

На правах рукописи



Правдивцев Андрей Виталиевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ УМЕНЬШЕНИЯ ФОНОВОЙ
ОБЛУЧЁННОСТИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИК ПЕЛЕНГАТОРОВ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в филиале акционерного общества «Производственное
Объединение «Уральский оптико-механический завод» имени
Э.С. Яламова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Белоусов Юрий Иванович

Официальные оппоненты: **Павлов Николай Ильич**
доктор технических наук, заместитель
генерального директора по научно-испы-
тательному комплексу АО «НИИ ОЭП»
Митрофанов Сергей Сергеевич
кандидат технических наук, доцент фа-
культета Прикладной оптики ФГАОУ
ВО «Санкт-Петербургский националь-
ный исследовательский университет ин-
формационных технологий, механики и
оптики»

Ведущая организация: АО «Лыткаринский завод оптического
стекла»

Защита состоится 3 июня 2019 года в 15.30 на заседании диссертационно-
го совета Д 999.022.02 при АО «Государственный Оптический Институт им.
С.И. Вавилова» по адресу: 199053, Санкт-Петербург, Кадетская линия В.О.,
д. 5, корп. 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «Государственный Оп-
тический Институт им. С.И. Вавилова» по адресу 199053, Санкт-Петербург,
Кадетская линия, д.5, корп. 2 и на сайте <http://www.npkgoi.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 999.022.02,
кандидат физико-математических наук



Журенков А.Г.

Общая характеристика работы

В настоящее время разрабатывается и производится большое количество оптико-электронных систем (ОЭС), работающих в ИК диапазоне спектра, и предназначенных для решения различного рода оборонных и народно-хозяйственных задач, причем требования, предъявляемые к ним, постоянно растут. Одна из тенденций построения ОЭС, базирующихся на подвижных объектах – использование набора сенсоров, распределённых по поверхности носителя, предназначенных для получения кругового беспропускного обзора. Для реализации данного подхода требуется минимизация габаритов систем, при сохранении высоких характеристик.

Так как ОЭС ИК диапазона имеют широкое применение, то задача повышения их характеристик (дальности обнаружения при заданном значении вероятности правильного обнаружения и вероятности ошибочных решений, точности определения координат), с уменьшением габаритов и при полноценном учете всех особенностей широкоугольных оптических систем (угловое поле более 90°), является актуальной. Основные характеристики ОЭС напрямую привязаны к отношению «сигнал/шум» (ОСШ). Поэтому основная идея исследования состоит в поиске способов увеличения величины ОСШ в тепловизионных приборах (ТВП) и ИК пеленгаторов, с приёмниками, функционирующим в режиме ограничения чувствительности фоном (ОФ), за счёт уменьшения внешних шумов. Рассматриваются внешние по отношению к фотоприёмнику шумы, вызванные его фоновыми засветками с элементов оптической системы ТАП или ИК пеленгатора; а так же внешние по отношению ТВП и пеленгатору шумы, вызванные излучением наблюдаемого сюжета.

Используемые в настоящее время методики расчета фонового излучения, формируемого оптической системой, являются приближенными и зачастую основываются на результатах исследований уже разработанных систем. Поэтому важной задачей является разработка вычислительного метода моделирования и оптимизации внутренних и внешних фоновых излучений оптических систем среднего и дальнего ИК диапазона.

Третье поколение ОЭС основано на широком использовании матричных приёмников, что стало возможным благодаря успехам в технологии изготовления полупроводниковых элементов и МФПУ. Применение МФПУ позволяет при регистрации оптического сигнала обеспечить в заданном широком угловом поле требуемое пространственное разрешение. При разработке ОЭС с использованием сверхширокоугольных ОС (угловое поле более 140°) требуется учитывать и оптимизировать закон изменения мгновенного углового поля в пространстве предметов и, связанный с ним, фоновый поток в пикселе, влияющий на ОСШ. В работе выделяется три группы задач, различающиеся, в конечном итоге, разными требованиями к характеру изменения величины мгновенного поля зрения оптической системы от центра к периферии поля зрения ОЭС. Обычно в системах, предназначенных для обнаружения объектов, требуется одинаковая величина мгновенного углового поля пикселя в

пространстве предметов. Однако существуют задачи, в которых мгновенное угловое поле должно быть неодинаковым в пределах всего углового поля. Примером может служить широкоугольная система, установленная на поверхности Земли, предназначенная для обнаружения объектов в заданном диапазоне высот в полусфере. При ограничении высот, на которых могут наблюдаться объекты, из-за более длинной наклонной трассы и меньшего коэффициента пропускания атмосферы, целесообразно требовать более высокого отношения «сигнал/шум» на краю поля. Это может быть достигнуто за счёт оптимизации мгновенного углового поля. При уменьшении величины мгновенного углового поля, поток от фона уменьшится, в то время как отклик от объекта не изменится (предполагая, что объект меньше мгновенного углового поля); тем самым увеличится ОСШ (для МФПУ, функционирующего в режиме ОФ). Требуемое изменение величины мгновенного углового поля в пространстве предметов может быть достигнуто за счёт геометрических искажений в виде дисторсии и проективных искажений, возникающих из-за взаимного расположения в пространстве объекта и ОЭС.

Востребованность ИК систем несканирующего типа, обеспечивающих непрерывный и беспропускной обзор широкой области пространства, требует создания современного рабочего инструментария расчёта «сверхширокоугольных» ОС ИК диапазона. Поэтому актуальной задачей является разработка метода синтеза и оптимизации широкоугольных оптических систем, с заданными требованиями по пространственному распределению значения мгновенного углового поля и потока фонового излучения в пикселе.

Целью диссертационной работы является разработка методов снижения уровня фоновой облучённости на приёмнике излучения для повышения эффективности ИК пеленгационных ОЭС.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать метод расчета и оптимизации фоновой облучённости на приёмнике от внешних и внутренних источников в пеленгационных ОЭС среднего и дальнего ИК диапазона и провести численное моделирование распространённых оптических систем.
2. Разработать метод оптимизации величины углового разрешения и потока излучения на пикселе в оптических систем широкоугольных ИК пеленгаторов и провести исследование влияния параметров оптических систем на поток излучения в пикселе.
3. Разработать метод коррекции конструктивных параметров оптических систем, влияющих на абберационные характеристики, позволяющая обеспечить выполнение требований по угловому разрешению и закону изменения потока на пикселе для пеленгационных ОЭС со светосильными широкоугольными оптическими системами.
4. Провести экспериментальные исследования для подтверждения

правильности разработанной метода расчёта фоновой облучённости и определения границ применимости.

Научная новизна

1. Разработан метод, позволивший оптимизировать конструкцию оптических систем ИК диапазона (путём варьирования оптимальной формы оправ, подбора оптических характеристик элементов конструкции) для уменьшения собственного и переотражённого излучения. В рассмотренных системах удалось снизить уровень фоновой облучённости в 1,5-4 раза.
2. Для светосильных широкоугольных оптических систем ИК диапазона показана возможность достижения изменения углового разрешения и интенсивности фонового потока на пикселе менее 10% по полю зрения за счёт применения разработанного численно-аналитического метода расчёта.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Метод численного моделирования фоновой облучённости от внутренних и внешних фоновых источников в пеленгационных ОЭС среднего и дальнего ИК диапазона, позволивший оценить фоновый поток на элементах МФПУ.
2. Оптимизация схемных, конструктивных и технологических параметров оптических систем оптико-электронных систем позволила уменьшить внутренний фоновый поток в 4 раза относительно среднего варианта, суммарный фоновый поток в 1,5 раза для системы предназначенной для наблюдения поверхности Земли.
3. Результаты расчета фонового потока ИК оптических систем с элементами, размещенными в криогенной области приёмника. В рассмотренных системах удалось повысить отношение сигнал/шум в 1,07-1,6 раза.
4. Численно-аналитический метод расчёта, позволивший получить в рассмотренных широкоугольных оптических системах отклонение мгновенного углового поля и потока на пикселе менее 10%.

