На правах рукописи

ВЯЗОВЫХ Максим Вячеславович

РАЗРАБОТКА ЛАЗЕРНЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА 2005

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Карасик В.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Белов М. Л.,
кандидат технических наук
Тимашов А. П.

Ведущая организация: **ОАО «НПО «Геофизика-НВ»»**

Защита диссертации состоится 7 декабря 2005 года в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомится в библиотеке МГТУ имени Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан 1 ноября 2005 г.

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

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук Бурый Е. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Моделирование лазерных систем видения (ЛСВ) на основе имитационного подхода является новой и весьма перспективной задачей из-за все более широкого применения таких систем в различных областях науки и техники. При этом моделирование ЛСВ на этапе разработки существенно облегчает проектирование системы, а также позволяет сделать оптимальный выбор параметров разрабатываемой системы.

Попытка построения аналитической математической модели системы приводит либо к существенному ее упрощению и, как следствие, к потере адекватности, либо аналитические и численные методы математической модели системы являются нереализуемыми вследствие их сложности. Именно поэтому исследование активных изображающих систем на основе имитационного подхода является наиболее эффективным, а метод моделирования и алгоритмы его реализации, предложенные в работе, представляются весьма актуальным.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка лазерных локационных изображающих систем с импульсным подсветом на основе математического моделирования с использованием имитационного подхода.

Задачи исследования

1. Разработать метод анализа процесса формирования изображения лазерной системой видения через слой рассеивающей среды, который учитывает влияние на качество формируемого изображения как слоя рассеивающей среды, так и приемной оптической системы.
2. Создать на основе разработанного метода модель активной изображающей системы с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды.
3. Разработать методику проверки адекватности созданной модели ЛСВ, основанной на имитационном подходе.
4. Создать макетный образец ЛСВ на базе предложенной модели.
5. Провести экспериментальные исследования по предусмотренной методике проверки адекватности созданной модели ЛСВ и проанализировать их результаты.

Методы исследования

1. Методы теории переноса изображения и методы теории переноса излучения – поиск некогерентных функций рассеяния слоя рассеивающей среды и идеальной оптической системы в виде функций Грина уравнения переноса излучения.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
1738151
Вязовых М.В. Разработка ла
МГТУ
им. Н. Э. Баумана
Библиотека

2. Методы теории линейных систем, использование аппарата модуляционных передаточных функций.
3. Аналитические и численные методы теории оптических систем с использованием алгоритмов расчета хода лучей через аберрированную оптическую систему.
4. Методы моделирования, использующие имитационный подход.

Научная новизна диссертации

1. Аналитически определено пространственно-угловое распределение яркости от произвольного источника в заданной плоскости слоя рассеивающей среды в виде суммы нерассеянной компоненты излучения, которая превалирует вблизи от плоскости объекта, и многократно рассеянной компоненты излучения, которая превалирует в дальней зоне. Показано, что такое результирующее распределение с высокой точностью описывает пространственно-угловое распределение яркости также и в граничной зоне.
2. Получено распределение освещенности в плоскости изображения идеальной оптической системы также в виде суммы нерассеянной и многократно рассеянной компонент излучения. Аналогичное выражение было получено и в рамках скалярной теории дифракции – идентичность выражений подтвердила правильность аналитических выводов.
3. Реализован оригинальный способ восстановления пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке приемной системы, учитывающего влияние слоя рассеивающей среды, по зарегистрированному эталонной оптико-электронной системой распределению освещенности в плоскости анализа.
4. Разработан способ эмуляции процесса формирования изображения реальной оптической системой посредством использования эффективной аттестованной программы расчета хода лучей, корректно учитывающий дифракционные и аберрационные искажения, вносимые реальной оптической системой.

Практическая ценность

1. Разработанная аналитическая модель процесса формирования изображения активной изображающей системой с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды позволяет представить систему «слой рассеивающей среды – приемная оптическая система» в виде линейной изопланатической системы.
2. Созданная модель ЛСВ, использующая имитационный поход, существенно облегчает на этапе разработки проектирование таких систем, а также позволяет сделать оптимальный выбор параметров разрабатываемой системы.
3. Предложенный способ восстановления пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке приемной системы, учитывающего

влияние слоя рассеивающей среды, по зарегистрированному эталонной оптико-электронной системой распределению освещенности в плоскости анализа позволяет получить искомое распределение с высокой точностью.
4. Используемая для эмуляции процесса формирования изображения реальной оптической системой аттестованная программа расчета хода лучей позволяет кроме получения искомого распределения освещенности с высокой точностью также синтезировать и оптимизировать оптические системы с заданными параметрами.

Внедрение результатов диссертационной работы

Разработанные соискателем методики расчета пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке и распределения освещенности в плоскости анализа реальной оптической системы использованы в МИРЭА при выполнении НИР «Сабо», на ФГУП «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана» при выполнении НИР «Сахарин», а также внедрены в учебный процесс кафедры "Лазерные и оптико-электронные системы" МГТУ им. Н. Э. Баумана, что подтверждается соответствующими актами.

