} \right)}. \quad (40)$$

Анализируя связь степени поляризации P собственного теплового излучения различных материалов, в работах [25, 27, 40, 41] теоретически и экспериментально установлено следующее соотношение:

$$P(\psi) = a(1 - \cos \psi). \quad (40')$$

Тогда, с учетом этого соотношение формул (38) и (40) угол наблюдения ψ можно записать в виде:

$$\psi(N, K) = \arccos \left\{ 1 - \frac{[U_2(N, K) - 1]}{a \times \sin \left\{ \operatorname{arctg} \left[\frac{U_2(N, K) - 1}{U_1(N, K) - 1} \right] \right\}} \right\}. \quad (41)$$

1.4 Выводы к главе 1

1. Основываясь на анализе информации об исследованиях оптико-электронных методов и устройств определения формы удаленных объектов, а также их объемной формы, выяснено, что одним из наиболее информативных демаскирующих признаков является их трехмерная форма. В разделе приведены и проанализированы способы и методы, направленные на

решение такой задачи как определение трехмерной формы поверхности удаленного объекта, приведены достоинства и анализ недостатков.

2. На основе анализа научно-технической и патентной литературы можно сделать вывод о том, что существующие оптико-электронные методы и устройства получения информации о форме удаленных объектов недостаточны для определения трехмерной формы (рельефа) поверхности или имеют определенные ограничения. Так, методы анализа поверхности объекта внутри контура классического тепловизионного изображения неоднозначно определяют форму ввиду зависимости яркости изображения объекта, как от формы, так и температуры и индикатрисы коэффициента излучения его поверхности внутри контура. Для раскрытия указанной неоднозначности, необходимо анализировать поляризационные термограммы, в основе формирования которых используются поляризационные свойства собственного излучения поверхности объектов.

3. Существуют методы определения трехмерной формы объектов на основе его многократного освещения пространственно-модулированными структурами оптического излучения, регистрации изображений искаженной рельефом поверхности контролируемого объекта и определении высоты рельефа поверхности по степени искажения изображения структуры зондирующей подсветки, а двух других координат по положению искаженной структуры подсветки в зарегистрированных изображениях. Эти методы достаточно громоздки и требуют решения проблемы сшивания изображений по нескольким проекциям. Кроме того, не очевидно их практическое применение для объектов с направленно-рассеивающим и зеркальным характерами отражения их поверхности.

4. Методы получения трехмерного изображения объекта путем измерения интенсивности отраженного излучения объектов с диффузным покрытием. Эти методы требуют дальнейшего развития применительно к объектам с направленно-рассеивающими свойствами отражения оптического излучения.

5. Применяемые технологии лазерного трехмерного сканирования в настоящее время наиболее развиты, но они успешно применяются только для сканирования крупных объектов, таких как жилые и производственные здания, башни, вышки, заводские территории, аэропорты и так далее. Это объясняется ростом погрешности измерения глубины при сканировании небольших объектов. Кроме того, наличие зеркальных бликов в индикатрисе обратного отражения покрытия объектов может свести на нет работоспособность метода лазерного сканирования.

6. Недостаток технологии, основанной на использовании стереоизображений, заключается в том, что при её применении трудно обеспечить точное соответствие пикселей на изображениях объекта, полученных с двух видеокамер в бесструктурных областях, в следствии чего трудно обеспечить достаточную точность получаемых трехмерных изображений.

7. К недостаткам описанных методов относится также невозможность их применения в оптико-электронных приборах и комплексах для определения формы объектов в реальном масштабе времени.

8. Обобщая материалы настоящего обзора научно-технической и патентной литературы и суммируя пп. 1–8 выводов, целесообразно отметить, что тема диссертационной работы по разработке, исследованию и развитию оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов на основе оптических свойств излучения и отражения является актуальной.

2 ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СОБСТВЕННОГО И ОТРАЖЕННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Получение информации о трехмерной форме, наблюдаемых объектов является одной из актуальных проблем современной науки и техники. В первой главе настоящей работы были рассмотрены ряд известных методов и способов извлечения информации об объемной форме удаленных объектов. Однако эти методы и способы имеют существенные ограничения в их реализации и применении. В этой связи были развиты ранее известные, а также разработаны и исследованы новые методы получения информации о трехмерной форме объектов, которые представляются в данной главе.

2.1 Физико-математические основы формирования тепловизионного изображения. Проблемы классического тепловидения

Инфракрасное (ИК) излучение, испускаемое телами, содержит информацию о составляющих эти тела веществах и их расположений. Восприятие этой информации с помощью системы наблюдения и соответствующая ее обработка позволяют определить и проконтролировать многие параметры, которые трудно или невозможно измерить непосредственно. Очевидно, что в каждом конкретном случае дистанционного наблюдения или измерения этих параметров сама система может изменяться, хотя общая радиометрическая схема должна присутствовать обязательно, причем состоит она, как отмечается в работе [29], из исследуемого источника излучения, окружающей среды, системы пропускающей излучение и формирующей изображение приемной системы, блоков обработки информации и визуализации. Вся система в целом формирует изображение, в котором видимый яркостный контраст

пропорционален тепловому контрасту наблюдаемого объекта, то есть его пространственному распределению температуры $T(x,y)$ и коэффициенту излучения $\varepsilon(x,y)$.

Это преобразование обычно осуществляют последовательно анализируя различные точки объекта мгновенным элементарным радиометрическим полем зрения, вырезающим в плоскости объекта площадь поверхности dA . Мгновенное поле зрения выбирают малым и быстро перемещают по объекту, чтобы перекрыть всю его площадь в случае одноэлементного приемника излучения. Распределение яркости $L(x,y)$ теплового излучения объекта при сканировании площадкой dA формирует на выходе приемника сигнал $U(t)$, амплитуда которого изменяется во времени в соответствии с изменениями визируемой яркости поверхности объекта. Сигнал $U(t)$ после усиления поступает в блок визуализации, развертка которого синхронизирована со сканированием при анализе. Видимая яркость каждого небольшого участка восстановленного изображения пропорциональна яркости теплового излучения исследуемого объекта. При таком методе получения изображения изменение теплового распределения во времени должно происходить медленнее по сравнению со временем полной развертки изображения объекта.

Таким образом, в ИК системе формирования изображения устройство пространственного анализа (сканирующее устройство) позволяет путем соответствующего кодирования (по закону развертки) получить сигнал, амплитуда которого изменяется во времени в соответствии с пространственным распределением тепла в рассматриваемой тепловой картине.

Поток излучения, попадающий на входной зрачок оптической системы от элементарной площадки dA для реальных тел описывается формулой [56]:

$$d\Phi_{\lambda} = \tau_a L_{\lambda} dA \sin \beta \sin \zeta, \quad (42)$$

где τ_a – коэффициент пропускания атмосферы; L_λ – яркость излучения элемента dA объекта; dA – площадь элементарной площадки, вырезаемой мгновенным полем зрения системы, β , ζ – вертикальная и горизонтальная составляющие телесного апертурного угла оптической системы ω . На выходе осесимметричной оптической системы формула имеет вид:

$$d\Phi'_\lambda = \tau_a \tau_o L_\lambda dA \sin \omega, \quad (43)$$

где τ_o – коэффициент пропускания оптической системы.

Такой поток $d\Phi'$ попадая на чувствительный элемент (ЧЭ) приемной системы, формирует величину сигнала [15]:

$$dU_\lambda = S_\lambda d\Phi_\lambda, \quad (44)$$

где S_λ – абсолютная спектральная чувствительность приемника.

Если формулу (43) подставить в формулу (44), опустить функцию \sin в виду малого угла ω , учесть, что площадка dA имеет свой коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda)$ и полученное выражение проинтегрировать по диапазону длин волн $\Delta\lambda$ от λ_1 до λ_2 чувствительности приемника излучения, то выражение для сигнала примет вид:

$$U = dA\omega \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \varepsilon(\lambda) L(\lambda, T) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (45)$$

Если при наблюдении излучающего объекта, площадка dA наклонена под углом ψ к направлению наблюдения, то формула (45) запишется в виде:

$$U = dA\omega \cos \psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_\lambda \varepsilon(\lambda) L(\lambda, T) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (46)$$

Выражение для сигнала через спектральную светимость $W(\lambda, T)$ объекта выглядит так [15, 49]:

$$U = \pi^{-1} dA \omega \cos \psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} W(\lambda, T) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda. \quad (47)$$

На основании закона Кирхгофа, светимость излучения реального объекта может быть записана в виде:

$$W(\lambda, T) = W^{\circ}(\lambda, T) \varepsilon(\lambda),$$

где $W^{\circ}(\lambda, T)$ – функция Планка для светимости абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой T :

$$W^{\circ}(\lambda, T) = C_1 \left(\lambda^5 \exp \left[\frac{C_2}{\lambda T} \right] - 1 \right)^{-1}, \quad (48)$$

где $C_1 = 3,74 \cdot 10^4$ Вт·мкм⁴/см²; $C_2 = 1,438 \cdot 10^4$ мкм·К.

Следует отметить, что выражение (47) получено в приближении геометрической оптики, то есть без учета функции рассеяния точки (ФРТ) оптической системы тепловизора. В работе [46] в приближении физической оптики и на основании работ [21, 22] получено следующее выражение для видеосигнала U :

$$U = \pi^{-1} dA \cos \psi \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} W(\lambda, T; x', y') \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda, \quad (49)$$

где $\pi^{-1} W(\lambda, T; x', y')$ представляет собой свертку яркости теплового излучения объекта и функции рассеяния точки $H(x'-x; y'-y)$, которая имеет вид:

$$\frac{W(\lambda, T; x', y')}{\pi} = \frac{1}{\pi} \iint_{(x, y)} W(\lambda, T; x, y) \cdot H(x'-x; y'-y) dx dy. \quad (50)$$

На основании данного соотношения для линейных тепловизионных систем справедливо применять выражение для видеосигнала U элемента изображения с координатами (x', y') представляется в виде:

$$U(x', y') = \frac{dA \omega \cos \psi}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} W(\lambda, T; x', y') \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda, \quad (51)$$

где $\pi^{-1}W(\lambda, T; x', y')$ представляет собой яркость в изображении элемента поверхности объекта, формируемая в результате обратного преобразования Фурье от произведения пространственно-частотного спектра яркости объекта $W(\lambda, T; \nu, \mu)$ и результирующей передаточной функции всех звеньев тепловизора $h(\nu, \mu)$:

$$\frac{W(\lambda, T; x', y')}{\pi} = \frac{1}{\pi A} \iint_{(\nu, \mu)} W(\lambda, T; \nu, \mu) h(\nu, \mu) \exp[+j2\pi(\nu x' + \mu y')] d\nu d\mu, \quad (52)$$

где A – площадь поверхности объекта в пространстве предметов; $\tau_o(\lambda)$ и $\tau_a(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптической системы тепловизора и слоя атмосферы между объектом и прибором; dA – элемент поверхности наблюдаемого объекта, нормаль которого составляет угол ψ с направлением наблюдения; (x, y) и (x', y') – декартовы координаты элементов поверхности объекта соответственно в пространстве предметов и изображений; S_{λ} – абсолютная спектральная чувствительность приемника излучения; λ_1, λ_2 – соответственно левая и правая граница чувствительности приемника излучения; ν, μ – пространственные частоты в изображении по координате x', y' .

$$\pi^{-1}W(\lambda, T; x, y) = \pi^{-1}\varepsilon(\lambda, T; x, y)\varepsilon(\psi)W^o(\lambda, T), \quad (53)$$

где $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$ – функция распределения спектрального коэффициента излучения элемента поверхности объекта; $\varepsilon(\psi)$ – индикатриса коэффициента излучения элемента dA поверхности объекта.

В целом, необходимо подчеркнуть, что формулы (49)-(52) являются как физико-математической основой анализа видеосигналов тепловизионных изображений объектов, так и их моделирования.

В этой связи, величина тепловизионного сигнала $U(x', y')$ в пространстве изображений функционально зависит от абсолютной температуры T поверхности объекта, значений его коэффициента $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$ которые в свою очередь зависят от оптических постоянных материала и шероховатости поверхности, а также от угла ψ ориентации элемента dA поверхности объекта по отношению к направлению наблюдения. Кроме того, видеосигнал $U(x', y')$ зависит от параметров оптической системы тепловизора ($S_\lambda, \lambda_1-\lambda_2, \tau_o(\lambda), \omega$), слоя атмосферы между объектом и прибором ($\tau_a(\lambda)$), а также передаточных функций всех звеньев оптико-электронной системы прибора:

$$h(\nu, \mu) = \prod_{i=1}^n h_i(\nu, \mu), \quad (54)$$

где $h_i(\nu, \mu)$ – передаточные функции составных звеньев прибора [12]; n – количество звеньев прибора.

К настоящему времени практически во всех областях науки и техники широко распространены методы моделирования. Это можно объяснить тем, что моделирование упрощает и ускоряет поиск правильных решений, является выгодным экономически и удобным в использовании. В области определения (установление принадлежности объекта к сравнительно узкому классу (типу), например, что объект является не просто объектом военной техники, а танком или автомобилем, самолетом или вертолетом и т.п.) образов условно можно выделить два, на наш взгляд, направления в методах моделирования:

1) математическое – применяется для обработки готовых изображений с помощью сложного математического аппарата (разложение в ряд Фурье, Адамара–Уолша и т.д.) с целью улучшения качества изображения и дальнейшей его обработки в соответствии с конечной задачей;

2) оптико-математическое – применяется для обработки изображений непосредственно в процессе их получения и опирается на предварительные теоретические разработки и оптико-физическое обоснование, результатом которой является алгоритм решения поставленной задачи (обнаружение, распознавание, классификация, идентификация).

Суть оптико-математического моделирования заключается в том, что при построении модели изображений объектов используются его свойства оптического излучения. Так, например, по обычным телевизионным изображениям (полученным в неполяризованном свете) определение трехмерной формы объекта затруднено из-за специфики формирования телевизионного изображения (изображение нагретого объекта строится за счет разницы температур объекта и фона, следовательно, равномерно нагретые тела в телевизионном изображении будут иметь информативным только контур изображения объекта, форма же внутри контура практически теряется). Следовательно, основная проблема тепловидения состоит в том, что классические телевизионные системы строят форму контура объекта и не могут построить форму объекта внутри контура.

Поэтому, после теоретического анализа оптических свойств излучения объектов предложено при определении формы объекта внутри контура использовать поляризационные свойства его собственного теплового излучения, так как степень и азимут поляризации, а так же степень эллиптичности излучения связаны с формой объекта [44, 46].

В этой связи, основную проблему тепловидения можно сформулировать следующим образом: так как величина видеосигнала в классических телевизионных системах зависит как от формы объекта внутри контура, так

и от температуры T и коэффициента излучения ε , то однозначно определять его форму внутри контура практически невозможно.

Для выяснения причины потери информации о форме объекта в классических тепловизионных изображениях, рассмотрим, согласно рисунку 25, геометрию регистрации излучения наблюдаемого объекта тепловизионной системой наблюдения с матричным приемником оптического излучения [46].

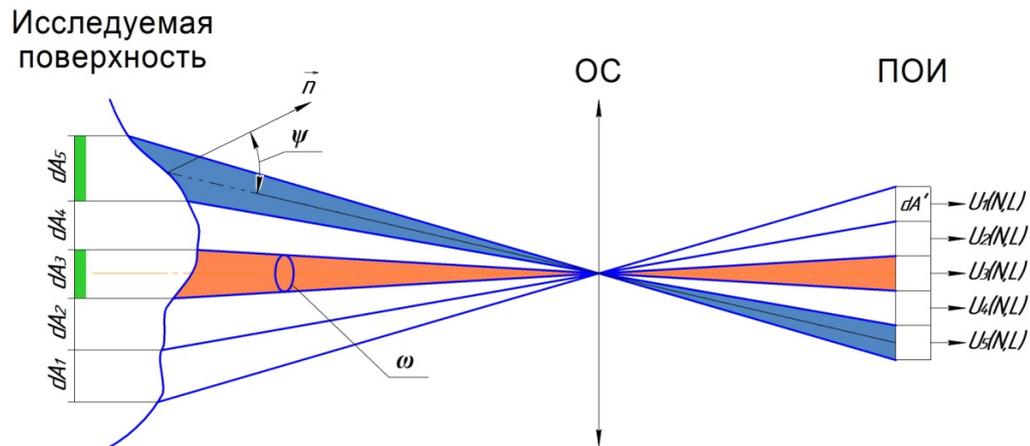


Рисунок 25 – Схема формирования информации о форме объекта в тепловизионных системах

Согласно этому рисунку, справедливо равенство:

$$dA_1 \cdot \cos \psi_1 = dA_2 \cdot \cos \psi_2 = \dots = dA_n \cdot \cos \psi_n. \quad (55)$$

То есть, справедливо соотношение

$$dA \cos \psi = \text{const}, \quad (56)$$

где dA – элемент поверхности наблюдаемого объекта, нормаль n к которому составляет угол ψ с направлением наблюдения.

При анализе выражения (51) с учетом формулы (53), величина видеосигнала для каждого элемента разложения кадра имеет вид:

$$U(N, K) = K(\varepsilon, T) dA(N, K) \cos \psi(N, K), \quad (57)$$

где $U(N,K)$ – величина видеосигнала тепловизионного изображения; N – номер строки элемента изображения; K – номер элемента в строке тепловизионного кадра; ε – коэффициент излучения; ψ – значение угла наклона нормали элемента на поверхности объекта по отношению к направлению наблюдателя; T – температура поверхности объекта.

Проведя анализ между рисунком 25 и этой связью, был сделан вывод, что именно здесь и происходит потеря информации о форме объекта внутри контура. Сопряженность всех элементов dA' и dA , соответственно, приводит к тому, что площадки, расположенные под меньшими углами ($\psi \rightarrow 0^\circ$, $\cos\psi \rightarrow 1$), должны иметь меньшие размеры dA , чтобы равняться тем площадкам, которые расположены под большими углами ($\psi \rightarrow 90^\circ$, $\cos\psi \rightarrow 0$). В связи с этим, становится ясной необходимость использования таких информационных оптических характеристик теплового излучения объектов, которые исключали бы пропорциональную связь параметров dA и $\cos\psi$. К таким величинам относятся поляризационные свойства собственного теплового излучения поверхности объектов. По этой причине исследование этой области получения информации о форме (рельефе) поверхности объектов внутри контура представляет собой особый научный и практический интерес [45].

2.2 Физическое обоснование поляризации собственного теплового излучения объектов

Для получения информации о трехмерных геометрических характеристиках (объеме) наблюдаемого объекта внутри теплового контура можно использовать поляризационные тепловизионные изображения, получаемые путем введения в оптическую схему прибора поляризационных фильтров. Исследования, проведенные в этой области, показывают, что явления поляризации излучения открывают ряд возможностей для определения многих характеристик, в том числе и формы поверхности в

частности для металлов, сплавов, конструкционных материалов и других непрозрачных веществ, и сред.

В общем случае поляризация собственного излучения материалов возникает из-за явлений отражения и преломления на границе «вещество–воздух», которые обстоятельно описываются теорией отражения Френеля для металлов и диэлектриков [2, 39]. При этом степень поляризации собственного излучения поверхности повышается по мере увеличения угла между направлением излучения и нормалью к излучающей поверхности [36].

Для наглядности, с использованием рисунка 26, рассмотрим формирование собственного излучения элемента dA поверхности объекта, его энергетические и поляризационные характеристики.

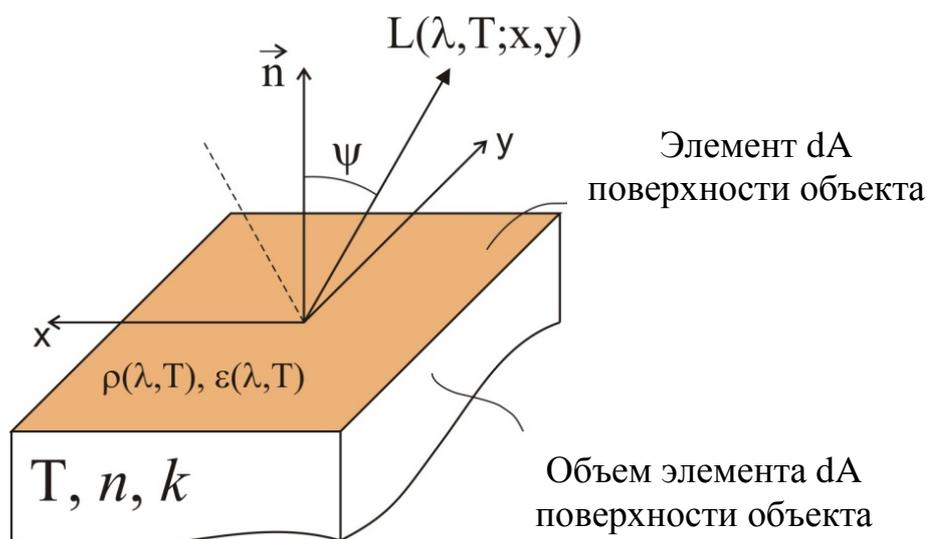


Рисунок 26 – Схема физического обоснования поляризации собственного теплового излучения объекта

На данном рисунке приняты обозначения: n и k – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления материала элемента dA поверхности объекта; \vec{n} – нормаль элемента dA поверхности; ψ – угол излучения элемента поверхности; T – абсолютная температура поверхности объекта; $\rho(\lambda, T)$, $\alpha(\lambda, T)$ и $\epsilon(\lambda, T)$ – коэффициенты отражения, поглощения и излучения поверхности объекта.

Энергетическая яркость $L(\lambda, T; x, y)$ собственного излучения, которое регистрируется приемником оптического излучения при наблюдении элемента dA поверхности объекта [22, 46, 56] описывается законом Кирхгофа (см. формулу (53))

$$L(\lambda, T; x, y) = \frac{1}{\pi} \varepsilon(\lambda, T; x, y) \varepsilon(\psi) W^\circ(\lambda, T).$$

Согласно этому фундаментальному закону излучения тел, собственное излучение наблюдаемого объекта формируется двумя факторами: первый фактор – это непосредственно излучение объема тела, которое описывается формулой Планка (48), и зависит от теплового состояния тела; второй фактор – это вклад поверхности тела, который определяется коэффициентом излучения материала поверхности и состоянием шероховатости.

При этом, коэффициент излучения $\varepsilon(\lambda, T)$ зависит от температуры T и постоянных материала n и k [2, 17], а состояние поверхности формирует, совместно с оптическими постоянными индикатрису излучения $\varepsilon(\psi)$ [36]. Следует отметить, что согласно закону сохранения энергии для непрозрачных материалов и сред и, с использованием равенства $\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T)$ [54], коэффициенты отражения и излучения $\rho(\lambda, T)$ и $\varepsilon(\lambda, T)$ связаны между собой соотношением:

$$\varepsilon(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T). \quad (58)$$

Что касается поляризационных свойств, то степень поляризации излучения определяет различие коэффициентов излучения объекта ε_{\parallel} и ε_{\perp} для компонентов этого излучения, поляризованных в плоскости выхода его из поверхности объекта и перпендикулярно ей соответственно. В конечном виде, значение степени поляризации собственного излучения элемента dA поверхности объекта описывается выражением:

$$P_{\psi} = \frac{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) - L_{\perp}(\lambda, T; x, y)}{L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) + L_{\perp}(\lambda, T; x, y)} = \frac{\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}}. \quad (59)$$

Значения ε_{\parallel} и ε_{\perp} для непрозрачных материалов определяются по формулам Френеля [2, 36], которые характеризуют зависимость поляризационных составляющих излучательной способности от таких параметров материала как действительная часть n комплексного показателя преломления \tilde{n} и показателя поглощения k (мнимая часть комплексного показателя преломления \tilde{n} материала): $\tilde{n} = n + ik$:

$$\varepsilon_{\parallel} = \frac{4n \cos \psi}{(n \cos \psi + 1)^2 + k^2 \cos^2 \psi}, \quad (60)$$

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{4n \cos \psi}{(n + \cos \psi)^2 + k^2}. \quad (61)$$

В свою очередь, энергетическая яркость элемента наблюдаемой поверхности объекта для параллельной и перпендикулярной компоненты излучения равны:

$$\begin{aligned} L_{\parallel}(\lambda, T; x, y) &= \frac{1}{\pi} \varepsilon_{\parallel}(\lambda, T; x, y) W^{\circ}(\lambda, T); \\ L_{\perp}(\lambda, T; x, y) &= \frac{1}{\pi} \varepsilon_{\perp}(\lambda, T; x, y) W^{\circ}(\lambda, T). \end{aligned} \quad (62)$$

Подставив (60)–(61) в (59) получим выражение для степени поляризации собственного теплового излучения элемента поверхности для угла ψ :

$$P_{\psi} = \frac{(n^2 + k^2 - 1) \sin \psi}{(n^2 + k^2 + 1)(1 + \cos^2 \psi) + 4n \cdot \cos \psi}. \quad (63)$$

Степень поляризации собственного излучения материалов во многом определяется действительной и мнимой составляющей комплексного показателя преломления, к примеру, для диэлектриков ($k \ll 1$, а $1 < n < 2$), и излучение поляризовано слабее, чем для металлов ($(n^2 + k^2)^{1/2} > 3,3$). Следует

отметить, что степень поляризации собственного излучения объекта зависит не только от параметров n и k материала, но и от состояния излучающей поверхности, влияние которой рассматривается в параграфе 3.2 главы 3.

2.3 Получение и анализ свойств поляризационных тепловых изображений выпуклых объектов

Для экспериментального подтверждения информативности поляризационных термограмм, рассмотрим результаты исследований проводимых ранее под руководством Тымкула В.М. в лаборатории тепловидения ФГБОУ ВПО «СГГА». Рассмотрим примеры получения поляризационных термограмм с азимутами поляризации фильтра 0 и 90 градусов.

Исследуемые объекты были установлены на оптической скамье ОСК-2. Оптическая ось тепловизора «Радуга-ЭВМ» и геометрическая ось исследуемого объекта совмещены. Изображения объектов регистрировались на экране ВКУ тепловизора. Для получения качественного изображения, тела нагревались до температуры плюс 50 °С. После окончательной настройки тепловизора на объекты, была произведена съемка. Снимки производились на пленке 125 единиц, при выдержке 1/4 секунды и диафрагме 3,5.

