

УДК 621. 396. 967. 029. 7
На правах рукописи

Степанов Родион Олегович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И АППАРАТУРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕТОВОЗ-
ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ В
ИК ДИАПАЗОНЕ**

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана на кафедре «Лазерные и оптико-электронные системы»

Научный руководитель: Карасик Валерий Ефимович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Волков Виктор Генрихович
доктор технических наук,
ФГУП «Альфа»

Кузичев Виктор Иванович
кандидат технических наук,
МГТУ им. Н.Э. Баумана

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

Защита диссертации состоится «9» июня 2010 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

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

Отзыв в одном экземпляре, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан «___» _____ 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук

Бурый Е.В.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последнее время во многих перспективных системах вооружения и военной техники широко применяются оптико-электронные средства (ОЭС), работающие в средневолновом (3...5 мкм) и длинноволновом (8...14 мкм) ИК диапазонах спектра, обеспечивающие возможность ведения боевых действий ночью и в условиях плохой видимости. Их активное развитие связывается, прежде всего, с успехами в разработке и промышленном освоении матричных приемников ИК излучения, позволивших отказаться от сложных и громоздких оптико-механических сканирующих устройств.

Расширение функциональных возможностей и повышение эффективности действия ИК приборов стимулировали проведение исследований по разработке методов и аппаратуры оказания им противодействия. В указанном аспекте первоочередной является задача дистанционного обнаружения ИК ОЭС и их селекции от ложных целей.

Один из наиболее эффективных подходов к решению этой задачи связан с созданием аппаратуры обнаружения, принцип действия которой основан на использовании эффекта световозвращения.

Эффект световозвращения возникает при зондировании любого ОЭС излучением, соответствующим его рабочему спектральному диапазону, и проявляется в том, что независимо от угла подсвета, отраженное излучение распространяется в направлении, близком к направлению его падения.

При световозвращении ОЭС выступает в роли преобразователя состояния зондирующего излучения. Преобразующие свойства определяются световозвращательными характеристиками (СВХ), а само ОЭС рассматривается как световозвращатель (Свз). Именно СВХ определяют возможность и эффективность обнаружения ОЭС.

Исследования СВХ ОЭС проводятся как в нашей стране, так и за рубежом.

Среди отечественных организаций, занимающихся такими исследованиями, следует отметить ФГУП «КБточмаш им. А.Э. Нудельмана», НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ФГУП «НПО «Астрофизика», ФГУП ГосНИИ ЛЦ РФ «Радуга», НПЦ «Транскрипт», МНПО «Спектр», а среди зарубежных - Electronics Command Research, Development and Engineering Center (США), CILAS (Франция).

Разработкам методов расчета и методик измерения СВХ ОЭС видимого и ближнего ИК диапазонов посвящены диссертационные работы А.А.Резунова, Н.В. Барышникова, И.В. Животовского. В этих работах исследованы пространственные, энергетические, поляризационные СВХ, а также разработана аппаратура для их экспериментального определения. Показано, что к основным СВХ относятся индикатриса ретроотраженного излучения и показатель световозвращения (ПСВ) ОЭС.

Вместе с тем, в указанных работах не рассмотрены специфические особенности проявления эффекта световозвращения в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах. Более того, в публикациях по данной тематике сведения о системных теоретических и экспериментальных исследованиях СВХ ИК ОЭС

отсутствуют. Это, в свою очередь, затрудняет обоснование принципов и технических путей построения лазерной локационной аппаратуры, осуществляющей обнаружение ИК ОЭС и высокоточное наведение на них средств оптического противодействия.

В связи с этим тема диссертационной работы, связанная с разработкой методов и аппаратуры для исследования световозвращательных характеристик ОЭС в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах представляется актуальной.

Цель диссертационной работы и задачи исследований

Целью диссертационной работы является разработка методов и аппаратуры для исследования световозвращательных характеристик ОЭС средневолнового и длинноволнового ИК диапазонов спектра.

Для достижения поставленной цели были решены следующие научно – технические задачи:

1. Разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение для расчета индикатрис ретроотражения и ПСВ оптических систем ИК ОЭС, проведен анализ СВХ различных типов ИК ОЭС и ложных целей, выявлены информативные признаки СВХ ложных целей, позволяющие в дальнейшем осуществлять их селекцию в заданном спектральном диапазоне.

2. Разработана методика измерения индикатрис ретроотражения и ПСВ ОЭС в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах, учитывающая особенности распространения ИК излучения при ретроотражении.

3. Исследована возможность использования эталонных тепловых излучателей типа “черное тело” (ЧТ) для имитации характеристик излучения, ретроотраженного от ИК световозвращателей.

4. Создан экспериментальный стенд для измерения индикатрис ретроотражения и ПСВ ОЭС в длинноволновом ИК диапазоне, на котором проведен цикл экспериментальных исследований СВХ современных ИК ОЭС с целью формирования информационного банка данных их отражательных характеристик.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы теории теплового излучения, матричный метод Джонса, методы теории оптико-электронных систем, методы линейной алгебры и математического анализа.

Научная новизна

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие новые научные результаты теоретического и прикладного характера:

1. Разработаны методика, алгоритмы и пакет прикладных программ для расчета световозвращательных характеристик ИК ОЭС, учитывающие особенности взаимодействия ИК излучения с материалами, входящими в состав этих ОЭС.

2. Разработана методика относительных измерений ПСВ ОЭС и ложных целей в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах спектра, основанная на использовании алгоритмов цифровой обработки индикатрис ретроотражения, зарегистрированных с помощью матричного фотоприемного устройства.

3. Обоснована возможность использования эталонных тепловых излучателей типа ЧТ для имитации характеристик излучения ретроотраженного от Свз и определена аналитическая связь между температурными характеристиками излучателей и имитируемыми ими величинами ПСВ.

Практическая ценность результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана функциональная схема измерительного стенда для исследования световозвратительных характеристик ИК ОЭС, базирующаяся на современной элементной базе и позволяющая регистрировать индикатрису ретроотражения и измерять ПСВ, а также пеленгационную и спектральную (зависимости ПСВ соответственно от угла падения и от длины волны зондирующего излучения) характеристики исследуемого ИК ОЭС.

2. Создан и испытан в лабораторных условиях экспериментальный стенд для исследования СВХ ИК ОЭС, позволяющий измерять ПСВ ОЭС и ложных световозвращающих целей с диаметром входного зрачка до 100 мм, в пределах от 1,5 до $10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ с погрешностью не хуже 15%.

3. Разработаны конструкции и изготовлены эталонные Свз ИК диапазона, обеспечивающие проведение измерений ПСВ ИК ОЭС в диапазоне значений представляющих практический интерес.

4. Результаты работы позволили сформировать информационный банк экспериментальных данных СВХ современных ИК ОЭС различного назначения, а также потенциальных ложных целей - тетраэдрических световозвратителей, являющийся основой для проведения расчетов лазерных локационных систем обнаружения, принцип работы которых основан на использовании явления световозвращения.

