

На правах рукописи



Бодрова Ирина Валерьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
ДЛЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВО «РГРТУ»).

Научный руководитель: **Миронов Валентин Васильевич**,
доктор физико-математических наук,
профессор, РГРТУ, г. Рязань

Официальные оппоненты: **Меньшиков Валерий Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
первый вице-президент Ассоциации –
генеральный конструктор, Ассоциация
участников Проекта «Международная
аэрокосмическая система глобального
мониторинга и прогнозирования»,
г. Москва

Усовик Игорь Вячеславович,
кандидат технических наук, и.о. началь-
ника лаборатории – научный сотрудник,
Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный научно-
исследовательский институт машино-
строения», г. Королёв

Ведущая организация: Филиал АО «РКЦ Прогресс» – Особое
конструкторское бюро «Спектр»
(ОКБ «Спектр»), г. Рязань.

Защита диссертации состоится 22 июня 2017 г. в 12 часов на засе-
дании диссертационного совета Д 212.211.02 в ФГБОУ ВО
«РГРТУ» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке в ФГБОУ ВО
«Рязанский государственный радиотехнический университет», а
также на сайте ФГБОУ ВО «РГРТУ» www.rsreu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Д.А. Перепелкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Проблема определения с Земли параметров покрытий космических объектов (КО) искусственного и естественного происхождения – актуальная научно-техническая задача. Как правило, параметры (характеристики) покрытий КО, в частности космических аппаратов (КА), определяются фотометрическими методами.

Решение подобных задач, относящихся к обратным задачам фотометрии, имеет важное значение для распознавания и идентификации КО на орбите, в частности космического мусора, для принятия последующих решений по их функционированию. Исследование поляризационных характеристик отраженной электромагнитной волны от КО позволяет получить достаточную информацию о типе, оптических характеристиках, а также о степени изношенности поверхности КО. Оптические методы мониторинга околоземного пространства, наряду с радиолокацией, являются основным инструментом наблюдения за КО, находящимися на околоземных орбитах. Более того, единственным источником информации об орбитальных объектах, расположенных на высотах выше 3-5 тыс. км, остается оптический мониторинг.

Основоположителем математического моделирования процессов переноса и рассеяния поляризованного света является английский математик, механик и физик-теоретик Д. Г. Стокс.

Значительный вклад в разработку математических поляризационных моделей внесли О.Френель, Д. Брюстер, Э.Малюс, Ф.Г. Басс, И.М. Фукс, Р. Азам, Н. Башара, которые описали процесс переноса и отражения светового поляризованного пучка с помощью интегрального уравнения Фредгольма, оператор которого оставляет инвариантным вектор-функцию Стокса.

Советские и российские ученые также внесли существенный вклад в разработку численных методов и алгоритмов для решения задач фотометрии. Следует отметить работы таких ученых, как Г.В. Розенберг, Т.А. Сушкевич, С.А. Ухинов, В.В. Коротаев, Г.Л. Башнина. Разработке математических методов решения задач оптического мониторинга околоземного пространства и их внедрению в астрономическую практику посвящены труды рязанских ученых В.И. Курышева, Е.Е. Артемкина, А.К. Муртазова, В.В. Миронова, А.В. Белошенкова, В.В. Куприянова.

Данная работа является продолжением исследований рязанских ученых и посвящена разработке алгоритмов решения обратных задач фотометрии с использованием поляризационных свойств отраженной световой волны.

Цель диссертационной работы - модернизация математических моделей и разработка алгоритмов для программных комплексов вычисления поляризационных характеристик светового потока и оптических параметров покрытий поверхностей КО по фотометрическим данным, необходимых для улучшения качества контроля и идентификации КО наземными техническими средствами.

Для достижения заданной цели поставлены и решены следующие научно-технические задачи:

- разработка расширенной поляризационной модели представления вектор-функции Стокса и описание поляризационных матриц Мюллера;
- разработка новых алгоритмов и адаптация численного метода определения поляризационных характеристик отраженного светового потока при фотометрии поверхностей космических объектов на основе расширенной модели и анализ адекватности модели;
- реализация алгоритмов и численного метода в виде программного комплекса для решения обратных фотометрических задач при обработке наблюдений за КО наземными техническими средствами.