Поляризационные тепловизионные изображения получали при различных азимутах ИК поляризатора, $t_{\text{п}}=0^{\circ}$, 45° , 90° и 135° , а для диска еще и при различных углах $\psi=0^{\circ}$ и 60° .

Для анализа методики определения формы объектов внутри контура были получены поляризационные тепловизионные изображения поверхности тел в виде конуса, сферы и диска, изображенных на рисунках.

Изображения поверхности тела в виде сферы при азимуте поляризации 0° и 90° представлены на рисунке 27.

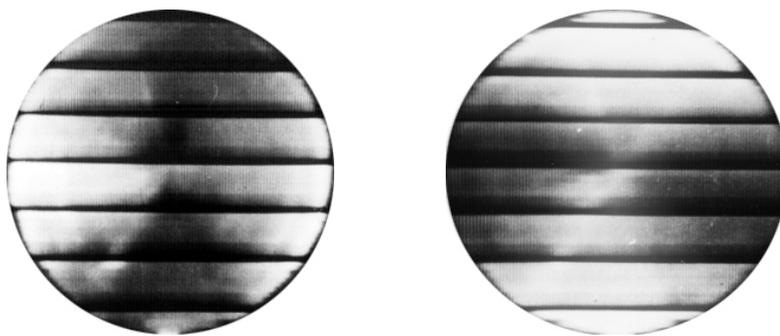


Рисунок 27 – Поляризационные термограммы сферы с азимутами поляризации $t_{\Pi}=0^{\circ}$ и $t_{\Pi}=90^{\circ}$

Изображения поверхности тела в виде конуса при азимуте поляризации 0° и 90° представлены на рисунке 28.

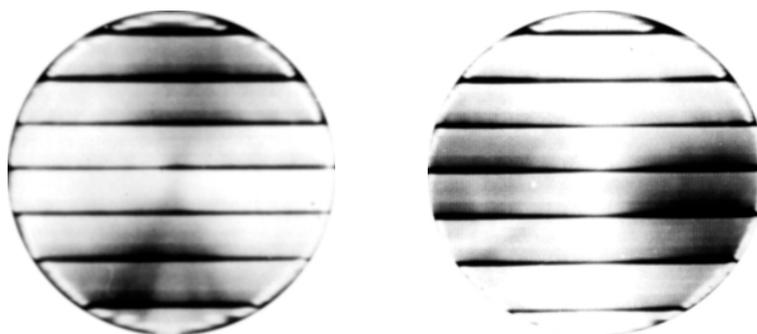


Рисунок 28 – Поляризационных термограммы конуса с азимутами поляризации $t_{\Pi}=0^{\circ}$ и $t_{\Pi}=90^{\circ}$

Изображение поверхности тела в виде плоского диска представлено на рисунке 29.

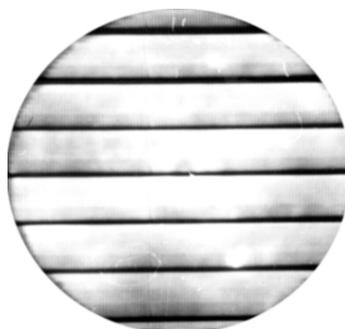


Рисунок 29 – Поляризационная термограмма плоского диска при $t_{\Pi}=0^{\circ}$ и $\psi=0^{\circ}$

Как видно из представленных поляризационных изображений, они обладают характерными свойствами. На поляризационном изображении сферы видно, что при $t_{\text{п}}=0^\circ$, яркость плавно увеличивается от центра к краю по горизонтали (то есть по плоскости поляризации поляризационного фильтра) и уменьшается по вертикали.

При изменении азимута поляризации изображения меняются распределения яркости в пределах границы исследуемого объекта. Картина «поворачивается» на угол изменения азимута поляризатора. На термограммах диска при $\psi=60^\circ$ и при разных углах $t_{\text{п}}$ поляризатора видно, что яркость при $t_{\text{п}}=90^\circ$ значительно меньше, чем при $t_{\text{п}}=0^\circ$.

Таким образом, по поляризационным термограммам можно отличить объекты друг от друга, а так же судить о форме объектов внутри контура изображения.

Для решения задачи воспроизведения формы объектов внутри контура изображения, были использованы негативы, отснятые с ВКУ тепловизора (фотографирование производили фотоаппаратом).

Фотометрирование двух изображений (при $t_{\text{п}}=0^\circ$, $t_{\text{п}}=45^\circ$) производилось параллельно строке диаметра изображения, то есть плоскости поляризации при $t_{\text{п}}=0^\circ$ и под углом равным 45° для термограммы, полученной при азимуте $t_{\text{п}}=45^\circ$.

По результатам эксперимента вычисляется степень поляризации P и азимут поляризации $t_{\text{п}}$ по формулам [51]:

$$P(N,L) = \sqrt{\frac{U_1^{(H)}(N,L) - 1}{2 \sin \left\{ \arctg \left[\frac{U_1^{(H)}(N,L) - 1}{1 - U_2^{(H)}(N,L)} \right] \right\} - [U_1^{(H)}(N,L) - 1]}};$$

$$2t = \arctg \frac{U_2^{(H)} - 1}{U_1^{(H)} - 1}.$$

Так как анализировались негативы, то $U^{(H)}_1$ и $U^{(H)}_2$ связывались с измеряемыми коэффициентами пропускания по формулам:

$$U_1^{(H)} = 1 - \tau_0; \quad (64)$$

$$U_2^{(H)} = 1 - \tau_{45}. \quad (65)$$

Были подсчитаны средние квадратичные ошибки измерения степени поляризации теплового излучения по поверхности объектов, по формуле:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{(n-1)^2}}, \quad (66)$$

где P_i - текущее значение степени поляризации; \bar{P} - среднее значение степени поляризации.

В данной работе стояла и обратная задача: по данной степени поляризации построить форму объекта.

Степень поляризации связана с углом ψ выражением [49]:

$$P = a(1 - \cos \psi), \quad (67)$$

где a - постоянная материала, (для дюралюминия $a=0,7$).

Тогда для ψ имеем:

$$\psi = \arccos\left(1 - \frac{P}{a}\right). \quad (68)$$

Угол наклона элементарных площадок вдоль линии визирования, рассчитывается по формуле:

$$x = y \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (69)$$

где y - координата, вдоль которой осуществляется визирование объекта.

На рисунке 30 представлена функциональная схема стенда получения поляризационных тепловизионных изображений.

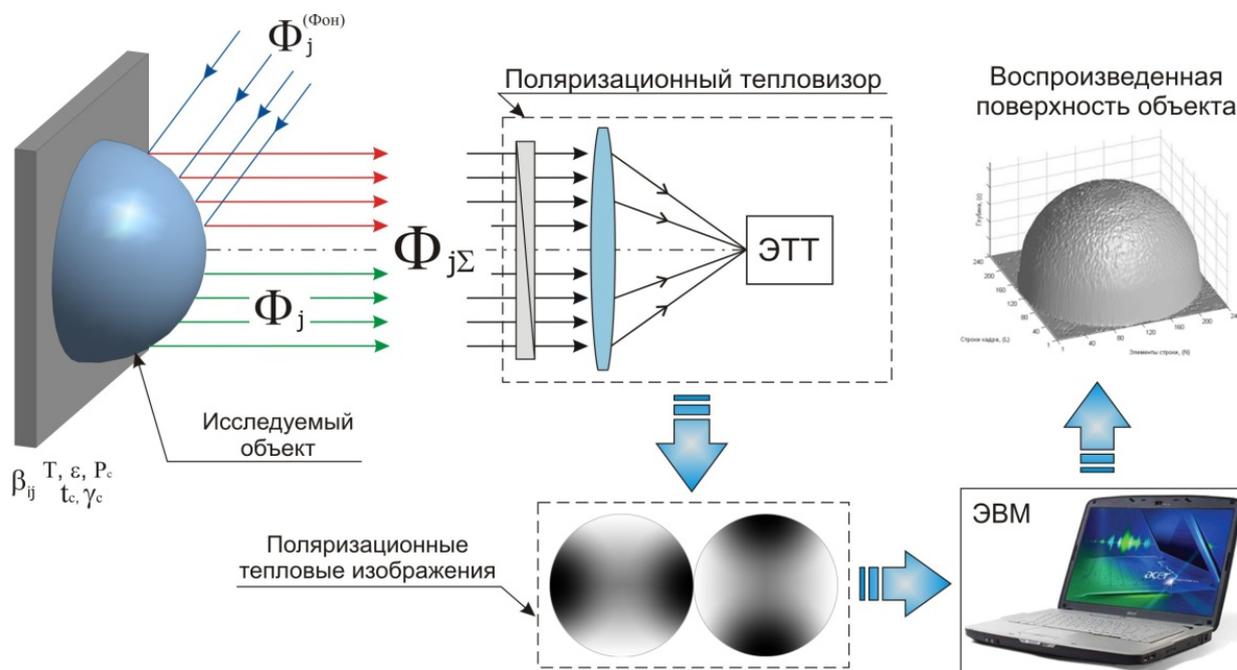


Рисунок 30 – Функциональная схема стенда получения поляризационных тепловизионных изображений

2.4 Метод определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных тепловых изображений с учетом эллиптичности поляризации теплового излучения

Собственное ИК-излучение объектов в реализации систем и комплексов для дистанционного определения трехмерной формы объектов обладает существенными преимуществами, отраженными в предыдущих параграфах данной главы. Для извлечения информации о форме объектов, за счет расширения информативности тепловизионного канала ИК системы наблюдения необходимо использовать инфракрасные поляризационные фильтры. В этой связи был разработан метод определения трехмерной формы наблюдаемых объектов.

Допустим, что тепловизионной системой наблюдается объект выпуклой произвольной формы, которая в декартовой системе координат описывается уравнением $f(x,y,z)=0$. Выбираем на его поверхности элемент dA , сопряженный по размеру с одним элементом разложения кадра (рисунок 25).

Величину видеосигнала тепловизионной системы, формируемого потоком, идущего от объекта излучения, представим в виде [46]:

$$U(N, K) = A_0 \alpha \beta \cos \psi(N, K) dA(N, K) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) S_\lambda d\lambda, \quad (70)$$

где A_0 – площадь входного зрачка прибора; α, β – углы мгновенного поля зрения по строке и по кадру; τ_0 – коэффициент пропускания оптических элементов прибора; τ_a – коэффициент пропускания слоя атмосферы между объектом и прибором; S_λ – спектральная чувствительность фотоприемника; $L(\lambda, T)$ – спектральная яркость излучения объекта; ψ – угол наблюдения элемент объекта. Далее для упрощения записи, связь параметров ψ и dA с числами N и K расположения их на изображении опущена.

Метод тепловизионного определения формы объектов включает сканирование поверхности объекта, при котором формируют два тепловизионных изображения с азимутами поляризации $45^\circ, 90^\circ$, а форму объекта определяют по углу ψ - значение угла наклона нормали элемента на поверхности объекта по отношению, к направлению наблюдателя и координате y . При этом угол ψ определяется из значения двух видеосигналов тепловизионного кадра для соответствующего ему элемента при азимутах поляризации 45° и 90° :

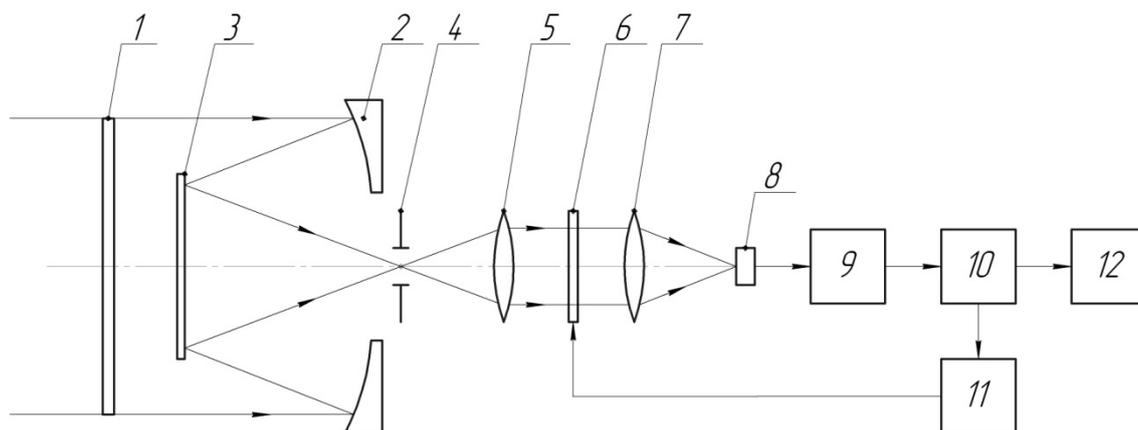
$$\psi(N, K) = \arccos \left\{ 1 - a^{-1} \sqrt{\frac{[U_1(N, K) - 1]}{2 \sin \left[\arctg \frac{U_1(N, K) - 1}{-U_2(N, K) + 1} \right] - [U_1(N, K) - 1]}} \right\}, \quad (71)$$

где $U_1(N,K)$ и $U_2(N,K)$ – величина видеосигналов поляризационных тепловизионных изображений с азимутами поляризации 45° и 90° .

На рисунке 31 изображена схема устройства для реализации предлагаемого метода тепловизионного определения формы объектов, где приведены следующие обозначения:

ИК поляризатор 6 устанавливается в схеме с возможностью вращения вокруг своей оптической оси и фиксации его азимута поляризации t_n под углами 0° , 45° , 90° относительно плоскости референции.

Предлагаемый метод реализуется следующим образом: собственное тепловое излучение от наблюдаемого объекта проходит защитное окно 1 и отражается от зеркала 2 и 3, далее излучение от объекта проходит диафрагму 4, окуляр 5 и направляется на ИК поляризатор 6, конденсор 9 и попадает на приемник излучения 8. Если азимут t_n поляризатора 6 равен $t_n=45^\circ$, то на выходе приемника 8 формируется $N \times K$ сигналов $U_1(N,K)$. При азимуте поляризатора $t_n=90^\circ$, аналогично формируются сигналы $U_2(N,K)$ от всех элементов $N \times K$ разложения тепловизионного кадра. После предварительной обработки сигналов в блоке 9, они поступают в модуль электронной обработки 10. Модуль управления фильтром 11 управляет вращением ИК поляризатора 6, и соответственно устанавливается необходимый азимут поляризации. После обработки сигналов для каждого азимута поляризации $U_1(N,K)$ и $U_2(N,K)$ информация передается на ВКУ, на экране которого формируются поочередно поляризационные термограммы с азимутами равными 45° и 90° .



1 - защитное окно; 2 - сферическое зеркало со слепым пятном; 3 - зеркало;
 4 - диафрагма; 5 – окуляр телескопической системы; 6 - линейный ИК поляризатор;
 7 - конденсор; 8 – матричный приемник ИК излучения; 9 – модуль предварительной
 обработки (МПО); 10 – модуль электронной обработки (МЭО); 11 – модуль
 управления фильтром; 12 - видеоконтрольное устройство (ВКУ)

Рисунок 31 – Функциональная схема тепловизионного устройства для
 определения формы объектов основе двух базисных поляризационных
 тепловизионных изображений

Задача определения трехмерной формы (координаты глубины
 изображения) решается следующими выражениями:

$$x(N, K) = y(N, K) \operatorname{tg} \left\{ \arccos \left[1 - a^{-1} \cdot \frac{U_1(N, K) - 1}{\sqrt{2 \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{U_1(N, K) - 1}{-U_2(N, K) + 1} \right] - [U_1(N, K) - 1]}} \right] \right\}; (72)$$

$z = \operatorname{const}$

$$x(N, K) = z(N, K) \operatorname{tg} \left\{ \arccos \left[1 - a^{-1} \cdot \frac{U_1(N, K) - 1}{\sqrt{2 \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{U_1(N, K) - 1}{-U_2(N, K) + 1} \right] - [U_1(N, K) - 1]}} \right] \right\}, (73)$$

$y = \operatorname{const}$

где x, y, z – декартовы координаты точек на поверхности объекта; N, K – номер строки и элемента строки тепловизионного кадра; U_1, U_2 – величины видеосигналов двух поляризационных тепловизионных изображений с азимутами поляризации 45° и 90° соответственно; a – постоянная, зависящая от материала и шероховатости поверхности объекта.

Характерное отличие рассматриваемого метода заключается в том, что при его разработке учитывался такой параметр поляризации оптического излучения объекта как степень эллиптичности поляризации γ . В настоящей работе развит метод определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных термограмм в части учета степени эллиптичности поляризации теплового излучения.

Рассмотрим методику учета эллиптичности поляризации излучения.

Вектор-параметр Стокса потока теплового излучения реального объекта в общем случае имеет вид [10]:

$$\Phi_j = \Phi \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \cos 2\gamma \\ P \cos 2\gamma \sin 2t \\ P \sin 2\gamma \end{bmatrix}, \quad (74)$$

где Φ – энергетический поток теплового излучения объекта; P, t, γ – степень, азимут и степень эллиптичности поляризации теплового излучения объекта.

Для яркости поляризованного излучения объекта в общем виде вектор-параметр Стокса имеет вид:

$$L_i = (\lambda, T, P, t, \gamma) = L(\lambda, T) \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \cos 2\gamma \\ P \cos 2\gamma \sin 2t \\ P \sin 2\gamma \end{bmatrix}. \quad (75)$$

Для уменьшения времени обработки информации для получения данных о форме наблюдаемого объекта в изображении, будем формировать два тепловизионных поляризационных кадра, с помощью поляризационного фильтра, имеющего азимуты поляризации 45° для первого кадра и 90° для второго кадра.

Вектор-параметр Стокса для энергетической яркости излучения, прошедшего произвольный поляризационный фильтр можно записать в виде [46]:

$$L_i^{(k)} = \sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^{(k)} L_j(\lambda, P, T, t, \gamma). \quad (76)$$

Матрица пропускания линейного поляризационного фильтра в общем виде выглядит так:

$$\tau_{ij}^{(k)} = \tau_n \begin{bmatrix} 1 & \cos 2t_\Pi & \sin 2t_\Pi & 0 \\ \cos 2t_\Pi & \cos^2 2t & \cos 2t_\Pi \sin 2t_\Pi & 0 \\ \sin 2t_\Pi & \cos 2t_\Pi \sin 2t_\Pi & \sin^2 2t_\Pi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (77)$$

где τ_n - энергетический коэффициент пропускания поляризатора; t_Π - угол положения плоскости поляризации фильтра, отсчитываемый относительно плоскости референции; $k=1$ соответствует $t_\Pi = 45^\circ$; $k=2$ соответствует $t_\Pi = 90^\circ$.

Пусть формирование первого кадра началось, и перед принимающем устройством установлен поляризационный фильтр с азимутом поляризации $t_\Pi = 45^\circ$.

Для термограммы с азимутом поляризатора $t_\Pi = 45^\circ$ величина видеосигнала U_1 в нормированном виде имеет вид:

$$U_1 = 1 + P \sin 2t \cos 2\gamma. \quad (78)$$

Аналогично, для термограммы с азимутом поляризатора $t_{\Pi}=90^{\circ}$, величина видеосигнала U_2 представляется в виде:

$$U_2 = 1 - P \cos 2t \cos 2\gamma. \quad (79)$$

При анализе термограмм сигналы U_1 и U_2 регистрируются и являются известными величинами.

Тогда абсолютные значения видеосигналов, формирующие поляризационные тепловизионные изображения будут равны:

$$U_1(N, K) = \tau_{\Pi}(1 + P \cos 2\gamma \cos 2t) A_0 \alpha \beta \cos \psi(N, K) \times \\ \times dA(N, K) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) S_{\lambda} d\lambda. \quad (80)$$

Второму кадру соответствует поляризационный фильтр с азимутом поляризации $t_{\Pi}=90^{\circ}$. В этом случае величина видеосигнала равна:

$$U_2(N, K) = \tau_{\Pi}(1 - P \cos 2\gamma \sin 2t) A_0 \alpha \beta \cos \psi(N, K) \times \\ \times dA(N, K) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) S_{\lambda} d\lambda. \quad (81)$$

Произведем нормирование сигналов U_1 и U_2

$$U_1^{(H)} = U_1 / \left(\tau_{\Pi} A_0 \alpha \beta \cos \psi dA \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) S_{\lambda} d\lambda \right); \\ U_2^{(H)} = U_2 / \left(\tau_{\Pi} A_0 \alpha \beta \cos \psi dA \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \tau_0(\lambda) \tau_a(\lambda) S_{\lambda} d\lambda \right), \quad (82)$$

В итоге получена следующая система уравнений:

$$\begin{cases} U_1^{(H)} = 1 + P \cdot \sin 2t \cdot \cos 2\gamma; \\ U_2^{(H)} = 1 - P \cdot \cos 2\gamma \cdot \cos 2t, \end{cases} \quad (83)$$

Поскольку в основе данного способа лежит регистрация поляризованного инфракрасного излучения, с учетом эллиптичности его поляризации, то этот параметр излучения необходимо учитывать. Согласно работе [51], степень эллиптичности $\text{tg}\gamma$ записывается в виде:

$$\text{tg}\gamma = \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max}}, \quad (84)$$

где ε_{\max} и ε_{\min} – максимальная и минимальная составляющие поляризационных компонент излучения.

В свою очередь степень поляризации P теплового излучения связана со степенью эллиптичности по формуле:

$$P = \frac{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}}{\varepsilon_{\max} + \varepsilon_{\min}} = \frac{1 - \text{tg}\gamma}{1 + \text{tg}\gamma}. \quad (85)$$

Тогда, на основе формул (84) и (85) имеем:

$$\text{tg}\gamma = \frac{1 - P}{1 + P};, \quad (86)$$

$$\gamma = \text{arctg}\left(\frac{1 - P}{1 + P}\right); \quad (87)$$

$$\cos 2\gamma = \cos\left[2\text{arctg}\left(\frac{1 - P}{1 + P}\right)\right]. \quad (88)$$

Таким образом, формула (88) связывает эллиптичность со степенью поляризации P .

Решая систему уравнений (83) получаем:

$$P \cdot \cos 2\gamma = \frac{U_1^{(H)} - 1}{\sin 2t}; \quad (89)$$

$$2t = \operatorname{arctg} \frac{U_1^{(H)} - 1}{1 - U_2^{(H)}}. \quad (90)$$

Тогда, подставив (90) в (89), имеем:

$$P \cdot \cos 2\gamma = \frac{U_1^{(H)} - 1}{\sin \left(\operatorname{arctg} \frac{U_1^{(H)} - 1}{1 - U_2^{(H)}} \right)}. \quad (91)$$

Введем обозначение:

$$A = \frac{U_1^{(H)} - 1}{\sin \left(\operatorname{arctg} \frac{U_1^{(H)} - 1}{1 - U_2^{(H)}} \right)}. \quad (92)$$

Тогда, выражение (91) записывается в виде:

$$P \cdot \cos 2\gamma = A. \quad (93)$$

Из тригонометрии воспользуемся формулой [3]:

$$\cos 2\gamma = \frac{1 - \operatorname{tg}^2 \gamma}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma}. \quad (94)$$

Учитывая (86), выражение (94) получится в виде:

$$\cos 2\gamma = \frac{2P}{(1 + P^2)}. \quad (95)$$

Подставив теперь (95) в (91), получим уравнение, где неизвестной величиной является P ; решая это уравнение, получим следующее выражение:

$$P = \sqrt{\frac{U_1 - 1}{2 \sin[\arctg(U_1 - 1) / (1 - U_2)] - (U_1 - 1)}}. \quad (96)$$

Так как P связана с углом ориентации ψ элемента dA по отношению к направлению наблюдения формулой (67), то, с учетом (96), получим следующее выражение для определения угла ψ :

$$\psi = \arccos \left[1 - a^{-1} \cdot \sqrt{\frac{U_1^{(H)} - 1}{2 \sin \left(\arctg \left(\frac{U_2^{(H)} - 1}{1 - U_1^{(H)}} \right) - (U_1^{(H)} - 1) \right)}} \right], \quad (97)$$

который фактически позволяет определить третью координату объемной формы наблюдаемого объекта согласно соотношениям (72) и (73).

2.5 Метод определение трехмерной формы объектов на основе одной поляризационной термограммы с комбинированным фильтром

Дальнейшее развитие методов и способов тепловизионного определения объемной формы объектов [25, 26, 27, 31] предопределяет возможность определения их трехмерной формы в реальном масштабе времени. С развитием технической базы научного и специального оптико-электронного приборостроения, с расширением области решения различных задач в науке, технике, медицине и оборонной отрасли, возникает острая необходимость в быстрых и эффективных методах решения поставленных задач. Возможности системы выполнять анализ и обработку поступающей информации, в том числе в изображении сцены, меняющуюся как во времени, так и в плане объектно-фоновой ситуации, выделяют её мобильные качества и расширяют область применимости и поле решаемых задач.

В виду выше изложенного, разработан метод определения трехмерной формы объектов в реальном масштабе времени, задачей, на решение которой направлен предлагаемый метод, является дистанционное определение трехмерных характеристик формы наблюдаемого объекта внутри его тепловизионного контура на основе одного поляризационного изображения.

Технический результат, достигаемый при решении поставленной задачи, заключается в определении и трехмерной визуализации формы объекта в реальном масштабе времени, расширение информативности тепловизионного канала оптических и оптико-электронных систем наблюдения, что дает неоспоримое преимущество перед аналогичными способами [29].

Поляризационно-комбинированное изображение – изображение полученное, полученное регистрацией инфракрасного оптического излучения, тепловизионной системой, с применением линейного поляризационного фильтра и ахроматической пластинки $\lambda/4$. Поляризационно-комбинированное изображение не обладает свойствами классической термограммы.

Рассмотрим оптико-физическое обоснование метода определения объемной формы объектов на основе одной комбинированной поляризационной термограммы [29, 42].

Вектор-параметр Стокса собственного теплового излучения объекта имеет вид [10, 46, 51]:

$$\Phi_j = \Phi \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \cos 2\gamma \\ P \sin 2t \cos 2\gamma \\ P \sin 2\gamma \end{bmatrix}, \quad (98)$$

где Φ – поток собственного излучения объекта; P , t , γ – степень, азимут и степень эллиптичности поляризации теплового излучения объекта.