Достоверность результатов

Достоверность результатов диссертационной работы основывается на выполнении принципа их соответствия известным ранее результатам, а также на том, что предложенные в диссертации методы и технические средства реализованы и апробированы в образцах измерительной техники.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы

Результаты диссертации использованы в плановых работах ОАО «МЗ «Сапфир», что подтверждено соответствующим актом.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы докладывались на:

Всероссийской НТК "Радиооптические технологии в приборостроении"

(Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006), Международной НТК "Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов" (Москва, Академия управления МВД России, 2007), "Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения" (Москва, ФГУП НПО "Орион", 2008), 16 Международной НТК "Современное телевидение" (Москва, ФГУП МКБ "Электрон", 2008), 17 Международной НТК "Современное телевидение" (Москва, ФГУП МКБ "Электрон", 2009), Международной НТК "Лазеры в науке, технике, медицине" (Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009).

Публикации

По результатам работы опубликованы две статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, пять работ в трудах научно – технических конференций, тезисы трех докладов на научно – технических конференциях. На одно из технических решений, предложенных в работе, получено положительное решение о выдаче патента на изобретение.

Структура и объём диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы, содержащего 55 библиографических описаний цитируемых источников. Диссертация изложена на 181 странице машинописного текста, включает 65 рисунков и 11 таблиц.

Научные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Методика и результаты теоретических исследований индикатрис ретроотражения и ПСВ зеркально-линзовых ИК ОЭС и тетраэдрических световозвращателей из оптических и “неоптических” материалов.

2. Методика использования эталонных тепловых источников излучения типа ЧТ для имитации характеристик ИК излучения, ретроотраженного от реального Свз, основанная на установлении аналитической зависимости между температурными характеристиками тепловых источников и имитируемыми ими величинами ПСВ.

3. Функциональная схема стенда для исследования световозвращательных характеристик в ИК диапазоне, позволяющего производить высокоточные измерения индикатрисы ретроотражения, показателя световозвращения, а также пеленгационной и спектральной характеристик исследуемого ИК ОЭС.

4. Результаты экспериментальных измерений световозвращательных характеристик ИК ОЭС, полученные при использовании созданного экспериментального стенда.

2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной задачи, решаемой в диссертационной работе, сформулированы цель и задачи исследований, дана краткая характеристика работы.

В первой главе диссертационной работы проанализированы основные характеристики явления световозвращения и проведены теоретические исследования этих характеристик для различных световозвращателей в ИК диапазоне.

Разработаны методики расчета световозвращательных характеристик ИК ОЭС (индикатрисы ретроотражения и ПСВ), позволяющие определять ПСВ в двух случаях – когда нет данных о конструктивных параметрах оптической системы Свз и когда эти данные известны.

В первом случае ПСВ может быть рассчитан по параметрам функции рассеяния оптической системы Свз, а именно – по ее угловому размеру. Эти параметры могут быть установлены либо экспериментально, либо примерно оценены по размерам фоточувствительного элемента ИК ФПУ, используемого в исследуемом приборе. Выражение для расчета ПСВ в этом случае имеет вид:

$$R = \frac{\tau_{об}^2 \cdot \tau_{о.с.фпу}^2 \cdot \rho_{пш} \cdot D^2 \cdot f^2}{4 \cdot \sigma^2},$$

где $\tau_{об}$, $\tau_{о.с.фпу}$ - коэффициенты пропускания объектива и оптической системы фотоприемного устройства, входящих в состав Свз; $\rho_{пш}$ - коэффициент отражения поверхности приемника излучения, входящего в состав Свз; D - диаметр входного зрачка объектива Свз; f - фокусное расстояние оптической системы Свз; σ - ширина функции рассеяния (диаметр пятна рассеяния) оптической системы Свз.

Во втором случае индикатриса, ПСВ и спектральные характеристики ИК приборов рассчитываются на основе конструктивных параметров их оптических систем. По сути дела это реализация дифракционного метода расчета индикатрисы и ПСВ с использованием современных САПР. Алгоритм расчета состоит из двух этапов.

Первый - моделирование процесса ретроотражения в САПР Zemax для определения вида индикатрисы отражения Свз.

Второй - расчет зависимости ПСВ от угла усреднения для полученной в Zemax индикатрисы с помощью выражений выведенных в диссертационной работе.

Отметим, что предложенный в работе способ использования Zemax позволяет исследовать все световозвращательные характеристики, как для случая осевого зондирования, так и для случая падения зондирующего пучка под углом к оси Свз.

В диссертации выведено выражение для расчета ПСВ Свз по параметрам индикатрисы полученной в Zemax для случая осевого зондирования:

$$R(\omega_{yc}) = \frac{D^2 \cdot \rho_{пш} \cdot \tau_{об}^2 \cdot \tau_{о.с.фпу}^2 \cdot \int_0^{\omega_{yc}} I_n(\omega) \cdot \sin(\omega) d\omega}{4 \cdot \omega_{yc}^2 \int_0^{\omega_{макс}} I_n(\omega) \cdot \sin(\omega) d\omega},$$

где $I_n(x)$ - полученная в Zemax функция, характеризующая осевое сечение нормированной индикатрисы ретроотражения; ω_{yc} - плоский угол усреднения; $\omega_{макс}$ - ширина индикатрисы ретроотражения.

В случае падения зондирующего излучения под углом α к оси Свз расчет ПСВ проводится по другой формуле, полученной в работе:

$$R(\omega_{yc}, \alpha) = \frac{D^2 \cdot \rho_{пш} \cdot \tau_{об}^2 \cdot \tau_{о.с.фпу}^2 \cdot K(\alpha) \cdot \sum_i \sum_j I_{n,i,j} \left|_{(i-i_m)^2 + (j-j_m)^2 \leq (f_n \cdot \omega_{yc} / m)^2} \right.}{4 \cdot \omega_{yc}^2 \cdot \sum_i \sum_j I_{n,i,j} \left|_{(i-i_m)^2 + (j-j_m)^2 \leq (f_n \cdot \omega_{yc.полн} / m)^2} \right.},$$

где $I_{n,i,j}$ - двумерный массив значений нормированной индикатрисы ретроотражения Свз, полученной для наклонного зондирующего пучка в Zemax; $K(\alpha)$ - функция зависимости коэффициента виньетирования зондирующего пучка от угла его наклона, полученная в Zemax; i_c, j_c - индексы центрального элемента массива $I_{n,i,j}$; $\omega_{yc.полн}$ - угол, в пределах которого распространяется все ретроотраженное излучение; m - масштабный коэффициент (шаг отсчетов при

формировании массива $I_{n,i,j}$ в Zemax).

Отметим, что обе разработанные методики учитывают особенности влияния конструкции фокальных элементов исследуемых приборов на коэффициент отражения $\rho_{\text{ПИ}}$ их поверхности. В работе обоснованы допущения и предложены подходы к расчету коэффициента отражения для приемников излучения различных типов.