Научная новизна полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

- разработаны расширенная математическая модель представления вектор-функции Стокса и матриц Мюллера;
- разработан, обоснован и протестирован алгоритм расчета дополнительных поляризационных параметров;
- разработаны оригинальные алгоритм и комплекс взаимосвязанных программ для расчета поляризационных параметров, рассчитанные на использование в наземных средствах контроля КО;
- создан алгоритм решения обратной задачи фотометрии поверхностей КО на основе вероятностных методов распознавания образов.

Соответствие специальности

В работе представлены результаты исследований из трех областей: математического моделирования, численных методов и

комплексов программ. Работа соответствует специальности 05.13.18 по следующим пунктам: п. 2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей; п. 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; п. 5. Комплексные исследования научно-технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Внедрение результатов

Теоретическое и практическое использование результатов диссертации подтверждено актами внедрения в различных организациях космической и технической отраслей (акты приведены в приложении к диссертации):

- 1 Астрономическая обсерватория ФГБОУ ВО «Рязанский государственный университет им. С. А. Есенина», г. Рязань.
- 2 ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань (учебный процесс).
- 3 ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань (НИР).

Методы исследования

Измерения интенсивности отраженного светового потока осуществлялись на основе поляриметрических методов.

Расчет поляризационных параметров проводился методами аналитического моделирования с использованием основных формул оптики, а также численными методами.

Алгоритмы определения параметров покрытий разрабатывались с помощью математических методов распознавания образов, статистических методов, метода аналитического моделирования.

Моделирование и разработка программного комплекса осуществлялись на персональном компьютере в среде Borland Delphi.

Основные положения, выносимые на защиту:

- 1 Разработка расширенной поляризационной модели представления вектора Стокса как функции от азимутального угла, угла эллиптичности и разности фаз между составляющими электрического вектора на основе аналитического моделирования. Составление, описание и исследование свойств поляризационных матриц

рассеяния Мюллера для металлических и диэлектрических отражающих поверхностей КО.

2 Разработка алгоритмов для расчета поляризационных характеристик отраженной световой волны на основе расширенной модели вектор-функции Стокса и матриц Мюллера на основе аналитических и уточненных численных методов. Уточнение диапазона модуляции поляризационных параметров, позволяющее увеличить интенсивность выходящего светового потока на 28 – 36 % по сравнению с известными методами.

3 Разработка алгоритмов определения типа покрытий и оптических параметров покрытий КО на основе математических методов распознавания образов, метода аналитического моделирования и статистического подхода. Точность разработанных алгоритмов, определяемая эмпирическим путем, составляет 98.2 – 99.7 % по отношению к эталонным результатам.

4 Разработка комплекса взаимосвязанных программ для расчета поляризационных характеристик и оптических параметров покрытий КО.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением математического аппарата, согласованностью результатов расчетов, моделирования и экспериментальных исследований, совпадением полученных результатов с известными результатами.

Предлагаемые в работе модели, алгоритмы, процедуры, программы для вычисления поляризационных параметров были апробированы в лабораторных условиях на модифицированной поляризационным блоком оптической установке модуляторного типа.

Для достоверности решения обратных задач фотометрии в работе проведен эксперимент с использованием зашумления сигнала. Для оценки устойчивости решения использовалась дисперсия отклонения точного решения от решения с зашумленным сигналом. Алгоритм вычисления оптических параметров покрытий показал устойчивость к изменению исходных параметров. Погрешность определения расчетного показателя преломления модельного объекта по сравнению с эталонным показателем при 1 %-м зашумленном сигнале составляет 5.64 %, при 10 %-м зашумленном сигнале – 6.32 %.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены на 9 международных научно-технических конференциях (см. список публикаций).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ. Из них: 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 9 тезисов докладов на международных научно-технических конференциях, 2 статьи в прочих изданиях, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично, кроме некоторых специально оговоренных случаев (соавторство работ). Все заимствования известных результатов, полученных другими авторами, оговорены в работе ссылками на оригиналы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и приложения. Общий объем диссертации составляет 229 страниц, в том числе список использованных источников из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показаны актуальность работы и степень разработанности темы, определены цель и задачи исследования, обоснована научная новизна полученных в диссертации результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, представлена структура диссертации.