Практическая значимость

Разработан метод анализа фоновой облучённости, который позволяет повысить эффективность пеленгационных ОЭС ИК диапазона путём оптимизации конструкции системы и численно оценить конструктивные решения, в том числе, перенос компонент ОС в охлаждаемую зону МФПУ. Метод был применён в процессе разработки ряда ИК объективов. Произведен анализ технического решения по конструктивному исполнению ОС с расположением линзовых компонент в криогенной области охлаждаемых приёмников по величине отношения «сигнал/шум». Разработан численно-аналитический метод анализа и оптимизации величины мгновенного углового поля и потока на пикселе в широкоугольных оптических системах.

Диссертационная работа базируется на результатах фундаментальных

исследований, полученных в теории оптико-электронного приборостроения Ю.Г. Якушенковым, Дж. Ллойдом, М.М. Мирошниковым, Н.С. Шестовым, В.Я. Колючкиным и многими другими.

Апробация работы Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях: XIII-я, IX-я и X-я международные конференции «Прикладная оптика» (2008, 2010, 2012 и 2018 г., Санкт-Петербург), Научно-техническая конференция ОАО «НПК «СПП» (2009 г.), Международная конференция DSPA-2010 - «Цифровая обработка сигнала и её применение» (Москва, 2010 г.), XXI, XXII и XXIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2010, 2012, 2014 г.), VIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2010 г.), международная конференция SPIE Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VIII (Прага, 2011), международная конференция SPIE Optical Modelling and Design II (Брюссель, 2012 г.), 8-th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication (Санкт-Петербург, 2012 г.).

Достоверность выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, подтверждается соответствием результатов теоретических исследований, основанных на предложенных математических моделях, с результатами экспериментов.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, в том числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов ВАК и 3 — в изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science. Список публикаций приведен в заключительной части.

Структура и объем диссертации Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 187 страниц, из них 150 страниц текста, включая 72 рисунка. Список литературы включает 137 наименований на 16 страницах.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе «Анализ технических решений для повышения эффективности ИК пеленгаторов» рассмотрена структура ИК пеленгаторов, показаны возможности по увеличению их эффективности.

Основными задачами ИК пеленгаторов, предназначенных для работы с удалёнными объектами, являются обнаружение, селекция и распознавание объектов на заданных расстояниях при определённых вероятностях правильного обнаружения и вероятности ошибочных решений, а также определение координат объектов с заданной погрешностью. Основным параметром, от которого зависят эти величины является пиковое ОСШ μ ,

под которой понимается отношение максимальной амплитуды сигнала u_c к среднеквадратичному значению суммы дисперсий совокупности внешних и внутренних шумов.

$$\mu = \frac{u_c}{\sqrt{d_{int} + d_{ext}}}, \quad (1)$$

где d_{int} – дисперсия шумов фотоэлектронного тракта (внутренний шум); d_{ext} – дисперсия шумов, внешних по отношению к самому фотоприёмнику и первичным электронным узлам.

В случае, если в ИК пеленгаторе используется матричный приёмник излучения, функционирующий в режиме ограничения чувствительности фоном, на величину отношения «сигнал/шум», помимо прочего, влияет и фоновое излучение, источниками которого являются: а) собственное излучение ОС; б) фон, на котором наблюдается объект, совместно с потоком, рассеиваемый или излучаемый атмосферой в направлении оптической системы ОС.

Так как характеристики объекта и подстилающей поверхности известны, то для повышения ОСШ, целесообразным является уменьшение собственного излучения ОС. На рисунке 1 приведен график изменения ОСШ в зависимости от относительной величины фонового потока, создаваемого ОС (при постоянном внешнем фоне).

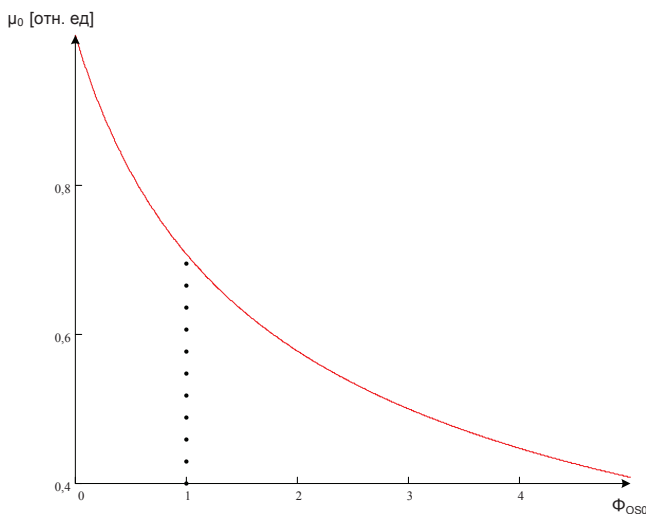


Рисунок 1. Изменение отношения «сигнал/шум» в зависимости от относительной величины фонового потока от ОС.

Обзор литературы показал, что существующие методы анализа и минимизации собственного теплового излучения являются упрощенными и не полностью учитывают конструкцию системы. Поэтому разработка подходов и методов, которые могут выполнять такого рода анализ, является актуальной задачей.

В настоящее время стали появляться системы, у которых часть или все линзы перенесены в холодную область МФПУ. На современном уровне технологии такая операция сложна и может

осуществляться только индивидуальной для конкретной оптической системы и конструкции МФПУ. Поэтому чрезвычайно важен метод предварительной количественной оценки выигрыша её реализации, чтобы прогнозировать рентабельность достигаемого увеличения эффективности ОЭС. В диссертационной работе проведено исследование изменения величины ОСШ, позволяющее сделать выводы о целесообразности применения технического приёма глубокого охлаждения части оптической системы ИК прибора.

Размер мгновенного поля зрения ОЭС (отношение площади пикселя МФПУ к квадрату эффективного фокусного расстояния оптической системы), который влияет на вторую составляющую внешних шумов, вычисляется на основе энергетического расчёта с учётом доступных МФПУ. Поэтому повлиять на него в процессе разработки оптической системы обычно достаточно сложно. Но в случае широкоугольных оптических систем может наблюдаться неравномерность мгновенного углового поля пикселя, при этом изменяется форма и площадь области, наблюдаемой пикселем (рисунок 2). Данные параметры влияют на ОСШ и должны быть учтены при проектировании ОЭС и в процессе функционирования системы при обработке информации.

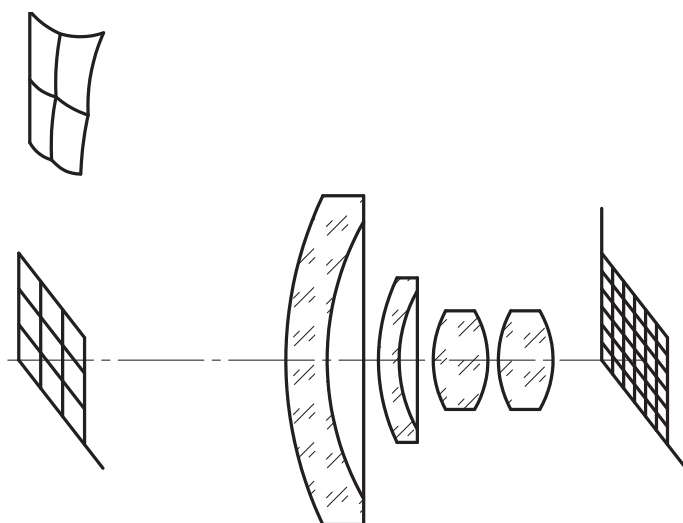


Рисунок 2. Искажение наблюдаемой формы пикселя в пространстве предметов.