Показано, что для приборов с тепловыми приемниками излучения коэффициент отражения целесообразно рассчитывать по формуле:

$$\rho_{\text{ПИ}} = \frac{1}{100} (Ff \cdot \rho_{\text{пикс}} + (100 - Ff) \cdot \rho_{\text{меж.пикс}}),$$

где Ff - фактор заполнения (fill factor) приемника; $\rho_{\text{пикс}} = 0,05...0,08$ - коэффициент отражения поверхности пикселей; $\rho_{\text{меж.пикс}} = 0,25...0,3$ - коэффициент отражения межпиксельных промежутков.

Для приборов на базе фотонных приемников излучения коэффициент отражения, с требуемой для инженерных расчетов погрешностью, может быть определен при помощи формулы:

$$\rho_{\text{ПИ}}(\lambda) = 1 - S_{\text{отн}}(\lambda) + k,$$

где $S_{\text{отн}}(\lambda)$ - относительная чувствительность приемника излучения; $k = 0,05...0,15$ - константа, характеризующая минимальный коэффициент отражения подложки фоточувствительной поверхности приемника излучения.

С помощью разработанных методик были проведены расчеты СВХ ряда современных ИК приборов. На основании анализа полученных результатов был обоснован типичный диапазон изменения ПСВ ИК ОЭС в границах от 10 до $10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$. Кроме того были выявлены две группы, на которые можно разделить большинство ИК приборов по форме их спектральных характеристик.

Первая группа – приборы с зеркально-линзовыми оптическими системами, наилучшая абберационная коррекция которых осуществлена для центральной области рабочего спектрального диапазона. Им свойственна П-образная форма спектральных характеристик (рис 1а).

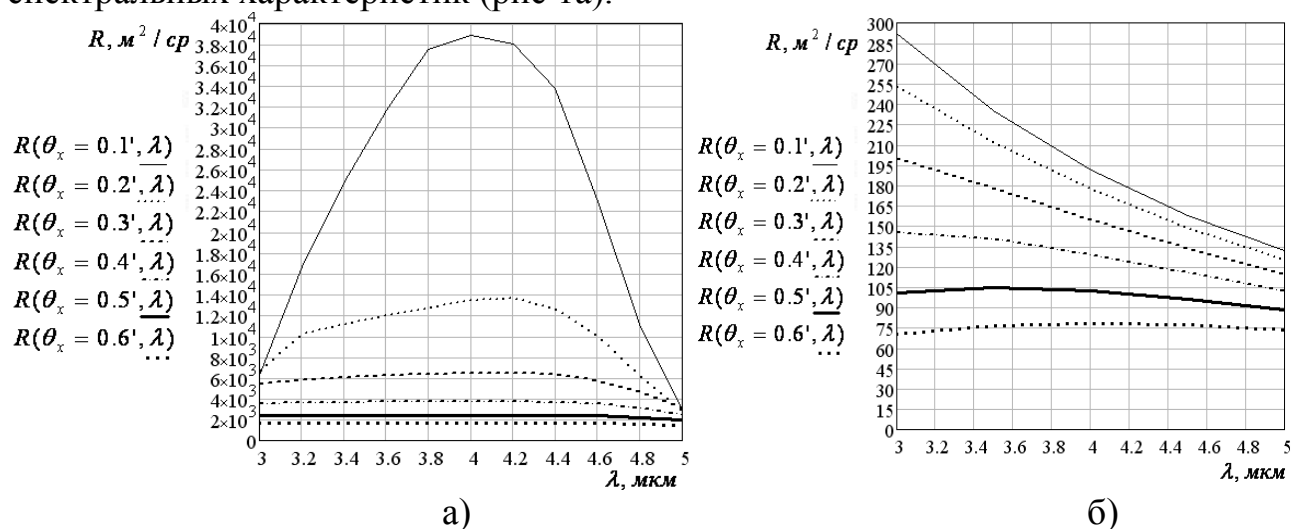


Рис.1. Спектральные характеристики современных ИК приборов (а - тепловизионного прибора “ЛИК-2”, б - ИК системы мониторинга пространства “СЫЧ”)

Вторая - приборы с зеркальными оптическими системами, близкими к дифракционно - ограниченными во всем рабочем спектральном диапазоне (рис.1б). Им свойственны монотонно убывающие спектральные характеристики.

Как известно, наиболее вероятными ложными целями для локационных систем обнаружения являются тетраэдрические световозвращатели (ТСВ). В диссертационной работе предложен алгоритм расчета СВХ ТСВ в ИК диапазоне. Он основан на определении абберационной функции зрачка (АФЗ) ТСВ с помощью матричного метода Джонса и последующем расчете индикатрисы, как суперпозиции компонентов АФЗ.

С помощью разработанного алгоритма рассчитаны индикатрисы ретроотражения призматических ТСВ из распространенных ИК материалов: BaF_2 , ZnSe и Ge , а также призматических ТСВ с металлизированными гранями (примеры результатов расчета приведены на рис.2). Особенностью призматических ТСВ, работающих в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах является разнообразие оптических материалов, из которых могут быть изготовлены эти ТСВ. Так среди оптических материалов для ИК области спектра встречаются материалы имеющие показатель преломления ниже, чем 1.4, а также материалы имеющие показатель преломления выше, чем 5. Такой разброс значений определяет специфику поляризационных свойств призматических ТСВ при ретроотражении.

Анализ результатов проведенных расчетов показал, что призматические ТСВ на основе полного внутреннего отражения обладают выраженными анизотропными поляризационными свойствами, проявление которых уменьшается с увеличением значения показателя преломления материала ТСВ, при этом вид его индикатрисы ретроотражения приближается к виду индикатрисы призматического ТСВ с металлизированными гранями.