В первой главе сформулированы прямая и обратная задачи фотометрических исследований КО. Проведен обзор существующих математических моделей процессов отражения светового потока от различных тел с учетом поляризации. В качестве основной математической модели, характеризующей состояние поляризации монохроматической плоской световой волны, использовались параметры Стокса J, Q, U, V , образующие четырехкомпонентный вектор \vec{S} в четырехмерном функциональном пространстве и являющиеся комбинациями составляющих вектора электромагнитной напряженности световой волны $\vec{E} = (E_x, E_y)$:

$$J = E_x E_x^* + E_y E_y^*,$$

$$Q = E_x E_x^* - E_y E_y^*,$$

$$U = E_x E_y^* + E_x^* E_y,$$

$$V = -i(E_x E_y^* - E_x^* E_y).$$

Выявлен ряд научных проблем, решение которых представляет практический интерес при оптическом мониторинге околоземного пространства (ОКП). Такими проблемами являются: недостаточно полное использование поляризационных параметров светового потока при решении обратной задачи фотометрии удаленных объектов ввиду неустойчивости решения, определение типа и оптических параметров покрытий исследуемых объектов с помощью фотометрических методов исследования.

Поиску теоретического решения вышеперечисленных проблем посвящена вторая глава диссертационной работы.

Во второй главе были поставлены и решены следующие задачи.

Первая задача: с помощью аналитического моделирования по формулам Джонса произведен расчет компонентов вектор-функции Стокса с использованием дополнительных параметров, характеризующих эллипс поляризации световой волны: азимутальный угол α , угол эллиптичности β , γ - разность фаз перпендикулярных компонент электрического вектора \vec{E} . Введение дополнительных параметров позволило расширить вектор-признак Стокса и использовать расширение для разработки уточненных методов определения параметров покрытий. Кроме того, сформулирована и доказана следующая теорема.

Теорема. Компоненты вектора Стокса для световой волны с поляризацией P выражаются через параметры α , β , γ :

$$J = I,$$

$$Q = IP(\cos 2\beta \cos 2\alpha - \sin 2\beta \sin 2\alpha \cos \gamma),$$

$$U = IP(\cos 2\beta \sin 2\alpha + \sin 2\beta \cos 2\alpha \cos \gamma),$$

$$V = -IP \sin 2\beta \sin \gamma.$$

Вторая задача: на основе аналитического моделирования по формулам Стокса и Френеля произведен расчет компонентов мат-

риц линейного оператора рассеяния светового потока двух видов: матрицы рассеяния металлической поверхностью и матрицы рассеяния диэлектрической поверхностью. Это математическая модель отличается конкретностью от известных используемых моделей, в которых матрица рассеяния представлялась в общем виде. В результате были получены следующие матрицы Мюллера:

1 Матрица рассеяния светового потока металлической поверхностью

$$M_{мет} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(|r_1|^2 + |r_2|^2) & \frac{1}{2}(|r_1|^2 - |r_2|^2) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(|r_1|^2 - |r_2|^2) & \frac{1}{2}(|r_1|^2 + |r_2|^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{Re}(r_1 \bar{r}_2) & -\operatorname{Im}(r_1 \bar{r}_2) \\ 0 & 0 & \operatorname{Im}(r_1 \bar{r}_2) & \operatorname{Re}(r_1 \bar{r}_2) \end{pmatrix}.$$

2 Матрица рассеяния светового потока диэлектрической поверхностью

$$M_{диэл} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(|r_1|^2 + |r_2|^2) & \frac{1}{2}(|r_1|^2 - |r_2|^2) & 0 & 0 \\ \frac{1}{2}(|r_1|^2 - |r_2|^2) & \frac{1}{2}(|r_1|^2 + |r_2|^2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (r_1 \bar{r}_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (r_1 \bar{r}_2) \end{pmatrix},$$

где в обеих формулах r_1, r_2 - амплитудные коэффициенты Френеля.