В качестве комбинированного поляризационного фильтра используется последовательно расположенные ахроматическая пластинка $\lambda/4$ с углом

ориентации быстрой оси $\Theta=45^\circ$ и линейный инфракрасный поляризатор с азимутом $t_n=0^\circ$ [48, 52]. Матрицы пропускания пластинки $\lambda/4$ и линейного поляризатора имеют соответственно следующий вид:

$$\tau_{ij}^{(1)} = \tau_{\lambda/4} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad (99)$$

$$\tau_{ik}^{(2)} = \tau_n \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (100)$$

где $\tau_{\lambda/4}$, τ_n – энергетический коэффициент пропускания ахроматической пластинки $\lambda/4$ и линейного поляризатора.

Вектор-параметр Стокса для потока излучения комбинированного поляризационного фильтра получится следующим образом:

$$\Phi_k = \sum_{i=1}^4 \tau_{ik}^{(2)} \left[\sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^{(1)} \Phi_j \right], k=1, 2, 3, 4. \quad (101)$$

Так как первый элемент вектор-параметра Стокса теплового излучения Φ_k , прошедшего через комбинированный поляризационный фильтр представляет собой значение энергетического потока теплового излучения объекта, то выходной сигнал на выходе приемника излучения записывается в виде:

$$U(N, K) = \Phi_{k=1} S = S \tau_0 \Phi \tau_{\lambda/4} \tau_n [1 - P(N, K) \sin 2\gamma], \quad (102)$$

где S – чувствительность приемника излучения, который располагается после комбинированного фильтра.

На основании формул

$$\operatorname{tg}\gamma = \varepsilon_{\perp} / \varepsilon_{\parallel}; \quad (103)$$

$$\operatorname{tg}\gamma = (1 - P)/(1 + P), \quad (104)$$

где ε_{\parallel} , ε_{\perp} – перпендикулярная и параллельная поляризационная компоненты коэффициента излучения материала поверхности объекта.

То уравнение, которое связывает выходной сигнал $U_{\text{н}}$ в нормированном виде со степенью поляризации P , после определенных преобразований принимает вид:

$$P^3 + (1 - U_{\text{н}})P^2 - P + (1 - U_{\text{н}}) = 0. \quad (105)$$

Учитывая выражение связи степени поляризации P поляризации теплового излучения плоского элемента поверхности с углом ориентации ψ элемента по отношению к наблюдателю

$$P(\psi) = a(1 - \cos\psi) \quad (106)$$

и решая уравнение (105), получим связь угла ориентации локальных элементов поверхности объекта через видеосигналы $U_{\text{н}}$ этих элементов:

$$\psi = \arccos \left\{ \begin{array}{l} -\frac{2}{3a} \sqrt[6]{\left[18(1 - U_{\text{н}}) + (1 - U_{\text{н}})^3\right]^2 - \left[(1 - U_{\text{н}})^4 + 11(1 - U_{\text{н}}) - 1\right]^2} \times \\ \times \cos \left[\frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{\left|(1 - U_{\text{н}})^4 + 11(1 - U_{\text{н}}) - 1\right|}{18(1 - U_{\text{н}}) + (1 - U_{\text{н}})^3} \right] + \frac{1 - U_{\text{н}}}{3a} \end{array} \right\}. \quad (107)$$

Эта функциональная связь угла ψ и видеосигнала U и используется для определения формы объекта.

Практически при обработке термограмм процесс определения формы объектов осуществляется по следующим формулам:

$$x(N, K)|_{z=const} = z(N-1, K) + \Delta x(N, K) \times \operatorname{tg} \psi_{xy}(N, K); \quad (108)$$

$$x(N, K)|_{y=const} = z(N, K-1) + \Delta y(N, K) \times \operatorname{tg} \psi_{yz}(N, K),$$

которые с учетом (107), формируют следующие выражения для третьей координаты трехмерной поверхности объекта, при сканировании в плоскости параллельной координатным плоскостям XOY и XOZ .

$$x(N, K)|_{z=const} = x(N-1, K) + \Delta y(N, K) \times \left. \operatorname{tg} \left\{ \operatorname{arccos} \left[1 - \frac{2}{3a} \sqrt{[18(1-U_H) + (1-U_H)^3]^2 - [(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1]^2} \right] \times \cos \left[\frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{|(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1|}{18(1-U_H) + (1-U_H)^3} \right] + \frac{1-U_H}{3a} \right\} \right\}; \quad (109)$$

$$x(N, K)|_{y=const} = x(N, K-1) + \Delta z(N, K) \times \left. \operatorname{tg} \left\{ \operatorname{arccos} \left[1 - \frac{2}{3a} \sqrt{[18(1-U_H) + (1-U_H)^3]^2 - [(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1]^2} \right] \times \cos \left[\frac{1}{3} \operatorname{arctg} \frac{|(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1|}{18(1-U_H) + (1-U_H)^3} \right] + \frac{1-U_H}{3a} \right\} \right\}. \quad (110)$$

Устройство, с помощью которого реализуется настоящий способ определения трехмерной формы объектов также защищено патентом РФ на изобретение, а его схема приведена на рисунке 32 [30].

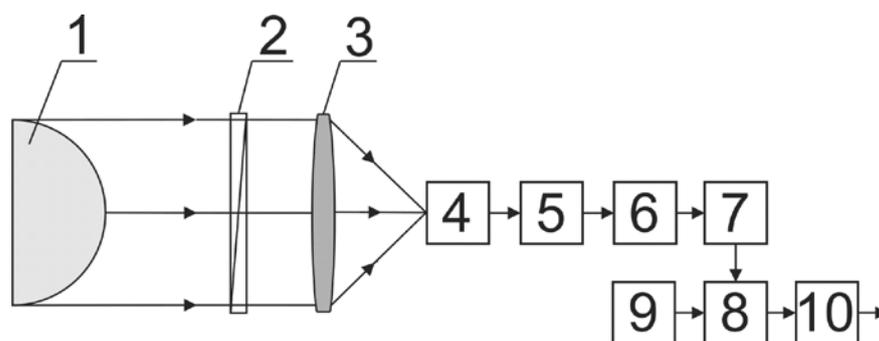


Рисунок 32 – Функциональная схема устройства определения трехмерной формы объектов на основе комбинированного поляризационного фильтра

Работа устройства заключается в следующем: тепловое излучение исследуемого объекта 1 проходит инфракрасный поляризационный фильтр 2, который представляет собой последовательно расположенные ахроматическую четвертьволновую платину и линейный ИК поляризатор с азимутом поляризации 0 градусов. Далее излучение фокусируется оптической системой 3 на матричный приёмник излучения (МПИ) 4, сигнал от которого поступает на вход блока усиления 5. После блока 5 сигнал поступает в блок обработки информации 6, содержащего аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Цифровая информация поступает в блок хранения 7, из которого передается на ЭВМ 8, где при помощи программного обеспечения 9 производится обработка и вычисление декартовых координат всех $N \times K$ элементарных площадок на поверхности наблюдаемого объекта. При этом, две (y и z) из трёх декартовых координат элементов поверхности объекта определяются размерами теплового изображения объекта, а вычисление третьей координаты x осуществляется за счет функциональной зависимости степени поляризации P теплового излучения каждого из элементов изображений от угла ориентации ψ излучающей площадки относительно направления её наблюдения и передается на устройство вывода информации 10.

2.6 Метод определения трехмерной формы объектов с направленно-рассеивающим покрытием на основе анализа яркости отраженного излучения элементов их поверхности

При решении задачи определения трехмерной формы объектов получил развитие метод, описанный в параграфе 1.2.3 первой главы. Задачей, на решение которой направлен метод, является определения трехмерной формы объектов, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим покрытием.

Для представления сути предлагаемого метода определения трехмерной формы объектов как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим покрытием, рассмотрим следующее теоретическое обоснование.

Рассмотрим на рисунке 33 произвольный элемент dA поверхности объекта в декартовой системе координат XYZ и допустим, что его нормаль \vec{n} составляет углы Θ и φ соответственно с осями OZ и OX . Эти углы и определяют ориентацию элемента dA в трехмерном пространстве. Направление источника освещения элемента dA определяется вектором \vec{r}_o , а направление, из которого визируется этот элемент, вектором \vec{r}_n . Сферические координаты этих направлений соответственно равны (Θ_o, φ_o) и (Θ_n, φ_n) [32].

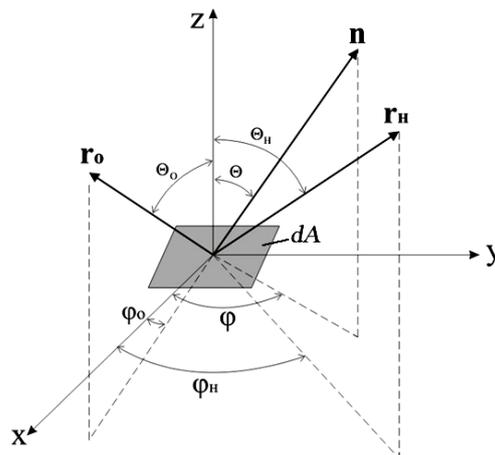


Рисунок 33 – Геометрия освещения и наблюдения элемента dA в декартовой системе координат XYZ

В общем случае угол между векторами \vec{r}_O и \vec{n} равен α_o , а между векторами \vec{r}_H и \vec{n} равен α_H .

На основании данных работ [40, 44, 47] сила отраженного излучения элементом dA равна выражению:

$$dI = \beta(\alpha_O, \alpha_H)(E / \pi) \cos \alpha_O \cos \alpha_H dA, \quad (111)$$

где E – освещенность элемента dA которая формируется источником коллимированного излучения; $\beta(\alpha_H, \alpha_o)$ – индикатриса яркости отражения элемента dA с произвольным покрытием.

На основании выражения (111), яркость отраженного излучения элемента dA равна:

$$dL = dI / dA \cos \alpha_H = \beta(\alpha_O, \alpha_H)(E / \pi) \cos \alpha_O. \quad (112)$$

Представим индикатрису яркости отражения в виде:

$$\beta(\alpha_O, \alpha_H) = \beta_O \cos^{2m} \alpha, \quad (113)$$

где β_o - коэффициент яркости элемента dA в направлении зеркального отражения; α – угол между направлениями зеркального отражения и наблюдателя; m – параметр, зависящий от характера рассеяния покрытия элемента dA ($m \geq 0$; при $m=0$ отражение является ламбертовым, а при $m \neq 0$ отражение носит направленно-рассеивающий характер).

Следует отметить, что величина $\cos^{2m} \alpha$ представляется в виде:

$$\cos^{2m} \alpha = \cos^{2m} (\alpha_O - \alpha_H). \quad (114)$$

На основании (111) и (114) выражение для сигнала, который формируется отраженным излучением элемента dA поверхности объекта можно представить в виде:

$$U' = \beta_O \cos^{2m}(\alpha_O - \alpha_H) (E / \pi) \cos \alpha_O A_{\text{ВХ}} \omega S, \quad (115)$$

где $A_{\text{ВХ}}$ и ω – площадь входного зрачка и мгновенный угол поля зрения измерительной системы; S – чувствительность приемника излучения измерительной системы.

Рассмотрим два варианта освещения и наблюдения объекта:

$$1) \quad \vec{r}_O = \vec{i}; \vec{r}_H = \vec{i}; \quad (116)$$

$$2) \quad \vec{r}_O = \vec{k}; \vec{r}_H = \vec{i}, \quad (117)$$

где \vec{i} , \vec{k} – единичные вектора соответственно направлений осей OX и OZ .

В свою очередь вектор нормали \vec{n} согласно рисунку 32 можно представить в виде:

$$\vec{n} = \vec{i} \sin \Theta \cos \varphi + \vec{j} \sin \Theta \sin \varphi + \vec{k} \cos \Theta. \quad (118)$$

Для направленно-рассеивающего покрытия элемента dA поверхности объекта $m=0,5$.

На основании выражений $\cos \alpha_O = (\vec{n}, \vec{r}_O)$ и $\cos \alpha_H = (\vec{n}, \vec{r}_H)$ и формул (116)–(118) имеем:

$$1) \quad \cos \alpha_O = \sin \Theta \cos \varphi; \quad \cos \alpha_H = \sin \Theta \cos \varphi, \quad (119)$$

$$2) \quad \cos \alpha_O = \cos \Theta; \quad \cos \alpha_H = \sin \Theta \cos \varphi. \quad (120)$$

В конечном счете, на основании (112), (113), (119) и (120) для обоих вариантов освещения и наблюдения элемента dA , величины нормализованных сигналов равны:

$$U_1 = U'_1 / \beta_O (E / \pi) A_{\text{ВХ}} \omega S = \sin \Theta \cos \varphi; \quad (121)$$

$$U_2 = U'_2 / \beta_O (E / \pi) A_{\text{ВХ}} \omega S = \sin \Theta \cos \Theta \left(\cos \Theta \sin \varphi + \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \varphi} \right). \quad (122)$$

Решая данную систему уравнений, получаем значения для $\text{tg}\Theta$ и $\text{tg}\varphi$ в виде:

$$\text{tg}\Theta = \frac{\left[-\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right) + \sqrt{\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right)^2 - 4\left(U_1 - U_2\right)^2} \right]}{\sqrt{4 - \left[-\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right) + \sqrt{\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right)^2 - 4\left(U_1 - U_2\right)^2} \right]^2}}; \quad (123)$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{\sqrt{\left[-\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right) + \sqrt{\left(2U_1U_2 - U_1^2 - 1\right)^2 - 4\left(U_1 - U_2\right)^2} \right]^2 - 4U_1^2}}{2U_1}. \quad (124)$$

В конечном итоге, координаты y и z элементов наблюдаемой поверхности объекта определяют по двумерной картине объекта в плоскости изображения YOZ с учетом масштаба изображения, а третью координату x внутри контура изображения определяют выражениями:

$$x(N, K) \Big|_{z=const} = x(N-1, K) + \Delta y(N, K) \times \text{tg}\varphi; \quad (125)$$

$$x(N, K) \Big|_{y=const} = x(N, K-1) + \Delta z(N, K) \times \text{tg}\Theta, \quad (126)$$

где K, N – номера строк и элементов строки, для которых измеряется третья координата x в изображении поверхности объекта; $\Delta y, \Delta z$ – шаг сканирования поверхности объекта соответственно вдоль координат OY и OZ .

2.7 Выводы к разделу 2

1. Исследованы и проанализированы оптико-физические основы формирования сигналов в тепловизионных приборах. Выявлены основные проблемы современного тепловидения. Рассмотрены принципы расширения

информативности оптического канала ТВП, на основе оптических свойств собственного и отраженного излучения поверхности объектов.

2. С использованием формализма вектор-параметра Стокса и матриц Мюллера разработаны теория, метод и математическая модель определения трехмерной формы выпуклых объектов на основе двух поляризационных термограмм с учетом эллиптичности поляризации собственного инфракрасного излучения и оптических свойств материалов поверхности объектов.

3. Разработан и исследован метод получения информации о трехмерной форме объектов с использованием комбинированного поляризационного фильтра на основе последовательно расположенных ахроматической четвертьволновой пластины и линейного ИК поляризатора. Особенностью метода является возможность определения трехмерной формы объектов в реальном масштабе времени. Технические решения метода защищены патентами РФ на изобретение № 2431936 и № 2469265.

4. Развит и усовершенствован метод определения трехмерной формы объектов на основе регистрации и обработки яркости отраженного излучения, элементов поверхности характерной чертой которого является его применимость к поверхностям объектов, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим характером отражения. Технические решения метода защищены патентом РФ на изобретение РФ № 2491503.

3 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ФОРМЫ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ТЕРМОГРАММ

3.1 Методика математического моделирования поляризационных тепловизионных изображений выпуклых объектов

На кафедре оптико-электронных приборов, а впоследствии, на кафедре наносистем и оплотехники ФГБОУ ВПО «СГГА» под руководством профессора Тымкула В.М. выполняются НИР по разработке математических моделей, теоретическому и экспериментальному исследованию тепловизионных изображений, в том числе, поляризационных. В этом параграфе, а также в п.3.2. рассматриваются развитие этих исследований, в основном, в частности анализа влияния оптических свойств поверхности объектов на поляризационные термограммы.

Рассмотрим, в качестве примера, методику моделирования поляризационных тепловизионных изображений объектов в виде сферы, эллипсоида и диска с использованием понятия вектор-параметра Стокса собственного теплового излучения объектов. Как уже отмечалось раньше, при наблюдении этих объектов тепловизионной системой в неполяризованном свете имеют место практически одинаковые изображения, как по контуру, так и внутри контура, несмотря на явное различие формы этих объектов внутри контура изображения видимой части их поверхности с осесимметричного направления. Подробный вывод методики моделирования поляризационных тепловизионных изображений, которые содержат информацию об их форме внутри контура приведем для сферы, как наиболее наглядном и симметричном объекте. Рассмотрим рисунок 34, на котором приняты следующие обозначения: $OXYZ$ – декартова системы координат; \vec{n}

– нормаль к элементу поверхности сферы, имеющему сферические координаты R, Θ, φ ; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты осей декартовых координат OX, OY, OZ ; ψ – пространственный угол ориентации элемента поверхности сферы по отношению к направлению наблюдателя H .

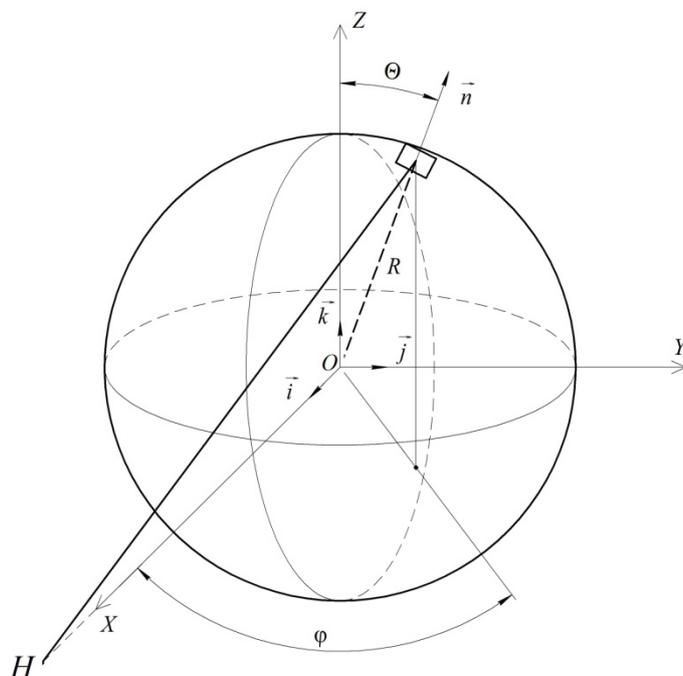


Рисунок 34 – Геометрия наблюдения тепловизионной системой объекта в виде сферы

Уравнение формы сферы в декартовых координатах имеет вид [3]:

$$f(x, y, z) = x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0. \quad (127)$$

Выражение, которое описывает зависимость между степенью поляризации $P'(N, K)$ и формой объекта через функцию распределения нормали \vec{n} для каждого элемента поверхности объекта имеет вид [48]:

$$P'(N, K) = \frac{\frac{1 + \left[1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)\right] a}{1 - \left[1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)\right] a} \left[(\vec{n} \times \vec{j})^2 - (\vec{n} \times \vec{k})^2 \right] + \left[(\vec{e}_\perp \times \vec{j})^2 - (\vec{e}_\perp \times \vec{k})^2 \right]}{\frac{1 + \left[1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)\right] a}{1 - \left[1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)\right] a} \left[(\vec{n} \times \vec{j})^2 - (\vec{n} \times \vec{k})^2 \right] + \left[(\vec{e}_\perp \times \vec{j})^2 - (\vec{e}_\perp \times \vec{k})^2 \right]}. \quad (128)$$

Тогда, вектор нормали к поверхности сферы равен:

$$\vec{n} = \left[\frac{\partial f}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial f}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial f}{\partial z} \vec{k} \right] / R = (x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}) / R \quad (129)$$

где $R = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ – радиус сферы.

Вектор наблюдения \vec{r}_H :

$$\vec{r}_H = ((l-x)\vec{i} - y\vec{j} - z\vec{k}) / (R^2 - l^2 - 2lx)^{1/2}, \quad (130)$$

где l – расстояние, с которого наблюдается сфера.

Тогда, при наблюдении элемента поверхности сферы с этого расстояния l , по правилам векторного умножения для перпендикулярной составляющей поляризации теплового собственного излучения этих элементов имеем:

$$\vec{\varepsilon}_\perp = [\vec{n} \times \vec{r}_H] = (\vec{n}_y \vec{r}_{Hz} - \vec{n}_z \vec{r}_{Hy}) \vec{i} + (\vec{n}_z \vec{r}_{Hx} - \vec{n}_x \vec{r}_{Hz}) \vec{j} + (\vec{n}_x \vec{r}_{Hy} - \vec{n}_y \vec{r}_{Hx}) \vec{k}.$$

В развернутом и нормированном виде вектор $\vec{\varepsilon}_\perp$ равен:

$$\vec{\varepsilon}_\perp = \frac{(l_z \vec{j} - l_y \vec{k})}{R \sqrt{R^2 + l^2 - 2lx}}. \quad (131)$$

Определим все остальные недостающие выражения для формулы (128):

$$(\vec{n} \times \vec{r}_H) = \frac{(xl - R^2)}{R \sqrt{R^2 + l^2 - 2lx}}; \quad (132)$$

$$(\vec{n} \times \vec{j}) = y^2 / R^2; \quad (133)$$

$$(\vec{n} \times \vec{k}) = z^2 / R^2; \quad (134)$$

$$(\vec{\varepsilon}_\perp \times \vec{j}) = l^2 y^2 / R^2 (R^2 + l^2 - 2lx); \quad (135)$$

В свою очередь параллельная компонента поляризации теплового собственного излучения элементов поверхности равна:

$$(\vec{\varepsilon}_{\parallel} \times \vec{j}) = l^2 z^2 / R^2 (R^2 + l^2 - 2lx). \quad (136)$$

Выражения (135) и (136), определяют перпендикулярную и параллельную составляющие.

После подстановки формул (129)–(136) в (128) получим

$$P'(x, y, z) = \frac{\frac{xl - R^2}{R(R^2 + l^2 - 2lx)^{1/2}} \left(\frac{y^2 - z^2}{R^2} \right) + \left(\frac{l^2 z^2 - l^2 y^2}{R(R^2 + l^2 - 2lx)} \right)}{\frac{xl - R^2}{R(R^2 + l^2 - 2lx)^{1/2}}} \cdot \frac{\frac{xl - R^2}{R(R^2 + l^2 - 2lx)^{1/2}} \left(\frac{y^2 + z^2}{R^2} \right) + \left(\frac{l^2 z^2 + l^2 y^2}{R(R^2 + l^2 - 2lx)} \right)}{R(R^2 + l^2 - 2lx)^{1/2}}.$$

После упрощения это выражение принимает вид:

$$P'(x, y, z) = \left(\frac{y^2 - z^2}{y^2 + z^2} \right) \left(\frac{1 - x}{R} \right). \quad (137)$$

Выражение (137) и определяет степень поляризации теплового изображения сферы в декартовых координатах. Данное выражение формирует распределение степени поляризации собственного теплового излучения в декартовых координатах элементов поверхности сферы при наблюдении ее на расстоянии l .

Перейдем к сферическим координатам

$$\begin{cases} x = R \sin \Theta \cos \varphi; \\ y = R \sin \Theta \sin \varphi; \\ z = R \cos \Theta. \end{cases}$$

Подставив эту замену переменных в (135) и (136) выражение (137) примет вид:

$$P'(\Theta, \varphi) = \frac{\sin^2 \Theta \sin^2 \varphi - \cos^2 \Theta}{\sin^2 \Theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \Theta} (1 - \sin \Theta \cos \varphi). \quad (138)$$

Аналогично можно получить соответствующие формулы для эллипсоида. Для этого необходимо начать вывод с функции, описывающей форму его поверхности:

$$f(x, y, z) = \frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{c^2} - 1 = 0, \quad (139)$$

и, с учетом обозначения $k_K = b/a$ – коэффициента сжатия эллипсоида (b – большая полуось эллипсоида, a – малая полуось эллипсоида), получить формулу для степени поляризации теплового собственного излучения поверхности эллипсоида в декартовых координатах:

$$P'(x, y, z) = \left(\frac{y^2 - z^2}{y^2 + z^2} \right) \left[1 - \left(x \sqrt{x^2 + k^2 y^2 + k^2 z^2} \right) \right]. \quad (140)$$

С учетом сферических координат поверхности эллипсоида.

$$\begin{cases} X = b \sin \Theta \cos \varphi; \\ Y = a \sin \Theta \sin \varphi; \\ Z = a \cos \Theta. \end{cases} \quad (141)$$

Распределение степени поляризации элементов поверхности эллипсоида принимает вид:

$$P'(\Theta, \varphi) = \frac{\sin^2 \Theta \sin^2 \varphi - \cos^2 \Theta}{\sin^2 \Theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \Theta} \left[1 - \frac{\sin \Theta \cos \Theta}{\sqrt{\sin^2 \Theta \cos^2 \varphi + k^2 (\sin^2 \Theta \sin^2 \varphi + \cos^2 \Theta)}} \right] \quad (142)$$

Что касается диска, то для него используется формула (142) с $k_K=0.1$, что является эллипсоидом, сжатым до геометрии диска, когда ось $2b$ составляет всего лишь десятую часть от оси $2a$; для сферы формула (142) справедлива при $k_K=1$. Таким образом, для получения модели поляризационного тепловизионного изображения диска, сферы и эллипсоида можно пользоваться формулой (142) с использованием различных значений k_K . При этом необходима связь углов Θ и φ с номерами строк K и номерами элементов в строках N тепловизионного кадра.

На основе геометрии наблюдения и логических рассуждений были получены следующие связи [48]:

$$\Theta = K\pi / K_0; \quad (143)$$

$$\varphi = \frac{N\pi}{N_0} - \frac{\pi}{2}, \quad (144)$$

где K_0 - число всех строк в кадре; N_0 - число всех элементов в каждой строке.

В настоящей работе представлена также методика математического моделирования поляризационных тепловизионных изображений выпуклых объектов с использованием эллипса поляризации их собственного теплового излучения.