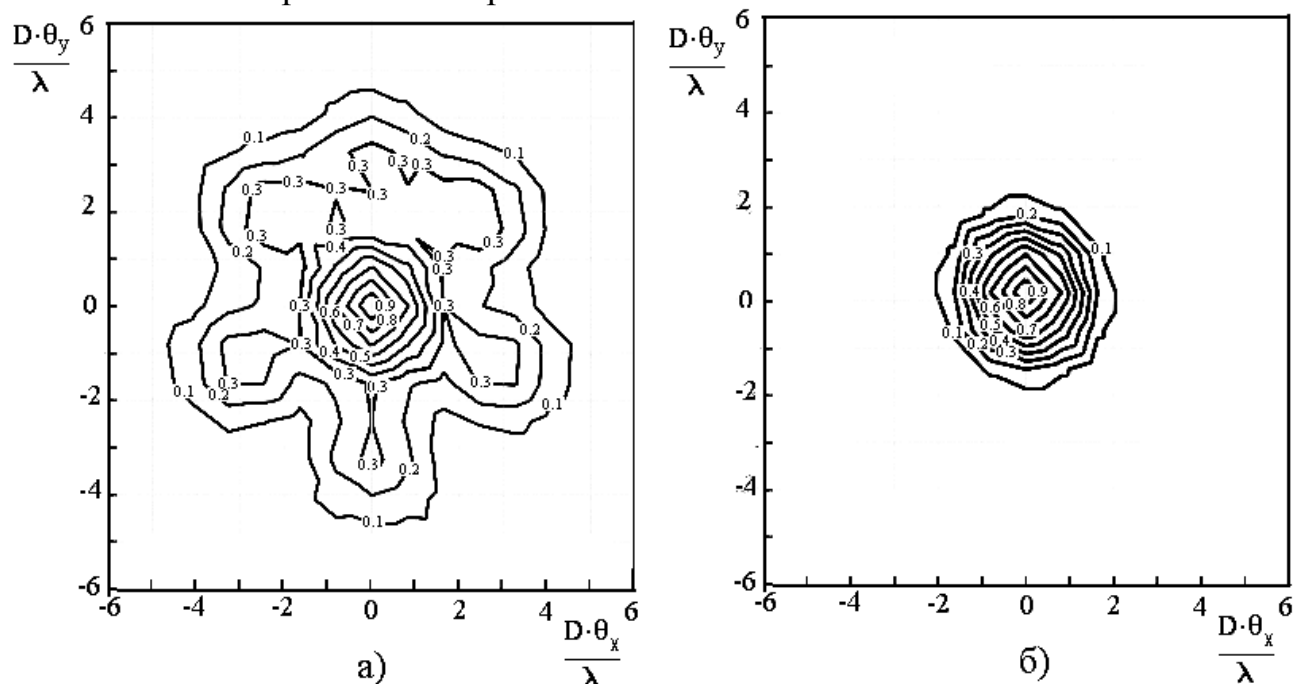


Рис. 2. Контурные графики индикатрис отражения ТСВ при зондировании их линейно-поляризованным излучением (а - призматический ТСВ ПВО из BaF_2 , б - призматический ТСВ из BaF_2 с рабочими гранями, металлизированными серебром)

Исследованы особенности формирования индикатрис ТСВ ИК диапазона с учетом погрешностей изготовления их двугранных углов и влияния дифракционных эффектов. На основе результатов исследования построены спектральные кривые, с помощью которых определена область типичных значений ПСВ таких ТСВ (рис. 3а).

Проведена оценка возможности использования в качестве ложных целей полых “неоптических” ТСВ, которые могут быть изготовлены из металла с отражающими поверхностями, обработанными не хуже 6-го класса чистоты по шероховатости ($Rz=2$ мкм). Построена зависимость ПСВ “неоптических” ТСВ от погрешности изготовления двугранных углов (рис. 3б).

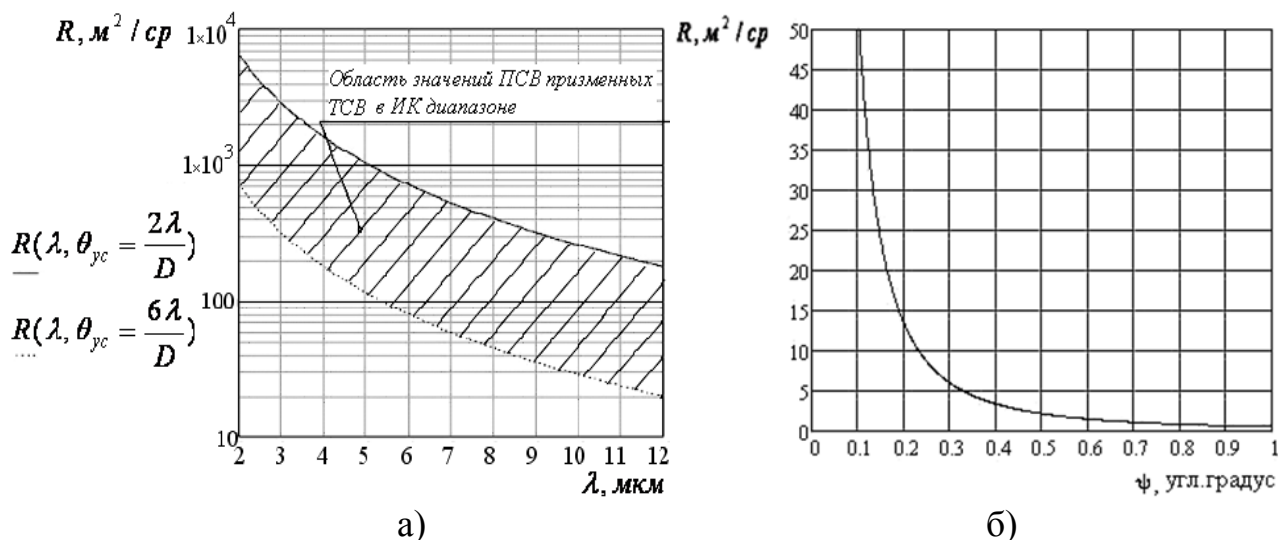


Рис. 3. Световозвращательные характеристики ТСВ (а - область типичных значений ПСВ призматических ТСВ полного внутреннего отражения в ИК диапазоне, б - зависимость ПСВ полых “неоптических” ТСВ от погрешности изготовления их двугранных углов)

Совместный анализ зависимостей, представленных на рис.3, показал, что в качестве ложных целей для лазерных локационных систем обнаружения длинноволнового ИК диапазона целесообразно использовать полые “неоптические” ТСВ, имеющие погрешность изготовления двугранных углов $\varphi \approx 0,1...0,2^\circ$, которые, воспроизводя те же значения ПСВ, существенно дешевле и проще в изготовлении, чем призматические ТСВ полного внутреннего отражения.

В результате проведенных исследований СВХ призматических ТСВ установлено, что в ИК диапазоне существует зависимость амплитудных и фазовых членов АФЗ, эллиптичности и азимута поляризации ретроотраженного излучения от показателя преломления материала призматических ТСВ (рис.4). В частности – существуют условия, для которых эллиптичность и азимут равны 0, что может являться информационным признаком для селекции призматических ТСВ от других типов СВз при оптической локации.

Во многих прикладных задачах оптической локации для натурального моделирования целесообразно использовать имитатор светового потока, ретроотраженного СВз. В работе предложена и научно обоснована методика создания таких имитаторов на основе тепловых излучателей типа ЧТ.