Поэтому повышение эффективности ОЭС за счёт использования при проектировании подхода, позволяющего повлиять на изменение мгновенного углового поля пикселя в широкоугольных ОС, является актуальной задачей. Это позволит упростить создание ОС с заданным требованием по изменению мгновенного поля, разрешения и освещённости.

Существующие решения не позволяют выполнять оценку изменения мгновенного углового поля пикселя для сверхширокоугольных систем (поле зрения более 180° , фокусное расстояние f'), в случае, если изменение размера изображения y' в зависимости от поля w , отличается от задаваемого формулой: $y' = -2f' \sin(\omega/2)$.

Типичной конструкцией широкоугольных ОС является набор менисков, обращенных в сторону плоскости изображения, и фокусирующая система. Зачастую при оптимизации система стремится к варианту, когда для края поля углы падения на первую поверхность становятся близки к предельным. При этом, усложняется изготовление линзы, ужесточаются допуски к сборке, а так же повышаются требования к просветляющим покрытиям. Просветляющие покрытия в этом случае должны иметь переменные характеристики, в зависимости от зоны линзы (в центре линзы углы падения на поверхность практически нулевые, к краю существенно увеличиваются). Изменение формы зрачка, за счет формы линзы и проективных искажений, приводит к уменьшению его площади, и, как следствие, к падению освещённости, если не предпринимать дополнительные усилия для её сохранения (ввод положительного аберрационного виньетирования).

Применение расчета с использованием отображающих функций требует разделения ОС на афокальную часть и фотографический объектив; при

разработке предполагается обеспечить заданный закон углового увеличения афокальной системы (при заданном угловом поле фотографического объектива). В процессе оптимизации данные параметры могут измениться, что может повлиять на итоговый вид отображающей функции. Безусловное задание данной характеристики может не позволить найти оптимальное решение при оптимизации из-за высокого веса ограничения.

Использование оптимизатора систем автоматизированного проектирования в ряде случаев является вычислительно затратными, и затрудняет определение параметров, оказывающих основное влияние на исследуемую характеристику. Требуется создать метод разработки широкоугольных системы с заданными требованиями по мгновенному угловому полю, угловому разрешению и потоку в пикселе.

Во второй главе «Метод расчёта фоновой облучённости в оптико-электронных системах ИК диапазона» приведены требования к методу расчета внешних и внутренних шумов, рассмотрено решение задачи анализа существующих конструкций и минимизация собственного теплового излучения.

Для определения облученности в плоскости МФПУ, создаваемого ОС, предлагается размещать в конструкции прибора источники, соответствующие источникам излучения; выполняя трассировку лучей от них для определения потока, приходящего на МФПУ. Ход луча определяется начальными условиями и свойствами объектов, с которым он пересекается.



Рисунок 3. Исходные данные для модели

На основе проведённого анализа сделан вывод о том, что система расчёта внешних и внутренних фоновых засветок в ОС оптико-электронных систем ИК 3-5 и 8-14 мкм должна оперировать следующими объектами, представленными на рисунке 3.

На рисунке 4 представлена блок-схема алгоритма решения задач анализа и оптимизации фоновой излучения в оптических системах. Исходные данные вводятся оператором в формализованном виде в **блок генерации**. Программное обеспечение данного блока формирует макропрограмму, для автоматического ввода системы в программу моделирования.

Выполнение макропрограммы, полученной на выходе блока генерации позволяет перейти к **модели системы**, введённой в программу, выполняющую непоследовательную трассировку лучей. Модель состоит из ОС, конструкции оправ, источников и приёмников излучения.

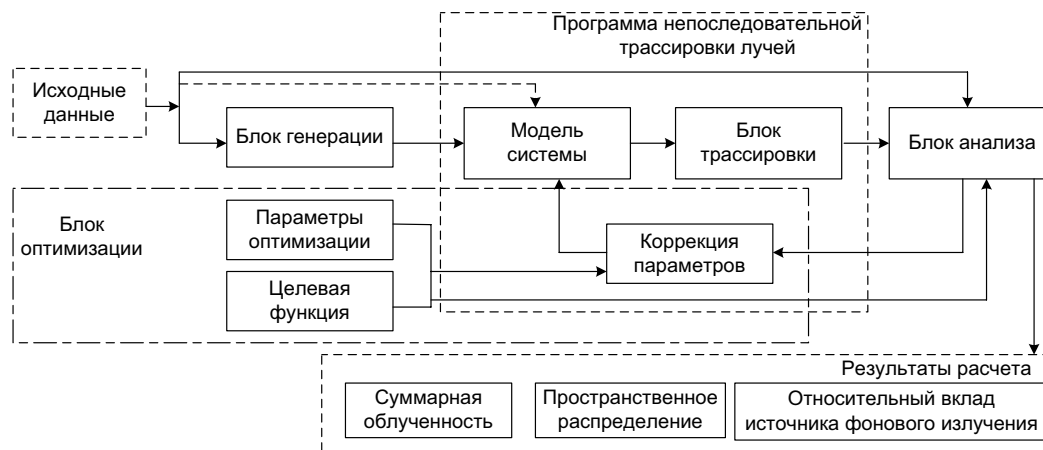


Рисунок 4. Алгоритм выполнения процедур анализа и оптимизации влияния внешних и внутренних фонов ИК объективов.

В **блоке трассировки** выполняется расчёт хода лучей от всех заданных источников, определяется величина потока и его распределение по поверхности приёмника. В **блоке анализа** выполняется обработка полученных данных и выдача результата. При решении обратных задач используется блок **коррекции параметров**, изменяющих характеристики системы по заданным законам для последующей трассировки лучей и анализа результатов.

Целевая функция для оптимизации задаётся оператором. Типичные критерии при оптимизации: уровень собственного излучения ОС, равномерность фонового излучения по поверхности МФПУ. **Параметры оптимизации** выбираются исходя из доступной технологии производства и ограничений на систему.

Предложенный метод является универсальным, не завязанным на определённое программное средство и может быть применён на любой САПР, обладающей требуемой функциональностью. В работе для реализации метода использована программа Zemax.

Порядок создания модели оптической системы и анализа результатов следующий:

1. Анализ документации на систему, создание модели оптической системы в непоследовательном режиме. Ввод корректных данных по пропусканию материалов линз и покрытиям на оптических элементах.
2. Анализ конструкции оправ в системе. Преобразование оправ к набору простейших элементов в системе (конусы, плоские элементы, кольца и т.д.). Ввод элементов в модель с учётом взаимного расположения, характеристик поверхности. Оправы могут быть загружены как единый объект в одном из стандартных форматов конструкторских САПР.
3. Ввод информации о приёмнике излучения, с учётом защитных стекол и спектральной чувствительности.
4. Задание источников излучения (сложные части собираются из отдельных простейших элементов).
5. Трассировка лучей от каждого источника с дальнейшим масштабированием получившегося результата в зависимости

от температуры и свойств объекта. Суммирование полученных результатов.

Предложенный метод был подтвержден на вариантах, имеющих аналитическое решение. Проведена апробация метода на объективе с промежуточным изображением и протяженной оправой, а также на ОС без промежуточного изображения и протяженных оправ. Для второго варианта дополнительно выполнено сравнение внешнего и внутреннего потоков для различных значений коэффициента поглощения в материале линз μ_{SL} и температуры ОС T_{OT} . В таблице 1 приведены результаты расчета нормированного значения «сигнал/шум» μ_0 (относительно случая, когда собственный поток объектива равен 1).