Для рассмотрения этой методики моделирования поляризационных тепловизионных изображений воспользуемся рисунком 35 [46].

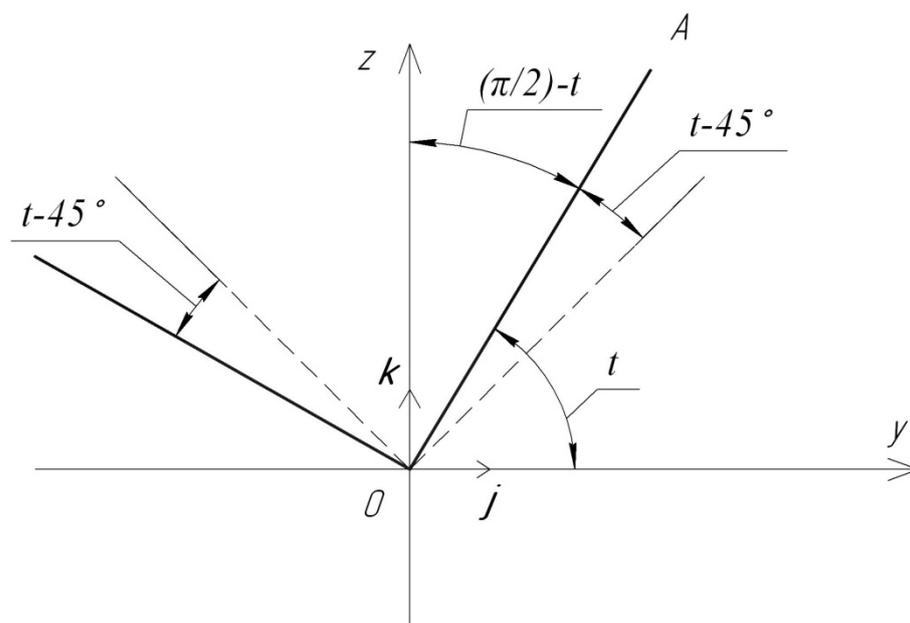


Рисунок 35 – Геометрия ориентации азимута поляризации элемента поверхности объекта

Допустим, что азимут поляризации (большая ось эллипса поляризации) излучения элемента dA поверхности объекта составляет угол t с плоскостью референции.

Для определения степени поляризации P' необходимо найти величины видеосигналов U_0 и U_{90} поляризационных тепловизионных изображений элементов dA поверхности объекта при азимутах поляризатора $t_{\Pi}=0^\circ$ и $t_{\Pi}=90^\circ$. Выразим U_0 и U_{90} через параллельную и перпендикулярную составляющие коэффициента излучения элемента dA и азимут t поляризации этого элемента, который представляет собой угол между плоскостью поляризации (ось OA) и плоскостью референции (ось OY). В общем случае, когда азимут t поляризации излучения элемента dA не совпадает с азимутом поляризатора, обе компоненты коэффициента излучения дают вклады в величины видеосигналов U_0 и U_{90} следующим образом:

$$U_0(N, K) = U_{\max} \cos^2 t + U_{\min} \sin^2 t = A(N, K)(\varepsilon_{\parallel} \cos^2 t + \varepsilon_{\perp} \sin^2 t); \quad (145)$$

$$U_{90}(N, K) = U_{\max} \sin^2 t + U_{\min} \cos^2 t = A(N, K)(\varepsilon_{\parallel} \sin^2 t + \varepsilon_{\perp} \cos^2 t), \quad (146)$$

где $U_{\max} = A(N, K)\varepsilon_{\parallel}$, $U_{\min} = A(N, K)\varepsilon_{\perp}$; $A(N, K)$ – постоянный множитель.

Согласно формуле [48]:

$$P'(N, K) = \frac{U_0(N, K) - U_{90}(N, K)}{U_0(N, K) + U_{90}(N, K)}, \quad (147)$$

найдем степень поляризации $P'(N, K)$ излучения элемента dA объекта в виде

$$P'(N, K) = P \cos 2t = \left(\frac{\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}} \right) \cos 2t, \quad (148)$$

где $P = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) / (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})$ – степень поляризации излучения элементов dA объекта.

В формуле (140) P' записана в виде зависимости от номера строки K в кадре и номера элемента N в строке, так как ε_{\parallel} , ε_{\perp} и P также являются функцией этих параметров.

Так как $\cos \psi = (\vec{n} \times \vec{r}_H)$, то с учетом (98) имеем:

$$P'(N, K) = [1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)] a \cdot \cos 2t; \quad (149)$$

$$\cos 2t = (\vec{n}_{yz} \times \vec{j}). \quad (150)$$

Тогда, приняв во внимание тождество, $\cos 2t = 2\cos^2 t - 1$, выражение (51) для расчета степени поляризации всех элементов поверхности объекта примет вид:

$$P'(N, K) = a [1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H)] \left[2(\vec{n}_{yz} \times \vec{j})^2 - 1 \right]. \quad (151)$$

Таким образом, формулы (128) и (151) с учетом формул (121)–(142) являются оптико–математической моделью поляризационных

тепловизионных изображений излучающих объектов [13, 16, 45, 48]. В тех случаях, когда необходимо моделировать поляризационные тепловизионные изображения по распределению степени поляризации, то можно воспользоваться выражением:

$$P(N, K) = a \left[1 - (\vec{n} \times \vec{r}_H) \right]. \quad (152)$$

По аналогичной методике осуществляется моделирование поляризационного тепловизионного изображения конуса, с учетом того, что уравнение конуса записывается в виде:

$$f(x, y, z) = \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \left(\frac{y}{d} \right)^2 - \left(\frac{z}{c} \right)^2, \quad (153)$$

где d – радиус основания; c – высота конуса.

В этом случае произведение $\vec{n} \times \vec{r}_H$:

$$(\vec{n} \times \vec{r}_H) = \frac{2z}{c^2} \cdot \left[\left(\frac{2x}{d^2} \right)^2 + \left(\frac{2y}{d^2} \right)^2 + \left(\frac{2z}{c^2} \right)^2 \right]^{-1/2}. \quad (154)$$

С использованием коэффициента сжатия конуса ($k_C = c/d$) выражение (154) принимает вид:

$$(\vec{n} \times \vec{r}_H) = z / \left(z^2 + k_K^4 [x^2 + y^2] \right)^{1/2}. \quad (155)$$

После соответствующих преобразований величина произведения степень поляризации P' и $\cos 2t$ определяется формулой:

$$P' \cos 2t = \left[1 - \frac{z}{\sqrt{z^4 + k_K^4 (x^2 + y^2)}} \right] \cdot \frac{2x^2}{(x^2 + y^2) - 1}. \quad (156)$$

На основе математической модели были получены смоделированные поляризационные термограммы сферы и конуса с азимутами поляризации $t_{\pi}=0^{\circ}$ и $t_{\pi}=90^{\circ}$, которые приведены на рисунках 36 и 37 [16].

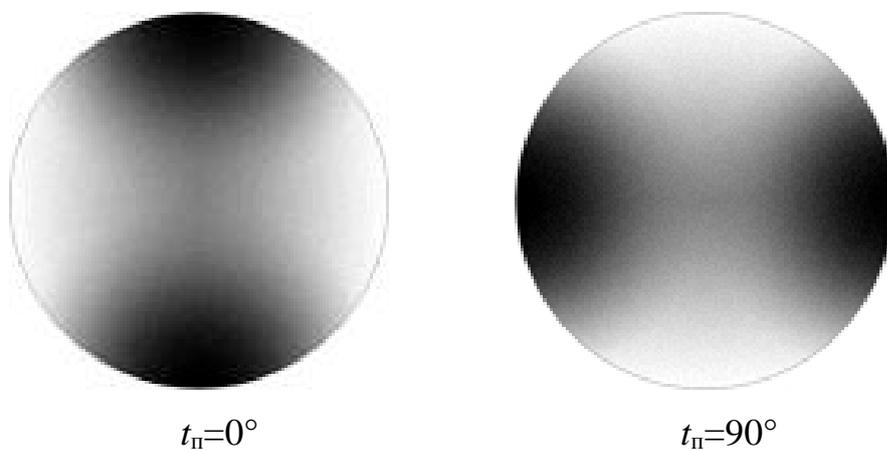


Рисунок 36 – Результат математического моделирования объекта простой формы в виде сферы

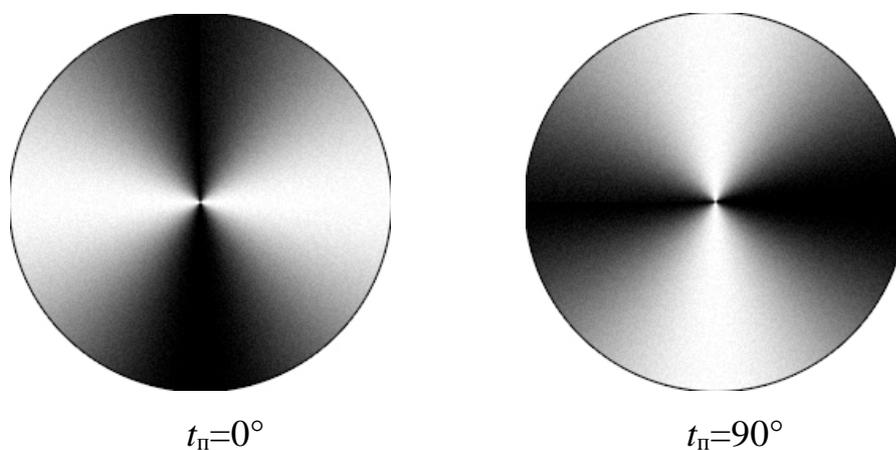


Рисунок 37 – Результат математического моделирования объекта простой формы в виде конуса

3.2 Влияние оптических свойств материалов на поляризацию излучения объектов и их термограммы

Поскольку на значение степени поляризации собственного теплового излучения объектов и методику определения их трехмерной формы оказывают влияние не только состояние окружающей фоновой обстановки, но и оптические свойства материалов из которых выполнен исследуемый объект, то важным моментом является исследование и анализ влияния типа и состояния поверхности исследуемых объектов на их поляризационные термограммы. В этой связи предлагается следующая связь между параметрами $P(\psi)$, η и поляризованными компонентами коэффициента отражения ρ_{\perp} и ρ_{\parallel} материала поверхности объекта [42, 50, 52]:

$$P(\psi) = P_{\psi} \cdot \eta = \frac{\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}} \cdot \eta = \frac{(1 - \rho_{\parallel}) - (1 - \rho_{\perp})}{(1 - \rho_{\parallel}) + (1 - \rho_{\perp})} \cdot \eta, \quad (157)$$

где

$$\rho_{\perp} = \frac{(c - \cos \psi)^2 + b^2}{(c + \cos \psi)^2 + b^2}; \quad (158)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{(c - \sin \psi \operatorname{tg} \psi)^2 + b^2}{(c + \sin \psi \operatorname{tg} \psi)^2 + b^2} \times \frac{(c - \cos \psi)^2 + b^2}{(c + \cos \psi)^2 + b^2}; \quad (159)$$

η – коэффициент, зависящий от длины волны излучения и шероховатости материала поверхности объекта ($\eta = 1$, если высота неровности поверхности $h = 0$); P_{ψ} – значение степени поляризации собственного теплового излучения материала поверхности объекта при угле ψ , которое определяется по формулам Френеля [17, 46].

Для непрозрачных материалов и материалов с комплексным показателем преломления $\hat{n} = n + ik$, параметры b^2 и c^2 равны [17, 39, 42]:

$$c^2 = \frac{1}{2n_0} \left\{ \left[n^2 - k^2 - (n_0^2 \sin^2 \psi)^2 + 4n^2 k^2 \right]^{1/2} + n^2 - k^2 - n_0^2 \sin^2 \psi \right\}; \quad (160)$$

$$b^2 = \frac{1}{2n_0^2} \left\{ \left[n^2 - k^2 - (n_0^2 \sin^2 \psi)^2 + 4n^2 k^2 \right]^{1/2} - n^2 + k^2 + n_0^2 \sin^2 \psi \right\}, \quad (161)$$

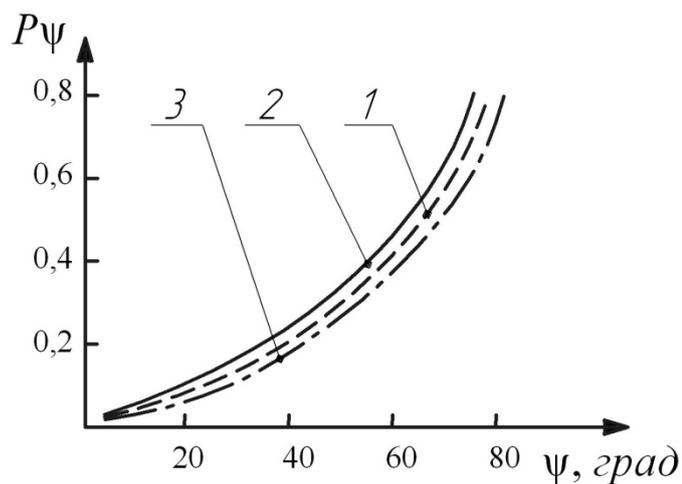
где n , k – оптические постоянные материала покрытия объекта; n_0 – показатель преломления среды, в котором находится объект; ψ – угол излучения, при котором наблюдается значение P_ψ степени поляризации теплового излучения материала поверхности объекта.

Для случая $(n^2 + k^2) \gg 1$ (металлы, сплавы), то имеем:

$$P_\psi = \frac{(\varepsilon_{||} - \varepsilon_{\perp})}{(\varepsilon_{||} + \varepsilon_{\perp})} = \frac{(n^2 + k^2 - 1) \sin \psi}{(n^2 + k^2 + 1)(1 + \cos^2 \psi) + 4n \cdot \cos \psi}. \quad (162)$$

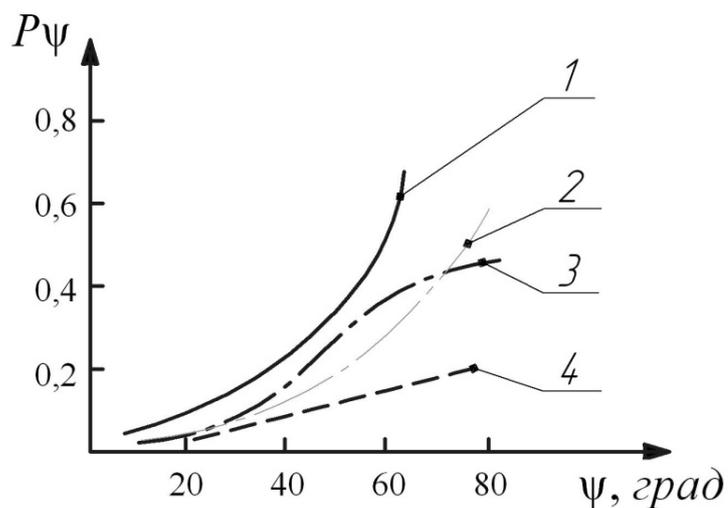
Следует отметить, что значение P_ψ определяемые по формуле (162) для конкретных металлов и сплавов соответствуют полированным поверхностям этих материалов.

На рисунке 38, в качестве иллюстрации, приведены расчетные и экспериментальные данные зависимости $P_\psi = f(\psi)$ для полированной стали, а на рисунке 39 представлены индикатрисы степени поляризации по экспериментальным данным для стали, дюралюминия и пластика, полученные Болотиным Г.А. и др. и приведенные в работе [13].



- 1 – Расчетные данные ($\lambda=10$ мкм); 2 – Расчетные данные ($\lambda=1$ мкм);
3 – Расчетные данные ($\Delta\lambda=0,7-2$ мкм)

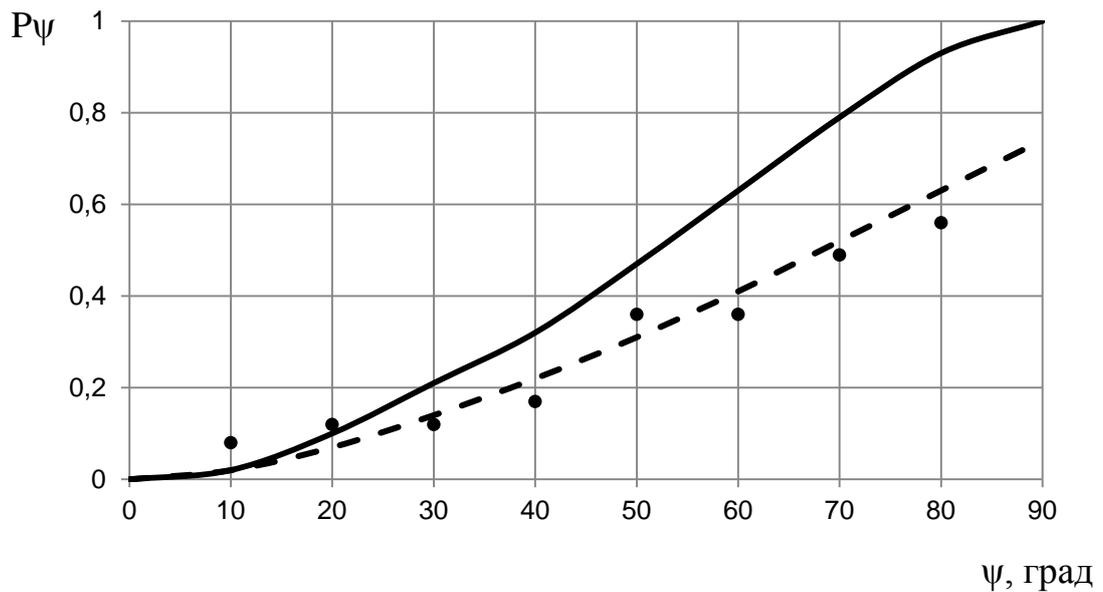
Рисунок 38 – Индикатрисы степени поляризации собственного теплового излучения стали



- 1 – Сталь ($\Delta\lambda=0,7-2$ мкм); 2 – Дюраль ($\Delta\lambda=0,7-2$ мкм);
3 – Дюраль ($\Delta\lambda=5-12$ мкм); 4 – Пластик ($\Delta\lambda=0,7-2$ мкм).

Рисунок 39 – Индикатрисы степени поляризации собственного теплового излучения материалов по данным экспериментальных исследований

Результаты наших экспериментальных исследований индикатрисы степени поляризации $P_\psi=f(\psi)$ для дюралюминия в области спектра $\Delta\lambda = 2\div 6$ мкм приведены на рисунке 40, а на рисунке 41 приведены результаты исследования влияния материала поверхности объекта на значение степени поляризации от угла наблюдения площадки для ряда металлических объектов с гладкой поверхностью.



— — расчет $P_\psi=(1-\cos\psi)$; - - - — дюралюминий расчет $P_\psi=a(1-\cos\psi)$;
 ● ● — дюралюминий (эксперимент) ($\Delta\lambda=2\div 6$ мкм).

Рисунок 40 – Индикатриса степени поляризации собственного теплового излучения дюралюминия по данным экспериментальных исследований и результаты ее расчетной аппроксимации

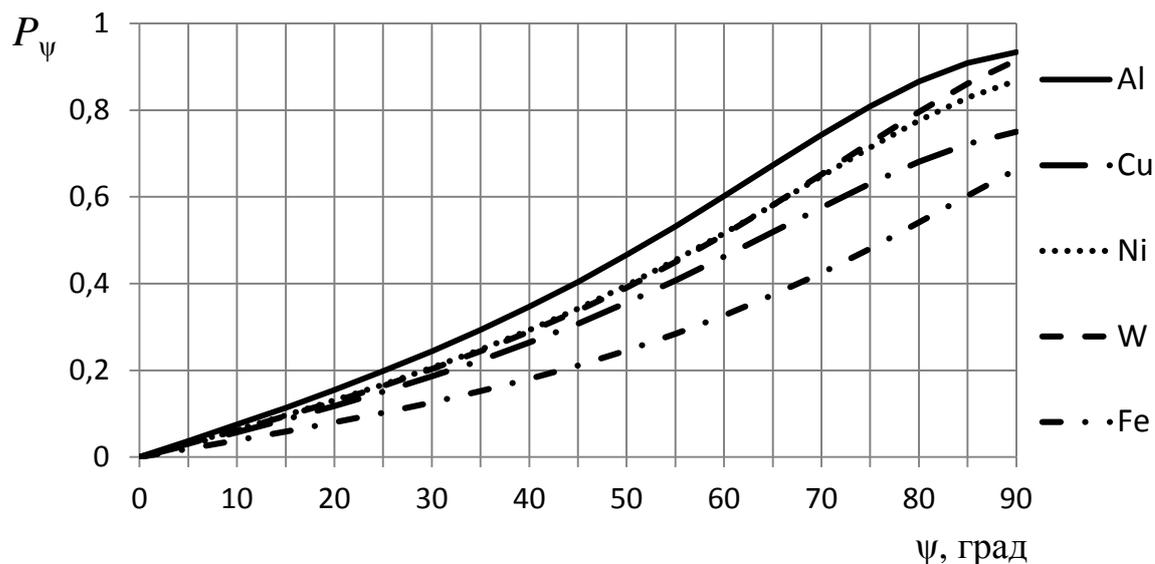


Рисунок 41 – Результаты теоретических исследований степени поляризации собственного излучения P_ψ от угла ψ для ряда металлических объектов

Анализ теоретических и экспериментальных данных, представленных на рисунках 38–41 и формул (157)–(162) показывает, что материал из которого выполнен исследуемый объект, оказывает определенное влияние на поляризационные тепловизионные изображения.

Кроме того, как еще отмечается в работе [13], степень поляризации собственного теплового излучения металлов, сплавов и конструкционных материалов довольно стабильна при изменении температуры, и слабо зависит от длины волны $\Delta\lambda$ в диапазоне от 2 до 10 мкм и сохраняет повышенные, по сравнению с диэлектриками, значения P_ψ даже для грубо обработанных поверхностей. Отсюда следует, что степень поляризации собственного теплового излучения металлических объектов и ее угловая зависимость (индикатриса) $P_\psi=f(\psi)$ являются весьма информативными демаскирующими признаками при выделении этих объектов на слабополяризованных естественных фонах.

3.3 Методика и результаты экспериментальных исследований поляризационных термограмм выпуклых объектов

Для практического подтверждения разрабатываемых методов и результатов математического моделирования по определению формы выпуклых объектов проведены экспериментальные исследования по получению и обработке поляризационных термограмм.

Для экспериментального получения поляризационных тепловизионных изображений объектов был собран стенд (рисунок 42), который состоит из оптической скамьи ОСК-2 (1), тепловизионной камеры FLIR InfraCam (США) (2), инфракрасного поляризатора (3) с возможностью вращения во круг его оптической оси и делениями, исследуемого объекта (4) и ЭВМ. Инфракрасный поляризатор изготовлен в ОАО «Государственный институт прикладной оптики» (г. Казань) и представляет собой решетку поляризатор ИК-излучения, полученную путем формирования штрихов треугольного профиля с последующим нанесением на одну из граней штриха металлического покрытия.

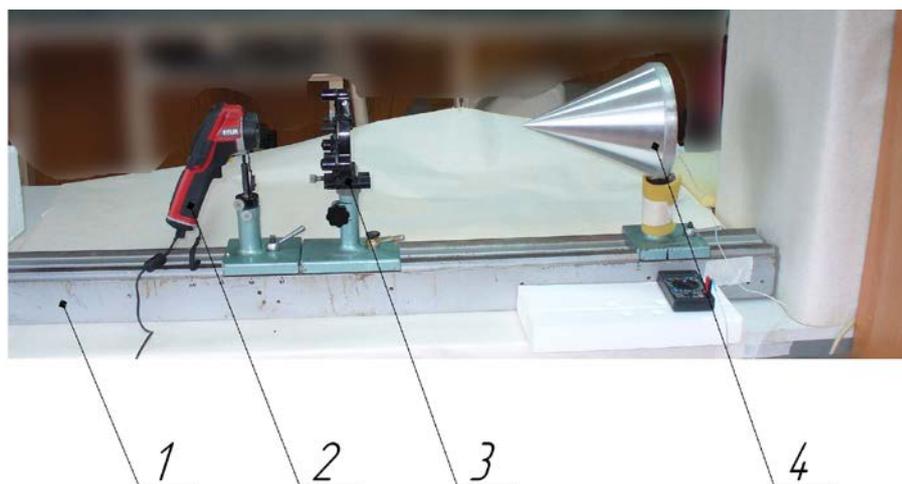


Рисунок 42 – Стенд для получения поляризационных тепловизионных изображений объектов

Технические характеристики составных устройств стенда приведены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Технические характеристики тепловизионной камеры.

