

На правах рукописи

ЖИВОТОВСКИЙ Илья Вадимович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ЭЛЕКТРОННОЙ
СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
СВЕТОВОЗВРАЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук**

Животовский

Москва 2005

Работа выполнена на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель – доктор технических наук
Немтинов Владимир Борисович

Официальные оппоненты – доктор технических наук
Сычёв Виктор Васильевич;
кандидат технических наук, доцент
Ровенская Тамара Сергеевна

Ведущая организация – ОАО «НПО «Геофизика-НВ», г. Москва

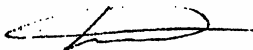
Защита состоится " 1 " марта 2006 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан "29" декабря 2005 г. —

Ваш отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Диссертационный совет Д 212.141.19.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

 Бурый Е.В.

Формулировка задачи и её актуальность. Активная лазерная локация оптико-электронных приборов (ОЭП), основанная на эффекте световозвращения, является одним из ведущих направлений современной лазерной оптики и локационной техники. Эффект световозвращения проявляется в том, что при зондировании ОЭП оптическим излучением (обычно лазерным) излучение возвращается по направлениям, близким к обратному направлению. При этом лоцируемый ОЭП принято называть световозвращателем (Свз).

Научная задача, решению которой посвящена диссертация, формулируется следующим образом: разработка и исследование лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик оптико-электронных приборов. Наиболее эффективно она может быть решена в рамках модельного синтеза лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик.

Вопросам исследования эффекта световозвращения посвящены работы Н.В. Барышникова, В.Е. Карасика, З.Г. Николавы, В.В. Рыбальского, Ю.В. Хомутского, А.М. Хорохорова, А.Ф. Ширанкова. Точные численные значения энергетических световозвращательных характеристик являются исходными данными при расчётах оптико-локационной аппаратуры обнаружения и селекции ОЭП, систем лазерного мониторинга, устройств навигации и пеленгации, использующих оптические Свз. В случаях, когда неизвестны параметры r , d , n оптической системы Свз, энергетические световозвращательные характеристики реальных образцов ОЭП можно определить с помощью экспериментальных измерений. Экспериментальные данные энергетических световозвращательных характеристик ОЭП служат отличительными признаками классов лоцируемых световозвращателей, что находит свое применение при решении задач селекции и идентификации. Современные ОЭП наблюдения, и появляющиеся новые типы Свз, имеют широкий диапазон показателей световозвращения (ПСВ) от 10^{-4} до 10^{-4} м²/ср. Существующие к настоящему времени экспериментальные установки позволяют находить ПСВ только свыше 5 м²/ср, так что с их помощью уже нельзя измерять характеристики многих современных ОЭП. Таким образом, актуальность диссертационного исследования обусловлена, прежде всего, необходимостью высокоточного измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП, а также создания банка данных этих характеристик, с целью использования его для решения задач обнаружения, распознавания (селекции) и идентификации классов ОЭП при лазерном дистанционном зондировании.

Применение современной элементной базы, и прежде всего ФПЗС-матриц, позволяет в рамках полунатурного метода измерений разработать новый подметод измерений. Предложенный оригинальный подметод «виртуальных диафрагм», опирающийся на современную элементную базу, идентифицирует создание нового средства измерения в виде проектируемого лазерно-электронного измерительного стенда (ПСВ-стенда). В рамках подметода «виртуальных диафрагм» определение энергетических световозвращательных характеристик ОЭП с помощью ПСВ-стенда заключается в измерении ПСВ на основе зарегистрированного с помощью ФПЗС-матрицы оцифрованного изображения функции рассеяния ОЭП.

Кроме того, в настоящее время общая методика проектирования лазерно-электронных измерителей энергетических световозвращательных характеристик отсутствует. Актуальность диссертационной работы состоит также в том, что она устраняет этот недостаток, сокращая время разработки стенда в рамках методики модельного синтеза

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1738132

Животовский И.В. Разработк

МГТУ
ИМ. Н. Э. БАУМАНА
БИБЛИОТЕКА

системы на основе методов математического моделирования.

Цель исследований. Разработка элементов теории лазерно-электронных систем измерения энергетических световозвращательных характеристик, создание на этой основе измерительного лазерно-электронного стенда и накопление банка данных в виде изображений когерентных функций рассеяния (КФР), показателей световозвращения (ПСВ), пеленгационных и дисперсионных характеристик.

Задачи исследований. Для достижения поставленной цели в диссертации решаются следующие задачи:

1. Разработка инженерно-графовой методики полного модельного синтеза лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик на основе трёх основных графовых моделей: метаорграфа системы предметных и теоретических моделей, содержащего как известные модели, так и новые модели, созданные автором; девятиэтапного связного орграфа, задающего этапы разработки и исследования создаваемой системы; и предметно-физического графа, задающего предметную цель моделирования в виде лазерно-электронного измерителя.

2. Анализ схемных модельных представлений разрабатываемой системы. Построение структурной схемы, реализующей полунатурный измерительный процесс и функциональной схемы синтезируемой системы, определяющей все преобразующие элементы ПСВ-стенда. Идентификация на основе схемного анализа принципиально нового полунатурного подметода измерения энергетических световозвращательных характеристик с помощью "виртуальных диафрагм", которые заменяют реальные измерительные диафрагмы в оптическом тракте приёмного канала ПСВ-стенда.

3. Формирование математического прообраза синтезируемой системы и идентификация энергетических световозвращательных характеристик лоцируемого ОЭП. Построение внешних и внутренних структурных моделей измерительной системы, а также математической модели поведения оптического измерительного канала.

4. Создание расчётных методик и формирование оценочного диапазона измеряемых параметров и характеристик. Разработка методики расчёта энергетических световозвращательных характеристик систем скрытого видеонаблюдения с объективами «pinhole». Построение алгоритма вычислительного процесса расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР ОЭП.

5. Проектирование на основе разрабатываемых модельных представлений лазерно-электронного стенда для измерения ПСВ (ПСВ-стенд).

6. Изготовление с помощью разработанной автором проектной документации ПСВ-стенда на основе современной элементной базы.

7. Проведение анализа погрешностей подметода "виртуальных диафрагм", реализуемого на созданном ПСВ-стенде для измерения показателя световозвращения ОЭП. Оценка суммарной теоретической среднеквадратической погрешности и идентификация основных независимых составляющих.