Таблица 1. Нормированное значение μ_0 в зависимости от μ_{SL} и T_{OT}

$\mu_{SL}, \text{см}^{-1}$	$T_{OT} = 280 \text{ K}$	$T_{OT} = 300 \text{ K}$	$T_{OT} = 321 \text{ K}$
0,003	0,93	0,86	0,77
0,01	0,90	0,82	0,72
0,015	0,89	0,80	0,68

Из данных таблицы 1 видно, что разница в отношении «сигнал/шум» между наилучшим и наихудшим среди рассмотренных вариантов достигает 1,4 раза. Подобные расчёты позволяют обосновать требования к уровню охлаждения ОС для сохранения отношения «сигнал/шум».

В третьей главе изложены методы уменьшения фоновой облучённости приёмника путём оптимизации конструктивных и технологических параметров оптической системы ИК пеленгатора.

В работе была рассмотрено использования метода для решения задачи уменьшения общего фонового потока (внутреннего и внешнего). Фоновая облучённость на приемнике в ОЭС может быть уменьшена следующим образом (при заданных характеристиках ОС):

1. Охлаждение оптической системы.
2. Применение оптических материалов с низким коэффициентом поглощения, уменьшение количества оптических элементов в ОС.
3. Изменение геометрии конструкции оправ.
4. Изменение оптических характеристик покрытий на оправках.

Типичный путь для решения задачи минимизации собственного теплового излучения – это охлаждение всей системы. Однако, при этом уменьшается только собственное тепловое излучение ОС, влияние внешних источников не рассматривается. В ряде случаев он не может быть применён из-за габаритно-массовых и технических ограничений.

В работе изучено влияние коэффициента теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов объектива на общий уровень его внутреннего фонового излучения; определена конфигурация этих параметров, соответствующая минимальному уровню фонового излучения.

Для примера был рассмотрен типичный 3-х линзовый светосильный объектив, предназначенный для работы в диапазоне 8,5-12 мкм (рисунок 5).

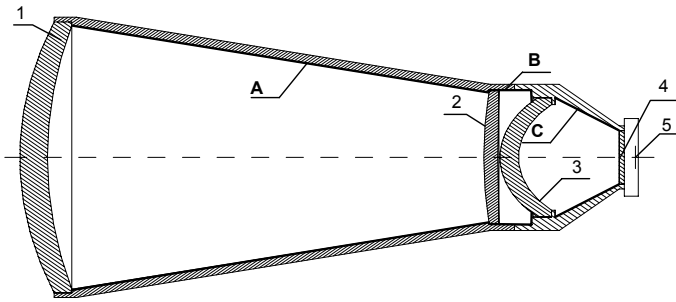


Рисунок 5. Схема моделируемого ИК объектива для области 8,5-12 мкм.

Температура линз и оправ объектива принималась равной $T = 293$ К. Оправа объектива была разбита на три группы элементов А, В, С. Каждой группе элементов присваивалось пять значений коэффициента отражения ρ_0 : 0 - 0,99; 1 - 0,70; 2 - 0,50; 3 - 0,28; 4 - 0,01 (рассмотрено 125 конфигураций). Все варианты рассчитывались при трёх видах

отражений от оправ: зеркальное; диффузное; смешанное (50% зеркальное, 50% - ламбертово). Для каждой расчётной конфигурации оценивались величина потока излучения, приходящего на приёмник от ОС Φ_{OS} и её оценка математического ожидания. После чего каждый из трёх блоков расчётных конфигураций упорядочивался по возрастанию $M[\Phi_{OS}]$. В результате, конфигурация с меньшим порядковым номером имеет меньшую величину фонового потока; каждой конфигурации сопоставлен набор оптических характеристик оправ {А В С}. Для данного примера было рассчитано излучение внешнего фона, попадающего на МФПУ.

Рассмотрим два примера систем, отличающихся условиями применения. Первая из систем предназначена для наблюдения поверхности Земли, а вторая располагается на летательном аппарате и предназначена для наблюдения объектов в верхней полусфере. Для обоих вариантов была рассчитана облучённость МФПУ, создаваемая как самой оптической системой, так и внешними источниками. В качестве внешних источников рассматривалась подстилающая поверхность (для первого случая температура поверхности 30°C , подстилающая поверхность для второго – безоблачное небо). Дополнительно рассматривался внешний источник направленного излучения, создающий облучённость 200 Вт/м^2 , расположенный под углом 15°C (вне поля зрения системы).

Анализ рисунка 6 показывает, что величина внутреннего фонового потока, приходящего на приёмник, действительно зависит и от коэффициентов теплового излучения оправ объектива и от их отражательных характеристик. При этом оптимальная конфигурация параметров относительно средневероятной конфигурации, взятой по расчётному массиву, имеет поток меньший в 4,6 раз. Оптимальные конфигурации коэффициентов теплового излучения {А В С}, для всех типов отражений от оправ - {0 0 0}, наихудшие - {4 4 4}.

Результаты расчета были нормированы к максимальному потоку от оптической системы. Графики потоков приведены на рисунке 6. В первом случае сумма внешнего и внутреннего потока меняется слабо между конфигурациями. При добавлении внешних ярких источников вне поля зрения, оптимальным становится вариант с высоким коэффициентом поглощения оправ. Во втором случае при отсутствии ярких источников

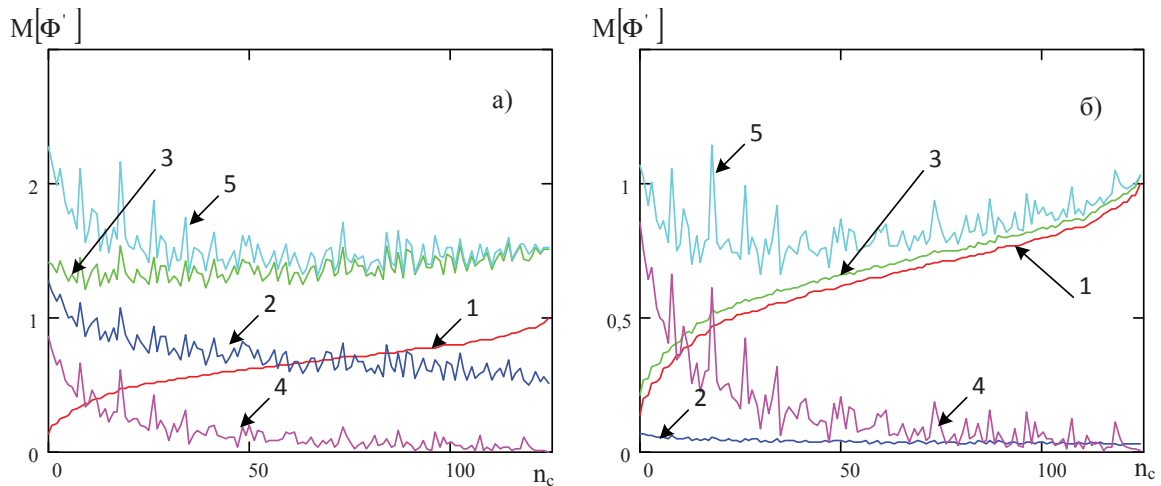


Рисунок 6. а – система для наблюдения поверхности Земли, б – система для наблюдения в верхнюю полусферу. 1 – собственного теплового излучения; 2 – внешнего полного потока от фона; 3 – суммарный поток от внешних и внутренних источников; 4 – поток от внешней боковой подсветки; 5 – суммарный поток от всех источников.