Параметр	Значение
Спектральный диапазон, мкм	7,5-13
Тип ФПУ, формат	Микроболометр, 120x120
Поле зрения	25°x18°

Продолжение таблицы 1

Параметр	Значение
Пороговая температурная чувствительность (Разность температур, эквивалентная шуму $\Delta T_{\text{пор}}$), К	0,02
Передача изображения на ЭВМ, интерфейс	USB
Диапазон измеряемых температур, °С	-10 ÷ +350
Запись изображений	Встроенная память (формат JPEG)
Дисплей	16000 цветов

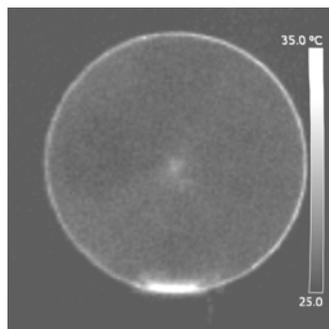
Таблица 2 – Параметры ИК–поляризатора

Параметр	Значение
Подложка	полиэтилен
Спектральная область пропускания, мкм	7-100
Количество штрихов на 1 мм	1200
Степень поляризации при $\lambda=8,3$ мкм, %	99

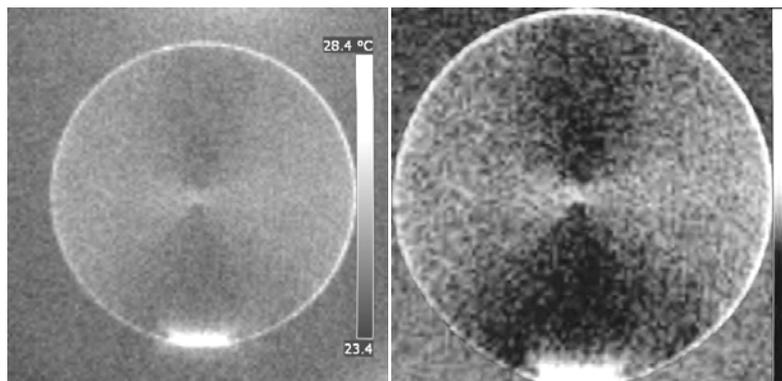
Таблица 3 – Параметры тест–объекта

Параметр	Значение
Тип	Конус
Материал	Алюминий
Высота, мм	230
Диаметр основания, мм	210

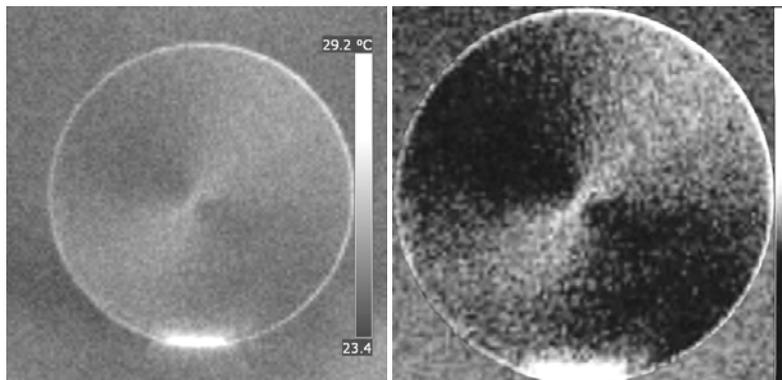
С помощью стенда были получены тепловизионные изображения объекта, в виде конуса, как в неполяризованном, так и в поляризованном свете, которые представлены на рисунке 43 [41].



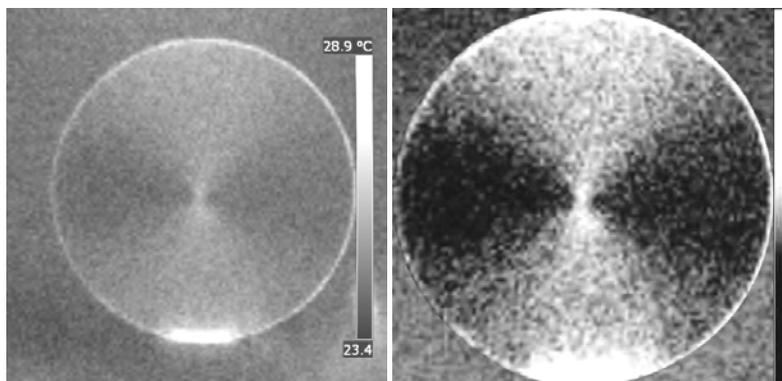
без поляризационного фильтра



$t_{\Pi}=0^{\circ}$



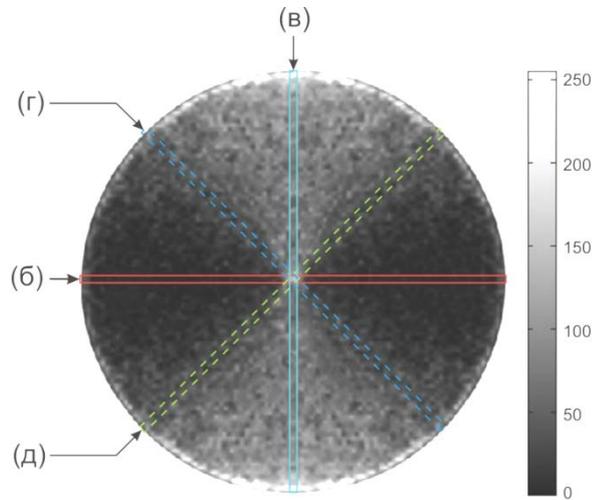
$t_{\Pi}=45^{\circ}$



$t_{\Pi}=90^{\circ}$

Рисунок 43 – Экспериментальные поляризационные тепловизионные изображения конуса

Для анализа экспериментальных поляризационных термограмм воспользуемся рисунками 44–46.



Линии сканирования: (б) – горизонтальная;
 (в) – вертикальная;
 (г) – левая диагональ;
 (д) – правая диагональ.

Рисунок 44 – Линии сканирования поляризационной термограммы

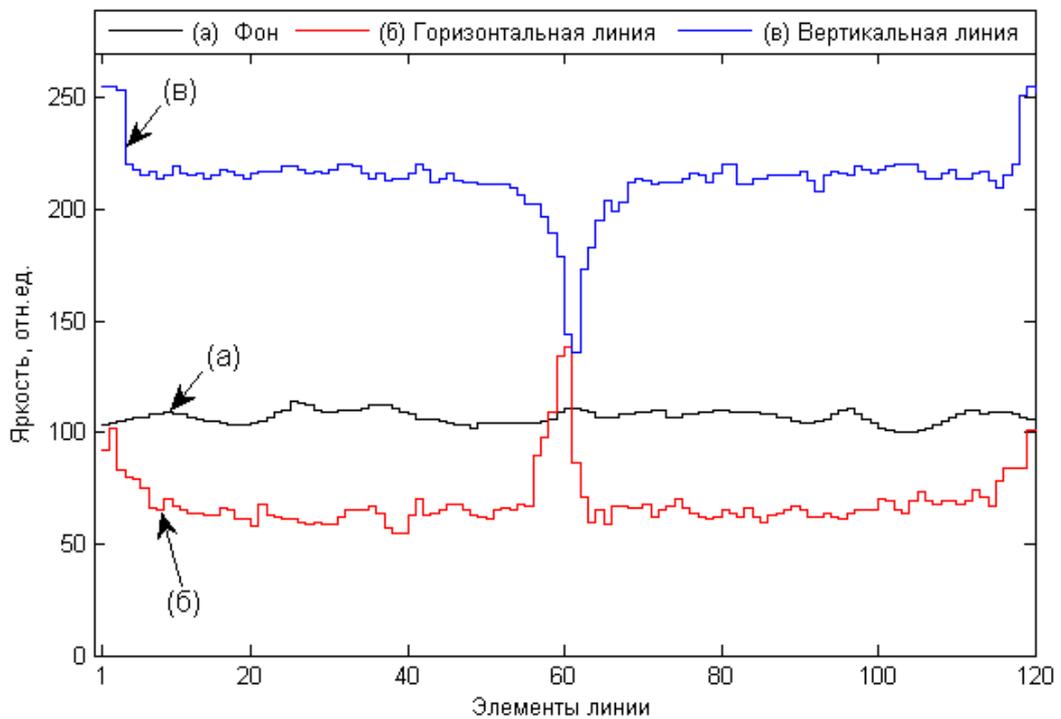


Рисунок 45 – Распределение яркости вдоль линий сканирования поляризационной термограммы конуса

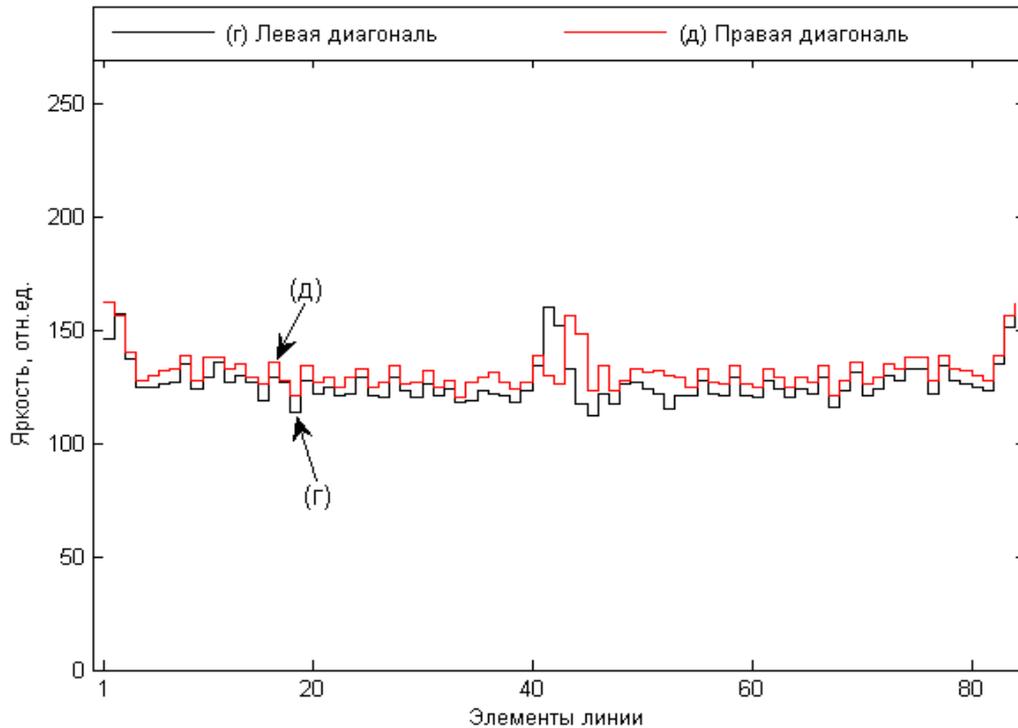


Рисунок 46 – Распределение яркости вдоль диагоналей изображения

На рисунке 44 приведена поляризационная термограмма тест-объекта в виде конуса с азимутом поляризации $t_{\text{п}}=90^\circ$ и линии, вдоль которых проводился анализ распределения яркости изображения – это (б) горизонтальная линия и (в) вертикальная линия.

На рисунке 45 представлены графики зависимости яркости элемента изображения от его номера в строке. Анализируя рисунок 45 можно сделать вывод о том, что яркость вдоль горизонтальной линии (линия перпендикулярна азимуту поляризатора) с учетом постоянного отклонения значения яркости эквивалентного шуму, имеет постоянное минимальное значение по сравнению с остальной областью изображения, за исключением краев и центра. Это объясняется тем, что на краях и центре термограммы в один элемент изображения проецируется элементарная площадка более сложной формы, чем в других областях. Для вертикальной линии, которая совпадает с азимутом поляризатора, значения яркости также постоянны вдоль линии, опять же за исключением краев и центра, однако, поскольку

линия анализа совпадает с азимутом поляризатора, то значения яркости вдоль линии принимают максимальное значение. При рассмотрении изменения яркости вдоль диагоналей изображения (рисунок 46) яркость, как и в случаях с горизонтальной и вертикальной линиями остается постоянной, однако значение яркости относительно равны, так как угол линии анализа с азимутом поляризатора составляет 45° в обоих случаях. Следует отметить тот факт, что при анализе изображения при повороте линии, вдоль которой анализируется распределение яркости, к примеру, от горизонтальной линии к вертикальной, сохраняется постоянство значений яркости вдоль линии, а абсолютное ее значение изменяется от минимального к максимальному. Приведенные результаты эксперимента по получению поляризационных термограмм подтверждает физическую и функциональную связь ориентации элементов наблюдаемой поверхности в пространстве со степенью поляризации их собственного теплового излучения.

3.4 Алгоритм, программа и результаты обработки поляризационных тепловизионных изображений объектов

3.4.1 Алгоритм и программа обработки поляризационных тепловизионных изображений объектов

На основе метода описанного в параграфе 2.5 настоящей работы был разработан алгоритм обработки поляризационных тепловизионных изображений и определения трехмерной формы исследуемых объектов. Схема алгоритма представлена на рисунке 47.

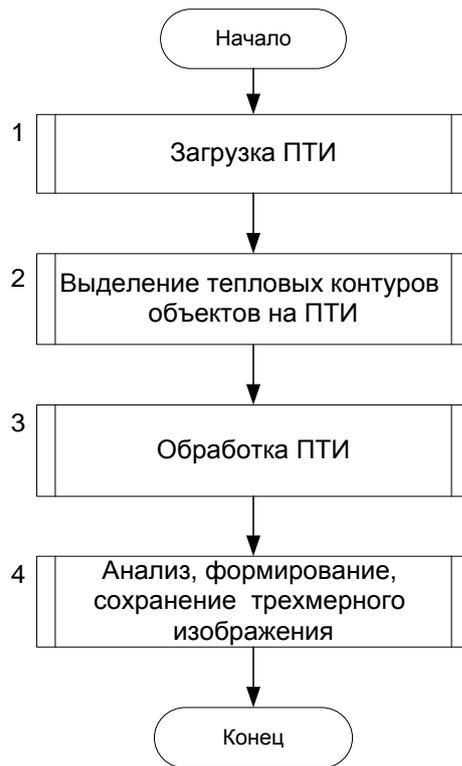


Рисунок 47 – Схема основного алгоритма обработки поляризационных изображений

На этом рисунке приведена схема основного алгоритма обработки и определения формы объектов по поляризационным термограммам, которая имеет достаточно простой вид. Согласно этому рисунку элемент схемы 1 выполняет загрузку (считывание) поляризационных тепловизионных изображений (ПТИ).

Элемент схемы 2 выполняет функцию определения контура анализируемого объекта, то есть основная задача данного блока – определить границу между областью изображения объекта, в которой находится информация об объекте и областью фона.

Для построения трехмерного изображения исследуемого объекта по поляризационным термограммам необходимо определить границу между областью теплового контура объекта и фоном, то есть областью изображения, которая не является частью объекта. Для решения этой задачи использовались два способа.

Первый – это анализ изменения яркости поляризационных тепловизионных изображений в зависимости от азимута поляризации t_p по алгоритму представленному на рисунке 48.

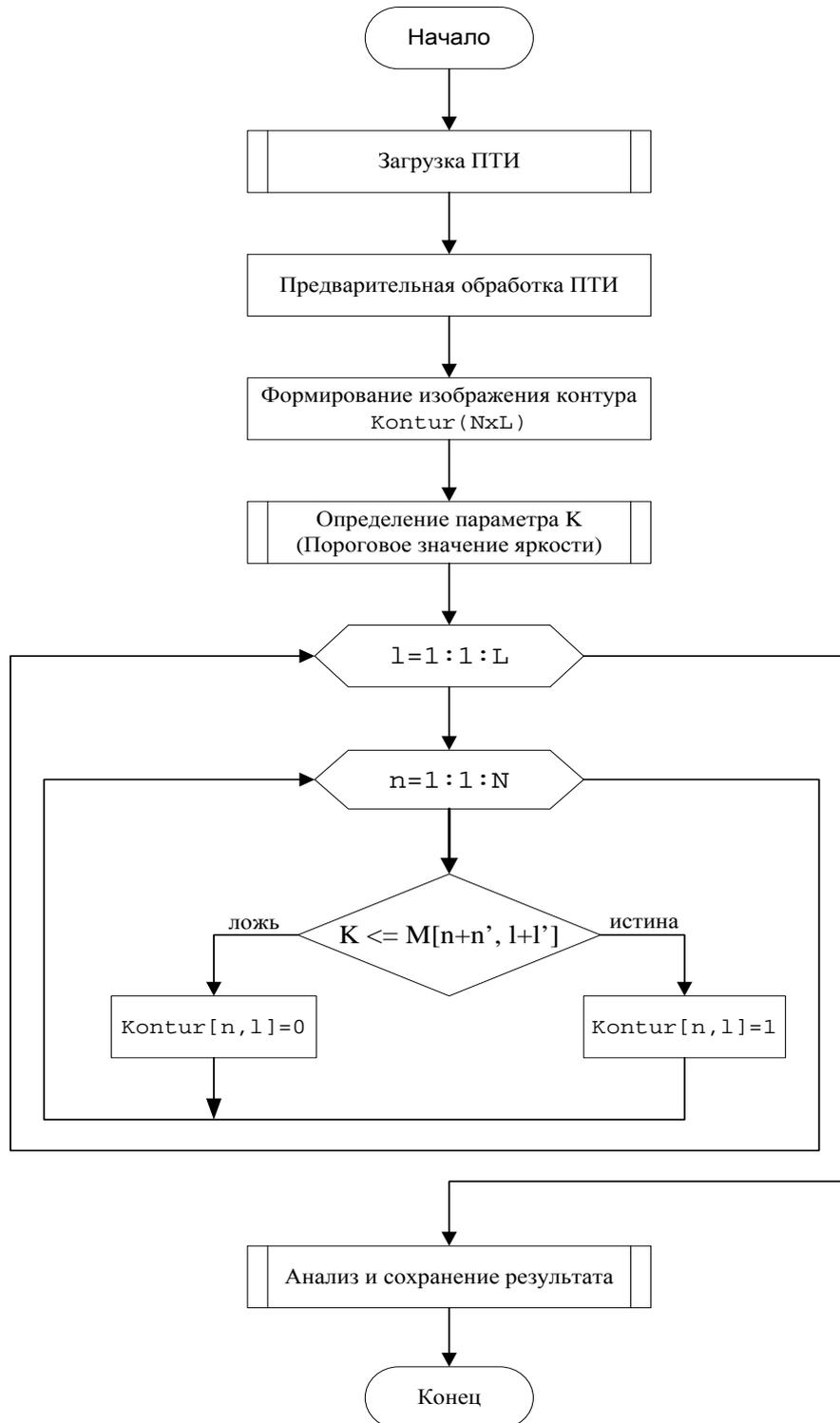


Рисунок 48 – Схема алгоритма определения границы контура объекта

Алгоритм основывается на анализе изменения яркости соседних пикселей от анализируемого пикселя на поляризационных изображениях с азимутом поляризации $t_{\text{п}}=45^\circ$ и $t_{\text{п}}=90^\circ$. Графически в упрощенном варианте способ представлен на рисунке 49.

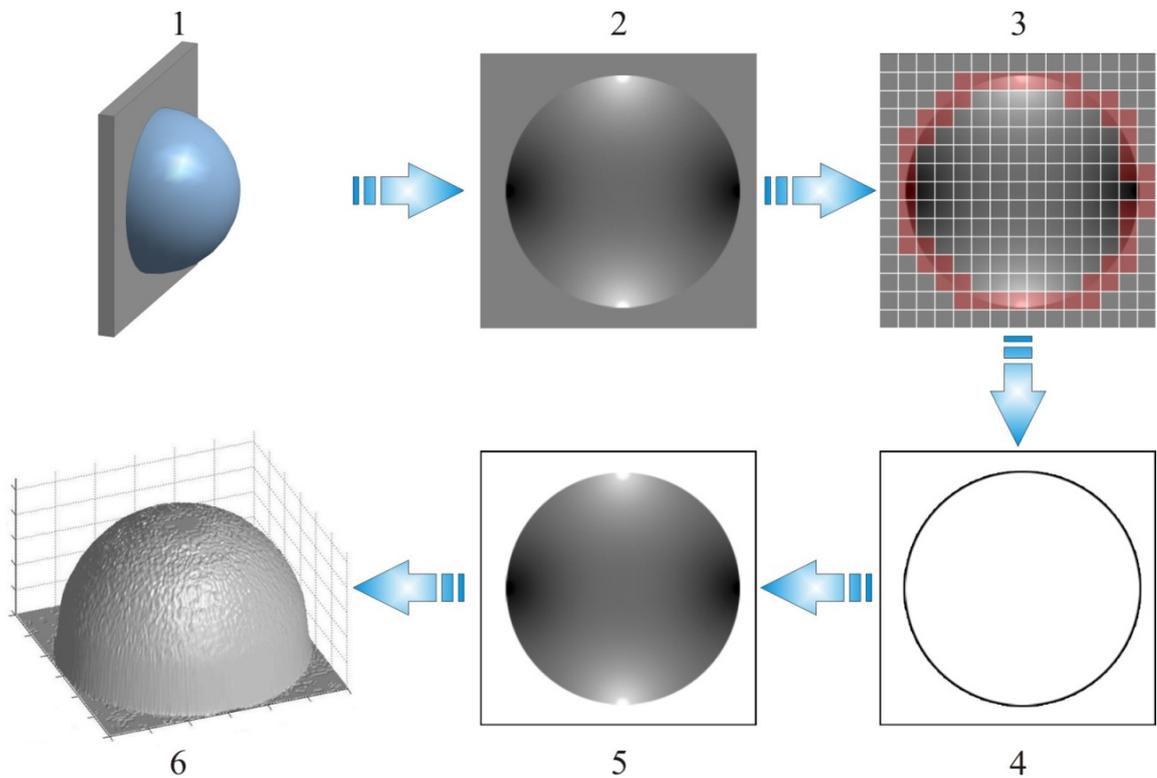


Рисунок 49 – Пошаговая схема построения изображения с определением контура объекта

Второй способ основывается на сопоставлении полученных поляризационных тепловизионных изображений объекта с его классическим тепловизионным изображением в неполяризованном свете (рисунок 50).

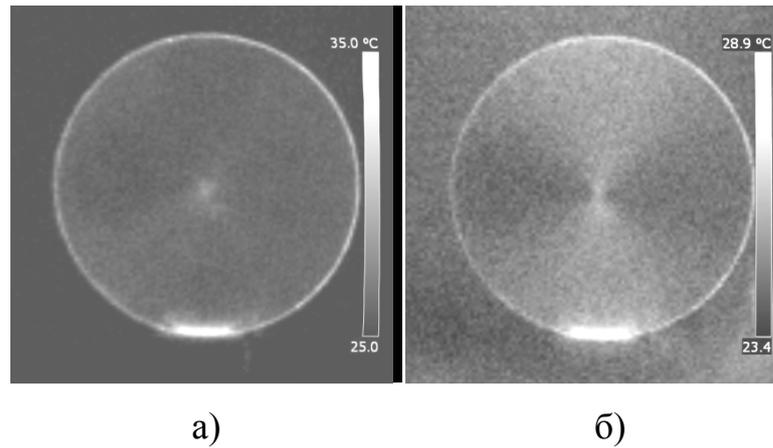


Рисунок 50 – Пример а) классического и б) поляризационного тепловизионного изображения объекта

Как отмечалось ранее по классическому тепловизионному изображению можно строго выделить все участки теплового контура, наблюдаемого тепловизионной камерой, объекта. При условии, что два поляризационных изображения и одно классическое в неполяризованном свете тепловизионное изображение являются изображениями одной сцены, то при их сопоставлении определяется граница объекта, внутри которой необходимо выполнять обработку информации и определять трехмерную форму. На рисунке 50а хорошо видно различие между областями объекта и фона, а на поляризационном тепловизионном изображении 50б это различие наблюдается в меньшей степени.

Элемент схемы 3 (рисунок 47) выполняет обработку поляризационных тепловизионных изображений, а именно вычисление степени поляризации P всех элементов поверхности объекта эквивалентных соответствующим пикселям изображения по выражению (96), и вычисление угла ориентации ψ также всех элементов поверхности объекта по выражению (97) и построение трехмерного изображения объекта изображения по выражениям (72) и (73).

Схема алгоритма непосредственного анализа и расчета параметров для воспроизведения трехмерной формы объектов приведена на рисунке 51 [43].

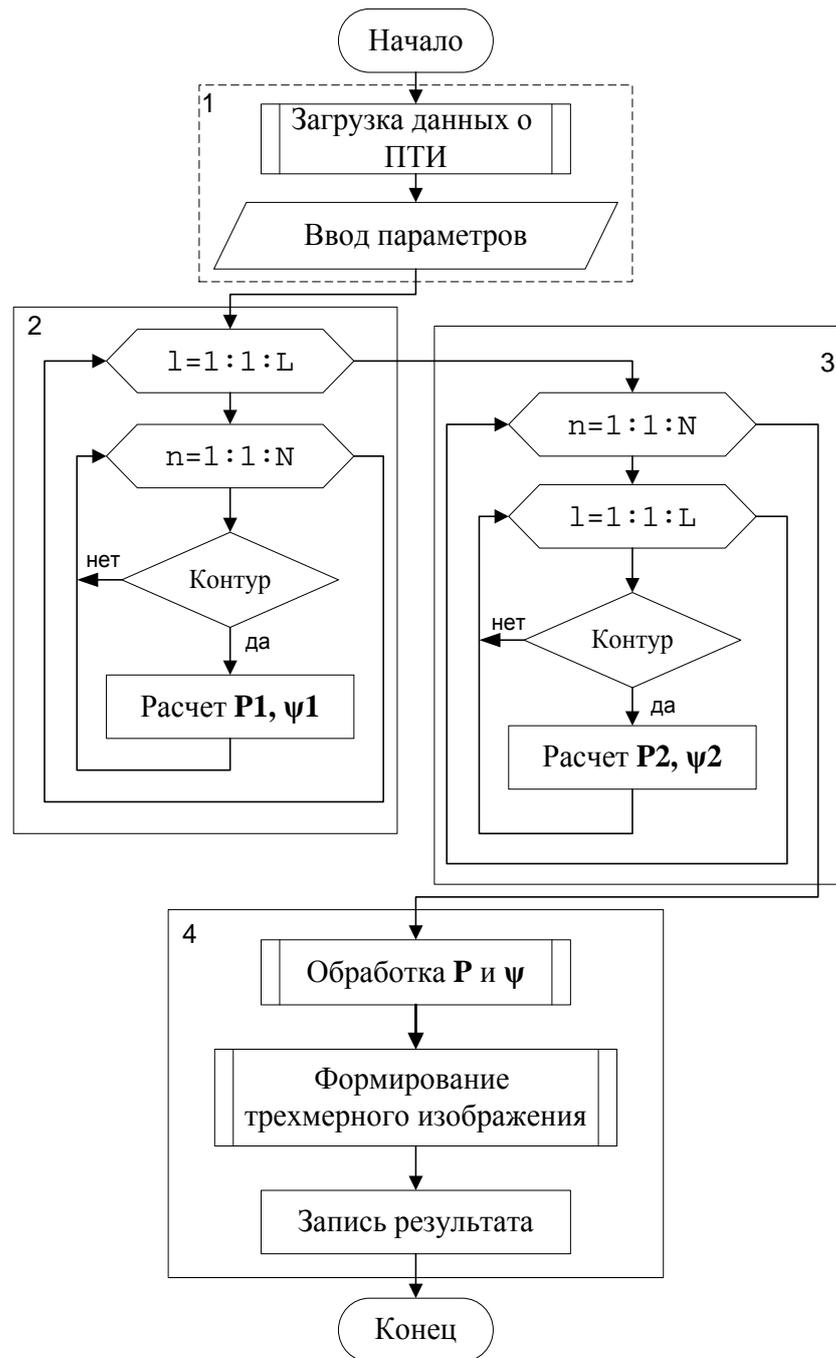


Рисунок 51 – Схема алгоритма анализа поляризационных изображений

На данной схеме блок 1 выполняет формирование массивов данных, кодирование поляризационных тепловизионных изображений, определение размеров изображения, загрузка информации о контуре объекта. Блоки 2 и 3 на основе предварительно полученной информации и самих ПТИ выполняют расчет степени поляризации P и угол ориентации элементарных площадок ψ . Различие блока 2 от блока 3 заключается в том, что расчет данных

необходимых для построения трехмерного изображения в блоке 2 выполняется по строкам, а в блоке 3 по столбцам.