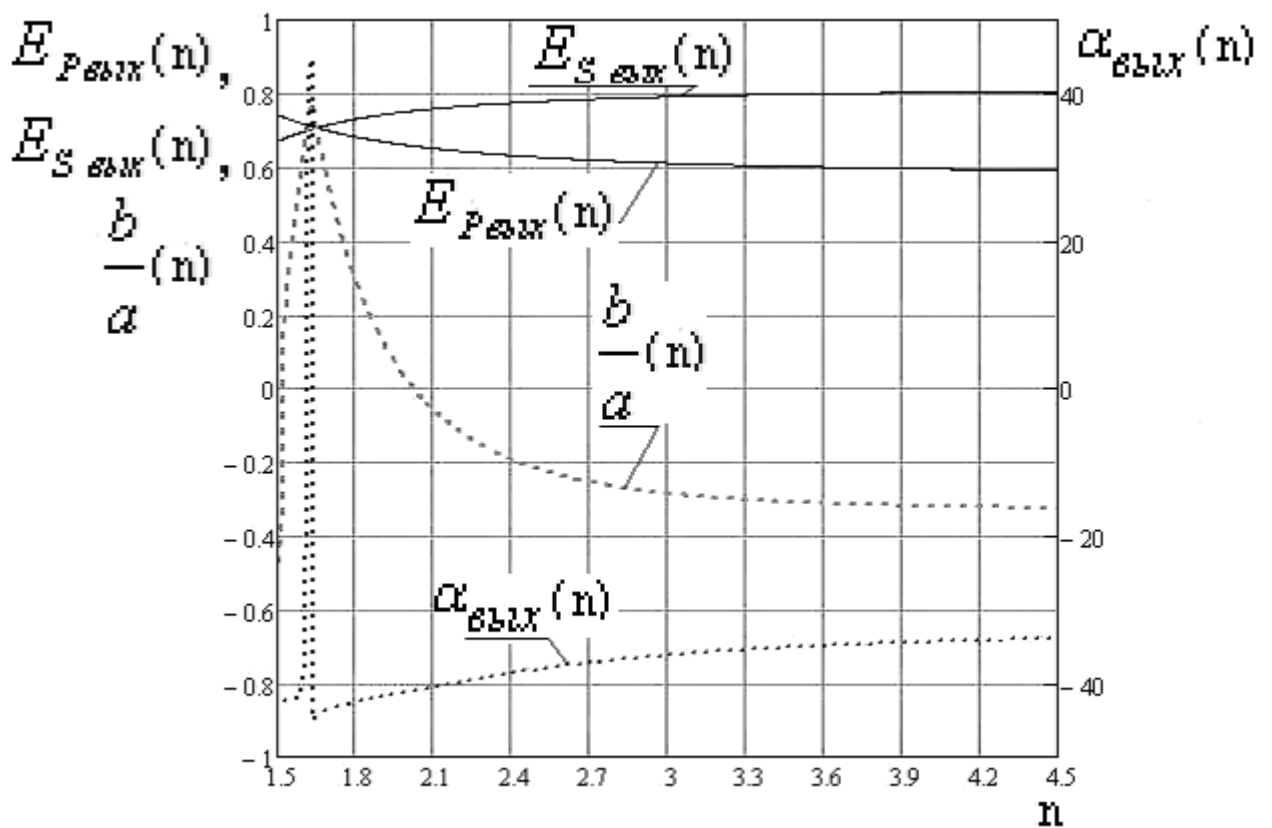


Рис. 4. Зависимости амплитудных членов $E_{S\text{вых}}$, $E_{P\text{вых}}$ абберационной функции зрачка призмных ТСВ, а также эллиптичности $\frac{b}{a}$ и азимута поляризации $\alpha_{\text{вых}}$ излучения, ретроотраженного призмным ТСВ, от показателя преломления материала n , из которого он изготовлен

Действительно, при зондировании любой Свз выступает в роли вторичного источника, формирующего излучение, характеристики которого определяются углом расходимости и потоком внутри этого угла. Следовательно, любой Свз может быть заменен излучателем-имитатором, способным создавать поток, аналогичный по своим характеристикам потоку, ретроотраженному этим Свз.

Разработка таких имитаторов представляет интерес в двух аспектах.

Во-первых, имитаторы позволят тестировать приемные каналы лазерных локационных систем обнаружения в широком спектральном диапазоне в натуральных условиях без использования их передающих каналов, что актуально в условиях ограниченной номенклатуры лазерных источников в средневолновом и длинноволновом ИК диапазонах.

Во-вторых, установление связи между параметрами тепловых имитаторов и характеристиками имитируемых Свз упростит процесс выбора необходимого фотоприемного устройства при проектировании приемных каналов лазерных локационных систем обнаружения. Такое соответствие позволит с единых позиций взглянуть как на сложившуюся систему температурных пороговых характеристик ИК фотоприемных устройств, так и на пороговые характеристики лазерных локационных систем в целом, значения которых привязаны к минимальным уровням ПСВ обнаруживаемых Свз.

В работе предложено использовать тепловой имитатор-излучатель, выполненный по коллимационной схеме и состоящий из объектива, в фокальной плоскости которого расположен термобарьер с круглой диафрагмой и ЧТ, установленным за ним (рис.5).

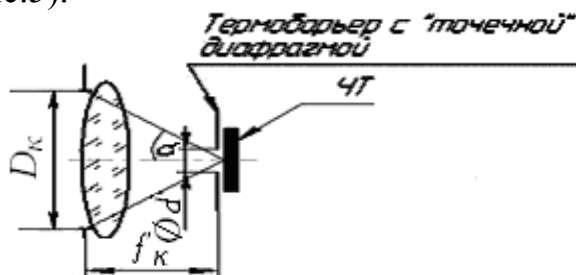


Рис.5. Тепловой имитатор ретроотраженного потока

В таком имитаторе требуемая расходимость излучения обеспечивается выбором диаметра диафрагмы, а величина потока регулируется изменением температуры ЧТ.

В работе получена зависимость, связывающая ПСВ имитируемого Свз с температурой ЧТ имитатора :

$$R(T) = \frac{\pi \cdot D_k^2 \cdot D_{cb}^2 \cdot f_k^2 \cdot \int_{\Delta\lambda} C1 \cdot \lambda^{-5} [\exp(C2 / \lambda \cdot T) - 1]^{-1} \cdot d\lambda}{(16D_k^2 + 64f_k^2) \cdot \Phi_3},$$

где $C1, C2$ – константы; D_{cb}, D_k – диаметры входного зрачка имитируемого Свз и теплового имитатора; Φ_3 – величина потока зондирующего излучения; f_k – фокусное расстояние коллиматора теплового имитатора; T – температура ЧТ имитатора.

С помощью полученной зависимости построены рабочие характеристики $R(T)$ для выбранного теплового имитатора, определяющие условия имитации требуемых значений ПСВ при заданных значениях величины потока зондирующего излучения и подтверждающие перспективность использования такого имитатора на практике.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке методики измерения световозврательных характеристик ОЭС в ИК диапазоне.

На основе анализа существующих методов и аппаратуры измерения разработана структурно-функциональная оптическая схема стенда для измерения СВХ ИК ОЭС (рис. 6). Принцип действия стенда основан на сравнении распределений освещенности излучения, ретроотраженного от исследуемого и эталонного Свз, при одинаковых условиях подсвета.

