

На правах рукописи

Гаршин Алексей Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МНОГОСПЕКТРАЛЬНЫХ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ОДНОВРЕМЕННОЙ РАБОТОЙ
КАНАЛОВ**

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Бахолдин Алексей Валентинович

Официальные оппоненты: **Солк Сергей Вольдемарович**
доктор технических наук
АО «НИИ ОЭП», начальник отдела

Ковалева Анна Сергеевна
кандидат технических наук
АО «ЛОМО», инженер-технолог

Ведущая организация: АО «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова»

Защита состоится 06 декабря 2016 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 при Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 190000, Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д.14, ауд. 314.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., д.49 и на сайте http://fppo.ifmo.ru/?page1=16&page2=52&page_d=1&page_d2=141423.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



В.М. Красавцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В последнее время широкое распространение получают оптико-электронные системы, работающие в нескольких спектральных диапазонах - многоспектральные оптико-электронные системы (МОЭС). Работа в нескольких спектральных диапазонах открывает широкие возможности получения, обработки и анализа информации. Такие системы могут применяться в различных областях человеческой деятельности: медицина, военное дело, космический и экологический мониторинг, охранная техника, промышленный и технический контроль.

Особую роль МОЭС играют в приборах специального назначения, где важнейшими задачами являются круглосуточность и всепогодность наблюдения (обнаружения, распознавания, сопровождения) объекта. Для их решения большинство оптико-электронных приборов этого класса комплектуются оптическими системами как видимого, так и инфракрасного (ИК) диапазонов. Применение ИК канала обеспечивает работу оптико-электронного прибора при низком уровне освещенности и низкой прозрачности атмосферы. Также они позволяют получать излучение от объекта через непрозрачные для видимого диапазона среды (пыль, дым и др.).

Вопросы классификации, построения, и применения МОЭС, а также особенности оптических приборов и систем, работающих в ИК диапазонах спектра, подробно рассмотрены в работах В.В. Тарасова и Ю.Г. Якушенкова. Разработке оптических систем посвящены работы В.Н. Чуриловского, М.М. Русинова, В.А. Зверева, А.П. Грамматина, Г.И. Цукановой, Л.Н. Андреева и др. Однако, построение оптических систем для МОЭС до сих пор остается сложной задачей оптического приборостроения, поскольку не выработаны принципы проектирования систем такого типа. Особо актуальной является задача разработки методики расчета и проектирования оптических систем для МОЭС с одновременной работой всех каналов.

Цель работы

Целью диссертационной работы является разработка методики расчета многоспектральных оптических систем с одновременной работой каналов.

Задачи исследования

1. Анализ существующих схем построения многоспектральных оптических систем и их элементной базы.
2. Разработка принципиальной схемы построения многоспектральной оптической системы с одновременной работой каналов.
3. Разработка теоретических основ композиции оптических систем инфракрасных объективов с вынесенным выходным зрачком.
4. Разработка методики расчета объективов, работающих в двух спектральных диапазонах.

5. Разработка методики габаритного и абберационного расчета трехлинзовых объективов с действительным выходным зрачком.

Методы исследования

1. Аналитические методы, основанные на применении теории параксиальной оптики и теории аббераций третьего порядка.

2. Методы компьютерного моделирования при вычислении числовых значений аббераций оптических систем.

3. Методы автоматизированной коррекции и оптимизации конструктивных параметров оптических систем по критериям качества изображения.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. При проектировании многоспектральных оптических систем с одновременной работой каналов, каждый канал необходимо рассматривать и как отдельную оптическую систему, и как зависимую и влияющую часть общей системы.

2. Принципы построения многоспектральных оптических систем с базовым единым компонентом и делением на каналы при помощи спектроделителей.

3. Многоспектральная оптическая система, содержащая три одновременно действующих спектральных канала.

4. Систематизация схемных решений объективов с действительными входным и выходным зрачками. Соотношения габаритного расчета для рассмотренных схем.

5. Методика габаритного и абберационного расчета трехлинзовых объективов с действительным выходным зрачком.

6. Методика расчета и принципы выбора оптимального варианта композиции объективов, работающих в двух спектральных диапазонах.

Научная новизна

1. Разработана методика габаритного и абберационного расчета многоспектральной оптической системы с одновременной работой каналов.

2. Разработана методика габаритного и абберационного расчета трехлинзовых объективов с действительным выходным зрачком.

3. Разработана методика расчета и выбора композиций линзовых объективов, работающих в двух спектральных диапазонах.

Практическая ценность

1. Полученные конструктивные параметры двухлинзовых апланатов могут быть использованы при модульном проектировании новых оптических систем.

2. Методика габаритного и абберационного расчета трехлинзовых объективов с действительным выходным зрачком может быть использована при разработке объективов ИК оптико-электронных приборов и комплексов.

3. Рассчитана оптическая схема крупногабаритной многоспектральной трехканальной оптической системы с дифракционным качеством изображения по всему полю.

Практическая ценность и новизна подтверждается полученными патентами РФ на полезные модели на оптические системы, рассчитанные при помощи разработанной диссертантом методики:

- RU 136198 «Трёхканальная зеркально-линзовая оптическая система»;
- RU 150182 «Теплопеленгатор-дальномер».

Достоверность полученных результатов

Результаты аналитических исследований и компьютерного моделирования подтверждены примерами оптических систем, расчет которых выполнен с помощью различного программного обеспечения (Zemax, OPAL, CAPO). Математические расчеты и моделирование осуществлялись при помощи пакета прикладных программ MathCad.