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы представлялись на XI, XIII и XIV Международных научно-технических конференциях "Лазеры в науке, технике, медицине" (г. Сочи, 2000, 2002 и 2003 гг.) и "Лазерные системы и их применения" (г. Кострома, 2004 г.).

Публикации

По теме диссертации опубликованы работы [1-6].

Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, выводов, библиографического списка из 76 наименований, содержит 169 страниц машинописного текста, 45 рисунков, 2 таблицы.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Для описания процесса формирования изображения через слой рассеивающей среды, учитывающего влияние на качество формируемого изображения как слоя рассеивающей среды, так и приемной оптической системы необходимо использовать методы теории переноса излучения.
2. Поиск некогерентных функций рассеяния слоя рассеивающей среды и оптической системы ведется в виде функций Грина уравнения переноса излучения.
3. Представление системы «слой рассеивающей среды – приемная оптическая система» в виде линейной изопланатической системы корректно

при выполнении условий ракурсной инвариантности для слоя среды и пространственной инвариантности для оптической системы.
4. Предложенный способ восстановления пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке приемной системы корректно учитывает влияние слоя рассеивающей среды.
5. Разработанный способ эмуляции процесса формирования изображения реальной оптической системой посредством использования эффективной аттестованной программы расчета хода лучей корректно учитывает аберрационные искажения, вносимые реальной оптической системой.
6. Модель ЛСВ, основанная на имитационном подходе, позволяет оценивать качество формируемого системой изображения по контрасту изображения тестовых шпальных мир различной пространственной частоты.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обсуждается актуальность темы исследований, сформулирована цель работы, изложены задачи и методы исследования. Приведен краткий обзор работ, посвященных процессу формирования изображения через рассеивающие среды.

Первая глава диссертационной работы посвящена математическому моделированию процесса формирования изображения активной изображающей системой с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды. Созданы аналитические модели слоя рассеивающей среды и приемной оптической системы.

Процесс формирования изображения в плоскости анализа приемной оптической системы моделируется следующим образом: пространственно-угловое распределение яркости в объектной плоскости преобразуется слоем рассеивающей среды в пространственно-угловое распределение яркости во входном зрачке оптической системы; это распределение яркости, в свою очередь, преобразуется изображающей оптической системой в распределение освещенности в плоскости анализа.

В рамках теории переноса излучения процесс преобразования пространственно-углового распределения яркости в плоскости объектов $L(\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp)$ в пространственно-угловое распределение яркости в плоскости входного зрачка оптической системы $L_1(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp})$ описывается аналитическим выражением, представляющим собой интеграл суперпозиции, в подынтегральное выражение которого входит произведение исходного распределения яркости и функции Грина слоя среды распространения.

$$L_1(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp}) = \int_{-\infty}^{\infty}\!\!\ldots\!\int L(\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp)\cdot G_{PC}(\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp;\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp})\cdot d\vec{r}_\perp\cdot d\vec{n}_\perp, \qquad (1)$$

$G_{PC}(\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp;\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp})$ – некогерентная функция рассеяния слоя рассеивающей среды, которая ищется в виде функции Грина уравнения переноса излучения.

В условиях решаемой задачи индикатрисы излучения в пространстве объектов сильно вытянуты, что существенно упрощает описание распространения узконаправленных световых пучков в рассеивающих средах путем перехода к малоугловому приближению уравнения переноса излучения. Однако общего решение уравнения получить невозможно. Для получения аналитического решения требуется перейти к следующему приближению уравнения переноса излучения – малоугловому диффузионному приближению путем разложения подынтегрального члена в ряд Тейлора для функции двух переменных.

$$\left(\frac{\partial}{\partial z}+\vec{n}_\perp\nabla_{\vec{r}_\perp}\right)\cdot L(\vec{r}_\perp,z,\vec{n}_\perp)=-[(\varepsilon-\sigma)-\frac{\sigma}{4}<\gamma^2>\nabla^2_{\vec{n}_\perp}]\cdot L(\vec{r}_\perp,z,\vec{n}_\perp), \qquad (2)$$

где $\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp$ – проекции единичных радиус-вектора точки $\vec{r}$ и вектора направлений $\vec{n}$ на плоскость z = const, нормальную к оси пучка; $\vec{n}_\perp\nabla_{\vec{r}_\perp}=n_x\frac{\partial}{\partial x}+n_y\frac{\partial}{\partial y}$; $\nabla^2_{\vec{n}_\perp}=\left(\frac{\partial}{\partial n_x^2}+\frac{\partial}{\partial n_y^2}\right)$; ε – показатель ослабления; σ – показатель рассеяния среды; $<\gamma^2>$ – дисперсия угла отклонения луча при элементарном акте рассеяния.