3.4.2 Связь степени поляризации собственного излучения элементов поверхности объекта с углом наблюдения

Важным аспектом является то, тот факт, что связь угла ориентации ψ элементарной площадки поверхности объекта, эквивалентной одному пикселю изображения со степенью поляризации ее собственного теплового излучения описывается формулой (40'), а так как функция \cos является четной, то возникает неоднозначность в определении «знака» наклона элементарной. На рисунке 52 приведен пример неоднозначности, где n – нормаль к элементу поверхности, H – направление наблюдения. Из данного рисунка следует, что углы ψ_1 и ψ_2 равны, хотя фактически $\psi_1 = -45^\circ$, а $\psi_2 = 45^\circ$, и наклоны этих площадок направлены противоположные стороны.

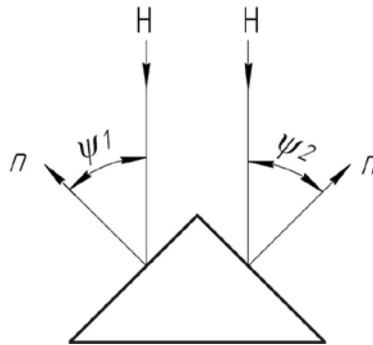


Рисунок 52 – Определение направления наклона исследуемых элементов поверхности объектов

Для разрешения этой неоднозначности рассмотрим следующее выражение для индикатрисы степени поляризации собственного теплового излучения металлов, сплавов и конструкционных материалов:

$$P(\psi') = \frac{\eta \sin^2 \psi'}{1 + \cos^2 \psi'}, \quad (163)$$

где входящий в данное выражение и далее, в формулы (164)–(167) угол ψ' – это значения угла ориентации нормали к элементу dA поверхности объекта при заданной индикатрисе степени поляризации.

Входящий в это выражение множитель

$$P_{\psi'} = \frac{\sin^2 \psi'}{1 + \cos^2 \psi'}, \quad (164)$$

согласно работе [12] характеризует индикатрису степени поляризации излучения в ИК диапазоне полированной поверхности металлов и сплавов, а параметр η зависит от шероховатости поверхности материала.

После несложного преобразования выражение (163) принимает вид:

$$P(\psi') = \frac{\eta \sin^2 \psi'}{2 - \sin^2 \psi'}. \quad (165)$$

Далее на основании данного выражения получено следующее квадратное уравнение относительно $\sin \psi'$:

$$2P(\psi') = (P(\psi') + \eta) \sin^2 \psi'. \quad (166)$$

После решения этого уравнения значение угла ψ' определяется по формуле [41]:

$$\psi' = \arcsin \left(\sqrt{\frac{2P(\psi')}{P(\psi') + \eta}} \right), \quad (167)$$

$$\text{где } P(\psi') = \sqrt{\frac{U_1 - 1}{2 \sin[\arctg(U_1 - 1) / (1 - U_2)] - (U_1 - 1)}}.$$

Поскольку функция \sin нечетная, то таким образом решается задача определения знака угла ориентации площадки.

Математически процедура определения знака угла ψ формируется на основе совместного анализа и соответствующего учета выражений для угла ψ' согласно (167) и для этого же по смыслу угла, согласно формуле (168):

$$\psi = \arccos\left(1 - \frac{P(\psi)}{a}\right). \quad (168)$$

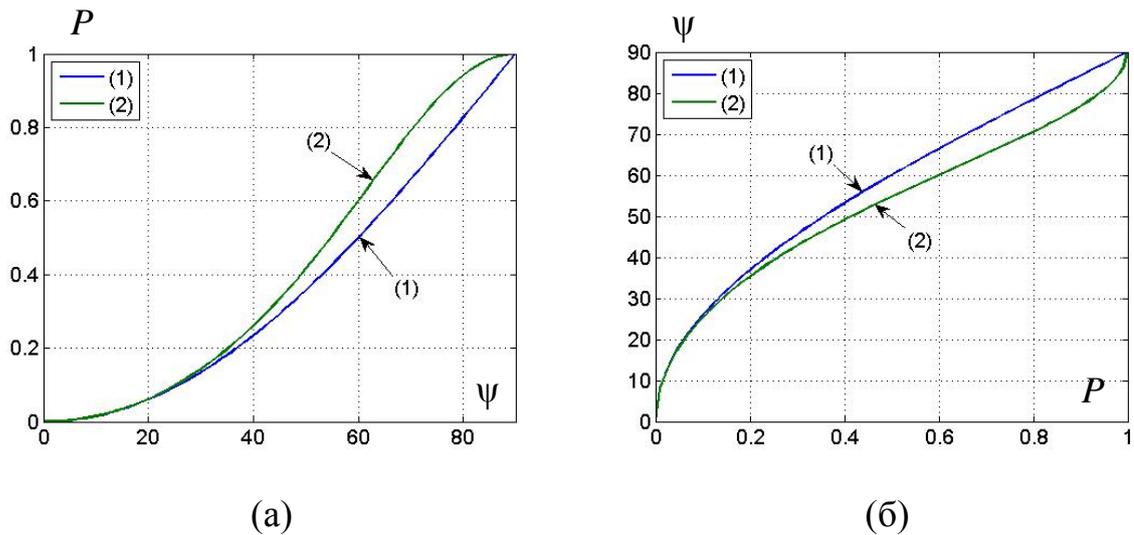


Рисунок 53 – Аппроксимация индикатрисы степени поляризации собственного излучения элементов поверхности объектов: (1) – выражение (168) и (2) – выражение (165): (а) – моделирование степени поляризации, (б) – моделирование угла ориентации в зависимости от степени поляризации излучения элементов поверхности

Для анализа равенства значений индикатрисы степени поляризации собственного излучения материалов по формулам (40') и (165) проводился её количественный расчет, результаты которого приведены на рисунке 53.

Углы ψ и ψ' физически имеют один и тот же смысл; они являются результатом различных аппроксимаций индикатрисы степени поляризации собственного излучения материалов поверхности объекта. В этой связи выполнен анализ их соответствия с использованием аналога тригонометрического тождества:

$$\sin^2 \psi' + \cos^2 \psi = f(\psi, \psi').$$

При этом следует иметь ввиду, что при расчете параметры a и η выбирались равными, угол ψ' при функции \sin рассчитывался по формуле (167), а угол ψ при функции \cos по формуле (40').

Результаты оценки тождественного соотношения приведен на рисунке 54.

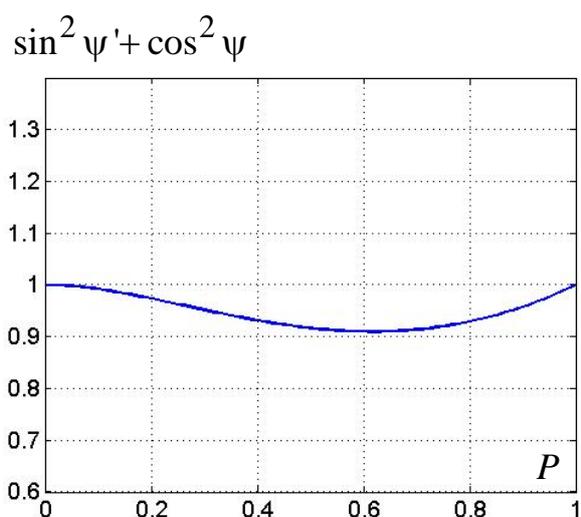


Рисунок 54 – Соотношение углов ψ и ψ' по выражениям (40') и (167)

Анализ рисунка 54 показывает, что в диапазоне всех возможных значений индикатрисы степени поляризации P , в пределах среднеарифметических отклонений $\Delta < 9\%$, значения соответствующих углов ψ и ψ' можно считать равными.

В этой связи, в блоках 2 и 3 (см. рисунок 51) вычисляется угол ψ как по формуле (168), так и по формуле (167) и, при условии их практического равенства между собой, выбирается, в конечном счете, истинное значение угла ψ .

3.4.3 Результаты обработки теоретических и экспериментальных термограмм

Непосредственно обработку степени поляризации P и вычисление значений угла ориентации ψ всех элементов изображений, формирование трехмерной формы объекта и запись результатов реализуется в блоке 4 схемы алгоритма, приведенной на рисунке 51. Элемент схемы 4 представляет собой модуль, который визуализирует результаты выполнения блоков 2 и 3 и записывает (сохраняет) результаты в ПЗУ ЭВМ.

На основе разработанного метода определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных тепловых изображений с азимутами поляризации $t_{\text{п}}=45^\circ$ и $t_{\text{п}}=90^\circ$, его математической модели, рассмотренного алгоритма обработки поляризационных термограмм и экспериментальных поляризационных термограмм объектов, построены трехмерные изображения поверхности сферы и конуса. На рисунке 55 приведен результат эксперимента по построению профиля алюминиевой полусферы по поляризационным термограммам приведенным в параграфе 2.2. Результаты вычислительного эксперимента воспроизведения трехмерных форм объектов в виде сферы и конуса приведены на рисунке 57, а на рисунке 57 – результаты экспериментального определения трехмерной формы объекта в виде конуса, полученные на основе указанного анализа поляризационных термограмм.

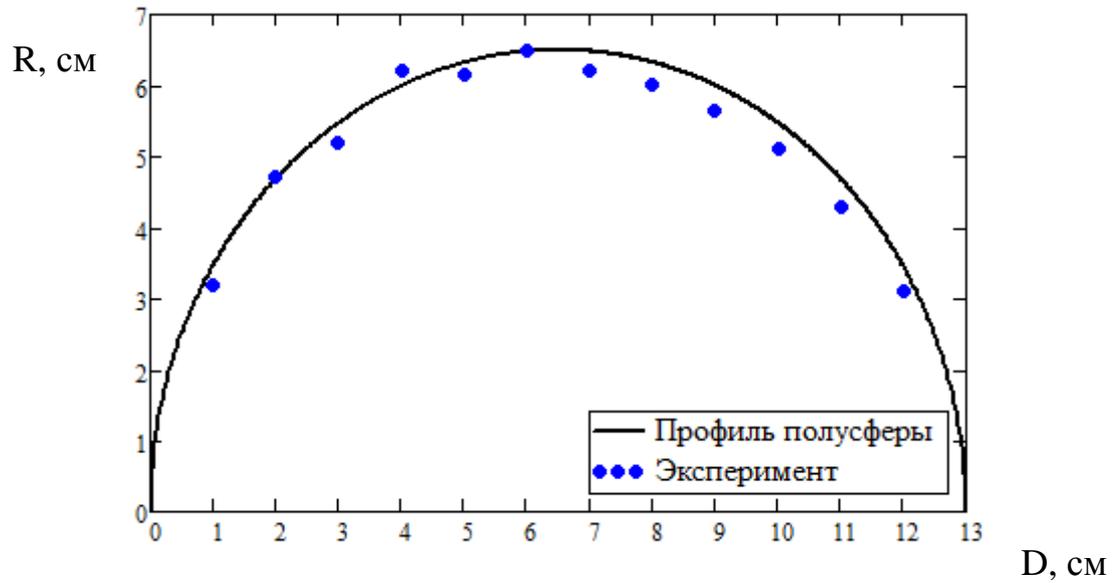
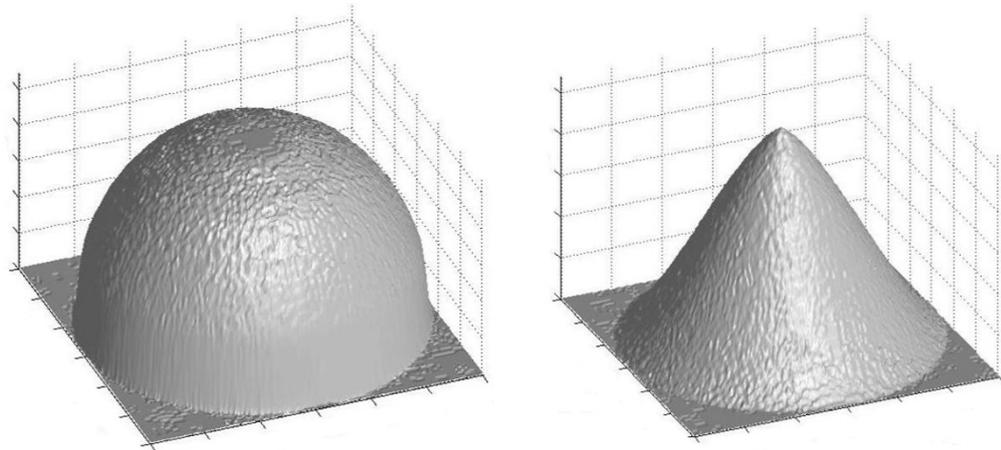


Рисунок 55 – Восстановление профиля полусферы (R – радиус; D – диаметр основания полусферы)



(а) сфера

(б) конус

Рисунок 56 – Математические модели трехмерной формы объектов, полученные по результатам обработки смоделированных поляризационных термограмм

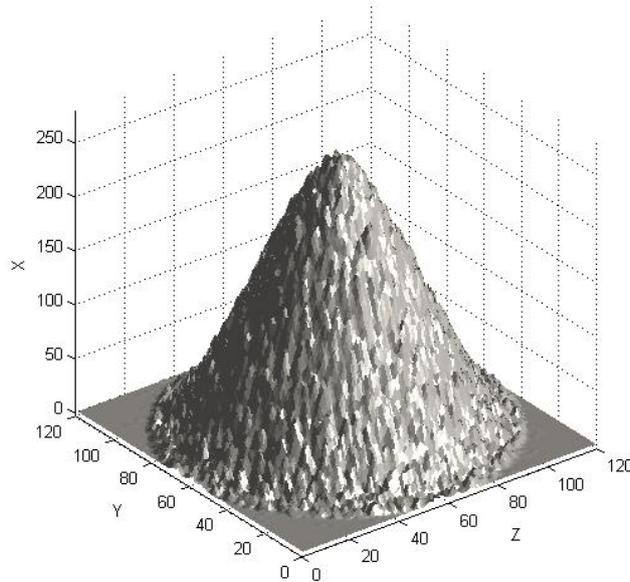


Рисунок 57 – Результаты определения трехмерной формы конуса по данным обработки экспериментальных поляризационных термограмм

После обработки полученного визуализированного изображения поверхности конуса медианным фильтром его трехмерная форма представлена на рисунке 58. Использование медианного фильтра для сглаживания воспроизведенной поверхности объекта, является примером возможностей дальнейшей обработки изображений, и представляет собой отдельную задачу, не входящую в рамки настоящей работы.

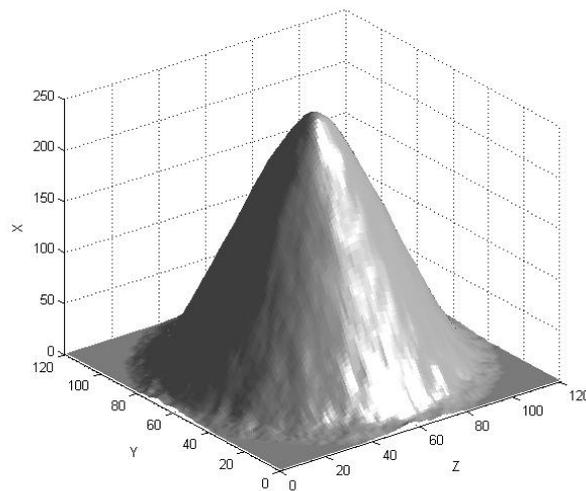


Рисунок 58 – Изображение трехмерной формы объекта в виде конуса после применения медианной фильтрации

3.5 Методика и результаты исследования погрешности метода определения трехмерной формы на основе поляризационных термограмм

Для анализа точности метода определения трехмерной формы по двум поляризационным термограммам, воспользуемся следующей формулой, по которой определяется угол ψ ориентации элементов поверхности объекта с использованием величин видеосигналов этих изображений:

$$\psi = \arccos \left[1 - a^{-1} \cdot \sqrt{\frac{U_1 - 1}{2 \cos \left[\arctg \left(\frac{U_2 - 1}{U_1 - 1} \right) \right] - (U_1 - 1)}} \right].$$

Предположим, что при сканировании поляризационных термограмм вдоль оси OY системы координат XYZ форма объектов воспроизведена по формуле (72):

$$x(N, L) = y(N, L) \cdot \operatorname{tg} \psi,$$

где $y(N, L)$ – координата в плоскости YOZ изображений, вдоль которой проводится сканирование.

Для конкретных значений чисел N и L элементарных площадок поверхности объекта их дифференциал функции $x(N, L)$ равен:

$$dx(N, L) = y(N, L) \frac{d\psi}{\cos^2 \psi}, \quad (169)$$

где $d\psi$ – приращение угла ψ при сканировании одного пикселя.

В свою очередь, с учетом формулы (72) имеем:

$$\frac{dx(N,L)}{x(N,L)} = \frac{d\psi}{\cos^2 \psi} \cdot \frac{\cos \psi}{\sin \psi} = \frac{d\psi}{\sin \psi \cdot \cos \psi}. \quad (170)$$

Для определения $d\psi$ продифференцируем исходное выражение для угла ψ при $a=1$:

$$d\psi = -\frac{1}{\sqrt{1-B^2}} \cdot \left(-\frac{1}{2\sqrt{C}}\right) \cdot \left\{ dU_1 \cdot \left[2 \cos \left(\arctg \frac{U_2-1}{U_1-1} \right) - (U_1-1) \right] - \right. \\ \left. (U_1-1) \left[-2 \sin \left(\arctg \frac{U_2-1}{U_1-1} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+T^2} \right) \cdot \left(\frac{dU_2(U_1-1) + dU_1(1-U_2)}{(U_1-1)^2} \right) - dU_1 \right] \right\}, \quad (171)$$

где

$$B = \left[1 - \frac{\sqrt{U_1-1}}{\sqrt{2 \cos \left(\arctg \frac{U_2-1}{U_1-1} \right) - (U_1-1)}} \right]; \quad (172)$$

$$C = \frac{U_1-1}{2 \cos \left(\arctg \frac{U_2-1}{U_1-1} \right) - (U_1-1)}; \quad (173)$$

$$T = \operatorname{tg} 2t = \frac{U_2-1}{U_1-1}. \quad (174)$$

Для расчета входящих в формулы (163)-(167) параметров используются следующие соотношения для нормированных видеосигналов поляризационных тепловизионных изображений с соответствующими азимутами поляризации, а также для углов t и γ .

$$U_1 = 1 + P \cos 2t \cos 2\gamma; \quad (175)$$

$$U_2 = 1 + P \sin 2t \cos 2\gamma; \quad (176)$$

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left[\frac{(1-P)}{(1+P)} \right]; \quad (177)$$

$$t = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left[\frac{(U_2 - 1)}{(U_1 - 1)} \right] = \frac{1}{2} \operatorname{arctg}(T). \quad (178)$$

Для оценки погрешности воспользуемся величинами $d\psi/\psi$ и dx/x , которые характеризуют относительные ошибки определения соответственно углов наклона ψ и линейной координаты x в зависимости от инструментальных погрешностей dU_1 и dU_2 величин видеосигналов поляризационных изображений.

Проведем оценку погрешности для следующих условий:

P – степень поляризации собственного теплового излучения берем в интервале от 0,05 до 0,95 с шагом 0,05; $a = 0,7$; $dU_1 = dU_2 = 0,002$.

Схема алгоритма расчета ошибки определения угла ориентации и координаты приведена на рисунке 59.

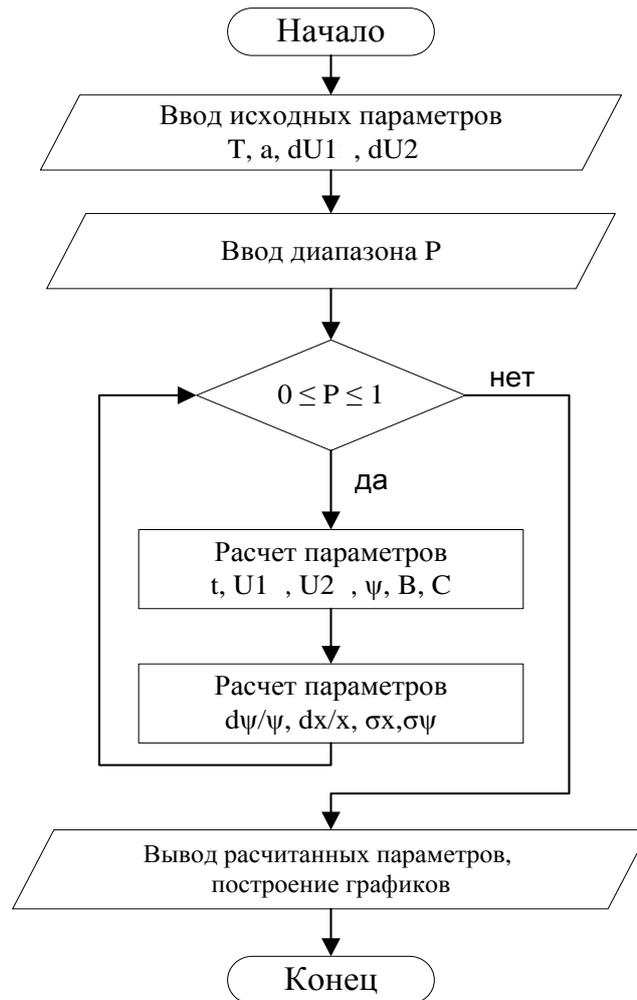


Рисунок 59 – Схема алгоритма расчета ошибки определения угла ориентации ψ и линейной координаты x

На основе выше описанной методики анализа точности метода определения трехмерной формы объектов внутри их тепловизионного контура были проведены исследования зависимости погрешности определения угла ориентации ψ и координаты x от степени поляризации собственного теплового излучения наблюдаемого объекта. Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов степени поляризации, погрешности определения угла ориентации ψ и координаты x

P	$\sigma_{\psi}, \%$	$\sigma_x, \%$
0,05	31	32
0,10	8,31	10,19
0,15	3,63	4,9
0,20	1,98	3,08
0,25	1,23	2,17
0,30	0,81	1,67
0,35	0,56	1,36
0,40	0,4	1,17
0,45	0,29	1,06
0,50	0,22	1,01
0,55	0,16	1
0,60	0,12	0,85
0,65	0,09	0,8
0,70	0,07	0,7
0,75	0,047	0,6
0,80	0,033	0,5
0,85	0,02	0,4
0,90	0,01	0,3
0,95	0,0056	0,2

Для анализа полученных данных на основе таблицы 4 были построены графики зависимости погрешности определения угла ориентации ψ и координаты x от степени поляризации P , которые представлены на рисунках 60 и 61.