При работе стенда, построенного согласно такой схеме, в плоскости входного зрачка Свз формируется поле квазиравномерной освещенности. Отраженное от световозврателя излучение при помощи светоделиителя и системы зеркал направляется в приемный канал, где на фоточувствительной поверхности матричного фотоприемного устройства (МФПУ) формируется распределение освещенности, соответствующее индикатрисе ретроотражения Свз. Зарегистрированное распределение передается в компьютер, где происходит вычисление значения ПСВ и хранение полученных результатов.

Для вычисления ПСВ разработан оригинальный алгоритм, использующий в качестве исходных данных зарегистрированные распределения освещенности излучения, ретроотраженного от эталонного и исследуемого световозврателей.

В основу указанного алгоритма заложено выражение для определения ПСВ, полученное в работе:

$$R_u(x''_{ус.и}) = \frac{R_{эт}(x''_{ус.эт}) \cdot x''_{ус.эт} \int_0^{x''_{ус.и}} I_u(x'') \cdot \sin(x'') dx''}{x''_{ус.и} \cdot \int_0^{x''_{ус.эт}} I_{эт}(x'') \cdot \sin(x'') dx''},$$

где $x''_{ус.эт}$, $x''_{ус.и}$ - координаты в плоскости анализа, соответствующие углам усреднения эталонного и исследуемого Свз; $I_u(x'')$, $I_{эт}(x'')$ - осевые сечения нормированных индикатрис ретроотражения исследуемого и эталонного Свз соответственно.

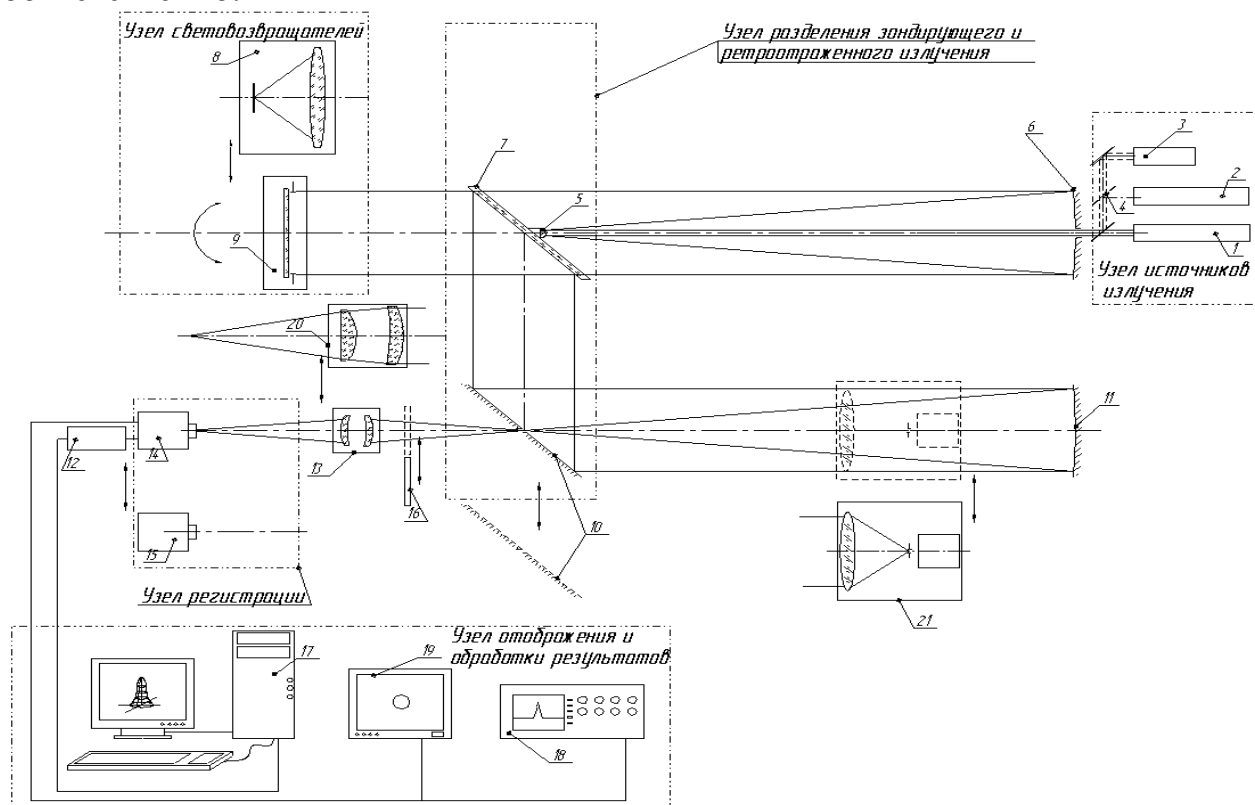


Рис. 6. Структурно-функциональная оптическая схема стенда для измерения СВХ ИК ОЭС (1-зондирующий лазер длинноволнового ИК диапазона, 2-зондирующий лазер средневолнового ИК диапазона, 3-маркерный лазер видимого диапазона, 4-полупрозрачное зеркало, 5-малое зеркало системы формирования зондирующего пучка, 6-большое зеркало системы формирования зондирующего пучка, 7-светоделительная пластина, 8-исследуемый Свз, 9-эталонный Свз, 10-поворотное зеркало, 11-зеркало приемного объектива, 12-устройство видеозахвата, 13-проекционный объектив, 14-МФПУ длинноволнового ИК диапазона, 15-МФПУ средневолнового ИК диапазона, 16-тепловой транспарант, 17-компьютер, 18-осциллограф, 19-монитор, 20-фотографический объектив, 21-тепловой имитатор ретроотраженного потока)

Отметим, что в отличие от существующих аналогов предложенный алгоритм позволяет использовать в измерительной схеме в качестве эталонного любой Свз с известным ПСВ, а в приемном канале измерительного стенда одно матричное фотоприемное устройство (в аналогичных стендах видимого диапазона в приемном канале дополнительно используются одноэлементные фотоприемники).

В работе исследованы особенности проектирования эталонных Свз ИК диапазона, связанные с учетом влияния дифракционных эффектов на форму индикатрисы отражения. Разработана конструкция эталонного Свз в виде плоской отражающей поверхности с круглой диафрагмой. Такой Свз характеризуется зависимостью ПСВ от угла усреднения. В частности, для угла усреднения, соответствующего радиусу второго темного кольца в распределении Эри, ПСВ рассчитывается по формуле:

$$R_{ЭТ} = \frac{\rho_{СВ} \cdot D_{СВ}^4}{20 \cdot \lambda^2},$$

где $\rho_{СВ}$ - коэффициент отражения рабочей поверхности; $D_{СВ}$ - диаметр входного зрачка эталонного световозвращателя; λ - длина волны зондирующего излучения.