Решая уравнение для точечного мононаправленного источника единичной мощности, получаем функцию Грина, которая представляет собой некогерентную функцию рассеяния слоя рассеивающей среды, на основании которой можно получить пространственно-угловое распределение яркости от произвольного источника (1):

$$G^S_{PC}(\vec{r}_\perp,z,\vec{n}_\perp)=\frac{12\cdot\exp(-kz)}{\pi^2\sigma^z<\gamma^2>^2 z^4}\cdot\exp\left\{-\frac{12\cdot(\frac{z^2}{3}\cdot n_\perp^2-z\vec{n}_\perp\vec{r}_\perp+r_\perp^2)}{\sigma<\gamma^2>z^3}\right\}, \qquad (3)$$

где k – показатель поглощения.

Однако такой подход справедлив лишь в области больших оптических расстояний, т.е. там, где световое поле в основном формируется многократно рассеянным светом – структуру светового пучка вблизи от источника полученные соотношения описывают с большой погрешностью, так как в этой области пространственно-угловое распределение яркости сильно анизотропно и существенно отличается от гауссова.

В этой области функцию Грина слоя рассеивающей среды следует искать из уравнения переноса излучения с членом, учитывающим перерассеяние, равным нулю:

$$\vec{n}\nabla L(\vec{r},\vec{n})=-\varepsilon L(\vec{r},\vec{n}). \qquad (4)$$

Такой подход к определению функции Грина слоя рассеивающей среды вблизи плоскости объектов можно считать достаточно адекватным и удовлетворяющим получению пространственно-углового распределения

яркости с высокой точностью за счет многократного превышения прямой (нерассеянной) компоненты излучения над рассеянной в этой области. Тогда для прямой (нерассеянной) компоненты функция Грина слоя рассеивающей среды будет описываться следующим выражением:

$$G^0_{PC}(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) = \delta(\vec{r}_\perp - \vec{r}'_\perp - \vec{n}'_\perp z) \cdot \delta(\vec{n}_\perp - \vec{n}'_\perp) \cdot \exp(-\varepsilon z). \qquad (5)$$

Представляется целесообразным результирующее пространственно-угловое распределение яркости в заданной плоскости слоя рассеивающей среды искать в виде суммы двух компонент – прямопрошедшего (нерассеянного) света и многократно рассеянного света:

$$L_1(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) = L^0_1(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) + L^S_1(\vec{r}_\perp, z, \vec{n}_\perp) =$$
$$= \iint\int_{-\infty}^{\infty} L(\vec{r}_\perp, \vec{n}_\perp) \cdot \left[G^0_{PC}(\vec{r}_\perp, \vec{n}_\perp; \vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}) + G^S_{PC}(\vec{r}_\perp, \vec{n}_\perp; \vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp})\right] \cdot d\vec{r}_\perp \cdot d\vec{n}_\perp . \qquad (6)$$

Конечно, нахождение пространственно-углового распределения яркости в виде суммы нерассеянной и многократно рассеянной компонент излучения не является строгим, но позволяет с достаточной для инженерных расчетов точностью получить это распределение не только вблизи источника яркости (где превалирует прямая компонента) и в дальней зоне (где превалирует рассеянная компонента), но и при описании пространственно-углового распределения яркости в граничной зоне, где обе компоненты имеют одинаковый порядок величины.

Аналитическое выражение, аналогичное (1), описывает преобразование пространственно-углового распределения яркости в плоскости входного зрачка в пространственно-угловое распределение яркости в плоскости анализа оптической системы:

$$L_2(\vec{r}_{2\perp}, \vec{n}_{2\perp}) = \int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int L_1(\vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}) \cdot G_{OC}(\vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}; \vec{r}_{2\perp}, \vec{n}_{2\perp}) \cdot d\vec{r}_{1\perp} \cdot d\vec{n}_{1\perp}, \qquad (7)$$

где $L_2(\vec{r}_{2\perp}, \vec{n}_{2\perp})$ – пространственно-угловое распределение яркости в плоскости анализа оптической системы; $G_{OC}(\vec{r}_{1\perp}, \vec{n}_{1\perp}; \vec{r}_{2\perp}, \vec{n}_{2\perp})$ – функция Грина или некогерентная функция рассеяния приемной оптической системы.

Интегрируя найденное выражение для пространственно-углового распределения яркости по всем направлениям, распределение освещенности в данной плоскости оптической системы получается в виде:

$$E_2(\vec{r}_{2\perp}) = \iint_{-\infty}^{\infty} L_2(\vec{r}_{2\perp}, \vec{n}_{2\perp}) \cdot d\vec{n}_{2\perp}, \qquad (8)$$

где $E_2(\vec{r}_{2\perp})$ – распределение освещенности в плоскости анализа оптической системы.