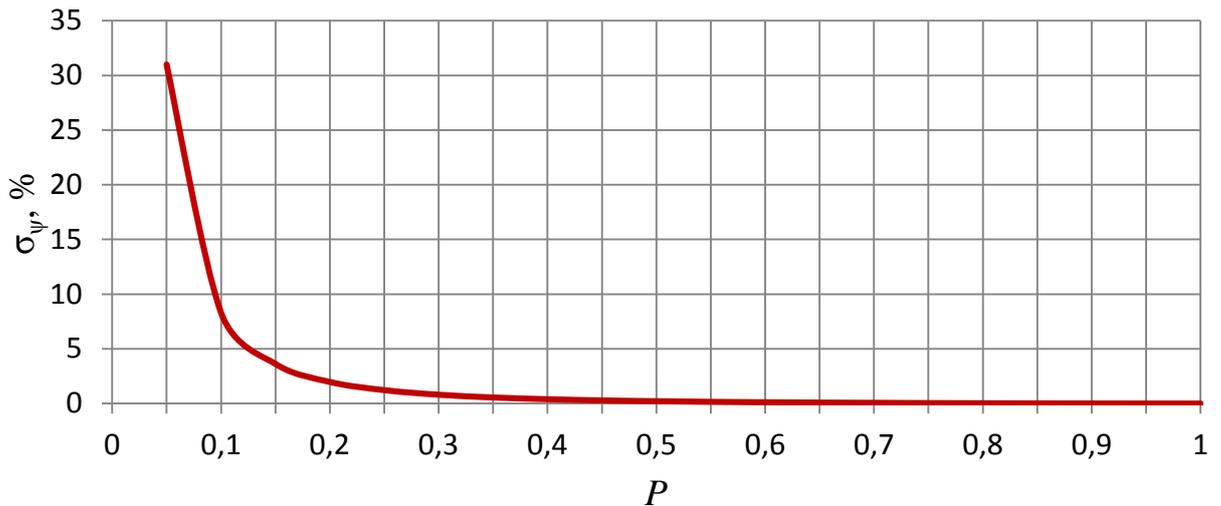


Рисунок 60 – Зависимость погрешности определения угла ориентации от степени поляризации

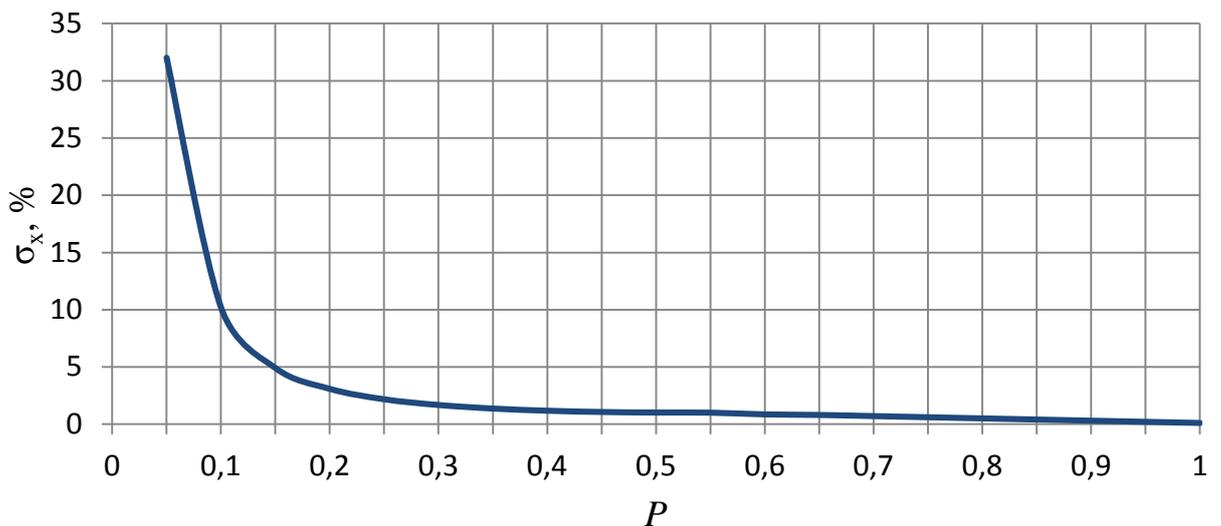


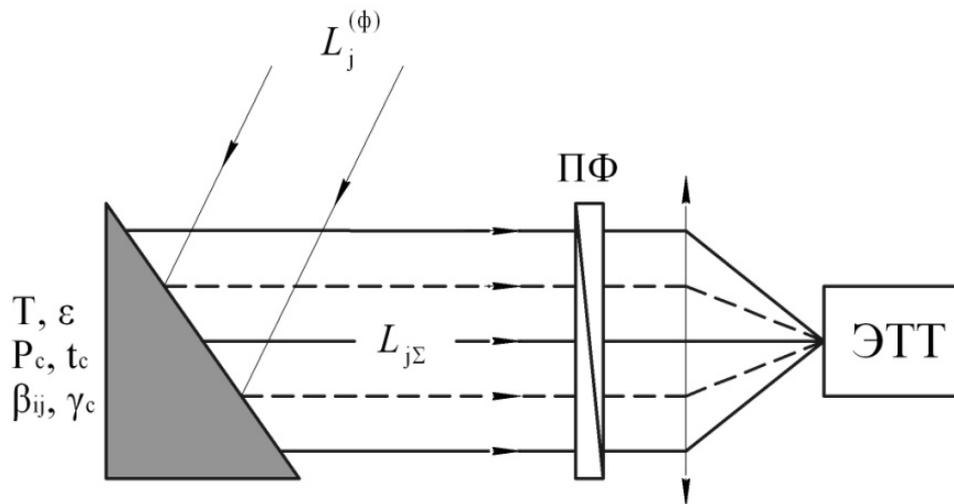
Рисунок 61 – Зависимость погрешности определения координаты от степени поляризации

Из результатов расчетов погрешности видно, что погрешность метода определения формы объектов является достаточно приемлемой в диапазоне значений P больших 0,15. Так, в диапазоне, $0,15 \leq P \leq 0,8$, погрешность лежит в диапазоне от 4,9% до 0,5%. Кроме того анализ зависимостей, представленных на рисунках 58 и 59 показывает, что при увеличении степени поляризации собственного излучения поверхности объектов погрешность

определения как угла ориентации ψ так и линейной координаты x имеет тенденцию к уменьшению.

3.6 Методика учета излучения внешней помехи фона при формировании поляризационных тепловых изображений

Для рассмотрения влияния и учета теплового потока излучения фона, который отражается поверхностью объекта и регистрируется приемником оптического излучения, воспользуемся рисунком 62.



$L_j^{(\phi)}$ – вектор-параметр Стокса яркости фонового источника; $L_{j\Sigma}$ – вектор-параметр Стокса суммарной яркости; ОС – оптическая система тепловизора; ЭТТ – электронный тракт тепловизора; ПФ – поляризационный фильтр.

Рисунок 62 – Схема влияния теплового излучения фона на поляризованное излучение объекта

В вектор-параметрическом представлении яркость собственного теплового излучения объекта описывается следующим образом:

$$L_j = L_c \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ P_c \cos 2t_c \cos 2\gamma_c \\ P_c \sin 2t_c \cos 2\gamma_c \\ P_c \sin 2\gamma_c \end{bmatrix}, \quad (179)$$

где P_c , t_c и γ_c – соответственно степень, азимут и степень эллиптичности энергетической яркости L_c теплового излучения объекта.

Для описания потока излучения фона воспользуемся выражением для вектор–параметра Стокса яркости теплового излучения фона:

$$L_j^{(\Phi)} = L_\Phi \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ P_\Phi \cos 2t_\Phi \cos 2\gamma_\Phi \\ P_\Phi \sin 2t_\Phi \cos 2\gamma_\Phi \\ P_\Phi \sin 2\gamma_\Phi \end{bmatrix}, \quad (180)$$

где P_Φ , t_Φ и γ_Φ – соответственно степень, азимут и степень эллиптичности энергетической яркости L_Φ теплового излучения фона.

Матрица отражения Мюллера поверхности объекта, согласно работам [10, 36, 40] представляется в виде:

$$\beta_{ij} = R \cdot \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} & 0 & 0 \\ \beta_{21} & \beta_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{33} & \beta_{34} \\ 0 & 0 & \beta_{43} & \beta_{44} \end{bmatrix}; \quad (181)$$

где $R=R(\Theta,\varphi)\rho$, $\beta(\Theta,\varphi)$ – коэффициент габаритной яркости поверхности объекта [39], который зависит от его формы и характеризует индикатрису отражения поверхности объекта; ρ_0 – коэффициент отражение материала покрытия объекта; β_{12} , β_{21} , β_{33} , β_{34} , β_{43} , β_{44} – элементы матрицы отражения Мюллера, которые характеризуют поляризационные свойства отражения объекта.

Поскольку приемником измерительной системы регистрируется общий поток, а именно поток собственного теплового излучения объекта и отраженный поверхностью объекта поток теплового излучения фона, то вектор параметр Стокса суммарной яркости теплового излучения равен:

$$L_{i\Sigma} = k_c L_j + k_o \sum_{i=1}^4 \beta_{ij} \cdot L_j^{(\Phi)}, \quad (182)$$

где k_c – доля собственного теплового излучения объекта в суммарном потоке его теплового излучения; k_o – доля отраженного теплового излучения от объекта в суммарном его тепловом излучении.

В этой связи на основе выражения (182) и формул (179)–(181) имеем:

$$L_{i\Sigma} = k_c L_i + R k_o L_\phi \cdot \begin{bmatrix} 1 + P_\phi \beta_{12} \cos 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi \\ P_\phi (\beta_{21} + \beta_{22} \cos 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi) \\ P_\phi (\beta_{33} \sin 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi + \beta_{34} \sin 2\gamma_\phi) \\ P_\phi (\beta_{43} \sin 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi + \beta_{44} \sin 2\gamma_\phi) \end{bmatrix}. \quad (183)$$

Следует отметить, что первый параметр $L_{1\Sigma}$ суммарного теплового излучения объекта формирует энергетическую характеристику этого излучения, поэтому будем его использовать для получения величины видеосигналов поляризационных термограмм.

Воспользуемся тем, что вектор-параметр Стокса на выходе поляризационного фильтра (ПФ) имеет вид:

$$L_{k\Sigma} = \sum_{i=1}^n \tau_{ik} L_{i\Sigma}, \quad (184)$$

где τ_{ik} – матрица пропускания поляризационного фильтра.

Определим видеосигналы для поляризационных тепловизионных изображений с азимутом поляризации поляризационного фильтра $\delta=45^\circ$ и $\delta=90^\circ$.

При $\delta=45^\circ$ имеем:

$$U_1 = A_0 \alpha \beta S \tau_o \tau_n \left\{ \begin{array}{l} k_c L_c (1 + P_c \sin 2t_c \cos 2\gamma_c) + \\ + k_o R L_\phi \left[\begin{array}{l} (1 + P_\phi \beta_{12} \cos 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi) + \\ + (P_\phi \beta_{33} \sin 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi + P_\phi \beta_{34} \sin 2\gamma_\phi) \end{array} \right] \end{array} \right\}, \quad (185)$$

где $A_0(\alpha, \beta)$ – площадь входного зрачка и углы мгновенного поля зрения объектива тепловизора; S – интегральная чувствительность приемника излучения тепловизора; τ_o и τ_n – коэффициент пропускания соответственно оптической системы тепловизора и поляризационного фильтра.

Для $\delta=90^\circ$ величина видеосигнала U_2 равна:

$$U_2 = A_0 \alpha R S \tau_o \tau_n \left\{ \begin{array}{l} k_c L_c (1 + P_c \sin 2t_c \cos 2\gamma_c) - \\ - k_o \beta L_\phi \left[\begin{array}{l} (1 + P_\phi \beta_{12} \cos 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi) + \\ + (P_\phi \beta_{33} \sin 2t_\phi \cos 2\gamma_\phi + P_\phi \beta_{34} \sin 2\gamma_\phi) \end{array} \right] \end{array} \right\}. \quad (186)$$

Рассмотрим случай, когда $P_\phi=0$, что для естественных образований достаточно типично [13]. Тогда имеем:

$$U_1 = A_0 \alpha \beta S \tau_o \tau_n \left\{ k_c L_c \left[(1 + P_c \sin 2t_c \cos 2\gamma_c) + R k_o L_\phi \right] \right\}; \quad (187)$$

$$U_2 = A_0 \alpha \beta S \tau_o \tau_n \left\{ k_c L_c \left[(1 - P_c \sin 2t_c \cos 2\gamma_c) - R k_o L_\phi \right] \right\}. \quad (188)$$

Когда тепловое излучение объекта и окружающего фона подчиняются законам Планка, Стефана-Больцмана и Кирхгофа [12, 13, 18, 24], а тепловизионная система является интегральной в рабочей области спектра, то имеют место условия:

$$\varepsilon = 1 - R; \quad (189)$$

$$\gamma_c = 0; \quad (190)$$

$$L_c = \pi^{-1} \varepsilon \sigma T^4; \quad (191)$$

$$L_{\phi} = \pi^{-1} \varepsilon_{\phi} \sigma T_{\phi}^4. \quad (192)$$

С учетом этих условий величины видеосигналов U_1 и U_2 равны:

$$\begin{cases} U_1 = k \left[\varepsilon k_c \sigma T^4 (1 + P_c \sin 2t_c) + \varepsilon_{\phi} k_o (1 - \varepsilon) \sigma T_{\phi}^4 \right]; \\ U_2 = k \left[\varepsilon k_c \sigma T^4 (1 - P_c \cos 2t_c) - \varepsilon_{\phi} k_o (1 - \varepsilon) \sigma T_{\phi}^4 \right], \end{cases} \quad (193)$$

где $k = A_0 \alpha \beta S \tau_o \tau_n$; ε , ε_{ϕ} – интегральный коэффициент излучения соответственно поверхности объекта и окружающего фона; T и T_{ϕ} – абсолютные температуры поверхности объекта и фона.

В данной работе с использованием материалов работы [55], нами рассмотрены величины видеосигналов ИК систем в трех спектральных интервалах с эффективными длинами волн λ_i ($i=1,2,3$), которые имеют следующий вид:

$$U(\lambda_i) = A_o \alpha \beta S_{\lambda_i} \tau_o(\lambda_i) \left[K_c \varepsilon(\lambda_i) L^o(\lambda_i, T) + K_o \varepsilon_{\phi}(\lambda_i) L^o(\lambda_i, T_{\phi}) \right], \quad (194)$$

где $L^o(\lambda_i, T)$ и $L^o(\lambda_i, T_{\phi})$ – спектральные яркости АЧТ с температурой соответственно поверхности объекта и окружающего фона. На основе анализа величин видеосигналов $U(\lambda_1)$, $U(\lambda_2)$, $U(\lambda_3)$ предложен способ бесконтактного измерения термодинамической температуры T поверхности объектов, который защищен патентом РФ [33].

При этом сведения о температуре поверхности объекта дополняют информацию о трехмерной форме поверхности объекта и расширяют информационную емкость тепловизионного канала.

3.7 Выводы к разделу 3

1. В настоящей главе развита математическая модель формирования поляризационных тепловизионных изображений выпуклых объектов с произвольными азимутами поляризации и приведены методика и результаты анализа влияния материала поверхности объекта и ее состояния на поляризационные термограммы. Выявлены закономерности влияния материала, из которого выполнен исследуемый объект, на поляризационные тепловизионные изображения. Показано, что степень поляризации собственного теплового излучения металлов, сплавов и конструкционных материалов довольно стабильна при изменении температуры, слабо зависит от длины волны λ в диапазоне от 2 до 10 мкм и сохраняет повышенные, по сравнению с диэлектриками, значения P_{ψ} даже для грубо обработанных поверхностей.

2. Разработаны математическая модель, алгоритм и программа обработки поляризационных тепловизионных изображений и программа построения трехмерного изображения поверхности объекта на основе метода определения формы объектов по двум поляризационным термограммам с азимутами поляризации 45° и 90° .

3. Приведена методика и получены результаты исследования методической погрешности метода определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных термограмм с линейными азимутами поляризации. Выявлено, что погрешность метода определения трехмерной формы объектов составляет значения от 4,9 % до 0,5 % в диапазоне степени поляризации P от 0,15 до 0,8.

4. Разработана методика учета влияния отраженного излучения окружающего фона на поляризационные тепловизионные изображения.

5. Разработан и собран экспериментальный макет для получения поляризационных тепловизионных изображений объектов. Получены

теоретические и экспериментальные тепловизионные изображения объектов в виде конуса с азимутами поляризации 0° , 45° и 90° . Проведен анализ зависимости распределения яркости поляризационных тепловизионных изображений объектов от азимута поляризатора и угла ориентации элементов их поверхности, которые подтвердили физическую и функциональную связь ориентации элементов наблюдаемой поверхности в пространстве со степенью поляризации ее собственного теплового излучения.

6. Теоретически и экспериментально получена трехмерная форма выпуклых объектов на основе метода определения формы с использованием поляризационных термограмм с азимутами поляризации 45° и 90° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен анализ научно-технической и патентной литературы по теории, методам и устройствам определения трехмерной формы объектов. Сформулированы актуальность, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость настоящей научно-исследовательской работы по разработке и исследованию новых оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов на основе оптических свойств собственного и отраженного излучения.

2. Разработаны и исследованы теория, метод, математическая модель, алгоритм и программа определения трехмерной формы выпуклых объектов на основе двух поляризационных термограмм с азимутами поляризации $t_{\text{п}}=45^{\circ}$ и $t_{\text{п}}=90^{\circ}$ с учетом эллиптичности поляризации собственного инфракрасного излучения и оптических свойств материалов поверхности объекта.

3. Разработан, исследован и обоснован метод получения информации о трехмерной форме объекта с использованием тепловизионного изображения с комбинированным поляризационным фильтром на основе последовательно расположенных ахроматической четвертьволновой пластинки и линейного ИК поляризатора. Особенностью метода является возможность определения трехмерной формы объекта в реальном масштабе времени. Технические решения метода защищены патентами РФ на изобретение № 2431936 и № 2469265.

4. Развита и усовершенствована метод определения трехмерной формы объекта на основе регистрации и обработки яркости отраженного излучения поверхностью, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим характером отражения. Технические решения метода защищены патентом РФ на изобретение № 2491503.

5. Разработан и собран экспериментальный макет стенда для получения поляризационных тепловизионных изображений объектов. Получены

теоретические и экспериментальные тепловизионные изображения объектов в виде сферы и конуса с азимутами поляризации 0° , 45° и 90° . Проведен анализ зависимости распределения яркости поляризационных тепловизионных изображений объектов от азимута поляризатора и угла ориентации элементов поверхности.

6. Теоретически и экспериментально получена трехмерная форма выпуклых объектов на основе метода определения формы с использованием поляризационных термограмм с азимутами поляризации 45° и 90° . Дана оценка погрешности метода.

7. Материалы диссертационного исследования используются в:

– ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» при статических и ресурсных испытаниях авиационных конструкций, и экспериментальных исследованиях тепловых процессов поверхности летательных аппаратов;

– ОАО «ПО «НПЗ» при сравнительном анализе работы контрольно-испытательного оборудования;

– Внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «СГГА» на кафедре наносистем и оптотехники по дисциплинам «Теория и расчет ОЭП» и «Системы оптотехники» по направлению 200400 – «Оптотехника».

Основные положения и практические результаты работы были представлены и обсуждены на научно-технических семинарах кафедры наносистемы и оптотехники ФГБОУ ВПО «СГГА», научно-технических советах института оптики и оптических технологии ФГБОУ ВПО «СГГА», Международных научных конгрессах «ГЕО-Сибирь-2010», «ГЕО-Сибирь-2011», «ГЕО-Сибирь-2012» (Новосибирск, 2010-2012 гг.), 21-ой Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2010 г.) и научно-практической конференции «Современные тенденции и принципы построения авиационных оптико-электронных систем» (Екатеринбург, 2012 г.).

По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, из них три статьи в изданиях, определенном в перечне ВАК Минобрнауки РФ, три патента РФ

на изобретение, одна статья в научно-техническом журнале «Вестник СГГА», три статьи в сборниках материалов VI, VII, VIII Международных научных конгрессов «ГЕО-Сибирь» 2010-2011 гг. и «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», один материал доклада в сборнике докладов «21-й Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения», а также один отчет НИР № ГР 01200954352.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Балоев, В.А. Анализ путей повышения эффективности наземных оптико-электронных комплексов наблюдения [Текст] /В.А. Балоев, С.С. Мишанин, В.А. Овсянников, В.Л. Филиппов, С.Е. Якубсон, В.С. Яцык. // Оптический журнал, 2012. – Т. 79, № 3. – С. 11-21.
- 2 Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф // 2-е изд., пер. с англ. под ред. Г.П. Мотулевич. – М.: Наука, 1973. – 720 с.
- 3 Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов [Текст] / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. // 4-е изд, Стереотип. – М. : Гостехиздат, 1954. – 608 с.
- 4 Вишняков, Г.И. Оптические схемы измерения формы трехмерных объектов методом проекции полос [Текст] / Г.И. Вишняков, К.Е. Лоцилов // Оптический журнал, 2011. – Т. 78, № 2. – С 42–47.
- 5 Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] : монография / Р. Гонсалес, Р. Вудс, С. Эддинс. – М. : Техносфера, 2005. – 616 с.
- 6 Горелик, А.А. Современное состояние проблемы распознавания [Текст] / А.А. Горелик, И.Б. Гуревич, В.А. Скрипкин. – М. : Радио и связь, 1985. – 158 с.
- 7 Госсорг, Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение [Текст] / Ж. Госсорг., пер. с франц. Н.В. Васильченко: под ред. Л.Н. Курбатова. – М.: Мир, 1988. – 416 с.
- 8 Грузман, И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах [Текст]/ И.С. Грузман, В.С. Киричук, В.П. Косых, Г.И. Перетягин, А.А. Спектор. – Новосибирск.: НГТУ, 2002. – 352 с.
- 9 Двойнишников, С.В. Разработка оптико-электронных систем для измерения 3D геометрии крупногабаритных объектов на основе пространственно-временной модуляции источника оптического излучения [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / Меледин В.Г. – Новосибирск, 2009. – 20 с.

10 Джерард, А. Введение в матричную оптику [Текст] / А. Джерард. – М. : Мир, 1978. – 341 с.

11 Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен [Текст] / Р. Дуда, П. Харт. - М. : Мир, 1976. – 352 с.

12 Зуев, В.Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере [Текст] / Р.Е. Зуев. – Советское радио, 1970. – 496 с.

13 Иванов, В.П. Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов [Текст] / В.П. Иванов, И.В. Курт, В.А. Овсянников, В.Л. Филиппов. – Казань: Отечество, 2006. – 595 с.

14 Игнатъев, В.М. Моделирование линейных цифровых фильтров для обработки изображений [Текст] / В.М. Игнатъев, Ф.А. Данилкин // Сб. матер. Междунар. конф. «Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки информации». – Курск, 1993.

15 Изнар, А.Н. Оптико-электронные приборы космических аппаратов [Текст] / А.Н. Изнар, А.В. Павлов, Б.Ф. Федоров. - М.: Машиностроение, 1972. – 368 с.

16 Исследование и разработка физико-математических и информационных основ поляризационного тепловидения и синтеза объемных тепловизионных изображений [Текст]: отчет о НИР (заключит.) / Сиб. гос. геодез. акад.; рук. В.М. Тымкул. – Новосибирск, 2010. – 24 с. № ГР 01200954352. – 24 с.

17 Кизель, В.А. Отражение света [Текст] / В.А. Кизель. – М.: Наука, 1973. – 353 с.

18 Кондратьев, К.Я. Тепловое излучение планет [Текст] / К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 263 с.

19 Красильников, Н.Н. Получение трехмерного изображения объекта путем измерения интенсивности диффузного отражения света различными точками его поверхности [Текст] / Н.Н. Красильников, О.И. Красильникова // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77 – № 6. – С. 19–24.

20 Криксунов, Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники [Текст] / Л.З. Криксунов. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.

21 Ллойд, Дж. Системы тепловидения [Текст] / Дж. Ллойд. // пер. с англ. Н.В. Васильченко: под ред. А.И. Горячева. – М.: Мир, 1978. – 414с.

22 Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов [Текст]: учебник для вузов / М.М. Мирошников. – Л.: Машиностроение, 1983. – 696 с.

23 Оптико-информационные измерительные и лазерные технологии и системы : Юбилейный сборник избранных трудов КТИ НИ СО РАН / Науч. Ред. Ю.В. Чугуй; Рос. акад. наук., Сиб. отделение, Конструкторско-технологический институт научного приборостроения. – Новосибирск.: Академическое издательство «Гео», 2012. – 456 с.

24 Орлов, В.Е. Сигналы и помехи в лазерной локации [Текст] / В.Е. Орлов, М.В. Самохвалов, Т.М. Креков и др. // под ред. В.Е. Зуева. – М.: Радио и связь. 1985. – 264 с.

25 А.с. №166727, МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, П.Г. Голубев, С.Г. Смагин. – №4738971/09; заявл. 06.06.89; опубл. 30.07.89, Бюл. №28. – 3 с.

26 Пат. 2099759 РФ, МПК G02B 27/18, H04N 5/33. Способ распознавания формы объекта и устройство его осуществления [Текст] /Тымкул В.М., Тымкул Л.В., Ананич М.И., Смагин С.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – 93037825/09; заявл. 23.07.1993; опубл. 20.12.1997, Бюл. №21. – 5 с.

27 Пат. 2141735 РФ, МКИ H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов / В.М. Тымкул, О.В. Тымкул, Л.В. Тымкул, М.И. Ананич, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – №95111870; заявл. 11.02.95; опубл. 20.11.99, Бюл. № 32. – 4 с.

28 Пат. 2334195 РФ, МПК G01B 11/24. Способ бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов [Текст] /

Двойнишников С.В., Меледин В.Г. и др.; заявитель и патентообладатель Двойнишников С.В., Меледин В.Г. – №2006118624/28; заявл. 29.05.2006; опубл. 20.09.2008, Бюл. №26. – 7 с.

29 Пат. 2431936 РФ, МПК H04N 5/33. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / Тымкул В.М., Фесько Ю.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – 2010129703/09; заявл. 15.07.2010; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. – 8 с.

30 Пат. 2469265 РФ, МКИ G01B 11/24. Устройство для бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "СГГА". – №2011125261/28; заявл. 17.06.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. №34. – 5с.

31 Пат. №2024212 РФ, МКП H04N 5/33, G01B 11/24. Способ тепловизионного распознавания формы объектов [Текст] / В.М. Тымкул, А.Б. Гринев, Т.Б. Куроптева, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – 95111870/28; заявл. 11.07.1991; опубл. 20.11.1994, Бюл № 22. – 5 с.

32 Пат. 2491503 РФ, МКИ G01B 11/24, G02B 27/22. Способ распознавания трехмерной формы объектов [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "СГГА". – №2012116268/28; заявл. 23.04.2012; опубл. 27.08.2013. Бюл. № 24 – 7с.

33 Пат. 2410654 РФ, МПК G01J 5/52. Способ измерения температуры [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько, Д.С. Шелковой.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – № 2009134008/28; опубл. 27.01.2011; Бюл. № 3. – 5 с.

34 Потапов, А.А. Новейшие методы обработки изображений [Текст] / Под ред. А.А. Потапова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 496 с.

35 Садыков, С.С. Методы выделения структурных признаков изображений [Текст] / С.С. Садыков, В.Н. Кан., И.Р. Самандаров. – Ташкент. : Фан, 1990. – 130 с.

36 Свет, Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур / Д.Я. Свет. – М.: Наука, 1982. – 296 с.

37 Соيفер В.А. Методы компьютерной обработки изображений [Текст] / Под. ред. В.А. Соифера. – 2-е изд., испр. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 784 с.

38 Тарасов, В.В. Инфракрасные системы "смотрящего" типа [Текст] / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 2004. – 444 с.

39 Тевяшов, В.И. Измерение матриц рассеяния тел с использованием зеркальной сферы в качестве образца [Текст] / В.И. Тевяшов, В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // ОМП, 1979. – № 8. – С. 11-12.

40 Тевяшов, В.И. Оптические характеристики отражения объемных тел в поляризованном свете [Текст] / В.И. Тевяшов, В.М. Тымкул, Ю.А. Шуба // ОМП. – 1979. – № 10. – С. 8–11.

41 Тымкул, В.М. Методика и результаты экспериментального определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм [Текст] / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько // Автометрия. – 2013. – Т. 49, № 2. – С. 123–127.

42 Тымкул, В.М. Математическая модель определения трехмерной формы объектов на основе двух поляризационных термограмм [Текст] / Ю.А. Фесько, В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Д.С. Шелковой // ГЕО-Сибирь-2011. Т.5., Ч.1: сб. матер. VII Междунар. Научн. Конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 164-168.

43 Тымкул, В.М. Методика и алгоритм определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм [Текст] / В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько // VIII Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», 10-20 апреля 2012 г., Новосибирск / Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2012», 10-20 апреля 2012 г., Новосибирск / сб. материалов Т. 1. – Новосибирск. : СГГА, 2012. – С. 9–13.