В заключительном разделе второй главы проведен анализ потенциальной точности разработанного метода измерений, показавший, что при использовании в измерительном стенде современной элементной базы, ПСВ Свз в длинноволновом ИК диапазоне может быть измерен с погрешностью не превышающей 7 %.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с разработкой макетного образца экспериментального стенда и проведению на нем экспериментальных исследований СВХ различных ИК ОЭС.

Целями проведенных исследований являлись:

- экспериментальное подтверждение истинности теоретических положений, разработанных в главах 1 и 2;
- экспериментальная оценка погрешностей разработанной измерительной аппаратуры;
- формирование банка данных СВХ ИК ОЭС.

Для достижения поставленных целей был создан макетный образец экспериментального стенда (рис.7). В созданном стенде для зондирования Свз используется СО₂ лазер ГЛ1А, а для регистрации ретроотраженного излучения - матричное фотоприемное устройство Ratheon 300D.

На созданном оборудовании был проведен цикл исследований световозвращательных характеристик ряда ИК приборов, ложных целей, разработанных и изготовленных эталонных Свз.

В качестве примера результатов измерений на рис.8 показаны зарегистрированная индикатриса ретроотражения и соответствующая зависимость ПСВ от угла усреднения полого ТСВ с золотым отражающим покрытием.

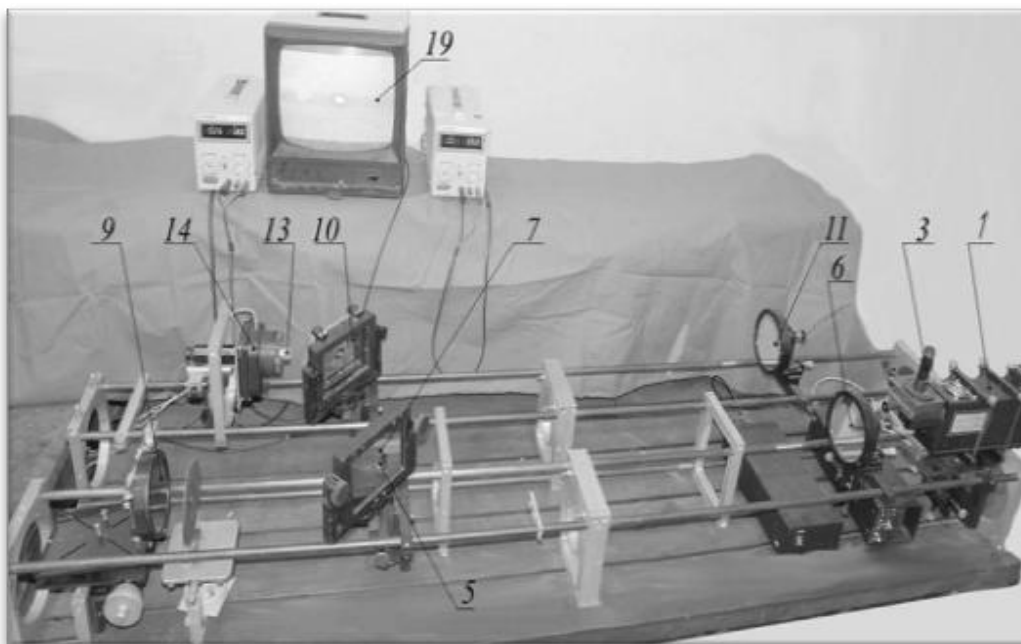


Рис. 7. Экспериментальный стенд для измерения СВХ ИК ОЭС (1-зондирующий лазер длинноволнового ИК диапазона, 3-маркерный лазер видимого диапазона, 5, 6-зеркала системы формирования зондирующего пучка, 7-светоделительная пластина, 9-эталонный Свз, 10-поворотное зеркало, 11- приемный объектив, 13-проекционный объектив, 14-МФПУ длинноволнового ИК диапазона, 19-монитор)

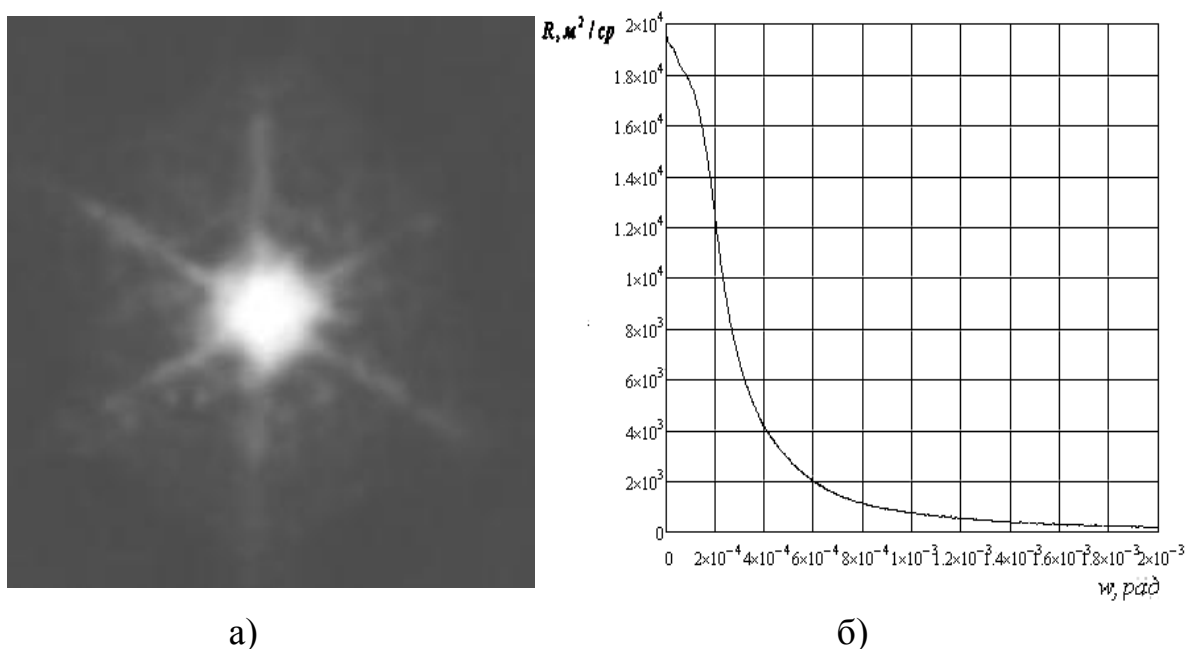


Рис. 8. Пример результатов измерения СВХ в ИК диапазоне (а - экспериментально зарегистрированная индикатриса ретроотражения полого ТСВ с золотым отражающим покрытием при зондировании на длине волны $\lambda_3 = 10.6$ мкм, б - соответствующая зарегистрированной индикатрисе зависимость ПСВ от угла усреднения)

В результате проведенных экспериментальных исследований сформирован банк данных СВХ 12-ти ИК Свз, среди которых 10 ИК приборов различного назначения, полый ТСВ и плоский Свз. Пространственные параметры зарегистрированных индикатрис соответствуют результатам расчетов, проведенных по разработанным методикам, представленным в 1 и 2 главах с погрешностью, не превышающей 15%.