Функция Грина идеальной оптической системы, состоящей из безаберрационного тонкого однолинзового объектива и слоя свободного пространства между плоскостью входного зрачка системы и плоскостью анализа, исходя из физического смысла, может быть представлена в виде

произведения двух функций: первая – $G_Л(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{2\perp})$ – в рамках лучевой оптики описывает изменение направления луча, падающего на входной зрачок оптической системы, вторая – $G_B(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp})$– неизменность яркости вдоль преломленного луча в свободном пространстве с учетом пропускания лучей света оптической системой:

$$G_{OC}(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp}) = G_Л(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{21\perp}) \cdot G_B(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp}), \qquad (9)$$

причем

$$G_Л(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{2\perp}) = \delta(\vec{n}_{2\perp} + \vec{n}_{1\perp} - \frac{\vec{r}_{1\perp}}{f'}), \qquad (10)$$

$$G_B(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp}) = \tau(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_1) \cdot \delta(\vec{r}_{2\perp} - \vec{r}_{1\perp} + f\vec{n}_{2\perp}), \qquad (11)$$

где f' – фокусное расстояние оптической системы; $\tau(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_1)$ – функция, характеризующая пропускание оптической системой лучей света, падающих в точку $\vec{r}_{1\perp}$ в направлении $\vec{n}_1$.

Распределение освещенности в плоскости изображения идеальной оптической системы на основании (8), (9), (10) и (11) представляется в виде:

$$E_2(\vec{r}_{2\perp}) = \frac{1}{f'^2} \int_{-\infty}^{\infty} \ldots \int \tau(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_1) \cdot L_1(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp}) \cdot \delta(\vec{n}_{1\perp} - \frac{\vec{r}_{2\perp}}{f'}) \cdot d\vec{r}_{1\perp} \cdot d\vec{n}_{1\perp}. \qquad (12)$$

Выражение, описывающее распределение освещенности в плоскости изображения идеальной оптической системы, было также получено, используя другое фундаментальное уравнение теории оптико-электронных систем – волновое. Выражения оказалось тождественным (12).

На основании результатов исследований была синтезирована обобщенная аналитическая модель процесса формирования изображения активной изображающей системой с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды, представленная на рис. 1.

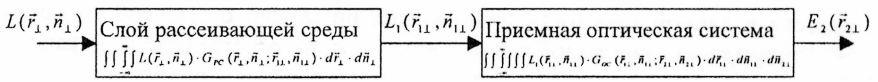


Рис. 1. Обобщенная аналитическая модель процесса формирования изображения активной изображающей системой с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды

В этой модели пространством входных сигналов является пространственно-угловое распределение яркости в плоскости объектов $L(\vec{r}_\perp,\vec{n}_\perp)$. Множеством операторов и отношений между ними являются – при распространении излучения как в рассеивающей среде, так и через идеальную оптическую систему – операторы интегрирования. Множеством выходных сигналов является распределение освещенности в плоскости анализа приемной оптической системы $E_2(\vec{r}_{2\perp})$.

Разработанная аналитической модель процесса формирования изображения активной изображающей системой с импульсным подсветом через слой рассеивающей среды позволяет производить оценку качества изображения (например, по контрасту изображения шпальных мир различного пространственного разрешения). В то же время, этой модели присущ ряд недостатков, затрудняющих практическую ее реализацию: во-первых, необходимо определение в аналитическом виде пространственно-углового распределения яркости в объектной плоскости при подсвете ее лазерным излучением; во-вторых, необходим расчет функции Грина слоя среды, что в случае рассеивающей среды является крайне затруднительным из-за зависимости функции Грина слоя рассеивающей среды от множества априори неизвестных параметров – показателя рассеяния, показателя поглощения, показателя ослабления, параметров индикатрисы рассеяния; в-третьих, необходим также расчет функции Грина приемной оптической системы, что в случае реальной оптической системы является также затруднительным из-за наличия у нее дифракции и аберраций; в-четвертых, математические процедуры реализации аналитической модели трудоемки.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов расчета и программного обеспечения для реализации модели лазерной системы видения с импульсным подсветом с использованием имитационного подхода. Созданы на основании этого подхода модели слоя рассеивающей среды и приемной оптической системы.

В диссертационной работе был предложен оригинальный метод эмуляции пространственно-углового распределения яркости в плоскости входного зрачка оптической системы по зарегистрированному эталонной оптико-электронной системой распределению освещенности в плоскости анализа.

Впрямую зарегистрировать пространственно-угловое распределение яркости в данной плоскости невозможно, но можно с высокой точностью зарегистрировать связанное с ним распределение освещенности. В качестве регистрирующей системы предлагается эталонная оптико-электронная система, состоящая из приемного стигматического объектива, матричнго фотоприемника высокого разрешения, высокоразрядного аналого-цифрового преобразователя, малошумящего блока обработки видеосигнала и лазерного излучателя. Основным свойством регистрирующей эталонной оптико-электронной является то, что она не вносит собственных искажений в изображение, – по крайней мере, в той области пространственных частот, с которыми работает реальная лазерная система видения.

Сформированное стигматическим объективом распределение освещенности переносится в оптически сопряженную ей плоскость объектов, используя угловое увеличение системы и условие равенства потоков, пришедшего на ПЗС-матрицу и излучаемого с объекта в направлении входного зрачка оптической системы. Полученное распределение светимости

и синтезированное на его основе пространственно-угловое распределение яркости в плоскости объектов (рис. 2), считая источники ламбертовыми, учитывает все искажения, вносимые слоем рассеивающей среды.