8. Разработка методики цифровой обработки распределения облучённости в ФР Свз и проведение экспериментальных измерений энергетических световозвращательных характеристик лоцируемых ОЭП в рамках подметода "виртуальных" диафрагм.

9. Создание банка экспериментальных данных в виде совокупности энергетических визуальных и измеренных световозвращательных характеристик современных оптических и оптико-электронных приборов.

10. Внедрение полученных результатов в практику научных и прикладных исследований и в учебный процесс.

Методы исследований. Для решения теоретических и прикладных задач использованы:

1. Методы теории оптико-электронных систем, в основе которой лежит системный подход к описанию процесса преобразования сигналов.
2. Методы структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем.
3. Методы фильтрации и обработки оцифрованных распределений облучённости.
4. Аналитические и численные методы теории оптических систем, опирающиеся на алгоритмы расчёта хода лучей через аберрационную систему.
5. Статистические методы оценки погрешностей.

Научная новизна и вклад исследования в решение задачи.

Новизна работы включает в себя:

- инженерно-графовую методику модельного синтеза разработки (проектирования и изготовления) и исследования синтезируемой системы на основе трёх основных графовых моделей;
- анализ 23-х схемных модельных представлений лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик, на основе которого идентифицирован принципиально новый полунатурный подметод измерения ПСВ с помощью "виртуальных диафрагм" с целью автоматизации и повышения точности измерений;
- формирование структурно-поведенческого математического прообраза синтезируемой системы и идентификация энергетических световозвращательных характеристик лоцируемого ОЭП как его выходных характеристик с целью построения внешних и внутренних структурных моделей, а также математической модели поведения системы;
- формирование диапазона измеряемых параметров и характеристик, создание методики расчёта энергетических световозвращательных характеристик систем скрытого видеонаблюдения с объективами «pinhole» и построения алгоритма расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР ОЭП;
- накопление банка данных в виде изображений когерентных ФР, ПСВ, пеленгационных и дисперсионных характеристик современных оптических и оптико-электронных приборов с помощью спроектированного и изготовленного ПСВ-стенда для решения задачи селекции видов лоцируемых световозвращателей.

Научные положения, выносимые на защиту. Создание элементов теории лазерно-электронных систем измерения энергетических световозвращательных характеристик, на основе которых спроектирован, изготовлен и исследован ПСВ-стенд, позволяет вынести на защиту следующие новые положения и результаты:

1. Новая инженерно-графовая методика модельного синтеза создаваемой системы на основе трёх основных графовых моделей: метаорграфа системы предметных и теоретических моделей, девятизвального связанного орграфа и предметно-физического графа для разработки (проектирования и изготовления) и исследования синтезируемой системы.
2. Принципиально новый полунатурный подметод измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП с помощью "виртуальных диафрагм".
3. Новые структурные математические модельные представления лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик, идентифицирующие полунатурный измерительный процесс: внешние структурные модели лазерно-электронной системы и оптического измерительного канала, а также связный орграф внутренней структурной модели оптического измерительного канала.
4. Новая алгоритмическая модель оптического измерительного канала на основе идентификации моделей поведения четырёх преобразующих элементов канала: фраунгоферовская алгоритмическая модель подводящего слоя пространства, одноступенчатая свёрточная модель оптической системы зондируемого ОЭП,

двухступенчатая свёрточная модель композиционного элемента "оптическая система Свз – отводящий фраунгоферовский слой пространства", трёхступенчатая свёрточная модель оптической системы приёмного коллиматора.

5. Ранее не существовавшая полная свёрточная модель, идентифицирующая результирующую функцию рассеяния оптического измерительного канала, которая в приближении идеальных коллимационных объективов с δ -образной функцией рассеяния, представляет собой автосвёртку функции рассеяния оптической системы световозвращателя.

6. Новая методика расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР ОЭП и методика цифровой обработки распределения облучённости.

Практическая ценность и область применения результатов исследования. В рамках практического применения разработанных элементов теории лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик созданы:

- ❖ девятиэтапная инженерно-графовая методика модельного синтеза системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП;
- ❖ оригинальные структурно-функциональные схемы, структурные и поведенческие математические модели;
- ❖ методика расчёта энергетических световозвращательных характеристик систем скрытого видеонаблюдения с объективами типа «pinhole»;
- ❖ принципиально новый подметод "виртуальных диафрагм" измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП, основанный на компьютерной обработке, зарегистрированного с помощью ФПЗС-матрицы, распределения облучённости в ФР ОЭП;
- ❖ алгоритм вычислительного процесса расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР ОЭП;
- ❖ лазерно-электронный ПСВ-стенд для измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП на длинах волн $\lambda = 0,53; 0,6328; 0,8; 0,9$ и $1,06$ мкм излучения зондирующего источника в широком диапазоне ПСВ ($10^{-4} - 10^4$ м²/ср) с погрешностью не превышающей 10%;
- ❖ банк данных в виде совокупности энергетических визуальных и измеренных световозвращательных характеристик (ФР, ПСВ, пеленгационная и дисперсионная характеристики) современных оптических и оптико-электронных приборов, работающих как в видимом, так и в ИК диапазонах спектра.

Внедрение. Разработанные соискателем методики расчёта и измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП, созданный лазерно-электронный ПСВ-стенд и накопленный банк данных использованы на ФГУП «КБ «Точмаш им. А.Э. Нудельмана» при выполнении НИР «Сахарин», на ФГУП 3 ЦНИИ МО РФ при выполнении НИР «Сигнатура». Результаты диссертации также использованы в учебном процессе кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н. Э. Баумана, и внедрены в НИИ РЛ. Акты о внедрении и использовании приведены в диссертации.

Апробация работы. Результаты работы доложены на XI, XIII, XIV и XV Международных НТК "Лазеры в науке, технике, медицине" (г. Сочи, 2000, 2002, 2003 и 2005 гг.) и XI Международной НТК "Лазерные системы и их применения" (г. Кострома, 2004 г.).

Публикации и личный вклад. Все теоретические исследования по созданию элементов теории лазерно-электронных систем измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП проведены лично автором. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе, патент на изобретение, 4 статьи, 5 тезисов докладов на международных НТК. Материалы работы изложе-

ны также в двух научно-технических отчётах по НИР. Список основных публикаций по теме диссертации приведён в конце автореферата.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 282 страницах, содержит 84 рисунка и 23 таблицы. Список цитируемой литературы включает 74 источника.