Апробация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 конференциях и профильных семинарах, 5 из которых международные: SPIE Optical Systems Design (г. Йена, Германия, 2015), Международный оптический семинар OS-2013, 2014, 2015 (г. Санкт-Петербург, 2013-2015 гг.), XI Международная конференция «Прикладная оптика-2014» (г. Санкт-Петербург, 2014), XLIII, XLIV, XLV научная и учебно-методическая конференция НИУ ИТМО (г. Санкт-Петербург, 2014-2016 гг.), III, IV, V Всероссийский конгресс молодых ученых (г. Санкт-Петербург, 2014-2016 гг.).

Выступления были отмечены дипломами:

- Победитель конкурса Международного Оптического Семинара 2013;
- Диплом «За лучший доклад на секции» (ВКМУ, 2014);
- Диплом «За лучший научно-исследовательский доклад» (КМУ, 2016).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 11 печатных, из которых 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 4 статьи в изданиях, включенных в системы цитирования Scopus и Web of Science, 2 патента РФ на полезные модели и 2 труда в электронных изданиях материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 116 наименований и шести приложений; содержит 150 страниц машинописного текста, 65 рисунков и 40 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, отображены научная новизна и практическая ценность, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы представлен литературный обзор современных МОЭС. В первом разделе приведен обзор применения МОЭС в различных сферах деятельности человека (военное дело, медицина, различные виды контроля, охрана и безопасность, научные исследования). Во втором разделе приводится краткий обзор особенностей ИК оптических систем как важной составляющей современных МОЭС. В третьем разделе рассмотрены типы построения оптических систем, применяемых в МОЭС. В четвертом разделе приведен краткий обзор известных методов расчета оптических систем и предлагается метод расчета сложных многоканальных систем. Метод является продолжением модульного принципа проектирования и основан на делении сложной системы на отдельные составные части. Расчет каждого модуля производится независимо от остальных, после чего производится последовательная компоновка рассчитанных модулей в единую систему. При таком подходе могут быть существенно упрощены процессы сборки и юстировки системы, поскольку отдельные модули могут быть отъюстированы и проконтролированы независимо друг от друга. В пятом разделе предложены и обоснованы принципы построения многоспектральных оптических систем (МОС) с базовым единым компонентом и делением на каналы при помощи спектроделителей. В шестом разделе приводится техническое задание на расчет трехканальной многоспектральной оптической системы с одновременной работой всех каналов.

Вторая глава посвящена проблеме расчета оптических систем с действительным выходным зрачком. Актуальность такого рода систем обусловлена широким применением охлаждаемых ИК приемников, в конструкции которых используется диафрагма, устанавливаемая на некотором расстоянии перед фоточувствительным слоем. Данная диафрагма должна совпадать с апертурной диафрагмой оптической системы, т.е. оптическая система должна иметь действительный выходной зрачок. При этом входной зрачок может располагаться как в пространстве предметов, так и в пространстве изображений. Последний вариант приводит к увеличению светового диаметра объектива, либо к возникновению виньетирования. Оптимальным является положение входного зрачка в пространстве предметов – на первой поверхности объектива. Для того чтобы оптическая система имела действительные входной и выходной зрачки, она должна состоять, как минимум, из двух компонентов с промежуточным изображением между ними.

Во втором разделе главы рассмотрены и проанализированы основные схемы построения объективов с действительными зрачками, а также

определены соотношениях для их габаритного расчета. Первая схема построения показана на рисунке 1.

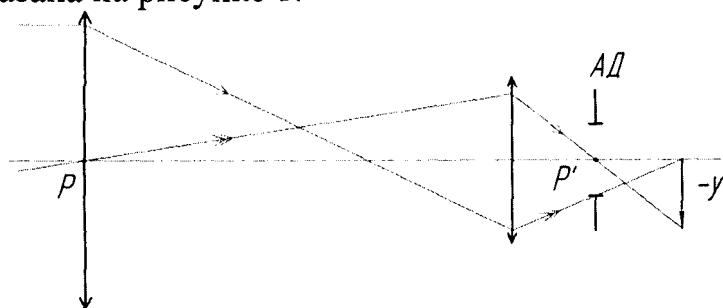


Рисунок 1 – Первая схема построения

Система состоит из первого компонента, формирующего промежуточное изображение, и второго положительного компонента, проецирующего это изображение на приемник, а входной зрачок с первого компонента – на материальную диафрагму приемника. При заданном расстоянии от диафрагмы до приемника каждой величине фокусного расстояния первого компонента соответствует единственная величина фокусного расстояния второго.

Вторая схема построения, показанная на рисунке 2, отличается от первой наличием коллектива.

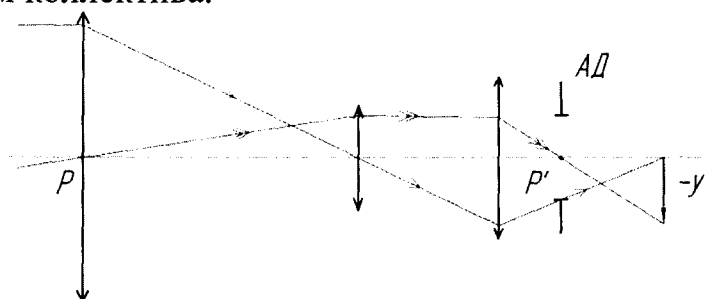


Рисунок 2 – Вторая схема построения

Использование коллектива позволяет управлять положением выходного зрачка системы без изменения оптических сил остальных компонентов.

На рисунке 3 показана третья схема построения системы.