44 Тымкул, В.М. Методика расчета звездной величины международной космической станции [Текст] / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, Ю.А. Фесько,

К.В. Кудряшов, С.В. Луговских // Изв. вузов Приборостроение. – 2013. Т. 56. – № 5. С. 5–9.

45 Тымкул, В.М. Методы распознавания и формирования 3D изображений в тепловидении [Текст] // В.М. Тымкул, Ю.А. Фесько / сб. трудов VI Международного научного конгресса «ГЕО-СИБИРЬ-2010», Новосибирск, 2010. – С. 98-103.

46 Тымкул, В.М. Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета [Текст]: учебное пособие для вузов / В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул. – Новосибирск: СГГА, 2005. – 215 с.

47 Тымкул, В.М. Отражение оптического излучения телами с направленно-рассеивающим покрытием [Текст] // В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, К.В. Кудряшов / Изв. Вузов. Приборостроение, 2007. Т. 50, № 10 – С. 58–63.

48 Тымкул, В.М. Системы тепловидения. Моделирование тепловизионных изображений [Текст] : учеб. пособие / В.М. Тымкул, М.И. Ананич. – Новосибирск : РИО «СГГА», 1995. – 59 с.

49 Тымкул, Л.В. Системы ИК – техники [Текст] : Учебное пособие / Л.В. Тымкул, В.М. Тымкул. – Новосибирск. : РИО «СГГА», 2007. – 164с.

50 Фесько, Ю.А. Метод определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – №6; Режим доступа: <http://www.science-education.ru/106-7509> (дата обращения: 23.11.2012).

51 Фесько, Ю.А. Анализ способов распознавания формы трехмерных объектов на основе поляризационных термограмм [Текст] / Ю.А. Фесько, В.М. Тымкул, О.К. Ушаков, В.М. Тымкул, О.К. Ушаков // сборник трудов XXI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: Орион, 2010 г. С. 100-102.

52 Фесько, Ю.А. Метод поляризационного тепловизионного распознавания трехмерной формы объектов [Текст] / Ю.А. Фесько, В.М. Тымкул, Л.В. Тымкул, О.К. Ушаков // Вестник СГГА: научн.-технич. журн./ учредитель ГОУ ВПО «СГГА». – Вып. 2(13). – Новосибирск : СГГА. –

53 Фу, К.С. Структурные методы в распознавании образов [Текст] / К.С. Фу.; пер. с англ. Н.В. Завалишин, под ред. М.А. Айзермана – М. : Мир, 1977. – 320 с.

54 Цисис, Г. Справочник по инфракрасной технике. Том1. Физика ИК излучения [Текст] / Г. Цисис, У. Вольф, – М.: Мир, 1995 – 606 с.

55 Шелковой, Д.С. Разработка и исследование принципов построения и схемы оптического трехспектрального пирометра [Текст] : автореф. дис. канд. наук / Тымкул В.М. – Новосибирск, 2010. – 8с.

56 Якушенков, Ю.Г. Теория и расчет ОЭП [Текст] / Ю.Г. Якушенков. – М. : Логос, 2011. – 444 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

А.1 Методика измерения температур сложных поверхностей на основе поляризационных термограмм

(методика внедрения результатов диссертации в
ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»)

Важнейшей и актуальной задачей современной науки, техники, медицины и производства является точное измерение абсолютной температуры тела. В современной пирометрии и тепловидении разработаны и исследованы ряд методов для неконтактного измерения абсолютной температуры поверхности объектов, которые позволяют сократить перечень априорной информации об измеряемом объекте и снизить погрешность результатов измерения для объектов из различных конструкционных материалов. Тем не менее, для объектов с неплоскими поверхностями имеется ряд ограничивающих обстоятельств.

В общем виде, сигнал регистрируемый тепловизионным интегральным измерительным прибором, равен:

$$U_{\Sigma} = K \cdot W^{\circ}(T) \varepsilon(\psi), \quad (\text{A.1})$$

где $W^{\circ}(T)$ - функция Планка для интегральной светимости АЧТ; $\varepsilon(\psi)$ – индикатриса интегрального коэффициента излучения материала; K – постоянная прибора; ψ – угол ориентации нормали к элементу dA поверхности объекта по отношению к наблюдателю.

Поскольку сигнал, регистрируемый измерительной аппаратурой, зависит от температуры, индикатрисы коэффициента излучения материала, а также формы поверхности (угла ψ) объекта, то имеется неоднозначность в определении, как формы поверхности, так и абсолютной температуры. Для определения полной необходимой информации при измерении температуры

исследуемого объекта нами предлагается использовать разработанные методы определения трехмерной формы объектов [29, 30, 41], которые позволяют определить ориентацию элементов поверхности объекта и в последствии форму поверхности наблюдаемой поверхности и значение индикатрисы $\varepsilon(\psi)$. В предложенных методах информацию об ориентации элемента поверхности получают из анализа регистрируемого собственного излучения, прошедшего через поляризационный фильтр.

Для описания поляризации собственного теплового излучения воспользуемся понятием вектор-параметр Стокса, с помощью которого поток излучения поверхности в общем виде описывается

$$\Phi_j = \Phi_0 \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \\ P \sin 2t \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (\text{A.2})$$

В формуле (A.2) и далее приняты следующие обозначения:

Φ_0 – энергетический поток излучения поверхности элемента dA поверхности; P, t – степень и азимут поляризации собственного излучения элемента поверхности.

При прохождении попеременно, собственного теплового излучения через поляризационный фильтр с азимутами $t_{\text{п}}=45^\circ$ и $t_{\text{п}}=90^\circ$, поток излучения можно описать выражениями (A.3), (A.5) и (A.7), в которых Φ_1 и Φ_2 – поток излучения прошедший поляризационный фильтр с азимутом поляризации 45° и 90° , $\tau_{ij}^{(1)}$ и $\tau_{ij}^{(2)}$ – соответственно матрицы пропускания поляризационного фильтра с азимутом поляризации 45° и 90° :

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^{(1)} \Phi_j, \quad (\text{A.3})$$

$$\tau_{ij}^{(1)} = \tau_{\Pi} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.4})$$

$$\Phi_1 = \tau_{\Pi} \Phi_0 (1 + P \sin 2t), \quad (\text{A.5})$$

$$\tau_{ij}^{(2)} = \tau_{\Pi} \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (\text{A.6})$$

$$\Phi_2 = \tau_{\Pi} \Phi_0 (1 - P \cos 2t). \quad (\text{A.7})$$

С учетом выражений (A.5) и (A.7) нормированные выражения видеосигналов для соответствующей термограммы можно записать в виде:

$$U_1^{(H)} = 1 + P \sin 2t; \quad (\text{A.7}')$$

$$U_2^{(H)} = 1 - P \cos 2t, \quad (\text{A.7}'')$$

На основании этих уравнений, степень поляризации теплового излучения для элемента поверхности dA определяется выражением (A.8):

$$P = \frac{U_1^{(H)} - 1}{\sin \left[\arctg \left(\frac{U_1^{(H)} - 1}{1 - U_2^{(H)}} \right) \right]}. \quad (\text{A.8})$$

Воспользуемся функциональной зависимостью ориентации элемента dA и его степени поляризации

$$P = a(1 - \cos \psi) \rightarrow P / a = 1 - \cos \psi. \quad (\text{A.9})$$

Тогда, формула для определения угла ориентации ψ элемента поверхности имеет вид [2]:

$$\psi = \arccos \left[1 - \frac{[U_1^{(H)} - 1]}{a \cdot \sin \left\{ \arctg \left[\frac{1 - U_1^{(H)}}{U_2^{(H)} - 1} \right] \right\}} \right], \quad (\text{A.10})$$

где a – постоянная зависящая от оптических свойств материала.

Для нахождения значения индикатрисы излучения $\varepsilon(\psi)$ при измеренном по соотношению (A.10) угле ψ воспользуемся следующими соотношениями.

На основе теории отражения Френеля и закона сохранения энергии величины сигналов для параллельной и перпендикулярной компонент собственного излучения можно записать в виде:

$$U_{\parallel} = K \cdot W^{\circ}(T) \varepsilon_{\parallel}(\psi); \quad (\text{A.11})$$

$$U_{\perp} = K \cdot W^{\circ}(T) \varepsilon_{\perp}(\psi). \quad (\text{A.12})$$

Причём, параллельная $\varepsilon_{\parallel}(\psi)$ и перпендикулярная $\varepsilon_{\perp}(\psi)$ компоненты коэффициента излучения материала в зависимости от оптических свойств материала поверхности определяются выражениями (A.13) и (A.14) [13, 36]:

$$\varepsilon_{\parallel}(\psi) = \frac{4n \cos \psi}{(n \cos \psi + 1)^2 + k^2 \cos^2 \psi}; \quad (\text{A.13})$$

$$\varepsilon_{\perp}(\psi) = \frac{4n \cos \psi}{(n + \cos \psi)^2 + k^2}, \quad (\text{A.14})$$

где n и k – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления материала поверхности объекта.

Из выражений (A.13) и (A.14) следует зависимость коэффициента излучения поверхности не только от материала, но и от направления ее наблюдения относительно вектора нормали поверхности. Таким образом, применение метода определения формы поверхности объекта уточняет значение коэффициента излучения, который используется для определения температуры в пирометрии и тепловидении как элемент априорной информации об объекте.

Рассмотрим это более подробно. На основании закона Стефана-Больцмана для теплового излучения зависимость видеосигнала интегральной по длинам волн термограммы от температуры поверхности объекта определяется выражением

$$U = K \cdot \varepsilon(\psi) \sigma T^4. \quad (\text{A.15})$$

С учетом (A.13) и (A.14) индикатрису коэффициента излучения можно найти:

$$\varepsilon(\psi) = \frac{1}{2} [\varepsilon_{\perp}(\psi) + \varepsilon_{\parallel}(\psi)]. \quad (\text{A.16})$$

Тогда температуру поверхности можно определить следующим образом:

$$T = \sqrt[4]{U / (K \sigma \varepsilon(\psi))}, \quad (\text{A.17})$$

где K – постоянная, характеризующая параметры прибора и численно равная

$$K = \frac{1}{\pi} \tau_o \tau_{\Pi} S d A \cos \psi, \quad (\text{A.18})$$

где S – интегральная чувствительность приемника излучения тепловизора; τ_o и τ_{Π} – коэффициенты пропускания соответственно оптической системы и ИК поляризатора.

Приведем формулу (А.17) к инженерному виду. Для этого, выражение (А.15) необходимо нормировать постоянной величиной σK :

$$U' = U / K\sigma. \quad (\text{А.19})$$

Тогда значение абсолютной температуры определяется по формуле:

$$T = \sqrt[4]{U' / \varepsilon(\psi)}, \quad (\text{А.20})$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ (Вт/м²К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана.

При этом, видеосигнал U должен иметь размерность [В], а σK – размерность [В/К⁴].

Таким образом, на основании анализа поляризационных термограмм с азимутами $t_{\text{п}}=45^\circ$ и $t_{\text{п}}=90^\circ$ и закона Стефана-Больцмана, разработана методика измерения абсолютной температуры наблюдаемых сложных поверхностей. Данная методика может найти широкое применение при тепловых испытаниях поверхностей авиационной техники, а также при измерении теплозащитных свойств строительных и энергоемких объектов.

А.2 Результаты экспериментальных исследований температуры сложных поверхностей

Экспериментальные исследования абсолютной температуры сложной поверхности летательных аппаратов проводились на базе ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» г. Новосибирск.

В связи с неравномерным распределением интенсивности теплового излучения неплоской поверхности показания элементов температуры объекта поверхности меняются с изменением угла ψ направления наблюдения излучающей площадки. Значения температуры, измеряемой с направления, совпадающим с направлением вектора нормали площадки и направления, составляющего некоторое значение угла ψ меняются в зависимости от характера индикатрисы излучения материала конструкционного материала

поверхности объекта. На рисунке А.1, в качестве примера, приведена индикатриса излучения поверхности танка, которая иллюстрирует неравномерное распределение интенсивности в зависимости от угла наблюдения [20].

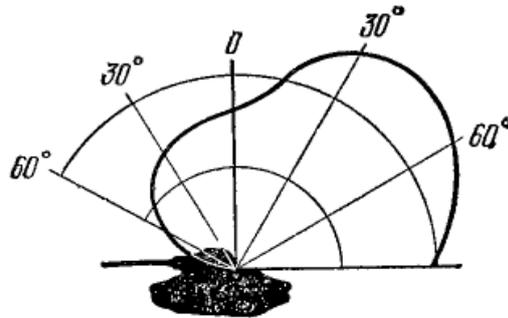


Рисунок А.1 – Индикатриса излучения кормовой поверхности танка,
 $\lambda=3-5$ мкм

В таблице А.1 приведены примеры формы излучающей поверхности и их индикатрисы излучения.

Таблица А.1 – Связь формы и индикатрисы излучения наблюдаемой поверхности

	Диск	Полусфера	Цилиндр со сферическим отверстием
Форма излучающей поверхности			
Форма индикатрисы излучения			

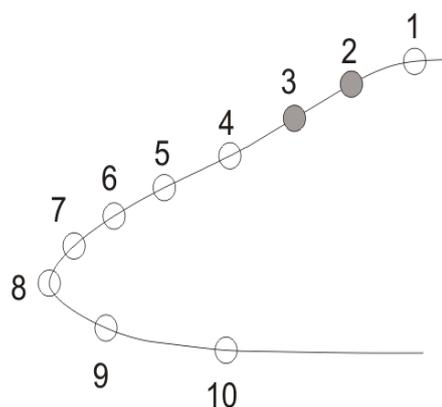
Следует отметить, что при наблюдении тепловизионной камерой некоторой объектной сцены, которая в зависимости от сложности входящих объектов может быть представлена набором простых элементов, то есть

форма, например, самолета может быть сформирована не одной поверхностью, а множеством простых площадок, имеющих различные (но характерные) параметры проекций.

В качестве объекта для исследования в данном эксперименте использовалась носовая часть фюзеляжа летательного аппарата С-80, фотография которого и профиль с маркерами измерения температуры приведены на рисунке А.2б. Среднее арифметическое результаты измерения температуры по маркерам, согласно рисунку А.2а, пирометром Thermopoint и тепловизионной камерой InfraCam (параметры приведены в таблице 1 п.3.3) при нормальных климатических условиях (НКУ) и при температуре среды $24,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены на рисунке А.3.



а)



б)

Рисунок А.2 – Носовая часть фюзеляжа ЛА С-80: а) фотография ЛА;
б) контур профиля с маркерами

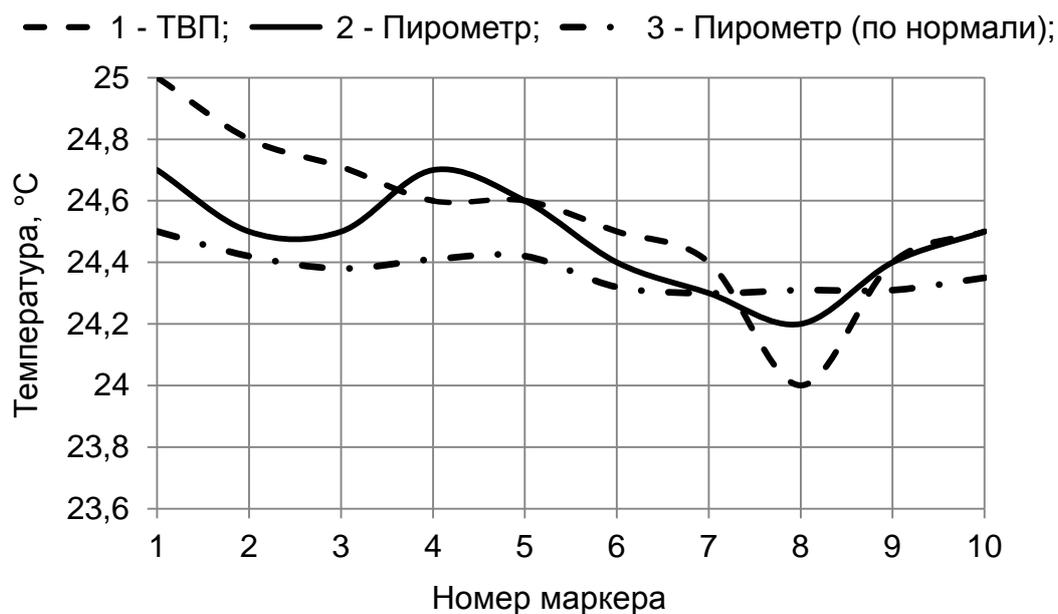


Рисунок А.3 – Значения температуры носовой части фюзеляжа ЛА С-80

Поверхность объекта выполнена из различных по излучательным характеристикам материалов. Этим объясняется достаточно резкое изменение температурной кривой. При этом, следует отметить участок 6-10, который выполнен из стеклопластика и имеет выпуклую форму с изменяющимся углом ψ между нормалью и направлением измерения, поэтому здесь выражена характерная зависимость изменения температуры от ориентации излучающей площадки.

На основе описанной методики измерения температуры с учетом формы поверхности выполнены эксперименты, конечные результаты которых приведены на рисунке А.4. При этом полученные поляризационные тепловизионные изображения объекта приведены на рисунке Б.1.

В целом на рисунке А.4 приведены следующие значения температуры поверхности объекта: 1 – результаты измерения тепловизионной камерой (ТВП) без учета ориентации элементов поверхности; 2 – результаты измерения температуры пирометром при наблюдении элементов поверхности ЛА с позиции наблюдения ТВП (кривая 1); 3 – результаты измерения температуры пирометром при наблюдении элементов поверхности по их

нормали; 3 – результаты измерения температуры по предлагаемой методике на основе поляризационных термограмм.

Кроме того, следует отметить, что пирометр «Thermopoint» был откалиброван по излучению эталонного источника, который входил в комплект контрольно-юстировочной аппаратуры к тепловизору «Радуга-ЭВМ» («Азовский оптико-механический завод», Россия).

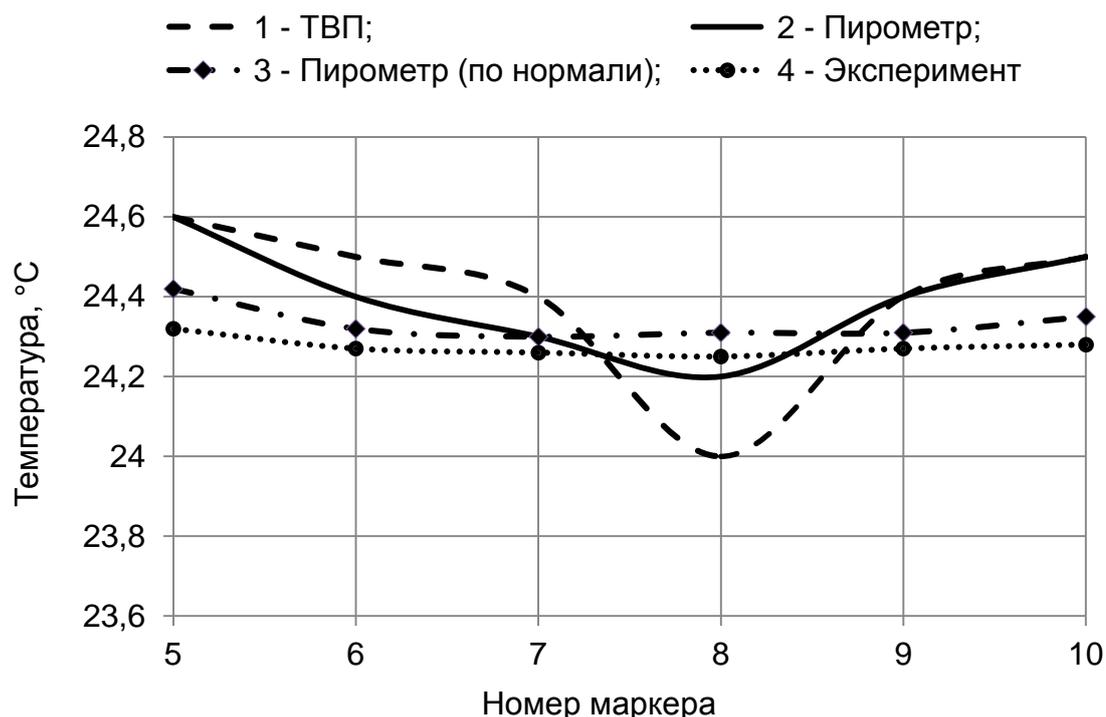


Рисунок А.4 – Результаты измерения температуры сложной поверхности ЛА С-80

Анализ измерений и данных графиков (рисунки А.3 и А.4) подтверждает различие значений температуры поверхности от угла наблюдения относительно её вектора нормали, а также возможность определения температуры сложных поверхностей на основе предложенной методики с использованием поляризационных термограмм.

В конечном итоге, результаты экспериментального измерения температуры сложной поверхности ЛА С-80 по предложенной методике показали хорошую сходимость с результатами, которые были получены измерением аттестованными измерительными приборами.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

Поляризационные тепловизионные изображения носовой части
самолета С-80.

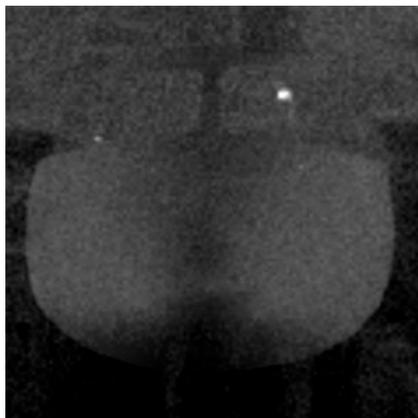
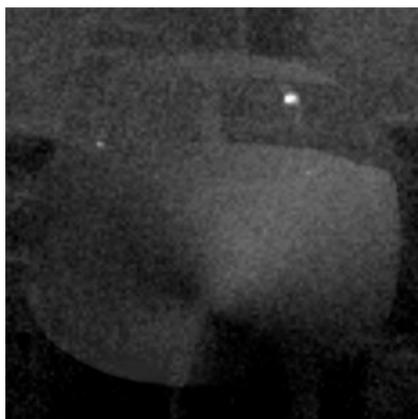
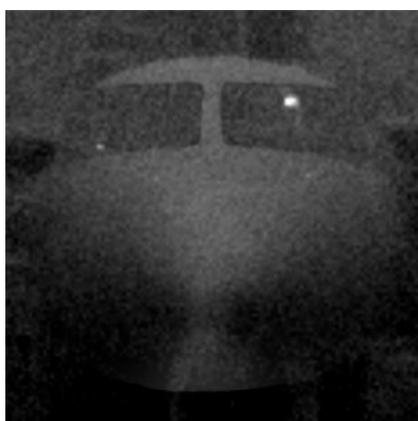
а) $t_{\Pi}=0^{\circ}$ б) $t_{\Pi}=45^{\circ}$ в) $t_{\Pi}=90^{\circ}$

Рисунок Б.1 – Поляризационные тепловые изображения самолета С-80

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

**Акт использования результатов работы
(ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»)**

**Федеральное государственное унитарное предприятие
«Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина»
(ФГУП «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»)**

Ползунова ул., д. 21, г. Новосибирск, 630051
Тел. (383) 279-01-56
Факс (383) 227-88-77
E-mail: sibnia@sibnia.ru, http://www.sibnia.ru

ОКПО 07541511, ОГРН 1025400530836, ИНН/КПП 5401101598/540101001
р/с 40502810944080100010 в Сибирском банке СБ РФ г. Новосибирск
к/с 30101810500000000641
БИК 045004641

№ _____

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Научный руководитель института,
доктор технических наук, профессор
_____ А.Н. Серьезнов
06 _____ 2013

**АКТ****использования результатов научно-исследовательской работы**

Результаты исследования «Разработка и исследование оптико-электронных методов определения трехмерной формы объектов», автор Фесько Юрий Александрович, выполненные на кафедре наносистем и оптотехники ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия» в рамках НИР № г.р. 01200954352 используются в отделении НИО-2 при:

- статических и ресурсных испытаниях авиационных конструкций;
- экспериментальных исследованиях тепловых процессов поверхности летательных аппаратов.

Начальник отделения прочности

А.Г. Каргапольцев

Акт использования результатов работы (ФГБОУ ВПО «СГГА»)

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе СГГА
н., профессор

 Ащеулов В.А.

« 03 » 2013 г.

АКТ

использования результатов НИР в учебном процессе

Результаты: Разработка математической модели и методов для дистанционного определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм, метода определения формы на основе регистрации яркости отраженного излучения объектов, установка для получения поляризационных термограмм с базисными азимутами поляризации, автор Фесько Юрий Александрович.

Выполнены в рамках научно-исследовательской работы «Исследование и разработка физико-математических и информационных основ поляризационного тепловидения и синтеза объемных тепловизионных изображений» № г.р. 01200954352 на кафедре «Наносистемы и оптотехника» ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия»

Результаты полученных исследований использованы в учебном процессе на основании рекомендаций кафедры «Наносистемы и оптотехника» и решения совета Института оптики и оптических технологий, а именно:

- в лекционных и практических курсах по дисциплинам «Системы оптотехники» и «Теория и расчет оптико-электронных приборов» по направлению 200400 – «Оптотехника» и специальности 200203 – «Оптико-электронные приборы и системы»;
- в курсовом и дипломном проектировании по направлению 200400 – «Оптотехника».

Заведующий кафедрой НиО к.т.н., доцент		Д.В. Чесноков
Директор ИОиОТ к.т.н., профессор		О.К. Ушаков
Начальник учебного управления Академии, к.т.н., профессор		С.М. Горбенко

Акт использования результатов работы (ОАО «ПО «НПЗ»)



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ
«НОВОСИБИРСКИЙ
ПРИБОРОСТРОИТЕЛЬНЫЙ
ЗАВОД»
(ОАО «ПО «НПЗ»)

УТВЕРЖДАЮ

Зак. и.о. главного инженера
А.А. Дейснер
2013г.



АКТ

использования результатов научно-исследовательской работы

Результаты: "Метод измерения трехмерных координат поверхности объектов", автор Фесько Юрий Александрович, выполненные на кафедре наносистем и оплотехники ФГБОУ ВПО «СГГА» в рамках НИР № ГР 01200954352 используются в отделе главного метролога при сравнительном анализе работы контрольно-испытательного оборудования.

Главный метролог

А.Г. Щербинин