вне поля зрения, оптимальным будет набор оправ, имеющих высокий коэффициент отражения (а соответственно создающий низкий уровень фоновой облучённости), так как основной вклад в облучённость вносит оптическая система. При введении дополнительных внешних источников, требования к подавлению рассеянного излучения увеличиваются, что усиливает требования по снижению коэффициента отражения.

Анализ распределений показывает, что в зависимости от условий применения, будут различные оптимальные характеристики конструкции системы. При выборе необходимо учитывать не только рассеянное излучение от внешнего фона, но и наличие ярких источников, находящихся вне поля зрения системы. Следует отметить, что нельзя распространять данные результаты на все подобные объективы из-за небольшого количества рассмотренных систем. Для каждой системы должен производиться анализ систем с учётом области применения.

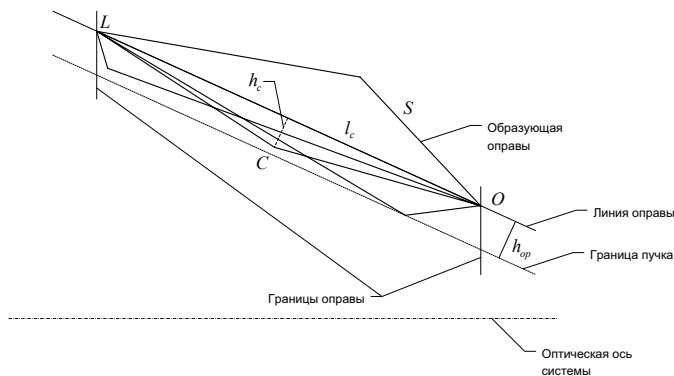


Рисунок 7. Схема расположения точки излома оправы.

оправ (приведена на рисунке 5), а так же ряд точек с различным соотношением h_c и l_c . Так же рассматривалась конфигурация, форма

В работе была рассмотрена возможность уменьшения фонового потока путём оптимизации формы оправ объектива (рассмотрено 160 конфигураций). Каждая оправа представлялась в виде двух частей (Рисунок 7). Координаты точки C излома задавались относительно точки O : h_c и l_c ; $h_c \in (-h_{op}; h^*]$, $l_c \in [0; OL]$. При расчёте фонового потока рассматривалось нулевая «номинальная» конструкция

оправ для которой конструировалось с учётом прочности и жесткости конструкции, а так же способа установки объектива в составе ОЭС.

Результаты обрабатывались аналогично варианту с изменением характеристик оправ. На рисунке 8 приведены график изменения $M[\Phi'_{OS}]$ для каждой из расчётных конфигураций, а так же интервал значений по уровню 3σ (тонкие линии). Анализ рисунка 8 показывает, что величина внутреннего фонового потока, приходящего на приёмник, действительно зависит от формы оправ. Фоновый поток для случая объектива с типичными оправами в 1,42 раза больше значения для наилучшего среди рассмотренных вариантов.

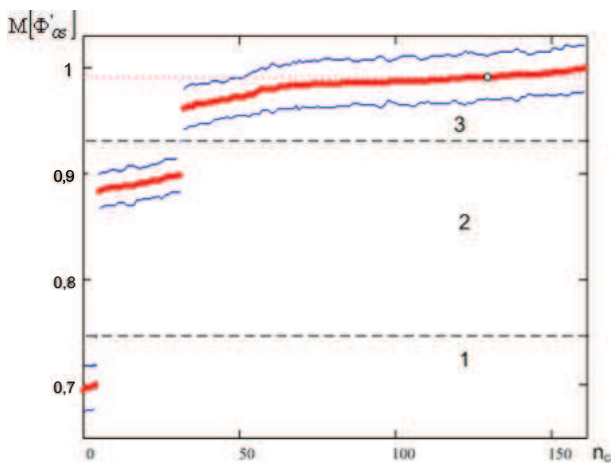


Рисунок 8. Оценка мат. ожидания нормированного фонового потока от объектива Φ'_{OS} .

На рисунке 8 можно выделить три области с существенно отличающимся уровнем фонового потока. Первая область соответствует минимальному потоку; конструкция близка к варианту с минимальным отклонением размеров оправ от световых высот, набор значений получен варьированием формы второй оправы. Вторая область характеризуется введением точки перегиба на оправе А. Конструкция с типичными оправами лежит по уровню потока в области 3 (на графике значение выделено белой точкой), что показывает её неоптимальность по сравнению с другими вариантами.

На рисунке 9 приведено изменение внешнего потока в зависимости от формы оправ; величина нормирована и отсортирована в соответствии с увеличением собственного фонового потока, аналогично рисунку 8. Среди рассмотренных конфигураций, вариантам с минимальным фоновым потоком минимально реагируют на рассмотренный внешний источник.

Было выполнено сравнение внутреннего фонового потока с потоком от поверхности Земли в качестве фона. Для оптимального варианта отношение потока от ОС к опорному составляют $\Phi_{OS}/\Phi_{B0} \approx 0,98$ и для типичной конструкции 1,4. Из этих данных явственно следует, что потенциальная чувствительность ИК системы (для случая приёмника, функционирующего в режиме ОФ), возрастает при оптимизации конструкции оправ ОС с целью минимизации его внутреннего фонового излучения.

Исходя из анализа данных, полученных при решении приведенных

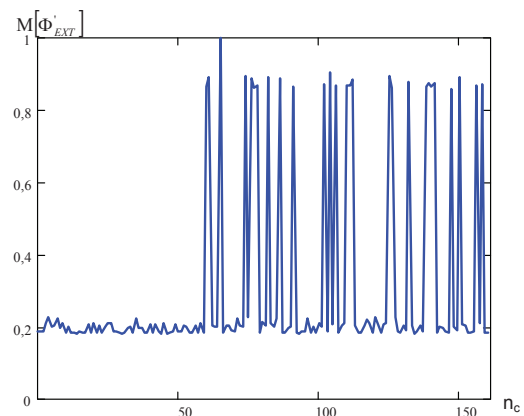


Рисунок 9. Оценка потока от внешнего источника Φ'_{EXT} .

выше задач, следует, что наибольшее влияние на суммарный фоновый поток оказывает оправа **С**, поэтому её следует охлаждать в первую очередь (например, охлаждение на 25° приведёт к уменьшению потока в 1,2 раза, по сравнению с системой, находящейся при температуре 293 К).

При суммарном применении рассмотренных методов для наилучшего случая, величина потока от оптимизированной системы может составить 0,09 от величины потока в неоптимизированном варианте.

Метод позволяет определять оптимальную конструкцию оправ, в зависимости от задачи и назначения ОЭС.

Для анализа выигрыша, возникающего при переносе линз в холодную область приёмника, было рассмотрено создание мультисенсорной ОЭС, имеющей составное сферическое поле зрения и предназначенной для работы в автоматическом режиме. В подобных системах необходимо использовать ОС минимального размера с высоким качеством. Общее поле зрения формируется из набора полей зрения единичных ОЭС. Рассмотрено три варианта ОС, отличающихся угловым полем (61° , 79° , 110° ; разрешение МФПУ для первого варианта 512×512 и 1024×1024 для остальных); для каждого из вариантов разрабатывался вариант с переносом линз в холодную область. Характеристики ОС: относительное отверстие 1:1; спектральный диапазон – 3,6-4,8 мкм; размер пикселя охлаждаемого МФПУ – 15 мкм; концентрация энергии пятна в квадрате 2×2 пикселя – более 85% по полю, мгновенное поле зрения пикселя не более $1,5$ мрад.