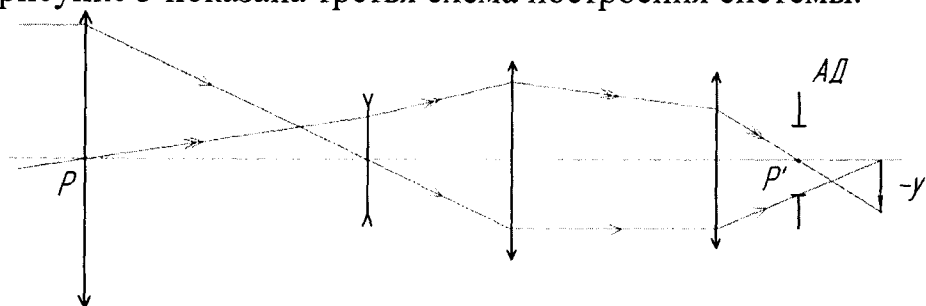


Рисунок 3 – Третья схема построения

Третья схема состоит из телескопической системы типа Кеплера и формирующего объектива. Коллектив, устанавливаемый в плоскости промежуточного изображения, имеет отрицательную оптическую силу и служит для согласования зрачков и увеличения выноса выходного зрачка

телескопической системы. Также благодаря отрицательной оптической силе он позволяет исправить кривизну поля.

Параллельный ход лучей между телескопической системой и формирующим объективом позволяет устанавливать в нем наклонный спектроделитель, не вносящий дополнительных aberrаций. Таким образом, данная схема имеет перспективу для использования в качестве двухспектральной или как основа для многоспектральной оптической системы.

В третьем разделе обосновывается необходимость отдельного расчета первого компонента системы для всех схем построения.

В четвертом разделе приведены параметры рассчитанных тонких двухлинзовых объективов для областей спектра 3 – 5 и 8 – 12 мкм. Проведено исследование aberrаций объективов с реальными толщинами компонентов, проанализированы остаточные поперечные aberrации и вторичный спектр рассчитанных объективов.

В пятом разделе рассмотрена возможность использования дифракционных элементов для расчета однолинзовых апланатов в среднем и дальнем ИК диапазонах. Показана методика габаритного и aberrационного расчета однолинзового асферического гибридного объектива. Приведен пример рассчитанного объектива, произведен анализ его aberrаций.

В третьей главе проведено исследование и разработана методика расчета объективов, работающих в двух спектральных диапазонах. В первом разделе приведено исследование дисперсии оптических материалов, прозрачных одновременно в спектральных диапазонах 3 – 5 и 8 – 12 мкм.

Для устранения хроматизма положения в двух диапазонах, значения оптических сил компонентов системы должны удовлетворять следующим условиям:

$$\begin{cases} \Phi_1 + \Phi_2 + \dots + \Phi_n = 1 \\ \Phi_1 / \nu_{11} + \Phi_2 / \nu_{21} + \dots + \Phi_n / \nu_{n1} = 0 \\ \Phi_1 / \nu_{12} + \Phi_2 / \nu_{22} + \dots + \Phi_n / \nu_{n2} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$ – оптические силы компонентов;

$\nu_{11}, \nu_{21}, \dots, \nu_{n1}$ – коэффициенты средней дисперсии оптических материалов компонентов в первом спектральном диапазоне;

$\nu_{12}, \nu_{22}, \dots, \nu_{n2}$ – коэффициенты средней дисперсии оптических материалов компонентов во втором спектральном диапазоне.

Решение системы уравнений (1) возможно при использовании двух материалов, если их характеристики удовлетворяют условиям:

$$\begin{cases} \nu_{11} > \nu_{21} \\ \nu_{11} / \nu_{12} \cong \nu_{21} / \nu_{22} \end{cases} \quad (2)$$

Анализ возможного решения (сочетание материалов KPC5-GaAs) показал, что при хорошей коррекции хроматизма, двухспектральный объектив обладает значительной сферической aberrацией даже при невысоких значениях относительного отверстия. Основной причиной являются большие величины относительных оптических сил компонентов.

При использовании трех различных материалов для любой комбинации материалов может быть получено точное решение системы уравнений (1), однако, не во всех случаях решение имеет физический смысл. Опираясь на свойства используемых материалов (величины показателей преломления), наиболее часто используемые значения относительных отверстий, параметры технологичности оптических деталей и прочие конструктивные соображения, были введены следующие критерии отбора комбинаций:

- максимальное значение относительной оптической силы компонента в комбинации не должно превышать 4 (по модулю);
- значения относительные сил остальных компонентов в комбинации не должны превышать 2 (также по модулю).

При необходимости расчета объектива с высоким относительным отверстием, наиболее сильный компонент может быть разбит на два, при этом остальные могут быть реализованы в виде одиночной линзы.

Для определения перспективных комбинаций материалов можно воспользоваться графоаналитическим методом. Пример номограммы показан на рисунке 4.