Во введении обоснована актуальность научной задачи, решаемой диссертации. Сформулированы цель и задачи исследований. Рассмотрены методы исследования и изложены научные положения, выносимые на защиту. Приведён обзор содержания диссертации по главам и дан обзор литературы.

В первой главе сформулирована постановка задачи разработки и исследования лазерно-электронной системы измерения световозвращательных характеристик ОЭП и начата разработка элементов теории таких систем. Элементы теории представляют собой совокупность научных положений, сформированных на основе предложенной автором девятиэтапной инженерно-графовой методики полного модельного синтеза разрабатываемой и исследуемой системы. Последняя является частным случаем общей методики, которая построена в структурной теории оптико- и лазерно-электронных систем В.Б. Немтиновым. Указано, что в рамках системно-модельного подхода изучаемая система считается заданной, если имеется какая-либо её модель, не обязательно математическая. Отмечено, что созданная автором инженерно-графовая методика включает в себя девять этапов разработки и исследования синтезируемой системы: *постановочный, схемный, структурно-поведенческий математический, компьютерно-предметный, компьютерно-математический, конструкторский, технологический, изготовительный и экспериментальный.*

Констатируется, что целью предложенной автором методики модельного синтеза системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП, в основе которой лежит единство моделей синтезируемой системы, и, прежде всего математических моделей (ММ), является проектирование, изготовление и исследование лазерно-электронного измерителя. Показано, что модельный синтез создаваемой системы сводится к заданию последовательно-параллельных графовых модельных переходов, описывающих, в частности, этапы разработки проектной документации.

На первом этапе (документно-постановочном) модельного синтеза сформулирована цель диссертации – разработка элементов теории лазерно-электронных систем измерения энергетических световозвращательных характеристик, создание на этой основе измерительного лазерно-электронного стенда и накопление банка данных в виде изображений КФР, ПСВ, пеленгационных и дисперсионных характеристик. Для достижения поставленной цели на языке математических модельных представлений введены три основные графовые модели, справедливые для любой технической системы: метаорграф предметных и теоретических моделей; девятиэтапный связный орграф, задающий этапы разработки и исследования лазерно-электронной системы; и предметно-физический граф, идентифицирующий предметную цель модельного синтеза. Метаорграф содержит графовые оболочки известных моделей и по мере выполнения работы заполняется новыми моделями. Эти модели лежат в основе разработки и исследования лазерно-электронного

стенда для измерения ПСВ (ПСВ-стенда). Девятиэтапный связный оргграф модельного синтеза представляет собой математический прообраз процессов разработки и исследования ПСВ-стенда. С целью формализации процесса проектирования синтез идентифицирован в виде двух разделов: в разделе I задана семизапная инженерно-графовая методика проектирования ПСВ-стенда (теоретическое изучение проблемы, расчёты и конструирование); раздел II посвящён двухэтапной изготовительно-экспериментальной реализации ПСВ-стенда. Предметно-физический граф идентифицирует разработку де-факторной полунатурной стендовой модели лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП в виде ПСВ-стенда.

В результате с помощью первых семи этапов созданной автором инженерно-графовой методики модельного синтеза лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик решена *первая главная практическая задача* диссертации. На основе разрабатываемых модельных представлений спроектирован ПСВ-стенд. На восьмом этапе (изготовительном) решена *вторая главная практическая задача* диссертации. В МГТУ им. Н.Э.Баумана в рамках разработанной автором проектной документации изготовлен ПСВ-стенд. Стенд создан при непосредственном и активном участии автора с помощью современной элементной базы, которая легла в основу разработки принципиально нового подмодуля измерения "виртуальных диафрагм" в рамках полунатурного метода измерения, защищён патентом и внедрён на ФГУП 3 ЦНИИ МО РФ. Принцип действия ПСВ-стенда основан на эффекте световозвращения и заключается в регистрации и последующей обработке изображения когерентной ФР, формируемой лоцируемым Свз. На девятом этапе (экспериментальном) проведены измерения световозвращательных характеристик различных ОЭП и создан банк данных этих характеристик.

На первом этапе (постановочном) модельного синтеза обоснована актуальность создания принципиально новых метода и средства измерения на основе автоматизированного цифрового дифракционно-геометрооптического метода регистрации функции рассеяния световозвращателя, которая сводится к идентификации четырёх аспектов процесса измерения. Выделено: что измеряется, или объект измерения в виде энергетических световозвращательных характеристик; как измеряется, или полунатурный метод измерения с использованием реальных или "виртуальных" диафрагм; чем измеряется, или средство измерения в виде проектируемого ПСВ-стенда; и анализ погрешностей измерения. Разработано ТЗ, сформулированы технические предложения и обоснованы исходные данные. Рассмотрены основные классы световозвращающих ОЭП, измеряемые параметры и характеристики (ФР, ПСВ, пеленгационная и дисперсионная характеристики). Указаны диапазоны измерения ПСВ, а также режимы работы и допустимая погрешность измерения.

На втором этапе (схемном) построено исходное множество из 23-х структурных и функциональных схем, детализирующее структуру и поведение лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП. В рамках первого кардинального подмножества из 14-ти геометрооптических схем впервые построена структурная схема процесса лазерного зондирования в лазерно-электронной системе измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП и выделены четыре каскада, идентифицирующие формирование зондирующего и ретроотражённого лазерного поля, а также регистрацию и обработку измерительных сигналов. Детально изучены основные виды Свз: выпукло сфе-

рический зеркальный Свз, шаровой Свз, угловой Свз и зеркально-линзовый Свз.

В результате анализа структурной схемы процесса лазерного зондирования показано, что основным источником измерительной информации в лазерно-электронной системе измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП является ретроотражённое лазерное поле. На рис. 1 приведена функциональная оптическая схема, идентифицирующая поведенческие свойства ретроотражённого поля. Она показывает, что в области дифракции Фраунгофера, т.е. в дальней зоне формируется когерентная ФР, пропорциональная фурье-образу аберрационной функции зрачка. Этот предварительный анализ процесса лазерного зондирования позволяет четко выделить основные методы измерения энергетических световозвращательных характеристик. Измерения могут проводиться, как в натурных условиях (дистанционные измерения), так и в полунатурных (лабораторные измерения). В обоих случаях задача сводится к измерению усредненной силы излучения $I_{ср}$, ретроотражённого от ОЭП в заданном малом телесном угле усреднения при известной облучённости $E_{зр}$ зрачка ОЭП. Натурные измерения осуществляются в реальных условиях на больших расстояниях в области дифракции Фраунгофера, где формируется когерентная ФР световозвращателя (рис. 1). При этом усреднённый ПСВ вычисляется косвенным способом

$$R_{ср} = I_{ср} / E_{зр} = (\Phi_1 / \Phi_2) (L_{нбл}^2 / \tau_1), \quad (1)$$

где Φ_1 , Φ_2 – лучистые потоки, пропорциональные усредненной силе ретроотражённого излучения и облучённости зрачка соответственно; τ_1 – коэффициент пропускания по интенсивности слоя пространства наблюдения толщиной $L_{нбл}$.



