

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»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

Работа выполнена в
Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Сибирская государственная геодезическая академия».

Научный руководитель – кандидат технических наук, профессор
Тымкул Василий Михайлович.

Официальные оппоненты: Нежевенко Евгений Семенович,
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, Институт автоматки и электрометрии
СО РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории
информационной оптики.

Кремис Игорь Иванович,
кандидат технических наук,
Новосибирский филиал ИФП СО РАН «КТИ ПМ»,
заведующий отделом прикладной оптико-
электронной техники.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учре-
ждение науки «Конструкторско-технологический
институт научного приборостроения» СО РАН,
г. Новосибирск.

Защита состоится « 06 » мая 2014 г. в 14:00 час. на заседании диссертаци-
онного совета Д.212.173.08 при Новосибирском государственном техническом
университете по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского госу-
дарственного технического университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Вихман Виктория Викторовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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. 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. 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 характеристик 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»).

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 «СПбГУАП»).

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

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

6. Методы получения и анализа стереоизображений.

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

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику и схему оптического устройства неконтактного определения формы трехмерных 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 поверхности;
- исследовать влияние оптических свойств материалов и погрешность определения формы объекта.

Объект и предмет исследования. Объектом настоящего исследования являются тепловизионные приборы и оптические системы наблюдения, 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 раздельном освещении 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 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 изобретения.

- 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.

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, 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 определять трехмерную форму объектов;

- предложенный метод определения трехмерной формы объектов на основе обработки поляризационных термограмм с базисными азимутами поляриза-

ции, 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 может быть практически использован в лазерно-тепловизионных системах наблюдения (патент РФ на изобретение № 2491503);

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

Материалы диссертационной работы внедрены в ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», в отдел главного метролога ОАО «ПО «НПЗ» и в учебный процесс на кафедре наносистем и оптоэлектроники ФГБОУ ВПО «СГГА», по дисциплинам «Теория и расчет ОЭП» и «Системы оптоэлектроники» направления 200400 – «Оптоэлектроника».

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 двенадцать научных работ, из них три статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях по списку 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» и один материал доклада в сборнике докладов 21-й 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 оптоэлектроники ФГБОУ ВПО «СГГА», научно-технических советах Института оптики и оптических технологий 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.).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников, включающего 56 наименований, и трех приложений. Общий объем работы составляет 167 страниц. Работа содержит 67 рисунков и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы ее цели и задачи, методы исследования, научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор современных методов и способов определения трехмерной формы поверхности объектов, направленных на решение задачи дистанционного получения информации о форме объектов, дан анализ 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 и воспроизведение трехмерной формы поверхности удаленного объекта, приведены достоинства и анализ недостатков. На основе анализа научно-технической и патентной литературы сделан 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. Следует отметить, что в тепловых изображениях поверхности объектов, формирующихся за счет собственного ИК излучения, отсутствуют изображения теней и полутеней, которые в видимом диапазоне содействуют, в некоторой степени, визуальному восприятию рельефа поверхности. Для раскрытия указанной неоднозначности в разделе предлагается исследовать и анализировать поляризационные термограммы, в основу формирования, которых используются поляризационные свойства собственного излучения поверхности объектов.

Выводы, сформулированные в главе, определяют цели и задачи работы и подтверждают ее актуальность.

Во второй главе вначале рассмотрены одна из основных проблем тепловидения и принципы формирования сигналов в тепловизионных приборах и системах, работающих как в неполяризованном, так и в поляризованном излучении.

Сигналы в тепловизионных системах, работающих с использованием неполяризованного излучения, формируются следующим образом.

В представлении физической оптики и для линейных тепловизионных систем получено следующее выражение для сигнала U элемента изображения с координатами (x', y') :

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

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

$$\frac{W(\lambda, T; x', y')}{\pi} = \frac{1}{\pi A} \iint_{(\nu, \mu)} W(\lambda, T; \nu, \mu) h(\nu, \mu) \exp[+j2\pi(\nu x' + \mu y')] d\nu d\mu, \quad (2)$$

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' .

При этом, распределение яркости по поверхности объекта представляется в виде:

$$\pi^{-1}W(\lambda, T; x, y) = \pi^{-1}\varepsilon(\lambda, T; x, y)\varepsilon(\psi)W^\circ(\lambda, T), \quad (3)$$

где $W^\circ(\lambda, T)$ – функция Планка для светимости абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой T ; $\varepsilon(\lambda, T; x, y)$ – функция распределения спектрального коэффициента излучения элемента поверхности объекта; $\varepsilon(\psi)$ – индикатриса коэффициента излучения элемента dA поверхности объекта.

В целом, необходимо подчеркнуть, что формулы (1)-(3) являются физико-математической основой как анализа сигналов тепловизионных изображений, так и их моделирования.

Оптико-физическое обоснование метода определения трехмерной формы объектов на основе поляризационных термограмм с азимутами 45° и 90° заключается в следующем.

Допустим, что тепловизионной системой наблюдаются объекты 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 dA' .

Для описания поляризационных свойств теплового излучения объекта воспользуемся понятием вектор-параметра Стокса оптического излучения, а процессы преобразования его оптическими элементами тепловизора и средами – матрицей преобразования Мюллера.

Так, вектор-параметр Стокса потока теплового излучения реального объекта в общем случае имеет вид:

$$\Phi_j = \Phi \begin{bmatrix} 1 \\ P \cos 2t \cos 2\gamma \\ P \cos 2\gamma \sin 2t \\ P \sin 2\gamma \end{bmatrix}, \quad (4)$$

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

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

$$L_i^{(k)} = \sum_{j=1}^4 \tau_{ij}^{(k)} L_j(\lambda, P, T, t, \gamma), \quad (5)$$

где L_j – вектор-параметр Стокса энергетической яркости теплового излучения объекта; $\tau_{ij}^{(k)}$ – матрица пропускания линейного поляризационного фильтра, которая в общем виде равна:

$$\tau_{ij}^{(k)} = \tau_{\Pi} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2t_{\Pi} & \sin 2t_{\Pi} & 0 \\ \cos 2t_{\Pi} & \cos^2 2t_{\Pi} & \cos 2t_{\Pi} \sin 2t_{\Pi} & 0 \\ \sin 2t_{\Pi} & \cos 2t_{\Pi} \sin 2t_{\Pi} & \sin^2 2t_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

τ_{Π} – 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 $t_{\Pi} = 90^\circ$.