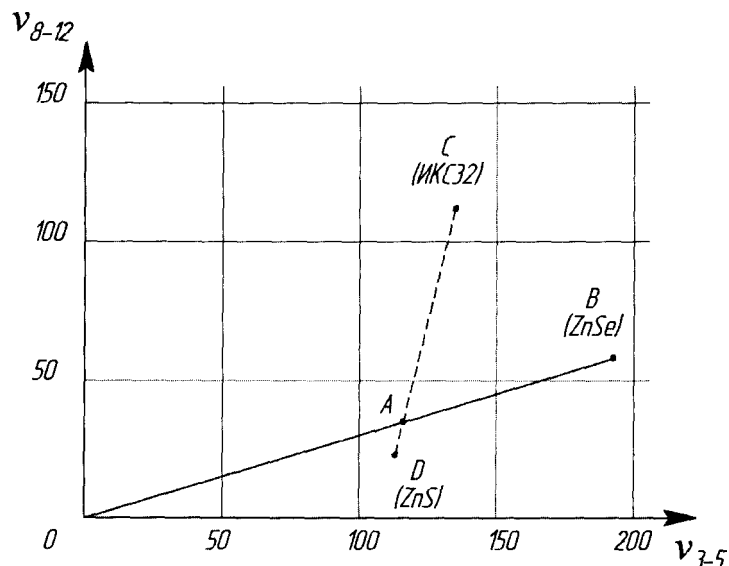


Рисунок 4 – Номограмма двухспектрального объектива

Помимо величин относительных оптических сил компонентов, критерием отбора может служить величина коэффициента кривизны изображения третьего порядка S_{IV} , зависящая только от сил компонентов и показателей преломления материалов.

$$S_{IV} = \Phi_1 / n_1 + \Phi_2 / n_2 + \Phi_3 / n_3, \quad (3)$$

где n_1, n_2, n_3 – показатели преломления материалов компонентов.

При поиске комбинации для самостоятельной оптической системы, оптимальным выбором будет сочетание материалов с наименьшим значением коэффициента S_{IV} . Однако если рассчитываемый объектив является частью более сложной системы, оптимальной может оказаться комбинация материалов с высоким значением коэффициента S_{IV} .

Особо важными критериями выбора комбинации материалов является их доступность и освоенность производством, поскольку большинство рассматриваемых материалов токсичны и вредны при обработке. Для наиболее технологичной комбинации материалов (Ge-ZnSe-ZnS) также был проведен расчет и анализ всех возможных композиций объектива (рисунок 5).

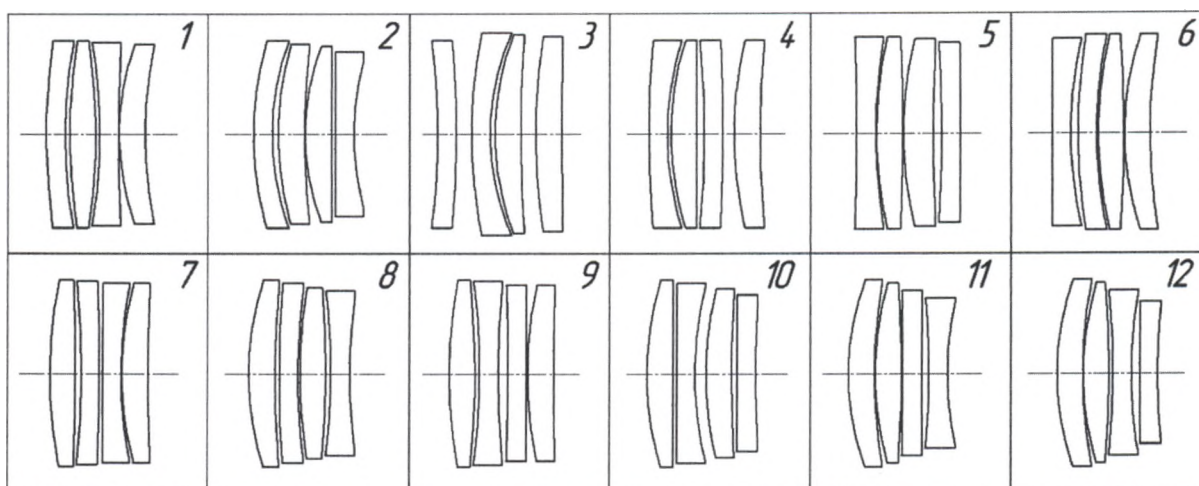


Рисунок 5 – Композиции двухспектрального объектива

Проведенный в работе анализ качества изображения композиций объектива и их чувствительности к допускам позволяет определить оптимальное решение.

Во втором разделе приведено исследование возможности использования дифракционных поверхностей при расчете объективов, работающих в двух спектральных диапазонах. Показана теоретическая возможность расчета двухспектрального двухлинзового объектива, одна из поверхностей которого является киноформом. Однако анализ дифракционной эффективности киноформа в двух диапазонах позволил сделать вывод о невозможности применения дифракционных поверхностей при расчете двухспектральных объективов.

Четвертая глава посвящена разработке методике расчета трехлинзовых ИК объективов с действительным выходным зрачком. В первом разделе главы описывается этап габаритного расчета. В качестве базовой принимается система из трех компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной величины (рисунок 6).

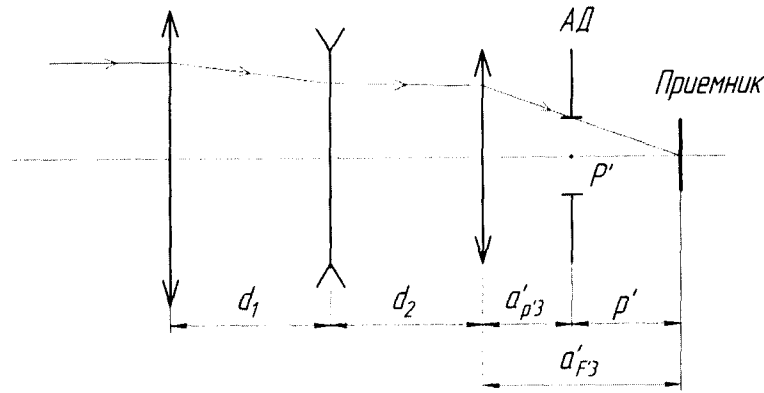


Рисунок 6 – Трехкомпонентная оптическая система

Данная система имеет три внутренних параметра (углы первого параксиального луча внутри компонентов α_2 , α_4 , α_6) и пять внешних (оптические силы компонентов Φ_1 , Φ_2 и Φ_3 и расстояния между ними d_1 и d_2). Поскольку система содержит пять внешних параметров, для определения их величин необходимо составить и решить систему из пяти уравнений. Базовыми являются уравнения: масштаба, исправления хроматизма положения и исправления кривизны изображения. В ходе работы были определены следующие условия:

- условие получения необходимой величины заднего отрезка;

Величина заднего фокального отрезка третьего компонента складывается из положения выходного зрачка относительно задней главной плоскости третьего компонента $a'_{p'3}$ и удаления выходного зрачка от плоскости изображения p' . Величина $a'_{p'3}$ выбирается исходя из конструктивных соображений: с учетом особенностей крепления корпусов объектива и фотоприемника, а также исходя из требований к длине всей системы.

$$1 - \Phi_1(d_1 + d_2) + \Phi_2 d_2 (\Phi_1 d_1 - 1) = a'_{p'3} + p' \quad (4)$$

- условие согласования положений входного и выходного зрачков;

Положение входного зрачка относительно передней главной плоскости первого компонента a_{p1} может быть задано из конструктивных соображений. Также оно может быть заранее известно в случае, если рассчитываемый объектив является составной частью сложной системы.

$$p' [a_{p1} + 1 - \Phi_3(d_1 + d_2) - \Phi_2 d_1 (1 - \Phi_3 d_2)] = 1 \quad (5)$$

- условие устранения хроматизма увеличения

$$\frac{\Phi_2 h_2 d_1}{v_2} + \frac{\Phi_3 (d_2 + d_1 h_3)}{v_3} = 0, \quad (6)$$

где h_2 , h_3 – высоты первого параксиального луча на втором и третьем компонентах.

На практике крайне редко удается добиться строгого устранения кривизны изображения. Чаще всего это условие может быть превращено в неравенство, а величина коэффициента кривизны изображения ограничена небольшим значением (0.2...0.4). Поэтому в системе уравнений габаритного расчета дополнительного может быть использовано условие устранения хроматизма увеличения.

В таблице 1 приведены примеры решений системы уравнений габаритного расчета для спектрального диапазона 8 – 12 мкм, все значения приведены к величине фокусного расстояния системы.

Таблица 1 – Решения системы уравнений габаритного расчета

Материалы компонентов			Оптические силы компонентов			Расстояния между компонентами	
			Φ_1	Φ_2	Φ_3	d_1	d_2
Ge	ZnSe	ZnSe	1,039	-0,760	0,825	0,388	0,162
Ge	ZnSe	Ge	0,878	-0,140	0,425	0,395	0,193
Ge	ZnSe	ZnS	1,231	-0,771	0,579	0,191	0,355
Ge	ZnS	ИКС25	0,866	-0,534	0,352	0,222	0,372
ИКС25	ZnSe	ИКС25	1,460	-0,781	0,444	0,086	0,481
IRG26	ZnSe	Ge	1,337	-0,641	0,438	0,098	0,471
KRS5	ZnSe	KRS5	1,357	-0,635	0,417	0,080	0,494

На этапе абберационного расчета составляется система уравнений коэффициентов аббераций третьего порядка. Наличие трех внутренних параметров позволяет осуществить коррекцию трех аббераций (сферическая абберация, кома и астигматизм). В работе использовались выражения коэффициентов аббераций третьих порядков (сферической абберации B_0 , комы K_0 и астигматизма C_0), предложенные проф. В.Н. Чуриловским.

Систему уравнений абберационного расчета можно привести к виду:

$$\begin{cases} B_0 = A_1\alpha_2^2 + B_1\alpha_2 + C_1\alpha_4^2 + D_1\alpha_4 + E_1\alpha_6^2 + F_1\alpha_6 + G_1 = 0 \\ K_0 = A_2\alpha_2 + B_2\alpha_4^2 + C_2\alpha_4 + D_2\alpha_6^2 + E_2\alpha_6 + F_2 = 0 \\ C_0 = A_3\alpha_4^2 + B_3\alpha_4 + C_3\alpha_6^2 + D_3\alpha_6 + E_3 = 0, \end{cases} \quad (8)$$

где $A, B, \dots, G$ – коэффициенты, зависящие от внешних параметров системы.

Исследования и расчеты показали, что среди решений системы уравнений (8) для данных таблицы 1, шесть решений содержали комплексные числа и лишь два – действительные. При этом величины углов первого вспомогательного луча внутри компонентов принимают крайне высокие значения, что приводит к возрастанию аббераций высших порядков. В таблице 2 показаны абберации объектива, синтезированного по описанной выше методике. Для расчета была выбрана первая комбинация из таблицы 1 и следующие исходные данные:

Заднее фокусное расстояние
Относительное отверстие
Угловое поле
Спектральный диапазон

$f' = 60$ мм
1:2
 $2\omega = 10^\circ$
8 – 12 мкм

Таблица 2 – Аберрации синтезированного объектива

Волновые аберрации на оси, дл.волн			
Отн. зр. коорд.	Длина волны		
	8 мкм	10 мкм	12 мкм
1,000	-9,57	-7,67	-6,32
0,707	-1,45	-1,17	-0,93
0,500	-0,17	-0,14	-0,10
0,000	0,00	0,00	0,00