Рис. 1. Функциональная оптическая схема, идентифицирующая формирование КФР Свз в области дифракции Фраунгофера (в дальней зоне)

Полунатурный метод имитирует механизм регистрации ретроотражённого излучения на больших расстояниях, удовлетворяющих условию дифракции Фраунгофера. При этом в качестве передающей и приёмной оптических систем зондирующего и регистрирующего устройств используют длиннофокусные объективы коллиматоров с высоким уровнем аберрационной коррекции. Зондируемый ОЭП облучается коллимированным пучком монохроматического излучения, создающим на входном зрачке равномерную облучённость. После ретроотражения от ОЭП излу-

чение с помощью отклоняющих зеркал направляется в объектив приёмного коллиматора. В результате в задней фокальной плоскости объектива приёмного коллиматора формируется распределение интенсивности ретроотражённого излучения в изображении КгРФР световозвращателя. При этом телесные углы усреднения определяются диаметрами d измерительных диафрагм и фокусным расстоянием объектива приёмного коллиматора. Выражение для вычисления ПСВ контролируемого световозвращателя при полунатурном методе измерения имеет вид

$$R_{cp} = I_{cp} / E_{cp} = R_{этлн} u_{свз} / u_{этлн}, \quad (2)$$

где $u_{свз}$, $u_{этлн}$ – напряжения на выходе приемника излучения, регистрирующего потоки от контролируемого и эталонного Свз.

Таким образом, на основе второго кардинального подмножества из четырёх структурно-функциональных оптических схем идентифицированы процессы лазерного зондирования и проведения натурального и полунатурного измерений энергетических световозвращательных характеристик ОЭП. Исследованы особенности методов измерения и введено понятие усреднённого ПСВ.

В рамках третьего кардинального подмножества из пяти схем разработаны схемные прообразы лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП, идентифицирующие полунатурный метод измерения. Впервые построена структурная схема системы, реализующей полунатурный измерительный процесс. Разработана структурная схема ПСВ-стенда. Впервые построена функциональная схема измерительной системы, определяющая все преобразующие элементы ПСВ-стенда. В результате идентифицирован полунатурный подметод "виртуальных диафрагм", которые заменяют физические диафрагмы в оптическом измерительном канале ПСВ-стенда на основе ФПЗС-матрицы. При этом угол усреднения задаётся виртуально, с помощью соответствующей круговой области зарегистрированного двумерного распределения облучённости в ФР ОЭП.

Во второй главе сформирован математический прообраз измерительной системы в рамках **третьего этапа** (структурно-поведенческого математического) модельного синтеза. Рассмотрены энергетические световозвращательные характеристики ОЭП как выходные характеристики лазерно-электронной измерительной системы. Введены в рассмотрение: распределение интенсивности в плоскости изображения когерентной ФР Свз, пространственная индикатриса ретроотражённого излучения, ПСВ и пеленгационная характеристика Свз. Построены когерентные и некогерентные ФР световозвращателя, которые идентифицируют вид дифракционно-абберационного изображения бесконечно удалённого зондирующего точечного источника, формируемого оптической световозвращающей системой в области дифракции Фраунгофера. Исследованы пространственно-координатное, пространственно-частотное, угловое пространственно-координатное и угловое пространственно-частотное модельные представления когерентной и некогерентной ФР. Найдено, что эти четыре модельные формы лежат в основе измерения введённых энергетических световозвращательных характеристики ОЭП. Для описания пространственно-частотных свойств ретроотражённого излучения введены когерентная и некогерентная, в частности оптическая, передаточные функции Свз. Разработаны структурные математические модельные представления лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик, идентифицирующие полунатурный измерительный процесс. Построена внешняя структурная модель (СМ) лазерно-электронной системы и внешняя СМ оптического измерительного канала, которая идентифицирует его в виде "оптического измерительного чёрного ящика", на выходе которого формируется

распределение облучённости в ФР.

Разработан связный орграф (рис. 2) внутренней СМ оптического измерительного канала (ОИК) и введён его алгоритмический оператор поведения $\mathcal{P}_{\text{ОИК}}^{\text{Алгртм}}$, представляющий собой композицию поэлементных операторов, так что

$$\mathcal{P}_{\text{ОИК}}^{\text{Алгртм}} = \mathcal{P}_{\text{ОС}}^{\text{прмн}} \mathcal{P}_{\text{кмпзц}} \mathcal{P}_{\text{ОС}}^{\text{свз}} \mathcal{P}_{\text{СП}}^{\text{подвдщ}} \{A\}. \quad (3)$$

Идентифицирована алгоритмическая модель ОИК. В ней выделены модели подводящего фраунгоферовского слоя пространства (ФСП) с оператором $\mathcal{P}_{\text{СП}}^{\text{подвдщ}}$, оптической системы (ОС) зондируемого Свз – $\mathcal{P}_{\text{ОС}}^{\text{свз}}$, композиционного элемента "ОС Свз – отводящий ФСП" – $\mathcal{P}_{\text{кмпзц}}$ и ОС приёмного коллиматора – $\mathcal{P}_{\text{ОС}}^{\text{прмн}}$.

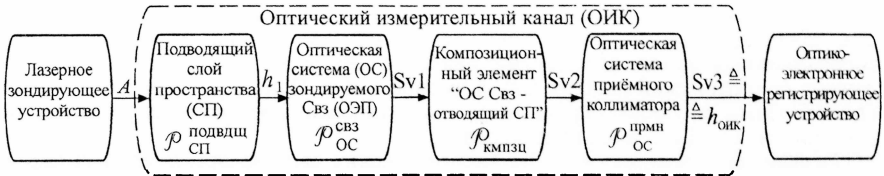


Рис. 2. Связный орграф внутренней структурной модели лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП: A – амплитуда зондирующей плоской волны; h_1 – КФР подводящего ФСП; $Sv1, Sv2, Sv3 \triangleq h_{\text{ОИК}}$ – одноступенчатый, двухступенчатый и трёхступенчатый свёрточные сигналы на выходе соответствующих преобразующих элементов

Впервые разработаны ММ поведения оптического измерительного канала ПСВ-стенда. Построена фраунгоферовская алгоритмическая модель подводящего слоя пространства, идентифицирующая КгрФР h_1 , которая является входным сигналом для оптической системы зондируемого Свз. Рассмотрена область изопланатизма, где aberrации приближенно постоянны (в частности, параксиальная область), исследуемых оптических систем. Получена пространственно-инвариантная свёрточная модель $SvM1$ оптической системы зондируемого Свз, в задней фокальной плоскости которой формируется одноступенчатая свёртка КФР подводящего слоя пространства с КгрФР h_2 ОС Свз. Построена свёрточная модель $SvM2$ композиционного элемента "ОС Свз – отводящий ФСП", на выходе которого формируется двухступенчатая свёртка входного одноступенчатого свёрточного сигнала с КФР h_2 ОС Свз. Найдена свёрточная модель $SvM3$ оптической системы приёмного коллиматора, в задней фокальной плоскости которой формируется трёхступенчатая свёртка входного двухступенчатого свёрточного сигнала с КФР h_3 объектива приёмного коллиматора.

Разработано трёхступенчатое свёрточное представление полной алгоритмической модели оптического измерительного канала (ОИК). Идентифицирован оператор поведения реального ОИК в виде трёхступенчатой свёртки составляющих операторов поведения, который переводит КФР подводящего фраунгоферовского слоя пространства в результирующую КФР оптического измерительного канала, так что

$$\mathcal{P}_{\text{ОИК}}: h_1 \rightarrow h_1 \otimes h_2 \otimes h_3 (\omega, \gamma) = Sv3(\omega, \gamma) \triangleq h_{\text{ОИК}}(\omega, \gamma). \quad (4)$$

Рассмотрен частный случай идеальных коллимационных объективов с δ -образной функцией рассеяния, т.е. анаберрационных объективов, в которых дополнительно пренебрегают конечными размерами зрачка, т.е. не учитывают дифракцион-

ное размытие КгрФР. Соответственно алгоритмический оператор поведения (4) превращается в автосвёрточный оператор, так что

$$\mathcal{P}_{\text{ОИК}}^{\text{ASv}}: a_0 \rightarrow h_2 \otimes h_2(\omega, \gamma) = \text{ASv}(\omega, \gamma) \triangleq h_{\text{свз}}(\omega, \gamma), \quad (5)$$

где $h_{\text{свз}}(\omega, \gamma)$ – функция рассеяния оптического измерительного канала, определяемая в виде автосвёртки абберационного оператора поведения $\mathcal{P}_{\text{ОС}}^{\text{свз}}$ оптической системы Свз.

В третьей главе проведены вычисления и получен оценочный диапазон измеряемых параметров и характеристик в рамках созданных расчётных методик. В главе рассмотрены четвёртый и пятый этапы (компьютерно-предметный и компьютерно-математический) модельного синтеза лазерно-электронной системы.

Проанализированы классические методы расчёта энергетических световозвращательных характеристик ОЭП. Исследованы параксиальный метод зон блеска, абберационно-геометрооптический метод зон блеска и дифракционно-абберационный метод. Исходными данными для расчётных методов являются данные об оптической системе Свз, а именно r , d , n . При отсутствии этих данных единственным способом определения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП является их измерение.

Разработана методика расчёта энергетических световозвращательных характеристик систем скрытого видеонаблюдения (СВИД) с объективами «pinhole». В результате, используя метод расчёта отражательных характеристик в рамках дифракционной теории аббераций, с помощью программы "Zemax" на основе конструктивных параметров объективов типа «pinhole» построены КФР трёх таких Свз. Получено выражение для расчёта максимального и усреднённого ПСВ для Свз с известными r , d , n . Результаты расчёта подтверждают, что объективы типа "pinhole" имеют сверхнизкие значения ПСВ ($1 - 100 \text{ см}^2/\text{ср}$).

Проведена идентификация измеряемых энергетических световозвращательных характеристик современных ОЭП наблюдения. Обзорно рассмотрены методы уменьшения ПСВ ОЭП. Составлены сводные таблицы ПСВ и пеленгационных характеристик ряда приборов. Найдено, что современный класс ОЭП наблюдения различного тактического назначения имеет ПСВ в диапазоне $0,01 - 10 \text{ м}^2/\text{ср}$, а в случае применения комплексных мер уменьшения ПСВ нижнюю границу диапазона можно снизить до $10^{-3} \text{ м}^2/\text{ср}$. Исследованы виды дорожных Свз и рассмотрены их энергетические световозвращательные характеристики. Показано, что диапазон ПСВ дорожных Свз лежит в пределах $5 \cdot 10^{-3} \dots 0,2 \text{ м}^2/\text{ср}$, а угловая ширина пеленгационной характеристики достигает 60° .

Констатирована тенденция расширения диапазона ПСВ ОЭП от 10^4 до $10^4 \text{ м}^2/\text{ср}$ и расширения диапазона угловых размеров пеленгационных характеристик от $10'$ до 60° . Найдено, что для определения энергетических световозвращательных характеристик современных ОЭП необходимо создание новой измерительной аппаратуры.

В рамках полунатурного метода измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП разработан принципиально новый подметод "виртуальных диафрагм". Он основан на компьютерной обработке зарегистрированного с помощью ФПЗС-матрицы распределения облучённости в ФР ОЭП. Показано, что ФПЗС-матрица пригодна для измерения энергетических характеристик с погрешностью менее 1% в пределах рабочего динамического диапазона. Предложен алгоритм расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР ОЭП. С помощью созданной методики "виртуальных диафрагм" измеряются энергетические световозвращательные характеристики современных ОЭП (ФР, ПСВ, пеленга-

ционная и дисперсионная характеристики). Получено выражение для расчёта усреднённого ПСВ в измерительном телесном угле усреднения $\Omega_{\text{изм}}$, заданным с помощью "виртуальной диафрагмы", так что

$$R_{\text{свз}}(\Omega_{\text{изм}}) = [u_{\text{свз}} \Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{изм}}) \Omega_{\text{эт}} / u_{\text{эт}} \Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{свз}}) \Omega_{\text{изм}}] R_{\text{эт.лн}}, \quad (6)$$

где $\Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{изм}})/\Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{свз}})$ – отношение лучистых потоков, ретроотражённых от Свз и регистрируемых ФПЗС-матрицей, для двух углов усреднения $\Omega_{\text{свз}}$ и $\Omega_{\text{изм}}$, соответствующих области идентификации ФР и текущему измерительному углу; $\Omega_{\text{эт}}$ – телесный угол, в котором распространяется ретроотражённое от эталонного Свз излучение. При этом наибольший телесный угол $\Omega_{\text{свз}}$, соответствующий круговой виртуальной области идентификации изображения ФР, считается такой угол, в котором заключено 95% энергии всего ретроотражённого от Свз излучения и регистрируемой ФПЗС-матрицей. Отношение потоков $\Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{изм}})/\Phi_{\text{свз}}(\Omega_{\text{свз}})$ вычисляется как отношение суммы коэффициентов матрицы $\|E_{ij}^{\text{свз}}\|$ дискретного распределения облучённости в ФР Свз в областях, соответствующих телесным углам $\Omega_{\text{изм}}$ и $\Omega_{\text{свз}}$ при заданных условиях наблюдения.

В четвёртой главе описан завершающий процесс проектирования полунатурного ПСВ-стенда, а именно, создание комплекта конструкторско-технологической документации, изготовление ПСВ-стенда, проведение его экспериментальных исследований, а также новой методики "виртуальных диафрагм" и проведено накопление банка данных энергетических световозвращательных характеристик. В главе рассмотрены **шестой, седьмой, восьмой и девятый этапы** (документно-конструкторский, документно-технологический, изготовительный и экспериментально-исследовательском) модельного синтеза лазерно-электронной системы измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП. В МГТУ им. Н.Э. Баумана при активном участии автора изготовлен ПСВ-стенд (рис. 3). Он представляет собой экспериментальную установку, включающую в себя лазерный источник излучения, оптическую формирующую систему, контролируемый Свз и оптико-электронное регистрирующее устройство. ПСВ-стенд предназначен для идентификации: 1) двумерных распределений облучённости в ФР Свз; 2) зависимостей ПСВ от угла усреднения на длинах волн зондирующего излучения ($\lambda = 0,53; 0,6328; 0,8; 0,9$ и $1,06$ мкм) в широком диапазоне измеряемых значений ($10^{-4} - 10^4$ м²/ср) с погрешностью не превышающей 10%; 3) пеленгационных характеристик; 4) дисперсионных характеристик. При этом диапазон плоских углов усреднения $2\omega_{\text{ср}}$ при определении ПСВ лежит в пределах от $10''$ до $40'$, а максимальный угловой размер снимаемой пеленгационной характеристики $2\psi_{\text{нбл}}$ составляет 120° .

Создана методика светоэнергетического расчёта ПСВ-стенда. **На девятом этапе** (экспериментально-исследовательском) показано, что ПСВ-стенд позволяет измерять значения ПСВ вплоть до $R = 5 \cdot 10^{-4}$ м²/ср при требуемом отношении сигнал/шум не менее 20. В рамках разработанной методики получены выражения для реализуемого отношения сигнал/шум измерительных каналов. Найдено, что реализуемые значения отношений сигнал/шум превышают требуемое.

Исследована специфика цифровой обработки распределения облучённости в ФР ОЭП в рамках подметода "виртуальных диафрагм" на основе предложенного расчётного алгоритма. Для повышения точности измерений исследованы особенности вычитание фона. Рассмотрена цифровая фильтрация для подавления различных помех, возникающих при регистрации и оцифровке распределения облучённости в ФР ОЭП. Проведён сравнительный экспериментальный анализ линейного низкочастотного сглаживающего, нелинейного и "взвешенного" медианных фильтров. Показано, что наиболее эффективным цифровым фильтром является нелинейный медианный фильтр, который устраняет влияние аддитивного и импульсного шумов, сохраняя при этом перепады распределений облучённости в ФР ОЭП.

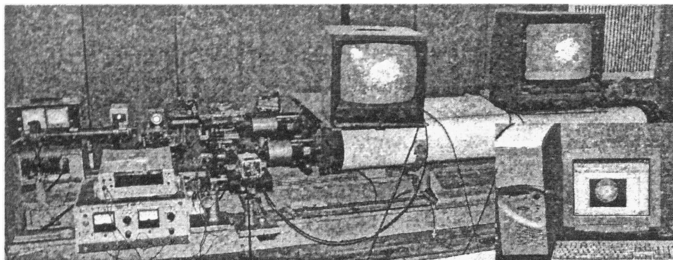


Рис. 3. Фотография полунатурного лазерно-электронного ПСВ-стенда для измерения энергетических световозвратательных характеристик ОЭП на основе подметода "виртуальных диафрагм"

Разработан алгоритм вычисления потока излучения, проходящего через "виртуальную диафрагму". Для идентификации наибольшего телесного угла усреднения, в пределах которого регистрируется 95% энергии всего ретроотражённого от Свз излучения, введена круговая виртуальная область изображения ФР. Приведены экспериментальные результаты определения радиуса "виртуальной диафрагмы", ограничивающей виртуальную область изображения ФР ОЭП.

Проведён сравнительный анализ погрешностей подметода "виртуальных диафрагм". Введено понятие суммарной теоретической среднеквадратической погрешности. Она определяется из анализа выражения (6), как среднеквадратическое значение четырёх независимых составляющих: погрешности δ_Φ вычисления отношения $\Phi_{\text{Свз}}(\Omega_{\text{изм}}) / \Phi_{\text{Свз}}(\Omega_{\text{Свз}})$; погрешности δ_U измерения отношения напряжения $U_{\text{Свз}} / U_{\text{эт}}$; относительной погрешности $\delta_{R_{\text{этил}}}$ вычисления ПСВ $R_{\text{этил}}$ эталонного Свз; погрешности δ_Ω определения отношения $\Omega_{\text{эт}} / \Omega_{\text{изм}}$. Для случая равномерного распределения облучённости в ФР Свз проведена оценка граничной погрешности $\delta_{\text{гр}}$ численного интегрирования двумерного квантованного выборочного массива, входящая в состав погрешности δ_Φ . Найден пороговый радиус виртуальной диафрагмы, равный пяти пикселям, при котором относительная граничная погрешность $\delta_{\text{гр}}$ не превосходит 4%. Получено, что суммарная теоре-

тическая погрешность подметода "виртуальных диафрагм" не превышает 7,6 %.