Проведена серия экспериментов, результаты которых подтвердили возможность использования в качестве имитатора ретроотраженного излучения теплового излучателя на базе ЧТ и ИК коллиматора фирмы CI-systems. Внешний вид имитатора представлен на фотографии модификации измерительного стенда (рис. 9).

Задачей таких исследований являлось экспериментальное обоснование возможности использования имитатора для создания потока излучения, имеющего характеристики, аналогичные характеристикам потока ретроотраженного от какого-либо ИК световозвращателя.



Рис. 9. Модификация измерительного стенда, предназначенная для работы с тепловым имитатором ретроотраженного излучения (1 - матричное фотоприемное устройство длинноволнового ИК диапазона, 2 - фотообъектив, 3 - тепловой имитатор ретроотраженного излучения на базе ЧТ и коллиматора фирмы CI-systems)

Методика экспериментального исследования предполагала на первом этапе регистрацию распределения освещенности, создаваемой в плоскости анализа световым потоком, ретроотраженным имитируемым Свз, определение углового размера этого распределения и ПСВ Свз. Затем по полученным в работе соотношениям находилась зависимость эквивалентного ПСВ от температуры ЧТ имитатора, с помощью которой по измеренному значению ПСВ имитируемого Свз определялись требуемая величина диафрагмы и температур ЧТ имитатора. На заключительном этапе при найденных значениях диафрагмы и температуры, регистрировалось распределение освещенности, создаваемое в плоскости анализа имитатором. Зарегистрированное распределение было обработано в соот-

ветствии с предложенным в работе алгоритмом. Результаты показали, что измеренное значение ПСВ соответствует заданному с погрешностью не превышающей 12,5%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

На основании полученных в работе результатов сформулированы следующие выводы:

1. Разработаны методики теоретических и экспериментальных исследований световозвращательных характеристик ОЭС ИК диапазона, и на их основе сформирован банк отражательных характеристик современных ОЭС и ложных целей в интересах создания лазерных тактических комплексов оптико-электронного противодействия.

2. Разработаны методики и программы расчета параметров индикатрис ретроотраженного излучения и ПСВ зеркально-линзовых ИК ОЭС, учитывающие характер отражения излучения от фоточувствительной поверхности фотонных и тепловых ИК приемников. Исследована форма спектральных характеристик ИК ОЭС и показано, что границы диапазона значений их ПСВ составляют от $10 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ до $10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$.

3. Создан алгоритм расчета СВХ потенциальных ложных целей - ТСВ, позволивший провести расчеты и исследования поляризационных характеристик, индикатрис ретроотражения, спектральных характеристик и ПСВ призмных и полых ТСВ ИК диапазона. Обоснованы требования к материалам призмных ТСВ, обеспечивающих заданную эллиптичность и азимут поляризации при отражении линейно-поляризованного излучения.

4. Исследованы отражательные характеристики полых “неоптических” ТСВ и разработана конструкция металлического ТСВ ИК диапазона. Проведен сравнительный анализ его отражательных характеристик с характеристиками призмных ТСВ. Обоснована целесообразность использования в длинноволновом ИК диапазоне металлических “неоптических” ТСВ с погрешностью изготовления двугранных углов 5...10 угловых минут, ПСВ которых соизмеримы со значениями ПСВ призмных ТСВ.

5. Разработаны функциональная схема экспериментальной установки и методика измерений ПСВ ИК ОЭС, основанная на использовании оригинального алгоритма цифровой обработки индикатрис ретроотражения, зарегистрированных с помощью матричного фотоприемного устройства. Проведены исследования погрешности разработанной методики измерения. Показано, что при использовании современных матричных фотоприемных устройств с пороговым потоком порядка 10^{-11} Вт методическая погрешность измерения ПСВ в длинноволновом ИК диапазоне не превышает 7%.

6. Исследованы особенности разработки эталонных СВз ИК диапазона. Разработан и изготовлен плоский эталонный СВз на основе кремния, обеспечивающий заданные значения ПСВ в диапазоне от 10 до $10^5 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ в средневолновом ИК диапазоне и от 1 до $10^4 \text{ м}^2 \cdot \text{ср}^{-1}$ в длинноволновом ИК диапазоне.

7. Теоретически и экспериментально обоснована возможность создания имитаторов ретроотраженного излучения ИК диапазона на базе излучателей

типа “черное тело”. Разработана методика измерения ПСВ ОЭС с использованием таких имитаторов в качестве эталонных Свз, создан макетный образец имитатора и проведены его экспериментальные исследования.

8. Создана экспериментальная установка для измерения ПСВ ИК ОЭС и проведен цикл экспериментальных исследований отражательных характеристик ряда современных ИК ОЭС, ложных целей, а также, созданных эталонных Свз. Результаты экспериментов подтверждают истинность теоретических положений, изложенных в работе, и позволяют сформировать информационный банк данных отражательных характеристик ОЭС ИК диапазона.

Основные результаты диссертации представлены в работах:

1. Степанов Р.О., Барышников Н.В. Разработка метода и аппаратуры измерения световозвращательных характеристик ОЭС ИК диапазона // Измерительная техника. 2007. №9. С. 24 – 28.

2. Карасик В.Е., Барышников Н.В., Степанов Р.О. Исследование отражательных характеристик тетраэдрических световозвращателей в ИК диапазоне // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. №1 С. 3 – 16.

3. Разработка метода исследований световозвращательных характеристик оптико-электронных средств ИК диапазона / Р.О. Степанов [и др.] // Радиооптические технологии в приборостроении: Сборник трудов 4 – й научно – технической конференции. Москва, 2006 г. С. 123 – 125.

4. Степанов Р.О. Измерение световозвращательных характеристик в рамках решения задач дистанционного обнаружения замаскированных ИК приборов ведущих несанкционированное визирование // Информатизация и информационная безопасность правоохранительных органов: Сборник трудов 16 – й международной научно конференции. Москва, 2007 г. С. 423 – 428.

5. Разработка метода пересчета паспортных энергетических характеристик ИК фотоприемных устройств для использования их при проектировании телевизионной аппаратуры с лазерным подсветом / Р.О. Степанов [и др.] // Современное телевидение: Сборник трудов 16 – й международной научно – технической конференции. Москва, 2008 г. С. 100 – 103.

6. Метод расчета световозвращательных характеристик телевизионных систем, работающих в инфракрасном диапазоне спектра / Р.О. Степанов [и др.] // Современное телевидение: Сборник трудов 17 – й международной научно – технической конференции. Москва, 2009 г. С. 136 – 139.

7. Степанов Р.О., Барышников Н.В. Исследование характеристик эталонных световозвращателей для лабораторных измерений отражательных свойств ОЭС ИК диапазона // Лазеры в науке, технике, медицине: Сборник трудов международной научно – технической конференции. Москва, 2009 г. С. 121 – 123.