Как видно из таблицы 2, аберрации синтезированного объектива крайне высоки, хотя они могут быть значительно уменьшены в процессе оптимизации. А для ряда других комбинаций решение системы уравнений приводит к физически и конструктивно неосуществимым схемам объектива. Поэтому в ходе работы было предложено модифицировать методику аберрационного расчета, добавив дополнительный внутренний параметр – коэффициент деформации одной из поверхностей. Поскольку оптическая сила третьего компонента во всех комбинациях невелика (таблица 1), удобно сделать последнюю поверхность системы плоской. Таким образом, система уравнений аберрационного расчета останется определенной. Для введения коэффициента деформации была выбрана пятая поверхность, имеющая умеренные высоты хода апертурного и главного лучей. Это позволит корректировать ее асферизацией сферическую аберрацию, кому, астигматизм и дисторсию. При этом параметр α_6 становится связанным:

$$\alpha_6 = 1 / n_3 \quad (9)$$

В этом случае система уравнений аберрационного расчета имеет четыре решения, из которых два содержат действительные числа, а два других – комплексные. В таблице 3 приведены аберрации синтезированного объектива с асферической поверхностью.

Таблица 3 – Аберрации синтезированного объектива с асферической поверхностью

Волновые аберрации на оси, дл.волн			
Отн. зр. коорд.	Длина волны		
	8 мкм	10 мкм	12 мкм
1,000	0,1212	0,0524	0,1007
0,707	0,0413	0,0060	0,0292
0,500	0,0182	-0,0001	0,0108
0,000	0,0000	0,0000	0,0000

Как видно из таблицы 3, синтезированный объектив обладает высоким качеством изображения на оси (дифракционным по критерию Рэлея) и является хорошей стартовой точкой для дальнейшей оптимизации и расчета. Дополнительно возможно введение реальных толщин компонентов уже на стадии абберационного расчета объектива с использованием методики профессора Г.Г. Слюсарева. Начальные значения толщин компонентов могут быть выбраны исходя из конструктивных соображений.

Также в ходе исследования было установлено, что в ряде случаев при оптимизации объектива существует возможность отказа от асферизации пятой поверхности и перехода к системе из всех сферических поверхностей. Т.е. введение асферических поверхностей может использоваться как прием для нахождения альтернативного решения при абберационном расчете.

Пятая глава посвящена расчету трехканальной многоспектральной оптической системы с одновременной работой всех каналов. В первом разделе на основе принципов построения, сформулированных в главе 1, и третьей схемы построения из главы 2 предлагается схема построения трехканальной МОС (рисунок 8).

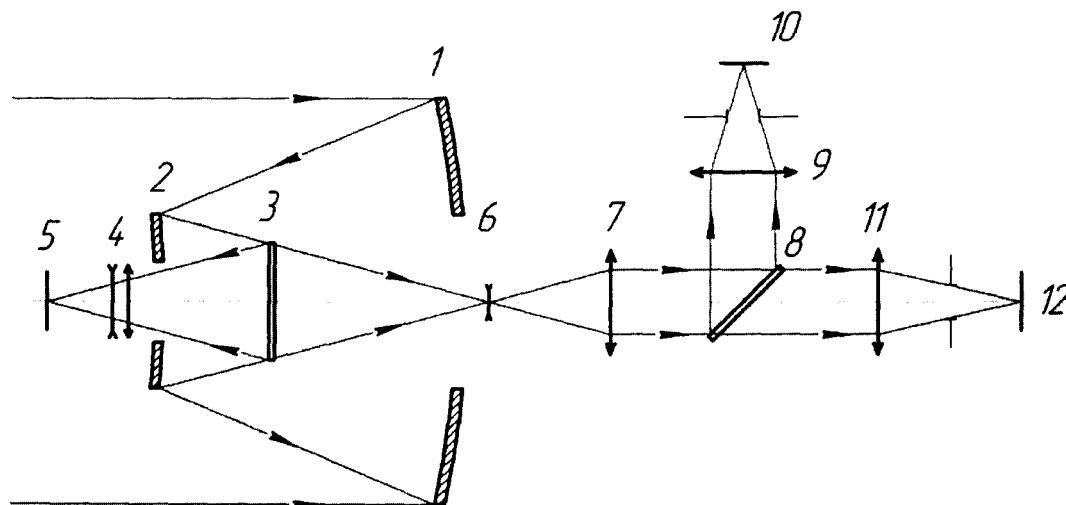


Рисунок 8 – Схема построения трехканальной МОС с одновременной работой каналов: 1 – главное зеркало, 2 – вторичное зеркало, 3, 8 – спектроделители, 4 – компенсатор зеркального объектива, 5 – приемник видимого диапазона спектра, 6 – коллектив, 7 – двухспектральный объектив, 9 – объектив канала 3 – 5 мкм, 10, 12 – охлаждаемые ИК приемники, 11 – объектив канала 8 – 12 мкм.

Использование в качестве входного единого компонента системы двухзеркального объектива позволяет использовать экранированную зону для введения дополнительного канала видимого диапазона спектра.