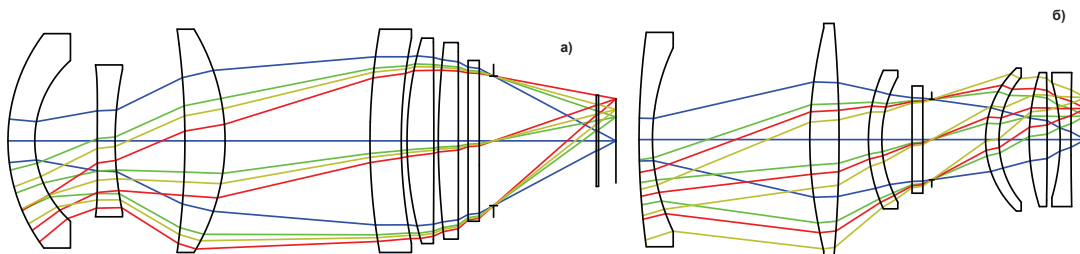


Рисунок 10. Схема ОС с угловым полем 110° . а) Вариант с холодной АД; б) Вариант с линзами в криогенной области МФПУ.

На основании требований были разработаны оптические схемы одиночной ОС; при этом использовался алгоритм для оптимизации равномерности мгновенного поля и потока в пикселе. Оптические схемы разработанных систем с угловым полем 110° приведены на рисунке 10. Характерные габариты рассчитанных ОС приведены в таблице 2 (в таблице приняты обозначения N_L – общее количество линз ОС, N_{LC} – количество линз в холодной области приёмника, длина объектива до входного окна приёмника L_R , общая длина совокупности «ОС-МФПУ» L_{OS} , диаметр входного окна МФПУ D_W).

Из анализа результатов можно сделать следующие выводы:

1. При переносе линз в холодную область приёмника уменьшаются продольные габариты L_R и L_{OS} .
2. Во всех вариантах наблюдается существенное уменьшение D_W . Это ведёт к увеличению надежности конструкции холодной области, и

Таблица 2. Характеристики оптической системы

№	$\Omega_{OS}, ^\circ$	N_L/N_{LC}	$L_{OS}, \text{мм}$	$L_R, \text{мм}$	$D_W, \text{мм}$
1.1	61	4/0	91	67,5	23,0
1.2	61	3/2	47	11	12,2
2.1	79	6/0	115	81	35,4
2.2	79	6/3	74	39	21,0
3.1	110	6/0	136	103	35,4
3.2	110	6/3	100	61	21,5

благоприятно сказывается на тепловых режимах криогенной области из-за меньшего притока тепла через входное окно.

3. Перенос линз в холодную область в рассмотренных вариантах практически не повлиял на общий объём холодной области, но наблюдается изменение её формы.

Для данных систем была рассчитана величина собственного фонового теплового излучения; результаты приведены в таблице 3 (μ_0 – нормированное отношение «сигнал/шум», Φ_R^{B0} – внешний фоновый поток).

Таблица 3. Собственное излучение оптических систем

Вариант	Общий поток, Вт	Поток от линз, %	$\Phi_R^{B0}, \text{Вт}$	μ_0
1.1	$1,73 \cdot 10^{-6}$	66,2	$1,17 \cdot 10^{-5}$	0,93
1.2	$2,83 \cdot 10^{-7}$	88,8	$1,19 \cdot 10^{-5}$	0,99
2.1	$4,22 \cdot 10^{-5}$	89,5	$4,35 \cdot 10^{-5}$	0,71
2.2	$1,20 \cdot 10^{-5}$	92,4	$4,32 \cdot 10^{-5}$	0,89
3.1	$6,05 \cdot 10^{-5}$	87,2	$4,05 \cdot 10^{-5}$	0,63
3.2	$1,18 \cdot 10^{-6}$	90,0	$4,28 \cdot 10^{-5}$	0,99

Перенос линз в холодную зону приёмника позволил существенно уменьшить собственное тепловое излучение ОС, что привело к росту отношения «сигнал/шум» (коэффициент увеличения μ_0 1,6) В вариантах 1.2 и 3.2 собственное тепловое излучение практически не влияет на отношение «сигнал/шум». Подобная характеристика может быть получена за счёт охлаждения всей конструкции объективов в целом; таким образом в рассмотренных случаях перенос линз в холодную область приёмника оказался эквивалентным охлаждению всей системы.

Расчётный метод был подтвержден результатами экспериментов, в которых изменялись оптические характеристики оправ и выполнялась оценка суммарного фонового потока на приёмнике.

В четвертой главе «Метод анализа и оптимизации мгновенного углового поля и фонового потока в широкоугольных оптических системах ИК пеленгаторов» приведён разработанный численно-аналитический метод, который позволяет упростить разработку широкоугольных ОС с заданными требованиями на изменение мгновенного поля, потока в пикселе и углового разрешения.

Поток в пикселе зависит от мгновенного углового поля в пространстве предметов, а также от формы и размеров зрачка, пропускания оптической системы. Поэтому относительный поток (рассчитывается относительно точки на оси) для случая одинаковой яркости рассматриваемой поверхности в пространстве предметов, приходящий на n -ый пиксель, который может быть представлен в виде: $\Phi_n = \frac{A_n}{A_0} \frac{E_{Rn}}{E_{Rn0}}$, где E_{Rn} и E_{Rn0} – значение относительной облучённости в точке, соответствующей пикселю с номером n и на оптической оси; A_0 и A_n – площадь проекции пикселя в пространстве предметов, для расположенного на оптической оси и пикселем с номером n соответственно. Параметр E_{Rn} определяет облучённость в точке, в то время как отношение A_n/A_0 учитывает конечный размер пикселя приёмника, сопряженного с ОС.

Из анализа формулы видно, что существует возможность влияния на итоговый поток в пикселе в системе как посредством изменения распределения облучённости E_{Rn} , формируемой изменением формы входного зрачка, так и за счёт изменения мгновенного углового поля пикселя. В ряде систем требуется контролировать угловое разрешение по полю. Для обобщения метода получения заданного углового распределения мгновенного углового поля пикселя и потока в пикселе в широкоугольных оптических системах на системы, где угловое разрешение является критическим параметром, внесём данную величину в список рассматриваемых в методе.

Угловое разрешение по полю рассчитывается как: $\Delta\alpha(R_n) = w(R_{n+1}) - w(R_n)$, где $w(R_n)$ и $w(R_{n+1})$ – угловое положение точек относительно оптической оси, в которые проецируется центр n и $n + 1$ -го пикселя.

Предлагаемый метод основан на предварительном расчёте ряда характеристик в аналитической форме (общая схема алгоритма приведена на рисунке 11). Метод является частично аналитическим, так как характеристика A_n/A_0 рассчитывается на основании аналитически полученной формулы, с учётом известных характеристик оптической системы и варианта применения ОЭС. При расчёте итогового потока предлагается функцию E_{Rn} вычислять в каком либо оптическом САПР. Это позволяет ускорить расчёт ОС с требуемыми характеристиками.

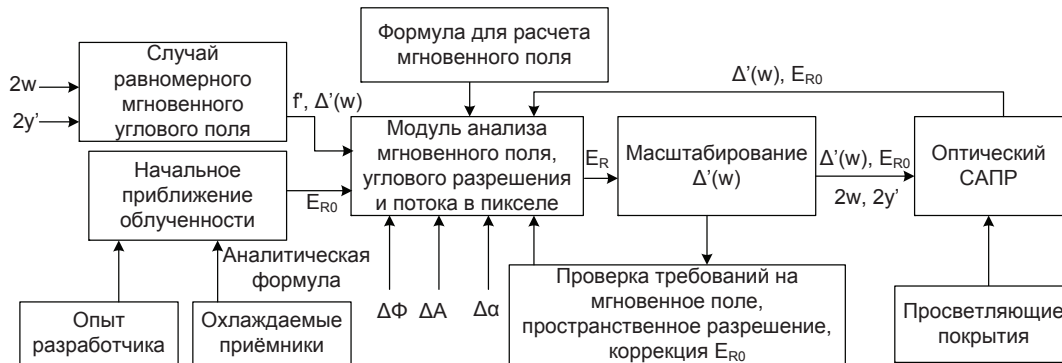


Рисунок 11. Блок-схема расчёта ОС с заданными требованиями к мгновенному полю, угловому разрешению и потоку в пикселе.