Третья задача: для решения основной задачи (определения параметров покрытий удаленных объектов) была модифицирована комплексная оптическая установка с помощью введения поляризационных приборов, позволяющих рассчитывать следующие параметры.

1 Параметры Стокса и коэффициент поляризации отраженного светового потока.

2 Дополнительные поляризационные параметры – азимутальный угол и угол эллиптичности световой волны.

Функциональная схема модифицированной оптической установки представлена на рисунке 1.

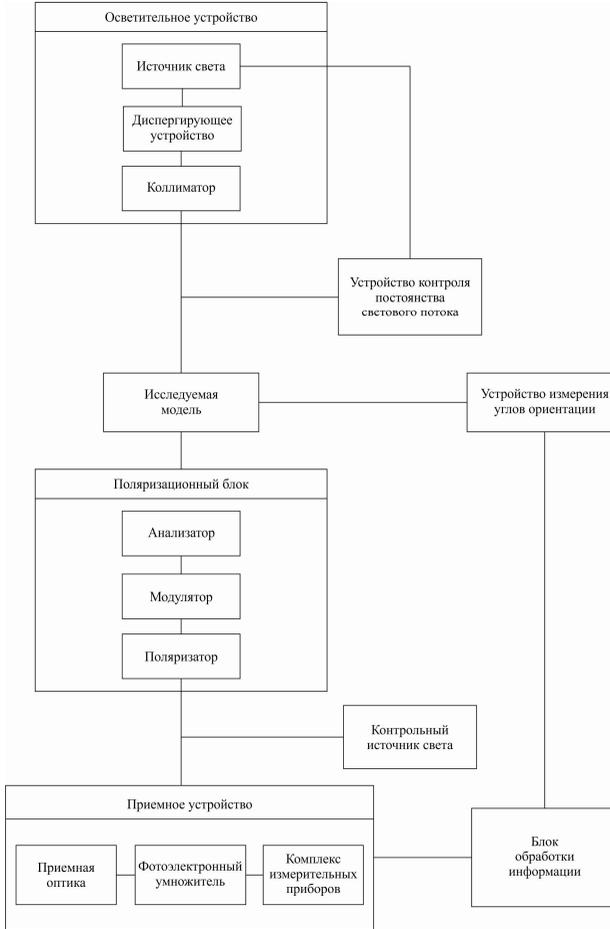


Рисунок 1 — Функциональная схема модифицированной оптической установки

Параметры Стокса численно рассчитаны с помощью четырех измерений интенсивности излучения путем изменения угла наклона плоскости поляризации φ и сдвига фаз γ между гармониками E_x и E_y , а также линейной поляризации для каждого измерения.

Компоненты вектора Стокса отраженного излучения находились из решения системы линейных уравнений:

$$I_k = \frac{1}{2} (J + Q \cos 2\varphi_k + U \sin 2\varphi_k \cos \gamma_k + V \sin 2\varphi_k \sin \gamma_k), \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

Для вычисления компонентов вектора Стокса была составлена программа на языке Delphi, которая рассчитывает исследуемые компоненты Стокса отраженного космическим объектом светового потока, а также вычисляет коэффициент поляризации.

Схема экспериментальной установки полностью отвечает реальному расположению системы излучатель-объект-фотоприемник, а встраиваемый блок обработки информации выполняет расчеты поляризационных параметров отраженной световой волны и характеристик покрытия исследуемых объектов.