В соответствии с данными ТЗ, был произведен габаритный расчет системы, показанной на рисунке 8:

Фокусное расстояние зеркального объектива	$f'_{1-2} = 2333,33 \text{ мм}$
Фокусное расстояние двухспектрального объектива	$f'_7 = 116,66 \text{ мм}$

<i>Фокусное расстояние коллектива</i>	$f'_6 = -120 \text{ мм}$
<i>Фокусное расстояние объектива канала 3–5 мкм</i>	$f'_9 = 70 \text{ мм}$
<i>Фокусное расстояние объектива канала 8–12 мкм</i>	$f'_{11} = 70 \text{ мм}$
<i>Расстояние между 7 и 9/11 компонентами</i>	$m = 100 \text{ мм}$
<i>Положение выходного зрачка объективов 9 и 11</i>	$p' = 25 \text{ мм}$

Во втором разделе рассматривается выбор типа зеркального объектива, работающего в качестве единого входного компонента системы. Проводится сравнительный анализ технологических параметров зеркал системы Кассегрена при разных значениях относительного отверстия, а также сравнение технологичности систем Кассегрена и Ричи-Кретьена при выбранном относительном отверстии 1:3,33. Окончательный выбор был сделан в пользу классической системы Кассегрена.

В третьем разделе приводится анализ известных компенсаторов и преобразователей фокусного расстояния зеркальных объективов. При расчете преобразователя фокусного расстояния был использован апланатический мениск, изменяющий фокусное расстояние системы на величину показателя преломления материала, из которого он изготовлен. Для коррекции полевых aberrаций использовался двухлинзовый несклеенный афокальный компенсатор, а также линза Смита. В ходе оптимизации был получен вариант преобразователя, состоящий из двух склеенных менисков и линзы Смита.

В четвертом разделе главы приводятся принципы выбора начальной точки для расчета коллектива. В качестве коллектива предложено использовать отрицательный мениск из оптического материала, имеющего высокое пропускание в обоих рабочих спектральных диапазонах. Приведено выражение величины коэффициента дисторсии третьего порядка для коллектива, показывающее, что знак вносимой дисторсии зависит от ориентации мениска в пространстве.

В пятом разделе показан расчет телескопической системы, состоящей из зеркального объектива, коллектива и двухспектрального объектива. При объединении рассчитанных ранее компонентов их aberrации суммируются, поэтому необходима совместная оптимизация телескопической системы. Оптимизация проводилась в программной среде Zemax в режиме мультikonфигурации, одновременно для спектральных диапазонов 3 – 5 и 8 – 12 мкм. В качестве стартовой точки двухспектрального объектива были опробованы три лучшие композиции, найденные в третьей главе диссертации.

В шестом разделе приводятся формирующие объективы каналов 3 – 5 и 8 – 12 мкм, рассчитанные при помощи методики, описанной в четвертой главе диссертационной работы.

В седьмом разделе показана трехканальная МОС, после объединения ранее рассчитанных модулей. Вид системы показан на рисунке 11.

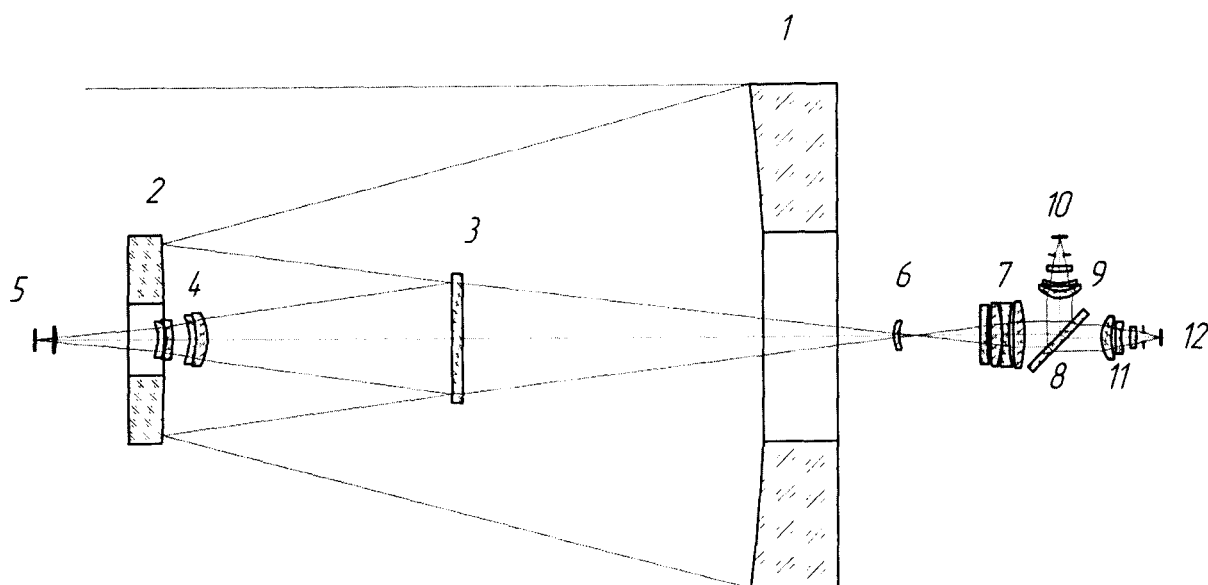


Рисунок 11 – Трехканальная многоспектральная оптическая система

Система обладает дифракционным качеством изображения по всему полю во всех спектральных каналах (таблица 4).