Входными данными являются: угловое поле в пространстве предметов $(2w)$, размер МФПУ $(2y')$, допустимое отклонение от равномерности

потока в пикселе ($\Delta\Phi$), мгновенного поля (ΔA) и допустимое изменение углового разрешения ($\Delta\alpha$) по полю, а так же форма поверхности в пространстве предметов, на которой рассматривается проекция пикселя. Перед выполнением алгоритма необходимо вывести формулу распределения мгновенного поля в зависимости от области применения ОЭС, а соответственно и формы поверхности, на которую проецируется пиксель, для передачи её в «Модуль анализа мгновенного поля, углового разрешения и потока в пикселе» (например, для ОЭС, предназначенной для наблюдения поверхности Земли с космического аппарата, наблюдаемая поверхность будет представлять собой сферу, а в случае наблюдения с низколетящего летательного аппарата – плоскость). Данное действие выполняется один раз, результат может быть использован в дальнейшем.

Так как угловое поле ОС может быть больше 180° , при расчете будем использовать дисторсию $\Delta'_{f\theta}(R)$:

$$\Delta'_{f\theta} = \frac{R}{f'w} - 1. \quad (2)$$

Алгоритм разработки ОС с заданными требованиями по мгновенному полю, потоку в пикселе и угловому разрешению следующий:

1. Расчёт фокусного расстояния ОС, которое соответствует случаю равномерного мгновенного поля: $f' = \frac{y'}{2 \sin w/2}$. Вычисление дисторсии по полю для данного варианта как первого приближения для дальнейшего синтеза: $\Delta' = \frac{2 \sin w/2}{\operatorname{tg} w} - 1$ или, для случая широкоугольных ОС как: $\Delta'_{f\theta} = \frac{2 \sin w/2}{w} - 1$. Вычисление высоты главного луча в плоскости МФПУ: $y' = f'(1 + \Delta') \operatorname{tg} w$ или $y' = f'(1 + \Delta'_{f\theta})w$. Получение зависимости $\Delta'(R)$ или $\Delta'_{f\theta}(R)$.

2. Введение предполагаемого начального приближения для функции E_{Rn} . Вводится на основании опыта разработчика, начальным приближением может служить функция монотонно убывающая от 1 до 0,85. Для систем с диафрагмой в холодной области используется аналитическое решение.

3. Определение вклада в требуемое распределение облучённости изменения площади пикселя в пространстве предметов. Проверка, удовлетворяет ли мгновенное поле и $\Delta\alpha$ заданным к ним требованиям. Если нет, то выполняется коррекция требований на E_{Rn} с учётом ограничений на мгновенное поле.

4. Определение величины дисторсии, соответствующей требуемому изменению мгновенному полю. Выполняется линейное масштабирование первого приближения дисторсии, с соответствующим пересчетом фокусного расстояния, до получения требуемых величин ΔA и $\Delta\Phi$: $f' = \frac{y'}{(1+\Delta') \operatorname{tg} w}$ или $f' = \frac{y'}{(1+\Delta'_{f\theta})w}$, где Δ' и $\Delta'_{f\theta}$ – «классическая» относительная дисторсия и дисторсия $f - \theta$ соответственно (формула 2). Контроль углового разрешения по полю.

5. Синтез и оптимизация ОС с рассчитанной дисторсией и требуемым качеством изображения.

6. Вычисление функции E_{Rn} в рассчитанной системе (с учётом предполагаемых просветляющих покрытий и поглощением материала оптических элементов). Расчёт функции E_n для получившейся системы.

7. Введение коррекции требований к дисторсии на основе анализа полученной E_n , изменение целевой функции оптимизации; оптимизация ОС.

8. Проверка на соответствие получившейся системы полному набору требований. Если система им не удовлетворяет, возврат к п. 5. В положительном случае – завершение алгоритма.

Следует отметить, что в представленном алгоритме нет необходимости вычислять функцию E_{Rn} , являющейся вычислительно затратной, на каждом шаге оптимизации в оптическом САПР. Расчёт распределения выполняется только в контрольных точках приведённого метода.

Расчёт изменения площади входного зрачка по полю, а также E_{Rn} возможно выполнить отдельно на основе трассировки лучей. Для этого перед оптической системой располагается плоскость, перпендикулярная главному лучу рассматриваемой точки поля. Входной зрачок определяется трассировкой краевых лучей и определения точки их пересечения с наклонённой поверхностью. В результате получаем двумерный набор координат на плоскости, который используется для расчёт площади (например, с использованием формулы Гаусса для многоугольника). Фокусное расстояние для зоны поля определяется по формуле из п. 4. Рассчитанные величины позволяют оценить распределение относительной освещённости. Дополнительно при расчёте хода лучей возможно учесть изменение пропускания для различных зон. Данный способ позволяет получить хорошее приближение распределения относительной освещённости по полю, но требует дополнительных трудозатрат.

На основании вышеприведённых данных, были получены итоговые выражения зависимости мгновенного углового поля пикселя от характеристик ОС и области применения ОЭС, для трёх основных случаев: ОЭС, предназначенная для работы с удалёнными (точечными) объектами, ОЭС, предназначенная для наблюдения за поверхностью Земли и размещённая на летательном и космическом аппаратах.

Для определения изменения мгновенного поля в широкоугольной ОЭС, предназначенной для работы с удалёнными точечными объектами, предлагается использовать для вычисления площади квадратного пикселя (с центром в точке $(x_c; y_c)$ и размером пикселя a_R) в пространстве предметов на сфере радиусом R_0 :

$$A = R_0^2 \int_{y_c - \frac{a_R}{2}}^{y_c + \frac{a_R}{2}} \int_{x_c - \frac{a_R}{2}}^{x_c + \frac{a_R}{2}} \sin \frac{R}{f'(1 + \Delta'_{f\theta}(R))} \frac{(-R\dot{\Delta}'_{f\theta}(R) + \Delta'_{f\theta}(R) + 1)}{f'R [1 + \Delta'_{f\theta}(R)]^2} dx_m dy_m. \quad (3)$$

В качестве примера рассмотрено изменение дисторсии (рисунок 12) в зависимости от линейного поля для трёх случаев применения ОЭС. Характеристики ОС: угловое поле в пространстве предметов 61° , размерность МФПУ 512x512, размер чувствительного элемента 15 мкм. На рисунке 12 дисторсия для следующих систем: а) системы работающие с удалёнными объектами – **А** допускается отклонение ΔS не более 10%, **В** – 1%; б) **С** – система расположенная на летательном аппарате, допустимое отклонение

10%; в) **D** – система расположенная на космическом аппарате, находящемся на высоте 500 км, допустимое отклонение 10%.

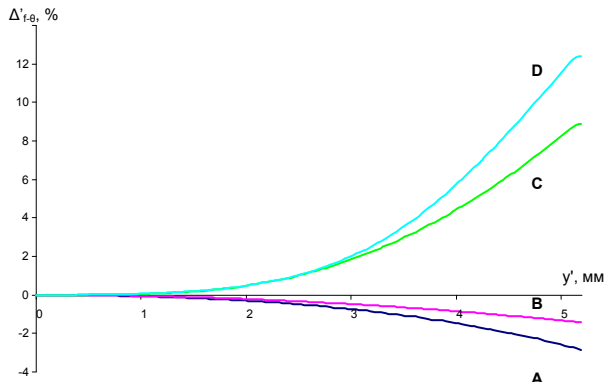


Рисунок 12. График дисторсии для различных случаев применения ОЭС.

На рисунке 13 приведено изменение мгновенного углового поля для рассмотренных вариантов. Несмотря на то, что во всех случаях отклонение мгновенного поля от равномерного менее 10%, вид закона изменения дисторсии для рассмотренных ситуаций сильно отличается.

Результаты расчётов были подтверждены результатами моделирования в непоследовательном режиме программы Zemax. Предложенный метод расчётов сверхширокоугольных ИК ОЭС отличается тем, что он непосредственным образом учитывает особенности совместной работы с МФПУ, то есть носит системный характер и чем определяется её практическая ценность для теории и практики опико-электронного ИК приборостроения.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Разработан метод моделирования внутренних и внешних фоновых излучений на приемнике излучения в оптических системах среднего и дальнего ИК диапазона, позволяющий производить анализ и оптимизацию оптической схемы и конструкции ОС ИК диапазона с целью уменьшения уровня фонового потока от внешних и внутренних источников. Рассмотрены следующие технические решения для повышения эффективности ОЭС:

- подбор оптимальных коэффициентов теплового излучения и отражательных характеристик оправ и конструктивных элементов оптического тракта может уменьшить фоновый поток в 4,6 раза относительно его значения при отсутствии оптимизации;
- варьирование конструкции оправ позволило уменьшить поток в 1,4 раза относительно объектива с типичными оправками;
- расчет собственного потока при охлаждении ОС позволяет назначать обоснованные требования к температурному режиму ОЭС;
- расчёт характеристик бликов, возникающий при проявлении эффекта Нарцисса, позволит определить возможность и метод их подавления;
- произведено сравнение классических ОС и ОС, у которых часть линз перенесено в охлаждаемую зону, по величине отношения «сигнал/шум».

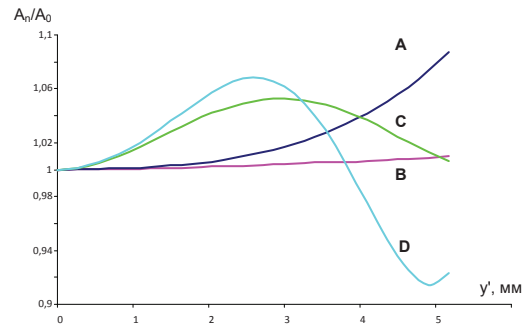


Рисунок 13. Изменение мгновенного углового поля $\frac{S_n}{S_0}$.

Показано, что вариант с линзами в охлаждаемой области, имеет наименьший уровень фоновой облучённости и габариты (отношение «сигнал/шум» выше в до 1,6 раз, длину меньше в 1,4-1,9 раз).

2. Разработан численно-аналитический метод синтеза и оптимизации конструктивных параметров широкоугольных оптических систем, с заданными требованиями по изменению мгновенного углового поля и фонового потока на пикселе. Выведены формулы, позволяющие рассчитать изменение мгновенного углового поля для трёх достаточно общих случаев применения ОЭС: работа с удалёнными воздушными объектами; ОЭС предназначенная для наблюдения объектов на поверхности Земли, в случаях когда ОЭС располагается на летательном и космическом аппаратах. Рассмотренные решения могут быть применены для оптических систем с угловым полем более 180°.

3. На основе предложенного метода оценки уровня собственного фонового излучения ОС, произведено сравнение классических ОС и ОС, у которых часть линз перенесено в охлаждаемую зону, по величине отношения «сигнал/шум». Показано, что вариант структурной схемы, состоящий из двух частей – афокальной и фокусирующей, расположенной в криогенной области охлаждаемого приёмника излучения, имеет наименьший уровень фоновой облучённости и габариты (отношение «сигнал/шум» выше в до 1,6 раз, длину меньше в 1,4-1,9 раз).

4. Проведены экспериментальные исследования, подтвердившие правильность разработанного метода.

5. Предлагаемая последовательность расчётов обеспечила возможность моделирования изменения величины ОСШ ТВП и ИК пеленгаторов при различных вариантах их построения, имеющих целью снижение внутренних засветок и обеспечения «сверхшироких» полей зрения с минимизацией фоновых шумов наблюдаемого сюжета. Задача поиска путей повышения эффективности ИК пеленгаторов за счёт снижения фоновой облучённости их МФПУ приобрела в определённом смысле законченный характер.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах Из перечня ВАК и Scopus/Web of Science:

1. Макаренко А. В., Правдивцев А. В., Юдин А. Н. Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем. // Электромагнитные волны и электронные системы. №12, 2009. С. 28 – 37.
2. Makarenko A. V., Pravdivtsev A. V. Architectural solutions of conformal network-centric staring-sensor systems with spherical field of view. Proc. of SPIE Vol. 8185 81850I-2. PP. 1–9, 2011.
3. Pravdivtsev A. V. An approach to the design of wide-angle optical systems with special illumination and IFOV requirements. Proc. Of SPIE 8429-58, 2012.
4. Pravdivtsev A.V., Akram M.N., Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing, Infrared Physics & Technology, Vol. 60, Sept. PP. 306-311, 2013.
5. Анализ влияния оптических характеристик поверхности оправ ИК

оптических систем на величину собственного и внешнего паразитного потока излучения. // Прикладная физика, №2, 2019. Принята в печать.

Другие публикации:

6. Ивлев О.А., Колючкин В.Я., Макаренко А.В., Мошнин А.Г., Правдивцев А.В. Принципы синтеза алгоритмов обнаружения целей пассивными оптико-локационными станциями расположенными на подвижных носителях. // Международная конференция «Прикладная оптика– 2008» / Сборник докладов. 2008. С. 117-122.
7. Макаренко А.В., Правдивцев А.В. Анализ влияния свойств поверхности оправ на величину теплового излучения оптических систем. // Международная конференция «Прикладная Оптика-2010» / Сборник докладов, т. 3. 2010. С. 208-212.
8. Макаренко А.В., Правдивцев А.В. Ab initio метод оценивания собственного «паразитного» излучения оптических систем инфракрасного диапазона. // VIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике / Сборник конкурсных докладов. – Самара, СамГУ, 2010. С.226-232.
9. Макаренко А. В., Правдивцев А.В., Юдин А. Н. Формирование постоянного элементарного поля зрения в широкоугольных оптических системах. //XXI Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения / Тезисы докладов. 2010. С. 60.
10. Правдивцев А.В. О возможности расчёта широкоугольных объективов с особыми требованиями к мгновенному полю зрения и освещенности. //XXII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения / Труды конференции. 2012. С. 73-75.
11. Pravdivtsev A.V. Prospective use of cooled detectors with integrated optics in conformal multisensors electro-optical systems. Technical digest of 8-th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication. 2012. PP. 79-80.
12. Правдивцев А.В. Анализ влияния конструкции оправ на величину теплового излучения оптических систем. // Международная конференция «Прикладная Оптика-2012» / Сборник докладов, т. 1. 2012. С. 230-234.
13. Правдивцев А.В. Экспериментальное исследование влияния характеристик оправ на внешний и внутренний паразитные потоки в диапазоне 8-12 мкм. //XXIII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения / Труды конференции. 2014. С. 134-137.
14. Правдивцев А.В. Комплексирование конструктивных и технологических параметров для снижения фоновой облучённости приёмника. // Международная конференция «Прикладная Оптика-2018» / Сборник докладов, т. 1. 2018. С. 116-118.