Аналитически найдены оптимальные значения параметров поляризационных элементов γ и ϕ по критерию наибольшей интенсивности выходящего светового потока, также определена оптимальная амплитуда модуляции фазового сдвига. Процедура оптимизации сводилась к представлению матриц поляризационных приборов с помощью формул Джонса. Чувствительность поляризационной системы максимальна при амплитуде модуляции разности фаз $A = 0.95$, рекомендуемый диапазон модуляции фазового сдвига составил $[45^0; 90^0]$, $[-90^0; -45^0]$, $[90^0; 135^0]$, $[-135^0; -90^0]$.

В третьей главе решена задача нахождения алгоритма вычисления дополнительных поляризационных параметров отраженной световой волны, таких как азимутальный угол α и угол эллиптичности β (по отношению к диапазону модуляции фазового сдвига γ между составляющими вектора \vec{E}) по компонентам Стокса, необходимых для решения обратных задач фотометрии КО. Искомые параметры находятся из решения системы уравнений:

$$\begin{cases} J = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2}; \\ Q = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} (\cos 2\beta \cos 2\alpha - \cos \gamma \sin 2\beta \sin 2\alpha); \\ U = \sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} (\sin 2\alpha \cos 2\beta + \cos \gamma \sin 2\beta \cos 2\alpha); \\ V = -\sqrt{Q^2 + U^2 + V^2} \sin 2\beta \sin \gamma. \end{cases}$$

Система допускает бесконечное множество решений, найден диапазон для параметра γ , позволивший однозначно вычислить параметры α и β . Алгоритм нахождения азимутального угла и угла эллиптичности световой волны состоит из следующих шагов:

1 Рассчитать параметры Стокса отраженной световой волны по методике, описанной во второй главе.

2 При модуляции фазового сдвига необходимо использовать значения γ , близкие $\pm 90^\circ$, причем амплитуда модуляции не должна превышать 45° .

3 Вычислить значения угла эллиптичности отраженной световой волны как
$$\beta = \pm \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{V}{\sqrt{Q^2 + U^2 - \cos^2 \gamma (Q^2 + U^2 + V^2)}}.$$

4 Вычислить азимутальный угол отраженной световой волны как
$$\alpha = \pm \frac{1}{2} \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} 2\beta \cos \gamma).$$

5 Уточнить знаки параметров α и β исходя из знаков компонентов Стокса Q , U , V и выбранных значений фазового сдвига.

Алгоритм нахождения азимутального угла и угла эллиптичности отраженной световой волны может применяться для приборной схемы фотометрических и поляризационных устройств, соответствующей реальной системе излучатель-объект-приемное устройство (рис. 1). Для проверки работоспособности алгоритма также использовался адаптированный к задаче численный метод градиентного спуска.

Кроме того, решена задача нахождения оптимальных диапазонов модуляции фазового сдвига и углов вращения плоскости поляризации при измерениях светового потока. Нахождение оптимальных диапазонов этих параметров позволило повысить интенсивность выходящего светового сигнала на 28-36 % по сравнению с известными методами (рис. 2). Для численного вычисления азимутального угла и угла эллиптичности световой волны были составлены программы на языке Delphi.

В четвертой главе решена основная задача диссертационной работы – разработка численного алгоритма определения параметров покрытий КО. Алгоритм состоит из трех частей.

1 Определение одного из двух возможных типов покрытий исследуемого объекта – диэлектрического или металлического.

2 Расчет показателя преломления покрытия в зависимости от типа покрытия.

3 Определение материала покрытия исследуемого объекта по найденному показателю преломления.

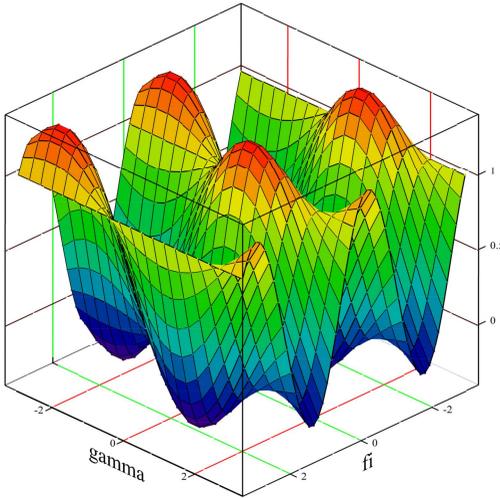


Рисунок 2 — График зависимости интенсивности выходящего светового потока от значений параметров модуляции

Для решения первой части задачи использовались вероятностные методы распознавания образов, адаптированные под конкретную ситуацию. В частности, использовались поляризационные параметры, характеризующие отраженный от исследуемой поверхности световой пучок:

– параметры Стокса J, Q, U, V ;

– азимутальный угол α , угол эллиптичности β световой волны.

Алгоритм для определения типа покрытия можно описать следующим образом.

Пусть Ω_1 - класс диэлектрических покрытий, Ω_2 - класс металлических покрытий.

Найдены три признака для определения диэлектрического покрытия:

1 $C_1 = \frac{Q \sin 2\Delta\theta + U \cos 2\Delta\theta}{V} = const$ при постоянном полярном угле ϕ .

2 $C_2 = \frac{U_0}{V_0} = \pm \frac{U}{V} = const$ при изменении полярного угла ϕ и при условии $\Delta\theta = 90^\circ$.

3 $C_3 = \sin 2\alpha \cdot ctg 2\beta = const$ при $\Delta\theta = 90^\circ$ и изменении полярного угла.

Здесь $\Delta\theta$ - угол между нормалью к объекту и направлением на приемник, ϕ - полярный угол между ними. Источник и приемник света рассматриваются в сферической системе координат, начало координат совмещено с объектом.

Принадлежность признаков x_1, x_2, x_3 к классу Ω_1 определим следующим образом: значения признаков имеют нормальное распределение с выборочными средними, равными соответственно $\bar{x}_1 = C_1, \bar{x}_2 = C_2, \bar{x}_3 = C_3$, и выборочными дисперсиями $\sigma_k^2 \leq 1, k=1,2,3$.

Известно, что вероятность того, что отклонение случайной величины (признака x_k), распределенной по нормальному закону, от его математического ожидания a_k не превышает по абсолютной величине некоторое значение $\varepsilon > 0$, равна $P(|X_k - a_k| \leq \varepsilon) = \Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)$,

где $\Phi\left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)$ - функция Лапласа. Таким образом, алгоритм классификации типа покрытия состоит из следующих шагов.

1 Находим приближение ε : $\varepsilon = \max|x_{k_i} - a_k|, i=1, \dots, N$, N - число измерений.

2 Находим значение $t = \frac{\varepsilon}{\sigma_k}$, затем значение функции Лапласа $\Phi(t)$, которое определяет вероятность $P(\Omega_1 / x_k)$ принятия нулевой гипотезы о принадлежности признака к классу Ω_1 .

3 Находим вероятность классификации объекта классом Ω_1 при условии классификации этим классом по каждому из трех признаков:

$$P(\Omega_1) = P(x_1)P(\Omega_1 / x_1) + P(x_2)P(\Omega_1 / x_2) + P(x_3)P(\Omega_1 / x_3),$$

где вероятности $P(x_k)$ заданы, $k=1, 2, 3$.

В случае $P(\Omega_1) > 0.8$ классифицируем объект классом Ω_1 , в противном случае – классом Ω_2 .

Для нахождения показателя преломления и определения материала покрытий исследуемых объектов разработаны два численных

алгоритма: для диэлектрических и металлических покрытий, так как для диэлектрических покрытий показатель преломления является вещественным, а для металлов – комплексным числом.

Алгоритмы основаны на представлении показателя преломления покрытия через параметры Стокса с помощью классических формул Френеля. Для вычисления показателя преломления по разработанному алгоритму необходимы данные поляриметрических измерений, такие как параметры Стокса и коэффициент поляризации отраженного светового потока, а также измеренные углы падения светового потока.