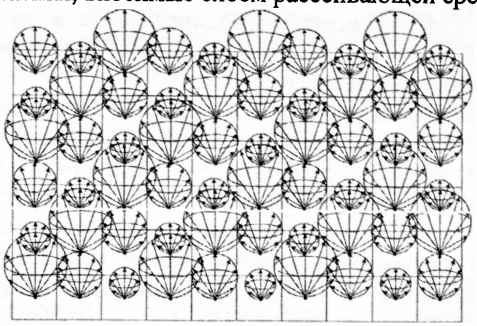


Рис. 2. Редуцированное пространственно-угловое распределение яркости в плоскости объектов в виде совокупности диффузионных элементарных источников

Для получения пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке оптической системы необходимо «прогнать» лучи от каждого элементарного источника плоскости объектов до плоскости входного зрачка на основании теоремы оптической взаимности через слой свободного пространства. Разработанный метод анализа и расчета позволяет с требуемой для инженерных вычислений точностью получить пространственно-угловое распределение яркости во входном зрачке приемной оптической системы с учетом искажений, вносимых слоем рассеивающей среды, в виде координат пересечения лучей с плоскостью входного зрачка и их направлений.

Также как и для идеальной, для реальной оптической системы можно записать выражение, связывающее пространственно угловое распределение яркости в фокальной плоскости оптической системы $L_2(\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp})$ с пространственно-угловым распределением яркости в плоскости входного зрачка $L_1(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp})$:

$$L_2(\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp}) = \int_{-\infty}^{\infty}\ldots\int L_1(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp})\cdot G_{POC}(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp})\cdot d\vec{r}_{2\perp}\cdot d\vec{n}_{2\perp}, \qquad (13)$$

где $G_{POC}(\vec{r}_{1\perp},\vec{n}_{1\perp};\vec{r}_{2\perp},\vec{n}_{2\perp})$ – функция Грина для реальной оптической системы. Но аналитический вид функции Грина для реальной оптической системы обычно не известен – связь между направлениями падающего и преломленного лучей сложнее, чем в обобщенном законе Снелиуса, – добавится зависимость изменения направления преломленного луча от аберраций оптической системы.

Пространственно-угловое распределение яркости во входном зрачке оптической системы было получено в виде координат пересечения лучей с плоскостью входного зрачка и их направлений – аттестованная программа расчета хода лучей позволит «трассировать» эти лучи через реальную оптическую систему с учетом ее аберраций для нахождения распределения освещенности в плоскости анализа.

Такую «трассировку» осуществляет пакет программ «Zemax», при этом количество лучей, испущенных каждым элементарным источником объектной сцены (рис. 2), прямо пропорционально его яркости (светимости), а сами лучи распределены квазиравномерно как в пределах элементарного источника, так и по входному зрачку оптической системы. Ход каждого луча просчитывается программой – вычисляются координаты встречи луча с каждой поверхностью – с учетом реальных аберраций конкретной оптической системы.

В результате такого способа имитации процесса формирования распределения освещенности в плоскости анализа реальной оптической системы корректно учитываются все реальные искажения из-за аберраций.

Предложенному алгоритму нахождения распределения освещенности присущи две основные погрешности – погрешность оцифровки распределения освещенности в изображении, формируемом регистрирующей системой

$$\delta_{кв} = \frac{1}{2 \cdot (2^b - 1)}, \tag{14}$$

где b – битность оцифровки изображения;
и погрешность распределения лучей по элементарным источникам в плоскости объектов

$$\delta^{л}_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}\overline{E}_{i,j}}{2 \cdot \overline{E}_{m,n} \cdot K_{\Sigma}} = \frac{255 \cdot (M \cdot N - 1) + 1}{2 \cdot 1 \cdot K_{\Sigma}}, \tag{15}$$

где $\overline{E}_{i,j}$ – приведенная (оцифрованная) освещенность текущего пикселя плоскости изображения оптической системы; $\overline{E}_{m,n} = 1$ – минимальное значение приведенной освещенности; K_{Σ} – общее количество испущенных лучей всеми элементарными источниками в плоскости объектов; $M \times N$ – количество элементарных источников в плоскости объектов.

Задавая общую максимальную погрешность получения распределения освещенности в плоскости анализа реальной оптической системы $\delta_{\Sigma} = \delta_{кв} + \delta^{л}_{\max}$, можно вычислить общее количество лучей, испущенных объектной сценой.

$$K_{\Sigma} = \frac{255 \cdot (M \cdot N - 1) + 1}{2 \cdot \delta^{л}_{\max}} = \frac{255 \cdot (M \cdot N - 1) + 1}{2 \cdot (\delta_{\Sigma} - \delta_{кв})}. \tag{16}$$

Для получения распределения освещенности в плоскости анализа реальной оптической системы с точностью в 5 % необходимо задать 10 миллионов лучей, что соответствует получасам машинного времени.