Таблица 4 – Качество изображения разработанной многоспектральной оптической системы

Канал МОС / критерий качества изображения	Точка поля	Рассчитанная система	Дифр. предел	Треб. по ТЗ, не менее
Видимый канал / ОПФ на простр. частоте 91 мм^{-1}	Центр	0,39	0,40	0,30
	Зона	0,39	0,39	0,30
	Край	0,37	0,37	0,30
Канал среднего ИК диапазона / Концентрация энергии в квадрате $50 \times 50 \text{ мкм}$	Центр	0,88	0,89	0,80
	Зона	0,86	0,89	0,70
	Край	0,83	0,89	0,70
Канал дальнего ИК диапазона / Концентрация энергии в квадрате $100 \times 100 \text{ мкм}$	Центр	0,88	0,89	0,80
	Зона	0,86	0,89	0,70
	Край	0,84	0,89	0,70

В восьмом разделе проведена оценка пропускания многоспектральной оптической системы на основе анализа эффективности просветляющих, отражающих и светоделительных покрытий. Для всех каналов разработанной системы пропускание составило выше 60%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложены принципы построения многоспектральных оптических систем с базовым единым компонентом и делением на каналы при помощи спектроделителей.

2. Рассмотрены существующие методы проектирования оптических систем и предложен метод расчета сложных многоканальных оптических систем, являющийся развитием модульного принципа проектирования.

3. Рассмотрены базовые схемы построения объективов с действительными входным и выходным зрачками и определены особенности их использования. Выведены формулы габаритного расчета рассмотренных схем построения.

4. Рассчитаны оптические схемы двухлинзовых апланатов для среднего и дальнего ИК диапазонов, которые могут быть использованы при модульном проектировании новых оптических систем. Произведена оценка достижимого уровня абберационной коррекции рассчитанных объективов.

5. Разработана методика расчета линзовых объективов, работающих в двух спектральных диапазонах. Определены возможные комбинации материалов для двухспектральных объективов в диапазонах 3 – 5 и 8 – 12 мкм. Произведены расчеты различных вариантов композиции двухспектрального объектива. Определены критерии выбора оптимального решения.

6. Разработаны методики габаритного и абберационного расчетов трехлинзовых объективов с действительным выходным зрачком. Получены условия согласования входного и выходного зрачков и условие устранения хроматизма увеличения в системе из трех разнесенных компонентов. Предложено введение деформации одной из поверхностей как прием для нахождения альтернативного решения при абберационном расчете трехлинзовых объективов.

7. Рассчитана крупногабаритная многоспектральная оптическая система, одновременно работающая в видимом, среднем и дальнем ИК диапазонах. Реализован модульный метод расчета сложной трехканальной оптической системы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из перечня ВАК:

1. Гаршин А.С. Особенности расчета трехлинзовых инфракрасных объективов, работающих с охлаждаемыми приёмниками // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 4. – С. 38-43. – 0,38 п.л./0,38 п.л.
2. A.S. Garshin, A.V. Bakholdin Dual-band infrared lenses design // Optical Systems Design 2015: Optical Design and Engineering VI. – Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9626. – P.96261B-1 – P.96261B-6. – 0,38 п.л./0,19 п.л.
3. G. Romanova, T. Ivanova, T. Zhukova, A. Garshin, R. Dantcaranov Influence of aspherical surfaces description on aberration correction // Optical Systems

Design 2015: Optical Design and Engineering VI. – Proc. of SPIE. – 2015. – Vol. 9626. – P.9626T-1 – P.9626T-7. – 0,44 п.л./0,09 п.л.

4. Гаршин А.С., Цуканова Г.И. Особенности построения и расчета крупногабаритных многоспектральных оптических систем // Оптический журнал. – 2015. – Т. 82. – № 6. – С. 42-47. – ISSN 0030 – 4042. – 0,38 п.л./0,19 п.л.
5. Гаршин А.С., Цуканова Г.И. Инфракрасные объективы с действительным выходным зрачком // В мире научных открытий. – Красноярск: Научно-инновационный центр, 2014. – Вып. 52. – № 4. – С. 249-258. – 0,62 п.л./0,31 п.л.

Публикации в других изданиях:

6. Гаршин А.С. Расчет инфракрасных объективов для охлаждаемых приёмников с учетом влияния эффекта Нарцисса // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. – 0,12 п.л. / 0,12 п.л.
7. Гаршин А.С. Методика расчета объективов, работающих в двух спектральных диапазонах // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. – 2015. – Том 1. – С.112-116. – 0,31 п.л. / 0,31 п.л.
8. Гаршин А.С. Разработка методики расчета объективов, работающих в двух спектральных диапазонах // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 0,12 п.л. / 0,12 п.л.
9. Цуканова Г.И., Гаршин А.С. Особенности построения многоспектральных оптических систем // Труды Оптического Общества им. Д.С. Рождественского. – Санкт-Петербург: ОАО "ГОИ им. С.И. Вавилова", 2014. – Т. 1. – 1.1.1. – С. 8-12. – 0,31 п.л. / 0,15 п.л.
10. Гаршин А.С. Инфракрасные объективы, работающие с охлаждаемыми приемниками // Альманах научных работ молодых ученых XLIII научной и учебно-методической конференции НИУ ИТМО. – 2014. – С. 100-103. – 0,25 п.л./ 0,25 п.л.
11. Гаршин А.С. Анализ существующих схем построения крупногабаритных многоспектральных оптических систем // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. – Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2014. – Выпуск 2. – С. 8-9. – 484 с. - 0,12 п.л. / 0,12 п.л.

Патенты:

12. Попова И.В., Цуканова Г.И., Гаршин А.С., Курнелъ Г.И., Егорова М.Г. Патент РФ 136198 на полезную модель «Трёхканальная зеркально-линзовая оптическая система» от 27.12.2013.
13. Попова И.В., Цуканова Г.И., Гаршин А.С., Курнелъ Г.И., Егорова М.Г., Егоров Д.И. Патент РФ 150182 на полезную модель «Теплопеленгатор-дальномер» от 10.02.2015.