Для численной реализации данных построенных алгоритмов автором составлена программа на языке Delphi, которая выполняет следующие действия:

- определяет тип покрытия КО – металл или диэлектрик;
- в зависимости от типа покрытия КО рассчитывает показатель преломления покрытия;
- по таблицам определяет материал покрытия.

Структурная схема программного комплекса дана на рисунке 3, в развернутом виде представлена в диссертации.

Для определения точности работы алгоритма определения материала покрытия были проведены эксперименты с модельными объектами на оптической установке для физического моделирования отражения светового потока (рис.1).

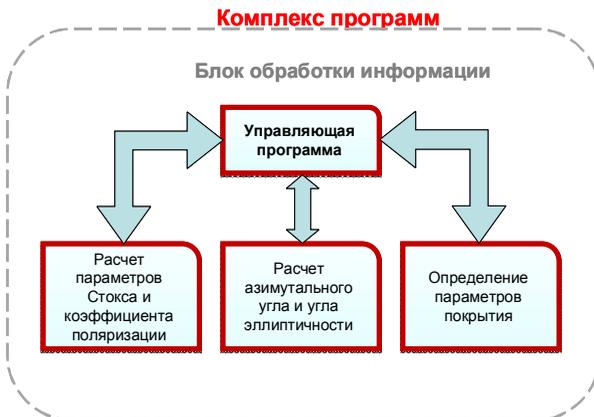


Рисунок 3 — Схема комплекса программ для определения поляризационных параметров и параметров покрытия

Модельный эксперимент показал следующие погрешности вычислений по предложенному алгоритму:

– для диэлектрического модельного объекта абсолютная погрешность вычисления расчетного показателя преломления по сравнению с эталонным показателем составляет 0.0008, относительная погрешность - 0.055 %;

– для металлического модельного объекта абсолютная погрешность составляет – 0.083, относительная погрешность – 1.8 %.

Для оценки устойчивости решения использовалась дисперсия отличия точного решения от решения с зашумленным сигналом.

Погрешность вычисления показателя преломления модельного объекта по сравнению с эталонным показателем при 1 %-м зашумленном сигнале составляет 5.64 %, при 10 %-м зашумленном сигнале – 6.32 %.

В заключении описаны основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

В приложении приведен список условных обозначений и сокращений, а также листинг разработанных программ.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Разработана расширенная математическая модель представления вектора Стокса, полученная с помощью аналитического моделирования. Составлены, описаны и исследованы свойства поляризационных матриц рассеяния Мюллера для металлических и диэлектрических отражающих поверхностей КО.

2 Разработаны алгоритмы для расчета поляризационных характеристик отраженной световой волны с помощью аналитических и уточненных численных методов. Уточнение диапазона модуляции поляризационных параметров позволило увеличить интенсивность выходящего светового потока на 28 – 36 % по сравнению с известными методами.

3 Разработаны алгоритмы определения типа покрытий и расчета оптических параметров покрытий КО на основе вероятностного метода распознавания образов. Точность разработанных алгоритмов, определяемая эмпирическим путем, составила 98.2 – 99.7 % по отношению к эталонным результатам.

4 Создан проблемно-ориентированный комплекс взаимосвязанных программ для решения всех поставленных задач.

**Основные результаты диссертационной работы опубликованы:
в рекомендованных изданиях из перечня ВАК**

1. Бодрова И.В., Бодров О.А., Наумов Д.А. Методика расчета компонентов вектора Стокса отраженного и падающего излучения при фотополяриметрических исследованиях техногенных космических объектов // *Авиакосмическое приборостроение*. - 2015. - №9. - С. 26-33.

2. Бодрова И.В., Бодров О.А., Наумов Д.А. Модифицированная методика расчета дополнительных поляризационных параметров для поляриметрических исследований // *Авиакосмическое приборостроение*. - 2016. - №6. - С. 25-30.

3. Бодрова И.В., Бодров О.А., Наумов Д.А. Расчет матриц рассеяния светового пучка металлической и диэлектрической поверхностями техногенных космических объектов // *Вестник РГРТУ*. - 2015. - №3. - С. 93-98.