Проведены экспериментальные исследования погрешностей измерения энергетических световозвращательных характеристик разработанного ПСВ-стенда, идентифицирующих адекватность методики "виртуальных диафрагм". Получена интегральная оценка энергетической погрешности созданного ПСВ-стенда в результате сравнения расчётной и экспериментальной функций рассеяния *мононаправленного световозвращателя* в виде апертурно ограниченного плоского зеркала. Экспериментально показано, что теоретическая и экспериментальная нормированные зависимости, определяющие долю полной энергии, которая соответствует виртуальной диафрагме заданного радиуса отличаются с погрешностью порядка 2%.

Осуществлена интегральная оценка погрешности измерения ПСВ с помощью эталонного выпукло сферического световозвращателя. Получено, что экспериментальные кривые ПСВ в пределах достаточно большого диапазона углов усреднения хорошо совпадают с теоретическими расчётными прямыми, так что относительная ошибка измерения ПСВ не превышает 5%.

Найдена интегральная оценка погрешности при измерении отношений напряжений для различных диаметров физических и "виртуальных" диафрагм. Показано, что при измерении отношения напряжений погрешность (2,8%) по методу "виртуальных диафрагм" не превосходит погрешности (3,3%) при использовании физических диафрагм. В результате экспериментально установлено, что суммарная погрешность измерения энергетических световозвращательных характеристик на ПСВ-стенде по методике "виртуальных диафрагм" не превышает 10%.

В результате экспериментальных исследований на разработанном автором ПСВ-стенде большого количества ОЭП решена *третья главная практическая задача* диссертации – создан банк данных в виде совокупности энергетических визуальных и измеренных световозвращательных характеристик современных оптических и оптико-электронных приборов. Сформированный банк данных состоит из: 1) ансамбля зарегистрированных двумерных распределений облучённости в ФР Свз; 2) зависимостей ПСВ от угла усреднения на длинах волн зондирующего излучения; 3) пеленгационных характеристик; 4) дисперсионных характеристик. Проанализированы энергетические световозвращательные характеристики большого количества различных наблюдательных приборов, работающих как в видимом, так и в ИК диапазонах спектра. Построены графики ПСВ в зависимости от радиуса виртуальной и физической диафрагмы, а также от угла усреднения. Исследованы прицел Smidt&Bender ($\lambda = 0,53; 0,6328; 0,8; 1,06$ мкм), "Алина" ($\lambda = 0,53; 0,6328$ мкм), ПНВ CYCLOP-M1 ($\lambda = 0,53; 1,06$ мкм), жёлтая и серая светоотражающая плёнки ($\lambda = 0,53; 0,8$ мкм), тетраэдрический Свз ($\lambda = 0,53; 0,8$ мкм), объективы типа "pinhole" систем СВИД " ($\lambda = 0,53; 0,6328$ мкм и $D_{\text{ф}} = 1; 3$ мм), а также дорожные Свз ТГ2 и КДЗ – "кошачий глаз" ($\lambda = 0,53$ мкм). Дополнительно рассмотрены прицелы: охотничий ПН-6К-02, ПН-6К-07, ПН-6К-08, AN/PVS-10, охотничий ночной ПН-1 и ночной бинокль КОМЗ – данные о которых сведены в таблицу. Для объективов типа "pinhole" и дорожных Свз построены экспериментальные пеленгационные характеристики. В результате обработки графиков ПСВ, параметризованных по длине волны λ зонди-

рующего излучения, получены дисперсионные характеристики при фиксированном угле усреднения. Они найдены для ОЭП, работающих в видимом диапазоне (прицелы "Алина" и AN/PVS-10), в ИК-диапазоне (ПНВ CYCLOP-M1 и ночной бинокль 1ПН98), а также для световых идентификаторов (тетраэдрический Свз и серая светоотражающая плёнка). На рис. 4 приведены экспериментально полученные энергетические световозвращательные характеристики для прицела «Алина» и дорожного Свз КДЗ – "копачий глаз".

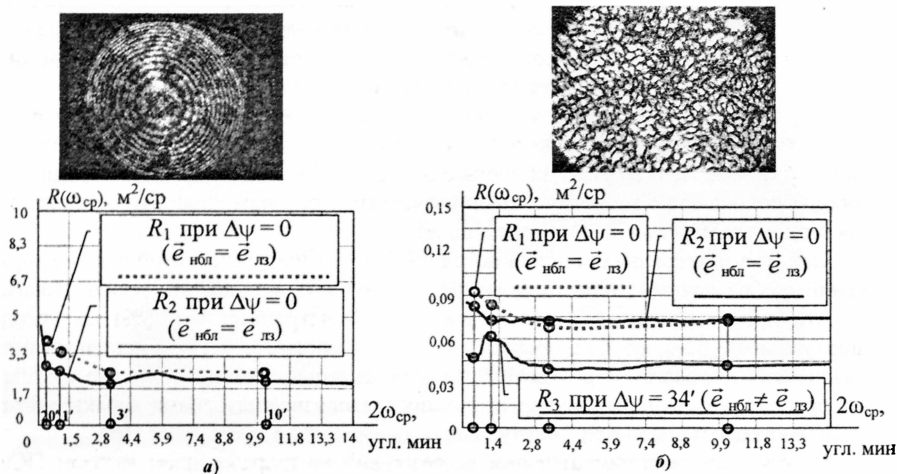


Рис. 4. Распределение облучённости в ФР Свз и результаты экспериментального измерения ПСВ:

- а) для прицела "Алина 3х46" на длине волны зондирующего излучения $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$;
 б) для дорожного световозвращателя КДЗ – "копачий глаз" на длине волны $\lambda = 0,53 \text{ мкм}$;
 R_1 – ПСВ, измеренный с помощью физических диафрагм ($a = 0,16; 0,5; 1,6; 5 \text{ мм}$), R_2, R_3 – ПСВ, измеренные с помощью методики виртуальных диафрагм.