Предложенный подход позволил создать модель ЛСВ на основе имитационного подхода, структурная схема которой изображена на рис. 3, реализующую алгоритм восстановления (имитации) пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке оптической системы по зарегистрированному эталонной оптико-электронной системой распределению освещенности и способ эмуляции процесса формирования изображения реальной оптической системой посредством использования эффективной аттестованной программы расчета хода лучей.

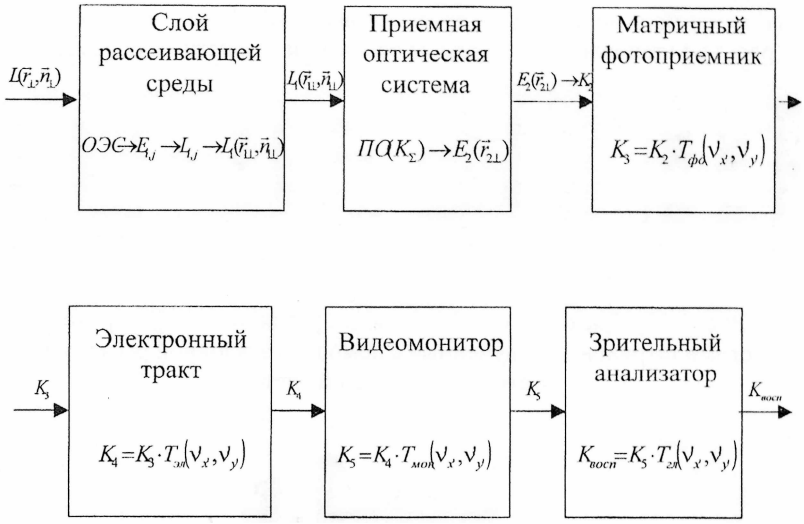


Рис. 3. Структурная схема модели ЛСВ на основе имитационного подхода

Третья глава диссертационной работы посвящена разработке методики проверки адекватности созданной модели ЛСВ на основе имитационного подхода, функционирующей в рассеивающих средах, а также проведению экспериментальных исследований и их анализу.

При этом под адекватностью модели понималась степень соответствия результатов, полученных по разработанной модели с данными экспериментальных исследований. Предлагаемая методика использует в качестве сравнительных результатов такой интегральный параметр изображающей системы как качество формируемого изображения. В соответствии с общепринятыми критериями качество формируемого

изображения оценивалось в обоих случаях (в рамках модели и в эксперименте) по контрасту изображения тестовых шпальных мир различной пространственной частоты и с определенными геометрическими размерами полос, то есть по системной МПФ.

Согласно разработанной методике на первом этапе с помощью созданной модели определялись контрасты изображения мир при заданных условиях наблюдения и характеристиках слоя рассеивающей среды. Этот этап включал ряд процедур и операций, реализуемых в определенной последовательности:

1) регистрация в плоскости анализа эталонной оптико-электронной системой изображений шпальных мир, подсвеченных через слой рассеивающей среды лазерным излучением (рис. 4) – в качестве такой регистрирующей системы был использован профессиональный фотографический аппарат (рис. 5), установленный на одном основании с макетным образцом ЛСВ;

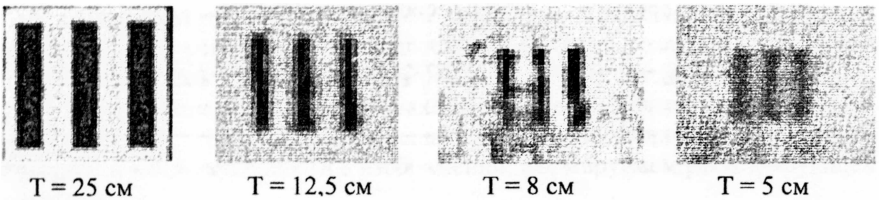


Рис. 4. Изображения шпальных мир с различными пространственными периодами штрихов T, полученные с помощью эталонной регистрирующей оптико-электронной системы

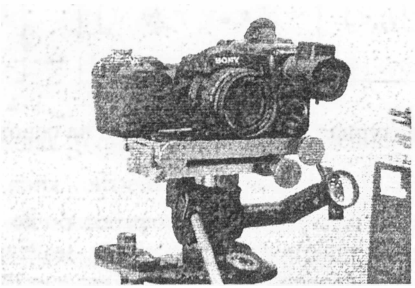
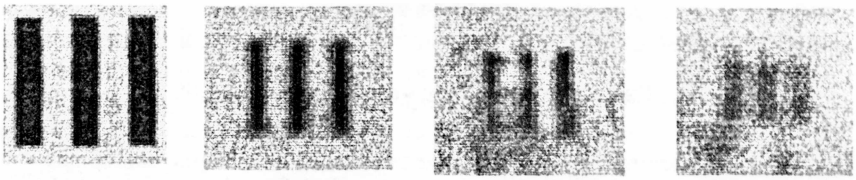