4. Бодрова И.В., Бодров О.А., Солдатов В.В. Влияние параметров Стокса на коэффициент поляризации при исследованиях фотометрических характеристик космического мусора // *Вестник РГРТУ*. - 2014. - №4. - С. 17-21.

5. Миронов В.В., Муртазов А.К., Бодрова И.В. Практическая реализация алгоритмов расчета поляризационных параметров светового потока на оптической установке модуляторного типа // *Инженерная физика*. - 2017. - №2. - С. 67-71.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

6. Бодрова И.В., Бодров О.А., Наумов Д.А. Определение типа поверхности удаленных объектов поляриметрическими методами. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2017610058 от 22.03.2017 г.

Прочие публикации

7. Бодрова И.В. Представление множества вектор-функций Стокса нормальным воспроизводящим конусом // *Фундаментальные и прикладные исследования и вопросы образования: тезисы докладов МНПК*. - Рязань: РГУ, 2016. - С. 39-43.

8. Бодрова И.В. Расширение вектора признаков параметров Стокса в поляриметрических задачах // *Методы и средства обработки и хранения информации: межвуз. сб. науч. тр.* - Рязань: РГРТУ, 2016. - С. 11-16.

9. Бодрова И.В., Бодров О.А. Разработка схемы определения параметров Стокса поляризованного излучения рассеивающей по-

верхности космических объектов // Современные концепции научных исследований: сб. науч. раб. IV МНПК. - М., 2014. - № 6. - Ч.3. - С. 24-26.

10. Бодрова И.В. Оптимизация расчета поляризационных параметров при ненулевой приборной схеме с модуляцией фазового сдвига // Современные технологии в науке и образовании: тезисы докладов МНПК. - Рязань: РГРТУ, 2016. - Т. 4. - С. 52-57.

11. Бодрова И.В. Уточненный метод вычисления азимутального угла и угла эллиптичности световой волны при поляриметрических исследованиях // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29: тезисы докладов МНК. - СПб., 2016. - Т. 8. - С. 76-78.

12. Бодров О.А., Бодрова И.В., Муртазов А.К. Численный метод решения обратной задачи фотометрии при исследовании космического мусора // Математические методы в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. - Рязань: РГРТУ, 2014. - С. 11-14.

13. Бодрова И.В. Восстановление коэффициента преломления однородной диэлектрической поверхности при фотополяриметрических исследованиях удаленных космических объектов // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: тезисы докладов МНТК-18. - Рязань: РГРТУ, 2015. - С.89-90.

14. Бодрова И.В., Бодров О.А. Статистический метод сравнения датчиков регистрации космического мусора // Космонавтика, радиоэлектроника, геоинформатика: тезисы докладов МНТК-6. - Рязань, 2013. - С. 200-201.

15. Миронов В.В., Муртазов А.К., Бодрова И.В. Блок-схема установки для физического моделирования отраженного светового потока и расчета оптических характеристик покрытий удаленных объектов // Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в современном информационном обществе: тезисы докладов 59-й Всероссийской научной конференции МФТИ. - Долгопрудный, 2016.

16. Бодрова И.В., Наумов Д.А., Муртазов А.К. Расчет параметров Стокса отраженного светового потока на оптической установке модуляторного типа // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-29: тезисы докладов МНК. - Самара, 2016. - С. 67-71.

17. Бодрова И.В. Расчет азимутального угла поляризованной световой волны при фотополяриметрических исследованиях удаленных космических объектов // Математические методы в технике и технологиях ММТТ-28: тезисы докладов МНК. - Саратов, 2016. - Т. 9. - С. 110-113.

Бодрова Ирина Валерьевна

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ
ДЛЯ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ
ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОКРЫТИЙ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 14.04.2017 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Тираж 100 экз. Заказ № 868

Отпечатано в типографии  Bookjet

390046, г. Рязань, Скорбященский пр-д., д.20, оф. 23

Сайт: <http://bookjet.ru>

Почта: info@bookjet.ru

Тел.: +7(4912) 466-151