В конечном виде нормированные видеосигналы двух поляризационных тепловых изображений, формируемых поляризованным тепловым излучением поверхности объектов с учетом степени эллиптичности поляризации для сигналов при азимутах поляризации 45° и 90° имеют вид:

$$\begin{cases} U_1^{(H)} = 1 + P \cdot \sin 2t \cdot \cos 2\gamma; \\ U_2^{(H)} = 1 - P \cdot \cos 2\gamma \cdot \cos 2t. \end{cases} \quad (7)$$

Так как между степенью поляризации P и степенью эллиптичности $\text{tg}\gamma$ поляризации имеется функциональная связь:

$$P = (1 - \text{tg}\gamma) / (1 + \text{tg}\gamma), \quad (8)$$

то, на основании решения системы уравнений (7), получена зависимость P от U_1 и U_2 :

$$P = \sqrt{\frac{U_1^{(H)} - 1}{2 \sin[\arctg(U_1^{(H)} - 1) / (1 - U_2^{(H)})] - (U_1^{(H)} - 1)}}. \quad (9)$$

В данной работе теоретически и экспериментально установлена следующая связь между индикатрисой степени поляризации $P(\psi)$ собственного теплового излучения элементов объектов и углом их ориентации по направлению наблюдения:

$$P(\psi) = a(1 - \cos \psi). \quad (10)$$

Тогда на основании (9) и (10), получена следующая функциональная связь угла ориентации элементов поверхности объектов с величинами видеосигналов $U^{(H)}_1$ и $U^{(H)}_2$ двух поляризационных термограмм с азимутами поляризации, равными 45° и 90° :

$$\psi = \arccos \left[1 - a^{-1} \cdot \sqrt{\frac{U_1^{(H)} - 1}{2 \sin \left[\arctg \left(\frac{U_1^{(H)} - 1}{1 - U_2^{(H)}} \right) \right] - (U_1^{(H)} - 1)}} \right], \quad (11)$$

а задача определения трехмерной формы (координаты глубины изображения) данного метода решается следующими выражениями:

$$x(N, K) = x(N - 1, K) + \Delta y(N, K) \operatorname{tg} \psi(N, K); \quad (z = \text{const}); \quad (12)$$

$$x(N, K) = x(N, K - 1) + \Delta z(N, K) \operatorname{tg} \psi(N, K); \quad (y = \text{const}), \quad (13)$$

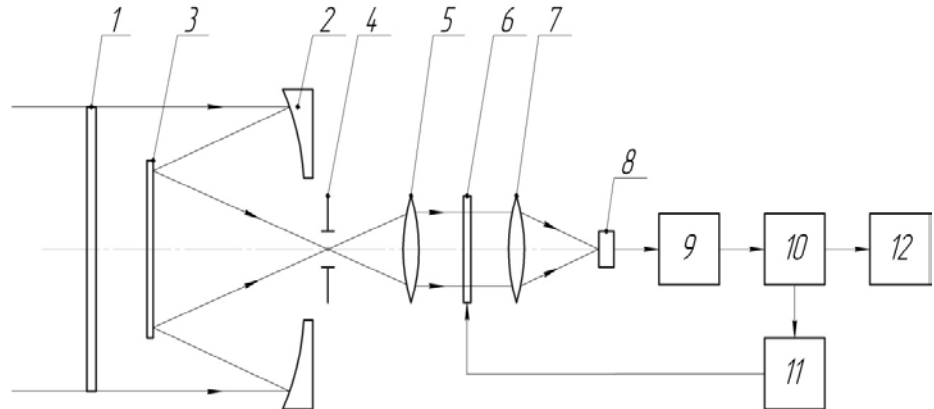
где x, y, z – декартовы координаты точек на поверхности объекта; N, K – номер строки и элемента строки тепловизионного кадра; $U^{(H)}_1, U^{(H)}_2$ – величины видеосигналов двух поляризационных тепловизионных изображений с азимутами поляризации 45° и 90° соответственно; a – постоянная, характеризующая материал и шероховатость поверхности объекта.

На рисунке 1 изображена схема устройства для реализации предлагаемого метода тепловизионного определения трехмерной формы объектов.

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

Способ 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 7 и попадает на приемник излучения 8.

Если азимут поляризатора $t_{\text{п}}$ равен $t_{\text{п}}=45^\circ$, то на выходе приемника 8 формируется $N \times K$ сигналов $U_1(N, K)$. При азимуте поляризатора $t_{\text{п}}=90^\circ$, аналогично формируются сигналы $U_2(N, K)$ от всех элементов $N \times K$ раз-



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 1 – Функциональная схема тепловизионного устройства для определения трехмерной формы объектов на основе двух базисных поляризационных термограмм

Рисунок 1 – Функциональная схема тепловизионного устройства для определения трехмерной формы объектов на основе двух базисных поляризационных термограмм. 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° .

Дальнейшее развитие методов и способов тепловизионного определения объемной формы объектов 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 обстановки, выделяют её мобильные качества и расширяют область применимости и поле решаемых задач. В связи с этим в этой же главе рассматривается разработанный дистанционный метод определения трехмерной формы объектов, который позволяет решить эту задачу по одному тепловизионному изображению, полученному с использованием поляризационного комбинированного фильтра, состоящего из последовательно расположенных ахроматической четвертьволновой пластинки и линейного поляризатора.

В этом методе связь угла ориентации локальных элементов поверхности объекта через видеосигналы U_n этих элементов имеет вид:

$$\psi = \arccos \left\{ -\frac{2}{3a} \sqrt{\left[18(1-U_H) + (1-U_H)^3 \right]^2 - \left[(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1 \right]^2} \times \right. \\ \left. \times \cos \left[\frac{1}{3} \arctg \frac{(1-U_H)^4 + 11(1-U_H) - 1}{18(1-U_H) + (1-U_H)^3} \right] + \frac{1-U_H}{3a} \right\}. (14)$$

Технические решения данного метода защищены двумя патентами РФ на изобретения.

Работа устройства заключается в следующем (рисунок 2): тепловое излучение исследуемого объекта 1 проходит инфракрасный поляризационный фильтр 2, который представляет собой последовательно расположенные ахроматическую четвертьволновую пластину с углом ориентации «быстрой» оси $\alpha=45^\circ$ 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, с помощью программного обеспечения 9 производится обработка и вычисление декартовых координат всех $N \times K$ элементарных площадок на поверхности наблюдаемого объекта. При этом две из трёх декартовых координат 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(передачи) информации 10.

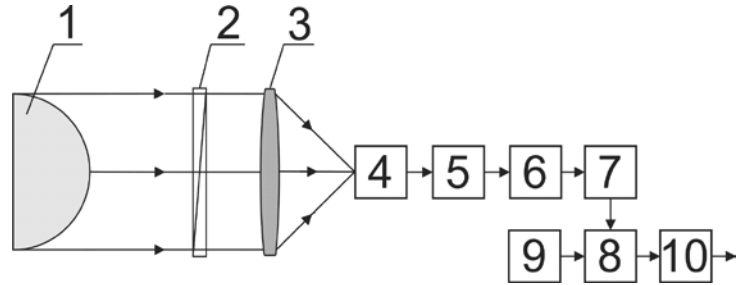


Рисунок 2 – Функциональная схема устройства для определения трехмерной формы объектов на основе комбинированного поляризационного фильтра

В этой главе также рассмотрен метод определения трехмерной формы объекта на основе измерения яркости отраженного элементами поверхности объекта оптического излучения при раздельном освещении с двух направлений. Суть предлагаемого метода определения трехмерной формы объектов, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим покрытием, следующая. Согласно рисунку 3 нормаль n произвольного элемента dA поверхности объекта в декартовой системе координат XYZ 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 r_0 , а направление, из которого визируется этот элемент,

В этой главе также рассмотрен метод определения трехмерной формы объекта на основе измерения яркости отраженного элементами поверхности объекта оптического излучения при раздельном освещении с двух направлений.

Суть предлагаемого метода определения трехмерной формы объектов, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим покрытием, следующая.

Согласно рисунку 3 нормаль n произвольного элемента dA поверхности объекта в декартовой системе координат XYZ 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 r_0 , а направление, из которого визируется этот элемент,

вектором \mathbf{r}_n . Сферические координаты этих направлений соответственно равны (Θ_o, φ_o) и (Θ_n, φ_n) . Нами используется освещение из двух направлений $\vec{r}_{o1} = \vec{i}$; $\vec{r}_{o2} = \vec{j}$, а наблюдение из одного направления: $\vec{r}_{n1} = \vec{r}_{n2} = \vec{i}$.

Для обоих вариантов освещения и наблюдения элемента dA , величины нормированных сигналов U_1 и U_2 пропорциональны их яркости отраженного излучения и равны:

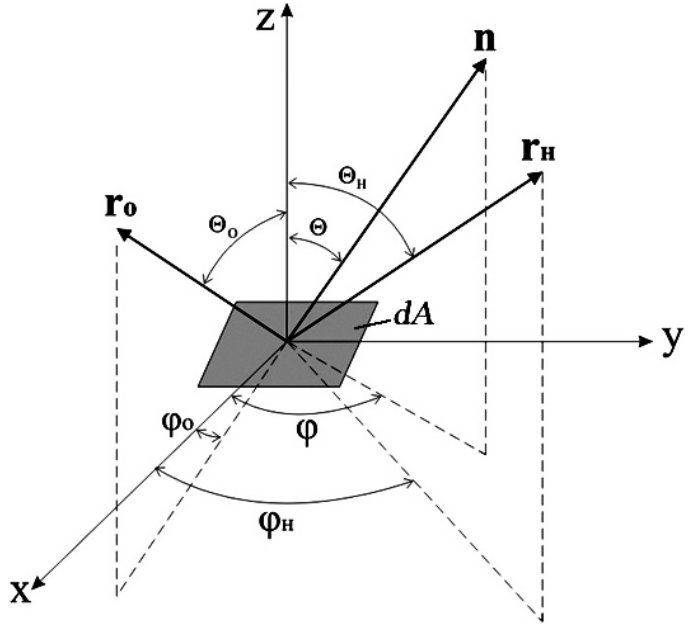


Рисунок 3 – Наблюдение элемента dA в декартовой системе координат

$$U_1 = U'_1 / \beta_o (E / \pi) A_{\text{вх}} \omega S = \sin \Theta \cos \varphi; \quad (15)$$

$$U_2 = U'_2 / \beta_o (E / \pi) A_{\text{вх}} \omega S = \sin \Theta \cos \Theta \left(\cos \Theta \sin \varphi + \sqrt{1 - \sin^2 \Theta \cos^2 \varphi} \right), \quad (16)$$

где U'_1 и U'_2 – абсолютные значения видеосигналов в изображении элемента dA поверхности объекта при освещении соответственно с направления оси OX и OY и наблюдения с направления оси OX ; β_o – коэффициент яркости отраженного излучения элемента dA в направлении зеркального отражения; E – освещенность элемента dA ; $A_{\text{вх}}$ и ω – площадь входного зрачка и телесный угол поля зрения измерительной системы; S – интегральная чувствительность приемника излучения измерительной системы.

На основании решения системы уравнений (15)-(16) получены значения сферических углов Θ и φ , которые определяют ориентацию нормалей элементов поверхности объекта в пространстве:

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\left[\sqrt{(2U_1U_2 - U_1^2 - 1)^2 - 4(U_1 - U_2)^2} - (2U_1U_2 - U_1^2 - 1) \right]}{\sqrt{4 - \left[\sqrt{(2U_1U_2 - U_1^2 - 1)^2 - 4(U_1 - U_2)^2} - (2U_1U_2 - U_1^2 - 1) \right]^2}}; \quad (17)$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sqrt{\left[\sqrt{(2U_1U_2 - U_1^2 - 1) - 4(U_1 - U_2)^2} - (2U_1U_2 - U_1^2 - 1) \right]^2 - 4U_1^2}}{2U_1}. \quad (18)$$

В конечном итоге, координаты y и z элементов наблюдаемой поверхности объекта определяются по двумерной картине объекта в плоскости изображения YOZ с учетом масштаба изображения, а третья координата x внутри контура изображения определяется выражениями, аналогичными формулам (12) и (13).

В третьей главе развита математическая модель формирования поляризационных тепловизионных изображений выпуклых объектов с произвольными азимутами поляризации.

Как отмечалось раньше, при наблюдении изотермических 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. Подробную иллюстрацию методики моделирования поляризационных тепловизионных изображений, которые содержат информацию об их форме внутри контура приведем для сферы, как наиболее наглядном и симметричном объекте.

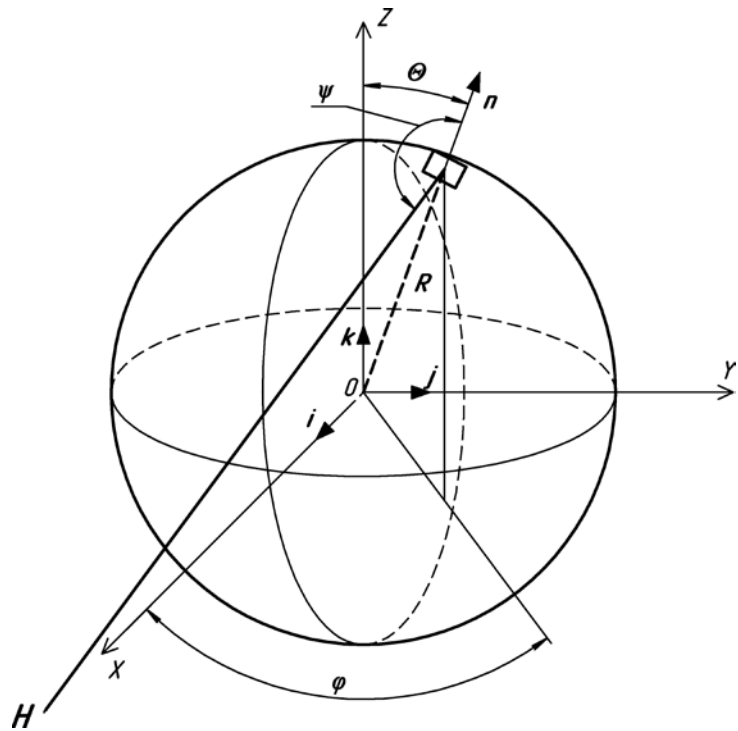


Рисунок 4 – Геометрия наблюдения тепловизионной системой объекта в виде сферы

Рисунок 4, на котором приняты следующие обозначения: $OXYZ$ – декартова система 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 , демонстрирует геометрию наблюдения элементарной площадки поверхности объекта.

На основе математической модели формирования поляризационных тепловизионных изображений объектов с заданной формой, получены теоретические поляризационные термограммы сферы, конуса и диска с азимутами поляризации $t_{\Pi}=0^{\circ}, 45^{\circ}, 90^{\circ}$ и 135° (ПТИ). На рисунке 6 приведены ПТИ сферы, конуса и плоского диска для азимута $t_{\Pi}=0^{\circ}$.

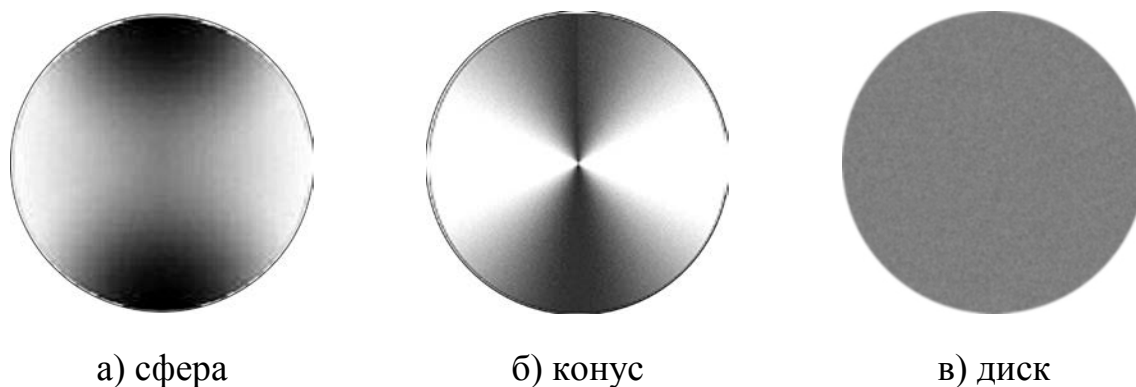
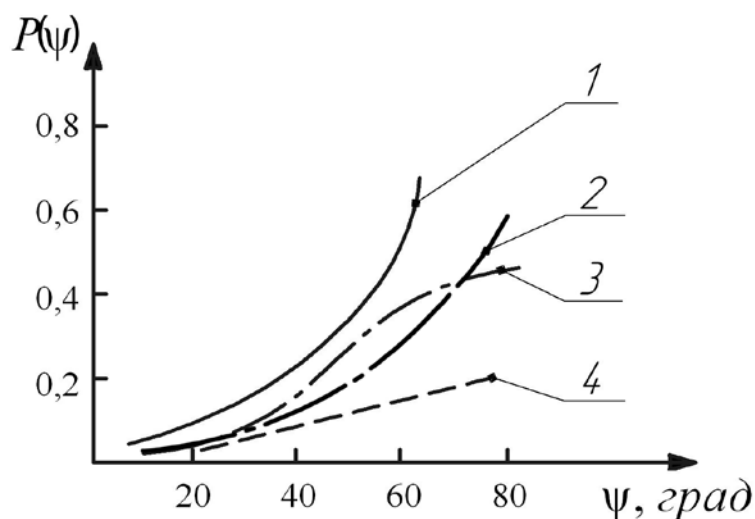


Рисунок 5 – Результаты эксперимента по математическому моделированию поляризационных термограмм объектов с азимутом поляризации $t_{\text{п}}=0^\circ$

В этой главе приведены также 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. На рисунке 6 представлены индикатрисы степени поляризации по экспериментальным данным для стали, дюралюминия и пластика, полученные Болотиным Г.А. и др. и приведенные в монографии «Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов», авторы Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А., Филлипов В.Л. – г. Казань : ФНПЦ НПО ГИПО, 2006. – 594 с. Приведенные данные показывают, как наличие существенной степени поляризации собственного излучения металлических конструкционных материалов, так и ее отличие по сравнению с таковой у диэлектриков.



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 6 – Индикатрисы степени поляризации собственного теплового излучения по данным экспериментальных исследований

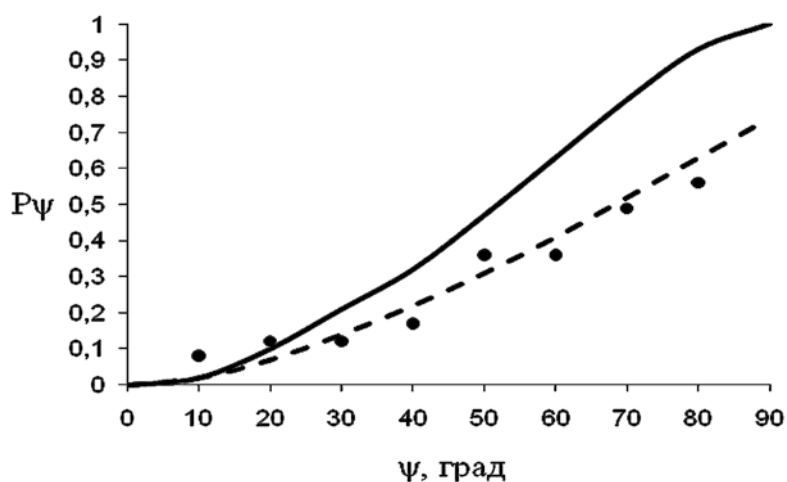
Результаты экспериментальных исследований, в ходе выполнения диссертационного исследования, индикатрисы степени поляризации $P_\psi=f(\psi)$ для дюралюминия в области спектра $\Delta\lambda = 2\div 6$ мкм приведены на рисунке 7, а на рисунке 8 приведены результаты расчетных исследований влияния материала поверхности объекта на значение степени поляризации при изменении угла наблюдения площадки для ряда металлических объектов с гладкой поверхностью.

Методика расчета индикатрисы степени поляризации собственного излучения поверхности непрозрачных материалов с комплексным показателем преломления $\tilde{n}=n+ik$ основана на теории Френеля и представляется следующим соотношением:

$$P(\psi) = P_\psi \eta = \frac{(\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})}{(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})} \eta = \frac{\eta(n^2 + k^2 - 1) \sin \psi}{(n^2 + k^2 + 1)(1 + \cos^2 \psi) + 4n \cdot \cos \psi}, \quad (19)$$

где n и k – оптические постоянные материала; ε_{\parallel} и ε_{\perp} – параллельная и перпендикулярная компонента френелевского коэффициента излучения материала поверхности; 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 гладкой поверхности материала объекта при угле ψ , которое определяется по формулам Френеля (при $(n^2+k^2)\gg 1$).

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований показывает, что тип материала из которого выполнен исследуемый объект, оказывает определенное влияние на поляризационные тепловизионные изображения. Также показано, что степень поляризации собственного теплового излучения металлов, сплавов и конструкционных материалов стабильна



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

Рисунок 7 – Индикатриса степени поляризации собственного теплового излучения дюралюминия по данным экспериментальных исследований и результаты ее расчетной аппроксимации

при изменении температуры объекта и слабо зависит от длины волны λ в диапазоне $2 \div 10$ 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 признаками при выделении этих объектов на слабо поляризованных естественных фонах.

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

Функциональная схема экспериментального макета установки получения поляризационных тепловизионных изображений приведена на рисунке 9, а фотографии его внешнего вида приведены на рисунке 10. Он состоит из оптической скамьи ОСК-2 (1), тепловизионной камеры FLIR InfraCam (США) (2), инфракрасного поляризатора (3) с возможностью вращения вокруг 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, полу-

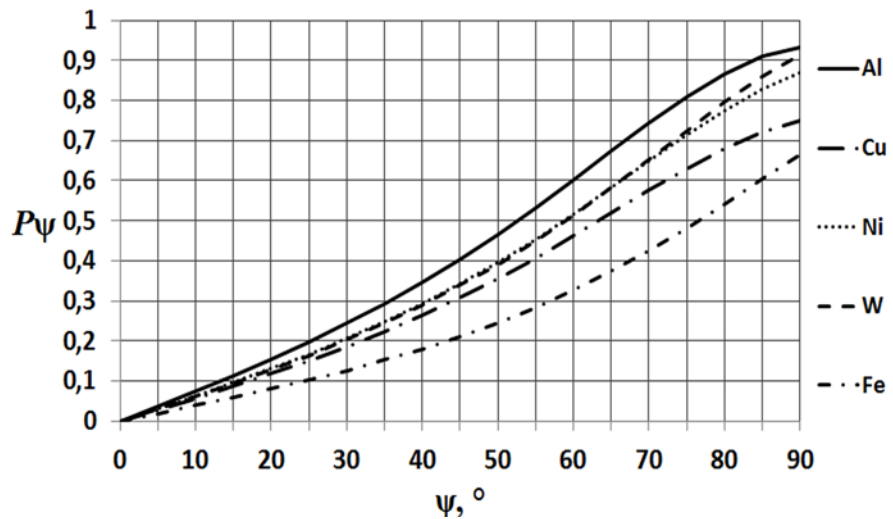


Рисунок 8 – Результаты теоретических исследований степени поляризации собственного излучения P_ψ от угла ψ для ряда металлических поверхностей

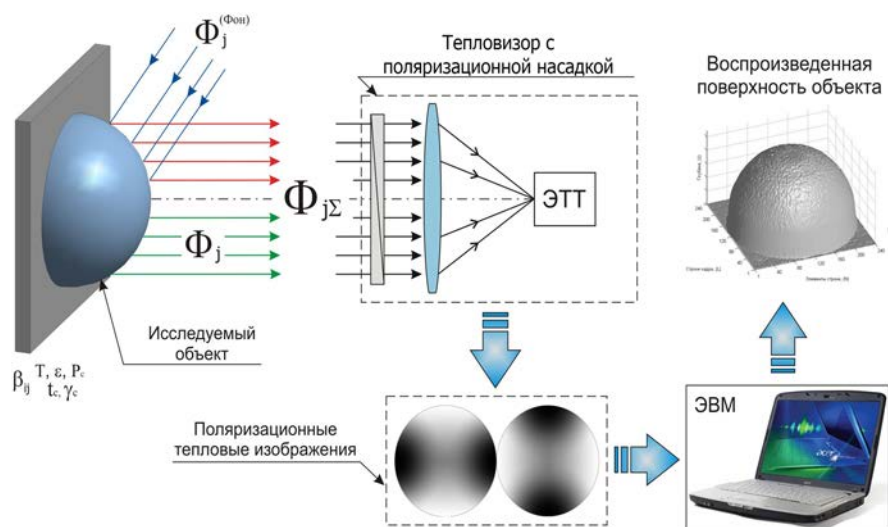


Рисунок 9 – Функциональная схема стенда получения поляризационных тепловизионных изображений

ченную путем формирования на полиэтиленовой подложке штрихов треугольного профиля с последующим нанесением на одну из граней штриха металлического покрытия.

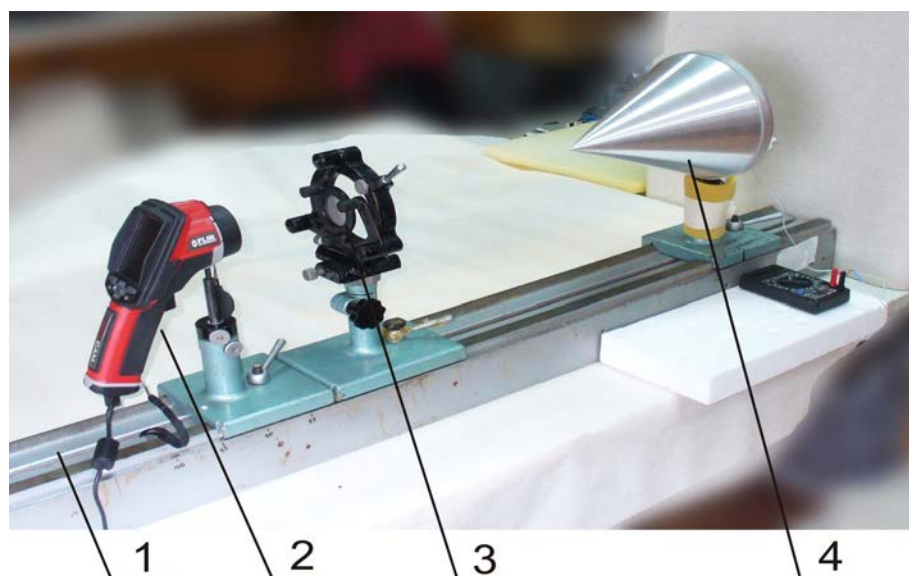


Рисунок 10 – Стенд для получения поляризационных тепловизионных изображений объектов

Технические характеристики тепловизионной камеры и инфракрасного поляризатора приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики тепловизионной камеры и ИК-поляризатора

Тепловизионная камера InfraCam		ИК-поляризатор (ФНПЦ «ГИПО»)	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Спектральный диапазон, мкм	7,5-13	Подложка	Полиэтилен
Тип ФПУ, формат	Микро-болومتر, 120x120	Спектральная область пропускания, мкм	7-100
Поле зрения	25°x18°	Количество штрихов на 1 мм	1200
Пороговая температурная чувствительность (Разность температур, эквивалентная шуму $\Delta T_{пор}$), К	0,2	Степень поляризации при $\lambda=8,3$ мкм, %	99
Передача изображения на ЭВМ, интерфейс	USB		
Диапазон измеряемых температур	-10÷350 °С		

На рисунке 11 приведены экспериментально полученные поляризационные тепловизионные изображения конуса, выполненного из дюралюминия при наблюдении вдоль его оси симметрии. Для примера на рисунках 12 и 13 приве-

дены значения яркости вдоль линии сканирования поляризационной термограммы конуса с азимутом поляризации $t_{\Pi}=0^{\circ}$, графики, которых приведены на рисунке 12, для линии сканирования вдоль горизонтальной (б) и вертикальной (а) линий соответственно, а на рисунке 13, для линий правой (д) и левой (г) диагоналей.

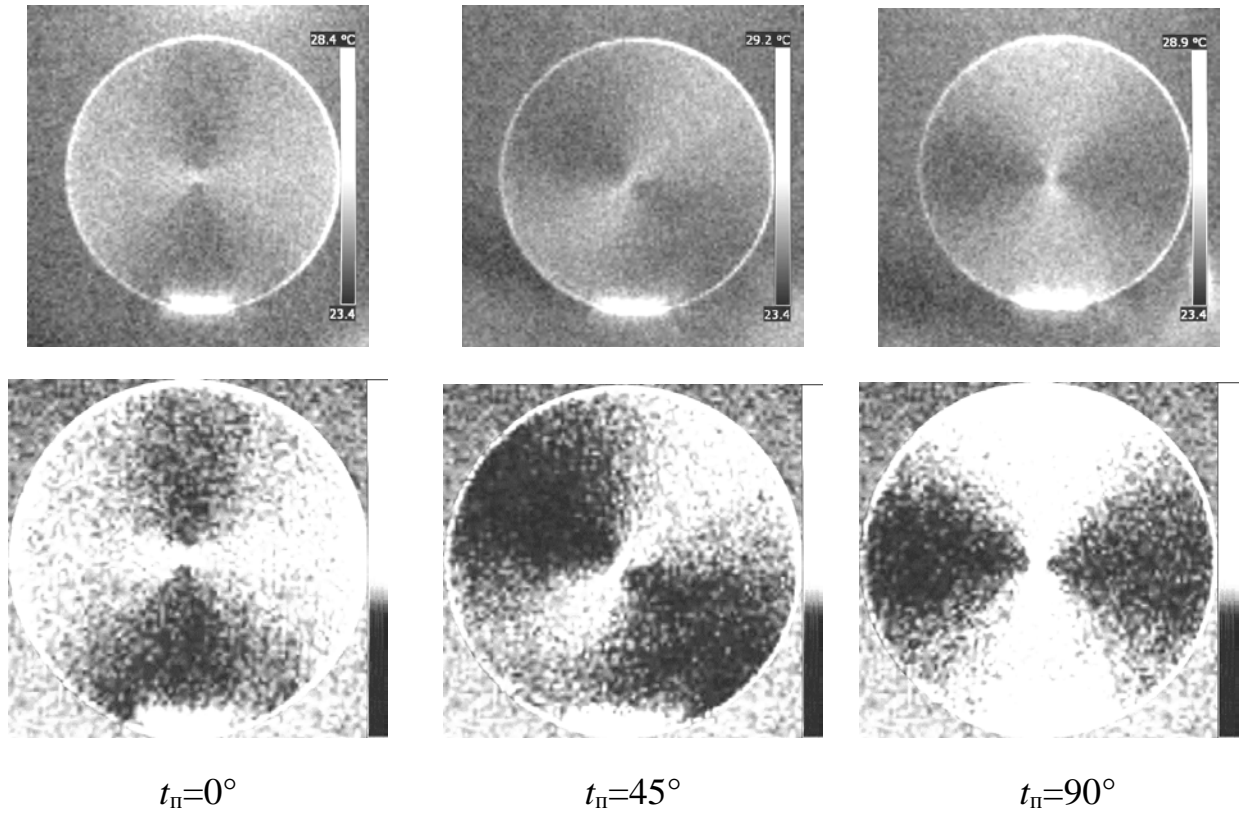


Рисунок 11 – Экспериментальные поляризационные тепловизионные изображения конуса

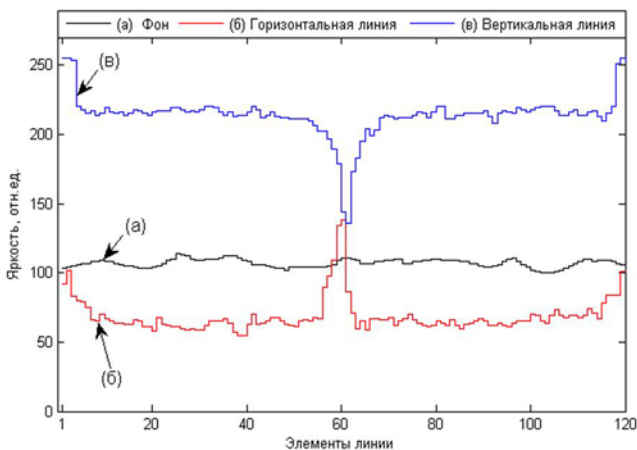


Рисунок 12 – Распределение яркости вдоль вертикальной и горизонтальной линий ПТИ конуса

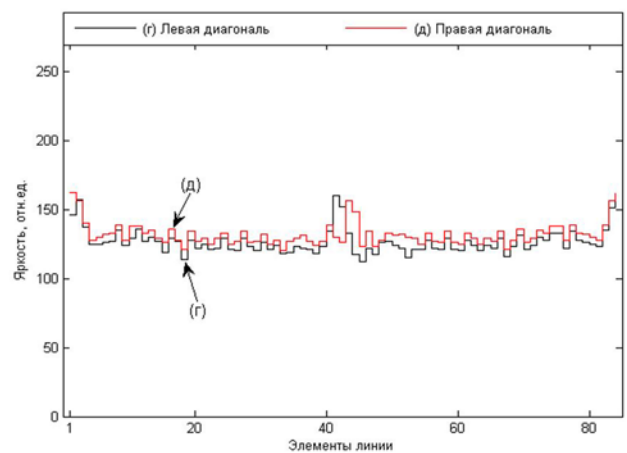


Рисунок 13 – Распределение яркости вдоль диагоналей ПТИ конуса

Для количественного анализа в этой главе также 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° .

Схема алгоритма обработки ПТИ и построения трехмерной формы поверхности объектов приведена на рисунке 14. На данной схеме в блоке 1 выполняется формирование массивов данных, кодирование ПТИ, определение размеров изображения и загрузка информации о контуре объекта. В блоках 2 и 3 на основе предварительно полученной информации самих ПТИ объектов выполняются расчет степени поляризации P и угол ориентации ψ элементарных площадок. Различие блоков 2 и 3 заключается в том, что расчет данных, необходимых для построения трехмерного изображения в блоке 2, выполняется по строкам, а в блоке 3 по столбцам. В блоке 4 производится обработка данных о степени поляризации собственного излучения P и угле ориентации ψ для всех элементов $N \times K$ поверхности объекта. Также в этом блоке реализуется формирование трехмерного изображения поверхности объекта с использованием соотношений (12) и (13). Для определения знака угла ψ в блоках 2 и 3 данной схемы алгоритма расчет угла ψ выполняется как по формуле (10), так и по формуле:

$$\psi = \arcsin \sqrt{2P(\psi)/(P(\psi) + \eta)}, \quad (20)$$

где $\eta = a$, и при условии их равенства между собой, выбирается в конечном счете истинное значение угла ψ .

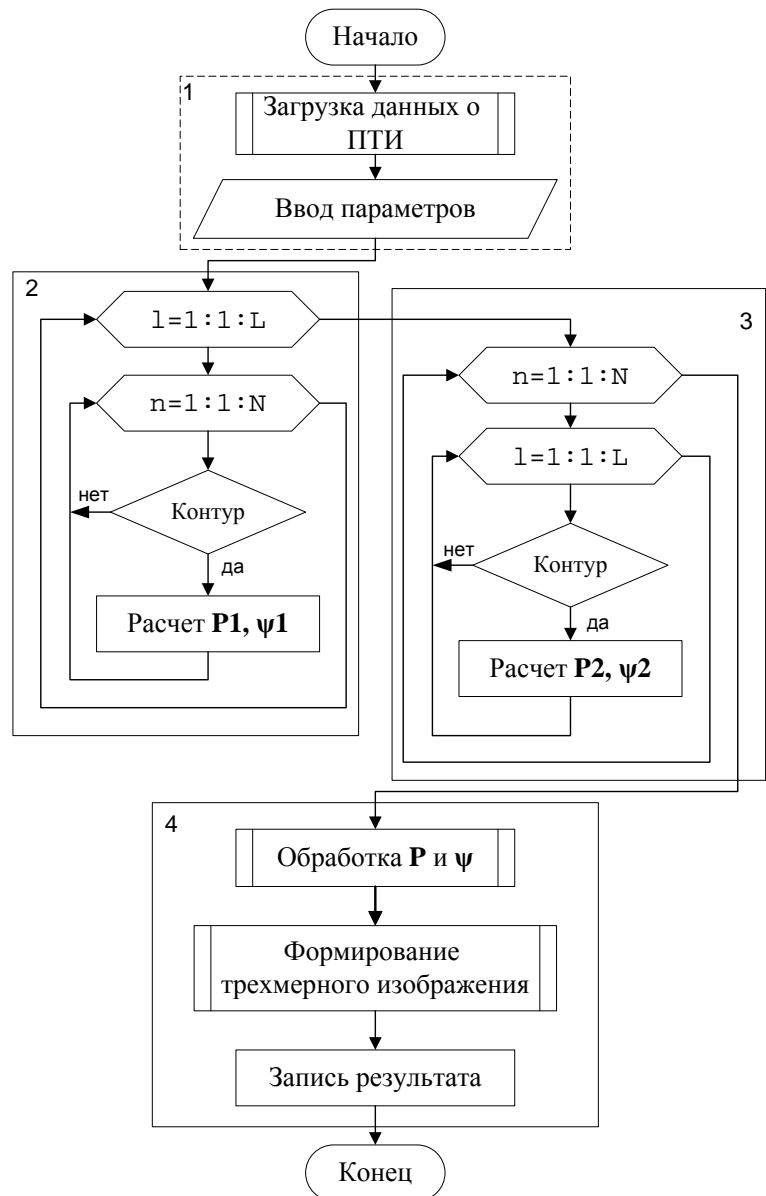


Рисунок 14 – Схема алгоритма обработки ПТИ и построения трехмерной формы объектов

Результаты эксперимента по воспроизведению трехмерной поверхности объектов на основе математических моделей и экспериментальных поляризационных термограмм приведены на рисунках 15 и 16.

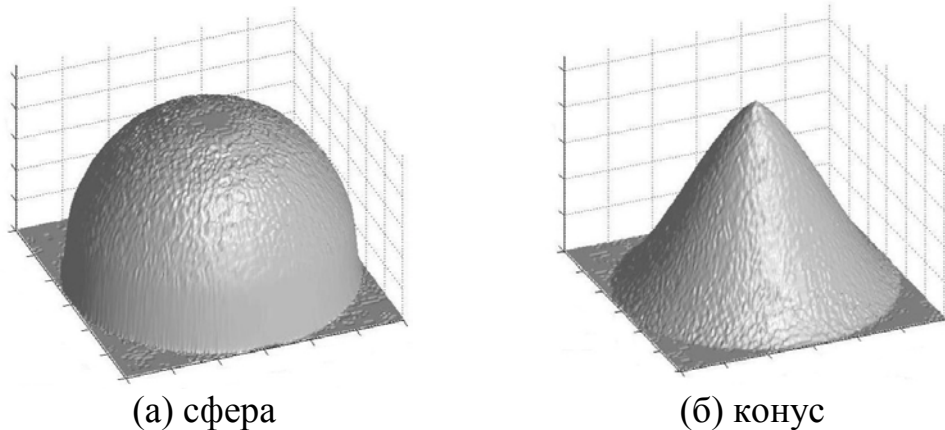


Рисунок 15 – Математические модели трехмерной формы объектов, полученные по результатам обработки теоретических поляризационных термограмм

На рисунке 16 представлены результаты воспроизведения трехмерной поверхности конуса, полученные на основе экспериментальных поляризационных термограмм (рисунок 16а) и после обработки медианным фильтром (рисунок 16б). 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.

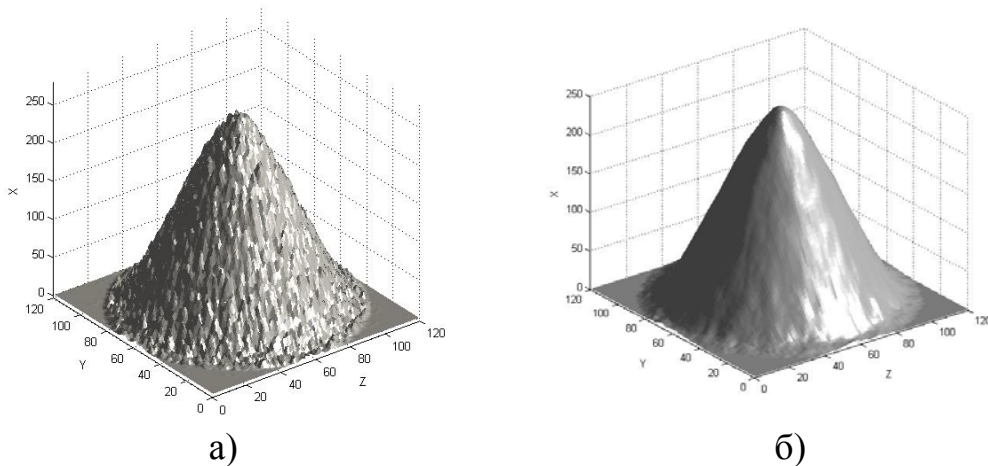


Рисунок 16 – Результаты определения трехмерной формы конуса по данным обработки экспериментальных поляризационных термограмм

Для оценки достоверности полученных данных приведена методика и получены результаты исследования 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 (см. рисунок 17).

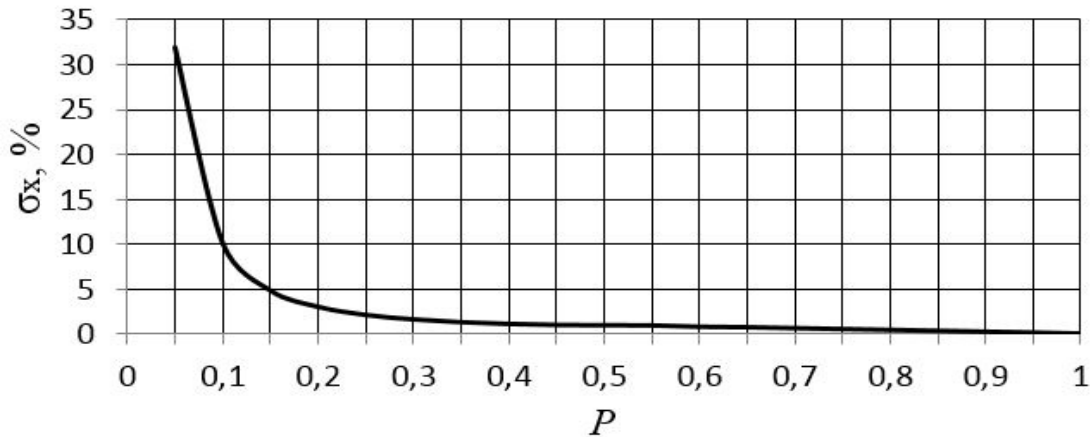


Рисунок 17 – Зависимость погрешности определения координаты x от степени поляризации собственного излучения поверхности объекта

Также в этой главе приведена разработанная методика учета влияния отраженного излучения окружающего фона на поляризационные тепловизионные изображения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

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. Развит и усовершенствован метод определения трехмерной формы объекта на основе регистрации и обработки яркости отраженного излучения поверхностью, как с диффузным, так и с направленно-рассеивающим характером отражения. (Патент 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 ФГУП «СибНИА им.С.А. Чаплыгина», в отдел главного метролога ОАО «Производственное объединение «Новосибирский приборостроительный завод» и в учебном процессе кафедры наносистем и оптотехники ФГБОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия».

Основные положения и практические результаты работы были представлены и обсуждены на научно-технических семинарах кафедры наносистем 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 двенадцать научных работ, из них три статьи в рецензируемых научных изданиях, определенных 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, VII 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 ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, определенных в перечне ВАК Минобрнауки РФ:

1. 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.

2. 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.

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

Патенты РФ на изобретение:

4. 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.

5. Пат. 2469265 Российская Федерация, МПК G01B 11/24. Устройство для бесконтактного измерения линейных размеров трехмерных объектов [Текст] / Тымкул В.М., Фесько Ю.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – № 2011125261/28; заяв. 17.06.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. – 4 с.

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

7. Пат. 2410654 РФ, МПК G01J 5/52. Способ измерения температуры [Текст] / Тымкул В.М., Тымкул Л. В., Фесько Ю.А., Шелковой Д.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «СГГА». – № 2009134008/28; заяв. 10.09.2009; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 5 с.

В изданиях и сборниках трудов российских и международных научно-практических конференций:

8. 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: науч.-технич. журн. / учредитель ГОУ ВПО «СГГА». – Вып. 2(13). – Новосибирск : СГГА, 2010. – С. 74–83.

9. 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 : СГГА. – 2010. – С. 98-103.

10. 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. науч. конгресса «ГЕО-Сибирь-2011». – Новосибирск : СГГА, 2011. – С. 164–168.

11. 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. конф. «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии» сб. материалов Т. 1. – Новосибирск. : СГГА, 2012. – С. 9–13.

12. Фесько, Ю.А. Анализ способов распознавания формы трехмерных объектов на основе поляризационных термограмм [Текст] / Ю.А. Фесько, В.М. Тымкул, О.К. Ушаков // Сборник трудов XXI Междунар. научно-технич. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: ФГУП «НПО Орион», 2010. – С. 100–102.