Рис. 5. Внешний вид эталонной оптико-электронной системы

2) восстановление с помощью полученного распределения освещенности редуцированного распределения светимости в объектной плоскости, учитывающего искажения, вносимые слоем рассеивающей среды;
3) расчет хода лучей от объектной плоскости до плоскости анализа через слой свободного пространства (которым заменен слой рассеивающей

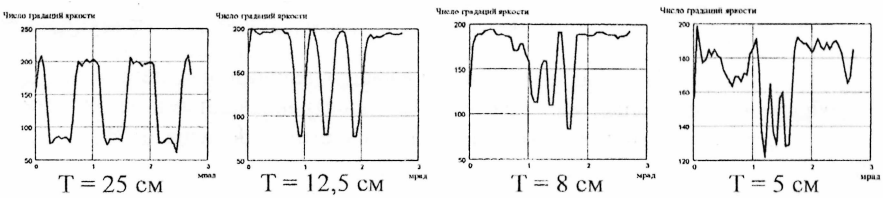
среды на основании оптической теоремы взаимности) и приемную оптическую систему разрабатываемой ЛСВ; расчет выполнялся на основе аттестованной программы расчета хода лучей, которая по заданному яркостному полю в плоскости объектов строила изображение в плоскости анализа реальной оптической системы методом трассировки лучей (рис. 6).



T = 25 см T = 12,5 см T = 8 см T = 5 см

Рис. 6. Изображения шпальных мир с различными пространственными периодами штрихов T, полученные с помощью эталонной регистрирующей оптико-электронной системы и программы расчета хода лучей

Полученные изображения мир содержат искажения, вносимые не только слоем рассеивающей среды, но и приемной оптической системой. Контрасты мир вычислялись по полученным изображениям (рис. 7) и приводились к выходу электронного тракта умножением на значения МПФ матричного приемника и электронного тракта на соответствующих пространственных частотах.



T = 25 см T = 12,5 см T = 8 см T = 5 см

Рис. 7. Центральные сечения в распределении освещенности изображений шпальных мир с различными пространственными периодами штрихов T, полученные с помощью эталонной регистрирующей оптико-электронной системы и программы расчета хода лучей

На втором этапе для определения контрастов изображений мир при аналогичных условиях наблюдения использовался экспериментальный макетный образец ЛСВ, разработанный в рамках диссертационной работы на основе созданной модели (рис. 8). Плоскость анализа изображений автоматически была приведена к выходу электронного тракта, так как вычисление контрастов осуществлялось по оцифрованному видеосигналу на выходе тракта (рис. 9 и 10).

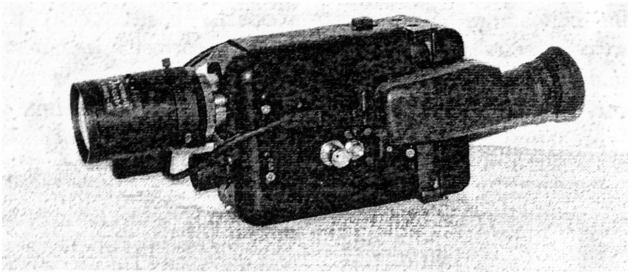


Рис. 8. Внешний вид макетного образца ЛСВ

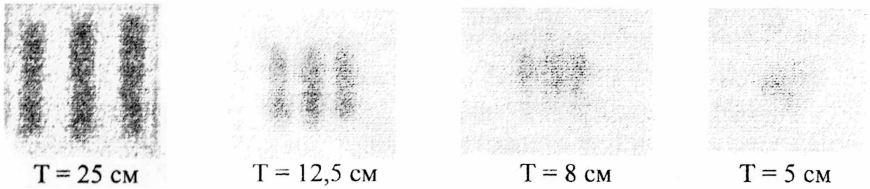


Рис. 9. Изображения шпальных мир с различными пространственными периодами штрихов T, полученные с помощью макетного образца ЛСВ

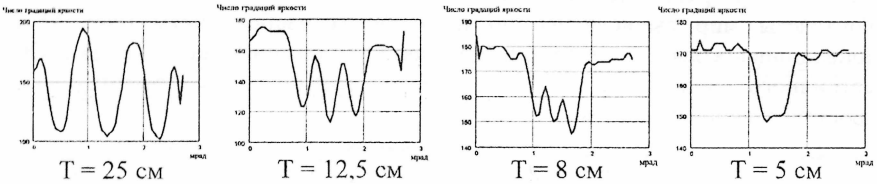


Рис. 10. Центральные сечения в распределении освещенности изображений шпальных мир с различными пространственными периодами штрихов T, полученные с помощью макетного образца ЛСВ