В результате получено, что использование разработанной автором методики "виртуальных диафрагм" на созданном лазерно-электронном ПСВ-стенде позволяет автоматизировать процесс измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП для длин волн $\lambda = 0,53; 0,6328; 0,8; 0,9$ и $1,06 \text{ мкм}$ излучения зондирующего источника в широком диапазоне ПСВ ($10^{-4} - 10^4 \text{ м}^2/\text{ср}$) с погрешностью не превышающей 10%. При этом найдено, что по всем экспериментальным параметрам методика "виртуальных диафрагм" адекватна методике реальных физических диафрагм с погрешностью не превышающей 30%. Таким образом, банк накопленных экспериментальных данных, представляющий собой уникальную базу данных, обладает большой практической ценностью, так как может быть использован для селекции различных видов лоцируемых световозвращателей.

Приложения содержат конструктивные параметры объективов типа "pinhole" и энергетические характеристики типовой ФПЗС-матрицы.

3. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате детального анализа энергетических световозвращательных характеристик современных оптических и оптико-электронных приборов, методов их измерения, а также методов цифровой обработки изображений на основе трудов отечественных и зарубежных авторов, а также теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в диссертации, решена актуальная научная задача в области оптико-электронного приборостроения. Решение этой задачи имеет важное народно-хозяйственное значение при измерении характеристик различных световозвращателей, при разработке лазерных локационных систем, в геодезии, строительных работах, а также при измерении расстояний и оценке качества сборки и юстировки оптических систем ОЭП.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе общей методики модельного синтеза в рамках системно-модельного подхода созданы элементы теории лазерно-электронных систем измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП.

2. Основные научные положения элементов теории сформированы на основе предложенной автором инженерно-графовой методики модельного синтеза, включающей в себя девять этапов разработки и исследования синтезируемой системы, которые позволяют систематизировать, формализовать и представить в наглядном виде этапы проектирования, изготовления и экспериментального исследования лазерно-электронного измерительного стенда.

3. Построены структурно-функциональные схемы, структурные и поведенческие математические модели системы измерения энергетических световозвращательных характеристик, идентифицирующие полунатурный измерительный процесс: внешние структурные модели лазерно-электронной системы и оптического измерительного канала, а также связный оргграф внутренней структурной модели оптического канала.

4. Создана алгоритмическая модель оптического измерительного канала на основе идентификации моделей преобразующих элементов: алгоритмическая модель подводящего френгоферовского слоя пространства, одноступенчатая свёрточная модель оптической системы зондируемого Свз, двухступенчатая свёрточная модель композиционного элемента "оптическая система Свз – отводящий френгоферовский слой пространства", трёхступенчатая свёрточная модель оптической системы приёмного коллиматора.

5. Разработана полная свёрточная модель, идентифицирующая результирующую ФР оптического измерительного канала, которая в приближении идеальных коллимационных объективов с δ -образной ФР, представляет собой автосвёртку ФР оптической системы Свз.

6. Создана методика расчёта энергетических световозвращательных характеристик систем скрытого видеонаблюдения с объективами «pinhole».

7. Предложен подметод "виртуальных диафрагм", созданный в рамках полунатурного метода измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП и основанный на компьютерной обработке зарегистрированного с помощью ФПЗС-матрицы распределения облучённости в ФР световозвращателя.

8. Построена методика расчёта ПСВ ОЭП на основе распределения облучённости в когерентной ФР и создана методика цифровой обработки распределения облучённости.

9. Спроектирован, изготовлен и исследован ПСВ-стенд для измерения энергетических световозвращательных характеристик ОЭП на длинах волн $\lambda = 0,53; 0,6328; 0,8; 0,9$ и $1,06$ мкм излучения зондирующего источника в широком диапазоне ПСВ ($10^{-4} - 10^4$ м²/ср) с погрешностью не превышающей 10%.

10. Создан банк данных энергетических световозвращательных характеристик современных оптических и оптико-электронных приборов (ФР, ПСВ, пеленгационная и дисперсионная характеристики).

4. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В. Автоматизация измерений световозвращательных характеристик // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2000. – №3(40). – С. 43-62.

2. Животовский И.В., Немтинов В.Б. Модельный синтез дифракционной лазерно-электронной системы измерения диаметра оптического волокна. Поведенческий модельный синтез лазерно-электронного фурье-оптодиаметромера // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2001. – №4(45). – С. 33-50.

3. Животовский И.В., Немтинов В.Б. Концептуально-знаковый и структурный модельный синтез лазерно-электронного фурье-оптодиаметромера // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2000. – №3(40). – С. 43-62.

4. Анализ возможности дистанционного обнаружения камер скрытого видения на основе эффекта световозвращения / Н.В. Барышников, И.В. Животовский, В.Е. Карасик и др. // Информационно-измерительные и управляющие системы. Радиотехника. – 2005. – № 4-5. – Т.3. – С. 76-86.

5. Патент № 2201814 (РФ). Устройство для измерения показателя световозвращения оптико-электронных приборов / Н.В. Барышников, В.Б. Бокшанский, М.В. Вязовых, И.В. Животовский, В.Е. Карасик, В.Б. Немтинов, Ю.В. Хомутский // Б.И. – 2003. – №11.

6. Барышников Н.В., Вязовых М.В., Животовский И.В. Развитие методов и аппаратуры экспериментальных исследований отражательных характеристик оптических световозвращающих систем // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XI МНТК. – Сочи, 2000. – С. 46.

7. Животовский И.В. Измерение отражательных характеристик методом цифровой обработки изображения функции рассеяния лоцируемого ОЭП // Лазерные системы и их применения: Тез. докл. XI МНТК – Кострома, 2004. – С. 46.

8. Барышников Н.В., Животовский И.В. Цифровые методы измерения световозвращательных характеристик // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XIV МНТК. – Сочи, 2003. – С. 48.

9. Животовский И.В. Цифровой метод измерения отражательных характеристик // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XV МНТК. – Сочи, 2004. – С. 49.

10. Барышников Н.В., Бокшанский В.Б., Животовский И.В.. Разработка аппаратуры второго поколения и методов измерения отражательных характеристик // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XIII МНТК. – Сочи, 2002. – С. 67.

У1738132

Животовский И.В.
Разработка и исследование
лазерно-электронной
системы измерения
энергетических световозвр...
о оо

У 1738132

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Подписано к печати 26.12.05г.

Заказ № 454, объём 1,0 п.л. Тираж 100 экз.

Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Адрес: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5