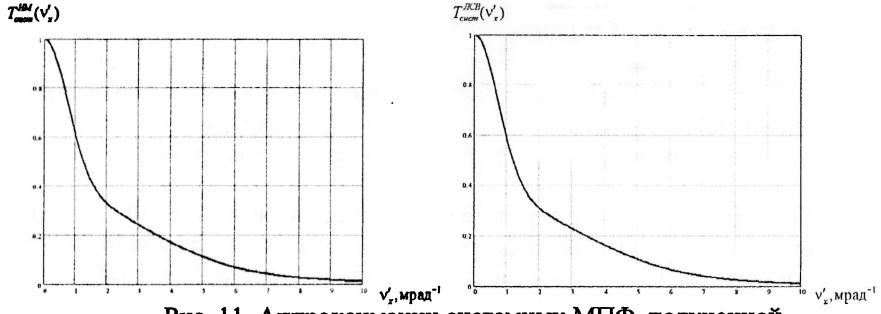


Рис. 11. Аппроксимации системных МПФ, полученной моделированием с использованием имитационного подхода и макетного образца ЛСВ

Третий, заключительный, этап был посвящен сравнению полученных результатов, то есть сравнению двух системных МПФ, одна из которых построена на базе данных разработанной модели, а другая – по результатам эксперимента (рис.11).

Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной модели на основе имитационного подхода, а, следовательно, дали основания считать корректными и научно обоснованными теоретические положения, развитые в работе, применительно к лазерным локационным изображающим системам, функционирующим в рассеивающих средах.

В выводах дается краткая характеристика предложенных методов анализа и расчета и подведены итоги по диссертации в целом.

Основные результаты диссертации состоят в следующем:

1. Создана модель активной изображающей системы, позволяющая на стадии проектирования оценить влияние свойств рассеивающей среды и характеристик приемной оптической системы на качество формируемого изображения и базирующаяся на имитационном представлении пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке приемной оптической системы. Использование модели на основе имитационного подхода существенно сокращает сроки и стоимость проектирования за счет устранения трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований, связанных с анализом изображений, формируемых в рассеивающих средах.
2. Разработан метод анализа процесса формирования изображения лазерной системой видения через слой рассеивающей среды, основанный на сепарабильных решениях уравнения переноса оптического излучения для прямой и многократно рассеянной компонент и последующем аддитивном синтезе полученных распределений освещенности. Корректность предложенного подхода подтверждена тождественностью выражения распределения освещенности в плоскости анализа идеальной оптической системы, полученного в рамках волнового уравнения.
3. Предложено и теоретически обосновано представление системы «слой рассеивающей среды – приемная оптическая система» в виде линейной изопланатической системы. Показано, что корректность такого представления связана с выполнением условий ракурсной инвариантности для слоя среды и пространственной инвариантности для оптической системы.
4. В рамках модели, основанной на имитационном подходе, реализован оригинальный способ восстановления пространственно-углового распределения яркости во входном зрачке приемной системы, учитывающего влияние слоя рассеивающей среды, по зарегистрированному эталонной оптико-электронной системой распределению освещенности в плоскости анализа.

5. Разработан способ эмуляции процесса формирования изображения реальной оптической системой посредством использования эффективной аттестованной программы расчета хода лучей, корректно учитывающий аберрационные искажения, вносимые реальной оптической системой.
6. Разработана методика проверки адекватности созданной модели ЛСВ на основе имитационного подхода, базирующаяся на сравнении контрастов изображений тестовых шпальных мир различной пространственной частоты, полученных в рамках модели и с помощью макетного образца ЛСВ.
7. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие хорошую адекватность разработанной модели ЛСВ на основе имитационного подхода в слабо и средне рассеивающих средах (различия в значениях контрастов изображений шпальных мир составляют не более 4%) и достаточную степень адекватности в сильно рассеивающих анизотропных средах (различия в значениях контрастов изображений шпальных мир составляют менее 10%).

Список публикаций по теме диссертационной работы:

По теме диссертации опубликованы и доложены следующие работы:

1. Карасик В.Е., Вязовых М.В. Анализ функции рассеяния активной системы видения // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XI Международной научн.-техн. конф. – Сочи, 2000. - С. 40-41.
2. Карасик В.Е., Вязовых М.В. Определение освещенности в плоскости анализа оптической изображающей системы при некогерентном освещении // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XIII Международной научн.-техн. конф. – Сочи, 2002. - С. 101.
3. Карасик В.Е., Вязовых М.В. Методика расчета распределения освещенности в плоскости анализа приемной оптической системы при распространении излучения через рассеивающую среду // Лазеры в науке, технике, медицине: Тез. докл. XIV Международной научн.-техн. конф. – Сочи, 2003. - С. 49-51.
4. Вязовых М.В. Разработка имитационной модели процесса формирования изображения реальными оптическими системами в рассеивающих средах // Лазерные системы и их применения: Тез. докл. Международной научн.-техн. конф. – Кострома, 2004. - С. 3-6.
5. Вязовых М.В. Определение освещенности в плоскости анализа оптической изображающей системы при некогерентном освещении // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2004. - № 2(55). - С. 12-17.
6. Карасик В.Е., Вязовых М.В. Имитационная модель процесса формирования изображения реальными оптическими системами в рассеивающих средах // Вестник МГТУ. Приборостроение. - 2005. - № 1(58). - С. 30-42.

Подписано к печати 9.11.2005 Зак. 363 Объем 1.0 п.л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана