

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 535.317

САМБРАНО РИВАС
Лус Фабиола Александра

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАФОКАЛЬНЫХ И ПРЕДФОКАЛЬНЫХ
ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ С АПЛАНАТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ
И КОРРЕКЦИЕЙ ПОЛЕВЫХ АБЕРРАЦИЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

Минск, 2024

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

АРТЮХИНА Нина Константиновна,
доктор технических наук, профессор, про-
фессор кафедры «Лазерная техника и техно-
логия» Белорусского национального техни-
ческого университета

Официальные оппоненты:

БЕЛЫЙ Владимир Николаевич
академик НАН Беларуси, доктор физико-
математических наук, профессор, заведую-
щий центром «Диагностические системы»
Института физики им. Б. И. Степанова НАН
Беларуси;

СТАРОСОТНИКОВ Николай Олегович
кандидат технических наук, ведущий инже-
нер-исследователь научно-конструкторского
управления «Космос» ОАО «Пеленг»

Оппонирующая организация

ОАО «Планар»

Защита состоится «21» июня 2024 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите дис-
сертаций Д 02.05.17 в Белорусском национальном техническом университете по
адресу: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, ауд. 202.

Телефон ученого секретаря (017) 293-96-18, e-mail: D.02.05.17@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского националь-
ного технического университета.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 02.05.17,
кандидат технических наук, доцент



Н. Н. Ризноокая

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых зеркальных схем, удовлетворяющих современным запросам по качеству изображения, требует обстоятельного анализа аберрационных свойств элементной базы и базовых схем, формирующих реальную основу синтеза зеркальных объективов, как предфокальных, так и зафокальных. Для этого необходимо проводить габаритные и аберрационные расчеты базовых схем, формирующих реальную основу композиции зеркальных объективов.

При создании телескопов с большой апертурой для изучения космоса в современных зеркальных объективах применяют технологии с использованием облученных и составных зеркал. В связи с этим необходимо провести дополнительное исследование по технологической адаптации зеркальных систем. При разработке составных зеркал необходимо решать проблему позиционирования сегментов зеркала, как геометрического, так и оптотехнического. Для решения геометрического позиционирования сегментов необходима разработка математической модели для случая регулярных сегментов (локальной кривой асферической поверхности) и равных промежутков, а также создание компьютерного алгоритма. Наиболее технологической формой составного зеркала принимается параболическая поверхность, которую образуют в рабочем состоянии сегменты составного зеркала.

Задачи, возникающие при аберрационном анализе схемных решений, позволяющих корректировать сферическую аберрацию, кому, астигматизм и кривизну изображения, а также при создании методик оценки центрального экранирования, виньетирования, защиты плоскости изображения от посторонней засветки, технологической адаптации зеркальных элементов требуют дальнейшего исследования.

В диссертационной работе поставлены и решены задачи по разработке и моделированию новых зафокальных и предфокальных композиций из двух и трех зеркал с высокими оптическими характеристиками, получению аналитических зависимостей для габаритного параметрического расчета, составляющих математические модели зеркальных объективов на основе предложенных принципов построения, решению вопросов технологической адаптации, разработке компьютерных алгоритмов для геометрического позиционирования гексагональных сегментов на составном зеркале, что в совокупности является актуальной научной задачей для систем дистанционного зондирования Земли, геодезических, военных и специальных приборов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Диссертационная работа соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований на 2021-2025 годы, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь 07.05.2020 г. № 156: «1. Цифровые информационно-коммуникационные и междисциплинарные технологии, основанные на них производства», в том числе «аэрокосмические и геоинформационные технологии» и «4. Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», в том числе «лазерные, плазменные, оптические технологии и оборудование».

Тематика диссертационной работы была включена в планы научной работы Белорусского национального технического университета, утверждаемые Советом университета и согласованные с Министерством Образования Республики Беларусь. Результаты, полученные в диссертационной работе, связаны с выполнением научно-исследовательской работы «Разработка новых лазерных материалов и твердотельных лазеров на их основе, светосильных объективов и зеркальных систем, технологии финишной обработки линз малой жесткости, аксиконов и оптических деталей лазерных гироскопов» (ГБ-16-246, 2016–2020 гг.).

Тематика научных исследований диссертационной работы рекомендована Национальным Центром оптических технологий (National center of optical technologies), г. Мерида, Венесуэла (Merida, Venezuela).

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью работы является разработка новых композиций зафокальных и предфокальных апланатических объективов с коррекцией полевых аберраций на основе анализа аберрационных свойств с повышенными оптическими характеристиками, а также решение вопросов технологической адаптации.

Для осуществления поставленной цели в процессе исследований потребовалось решить следующие задачи:

1. Провести аберрационный анализ композиций из двух и трех зеркал и определить решения, позволяющие корригировать сферическую аберрацию, кому, астигматизм и кривизну изображения.
2. Получить аналитические зависимости для габаритного параметрического расчета зеркальных объективов на основе предложенных принципов построения.
3. Разработать новые композиции зеркальных объективов, обеспечивающих предельно высокие оптические характеристики. Провести габаритные и аберрационные расчеты и компьютерное моделирование.
4. Усовершенствовать методику расчета бленды и защитного экрана от постороннего света в плоскости изображения для конструкторской адаптации двухзеркального зафокального объектива.
5. Разработать математическую модель и компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования гексагональных сегментов на составном зеркале.

Объектом исследования являлись предфокальные и зафокальные зеркальные объективы, имеющие два и три отражения от несферических поверхностей зеркал. Предметом исследования являлись оптические характеристики указанных зеркаль-

ных объективов, а также абберационные характеристики изображения в геометрическом и волновом представлении.

Научная новизна

Предложены новые схемные решения систем из двух и трех зеркал: разработанная оптическая система двухзеркального зафокального объектива, а также система с тремя отражениями, составленная из двух параболических зеркал, представляющая модуль с совмещенными вершинами первого и третьего зеркал, а также композиция из трех несферических зеркал с вынесенным третьим за пределы базовой схемы, включая модификацию объектива с дополнительным плоским зеркалом. Определены характеристики разработанных схем и даны практические рекомендации по выбору фокусного расстояния.

Установлены аналитические зависимости габаритного и абберационного расчета новых предфокальных и зафокальных композиций из двух и трех зеркал и составлены алгоритмы.

Получены формулы, определяющие габаритное построение схемы объектива с монолитом из первого и четвертого зеркал с плоским «ломающим» зеркалом, учитывающие конструктивные параметры Δ' и Δ (вынос плоскости изображения и осевую толщину монолита).

Найдены конструктивные решения для зеркальных схем с вынесенным третьим компонентом (зеркальным корректором полевых aberrаций), обеспечивающие увеличение поля зрения до $2\omega = 6^\circ$ и получение плоского изображения.

Модифицирована методика расчета и проведена конструкторская адаптация бленды и экрана с целью защиты плоскости изображения от постороннего света, вредных лучей и прямой засветки для двухзеркального зафокального объектива.

Разработаны математическая модель и компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования гексагональных сегментов в составном зеркале, образующих единую параболическую поверхность, адекватную по своему оптическому действию монолитному параболоиду. Проведено моделирование двухзеркального объектива с главным составным зеркалом из гексагональных сегментов, с перспективой его использования как оптического элемента аппаратуры дистанционного зондирования Земли.

Положения, выносимые на защиту

1. Новые зеркальные композиции: двухзеркального зафокального объектива со вторым зеркалом, диаметр которого превышает размер входного зрачка, и трехзеркального объектива с вынесенным третьим зеркалом за пределы базовой схемы, включая компактный зеркальный объектив с четырьмя отражениями от трех зеркал, позволяющие разрабатывать соответственно апланатические объективы с угловым полем до 4° , что в 1,5 раза больше аналогов, и объективы с коррекцией астигматизма и кривизны изображения с увеличенным полем зрения до 6° при сохранении высокой светосилы (относительного отверстия 1 : 1,5).

2. Методика расчета диаграмм виньетирования, основывающаяся на разработанном теоретическом положении, согласно которому все светозащитные и зеркальные элементы, могут быть заменены своим параксиальным изображением в пространстве предметов, создавая математическую модель наглядного графического представления о влиянии вредных потоков, позволяющая разрабатывать зер-

кальные объективы, защищенные блендами, с увеличенным угловым полем от 4° до 8° при допустимом виньетировании.

3. Математическая модель и компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования гексагональных сегментов в составном главном зеркале, образующих единую параболическую поверхность, адекватную по своему оптическому действию монолитному параболоиду, позволяющая минимизировать объем расчетных работ и сократить сроки решения задач для оптимального расположения шестигранных зеркальных элементов при любых значениях диаметров зеркал и длины сегментов.

Личный вклад соискателя ученой степени

Основные положения, результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы получены соискателем самостоятельно. Автором проведен анализ аберрационных свойств оптических элементов, составляющих зеркальные схемы, разработаны выносимые на защиту математические модели, методики проектирования, алгоритмы параметрических расчетов, аналитические зависимости, анализ и оценка оптических характеристик зеркальных объективов, включая модуль с составным главным параболическим зеркалом. Научному руководителю профессору кафедры «Лазерная техника и технология» БНТУ, д. т. н., профессору Артюхиной Н. К. принадлежит общее руководство работой, участие в постановке задач, обсуждение полученных результатов исследования. Соавтор публикаций Марчик В. А. оказывала консультации при проведении расчетов оптических систем. Соавтор Б. Конкет содействовал разработке математической модели и компьютерного алгоритма геометрического позиционирования гексагональных сегментов составного зеркала. Совместно с соавтором Л. Переса усовершенствована и адаптирована методика по расчету бленды и экрана для защиты плоскости изображения от постороннего света в двухзеркальном зафокальном объективе. Остальные соавторы занимались изучением вопросов, не вошедших в диссертационную работу.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения, выносимые на защиту, и выводы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях, конгрессах и конвенции: 9-я, 10-я, 11-я Международные научно-технические конференции «Приборостроение» г. Минск, Беларусь, БНТУ 2016–2018 гг.; 10-я, 11-я МНСТК «Новые направления развития приборостроения» г. Минск, Беларусь, БНТУ 2017–2018 гг., 7-й, 8-й Международные оптические конгрессы «Оптика XXI век» XII, XIII МК «Прикладная оптика» г. Санкт-Петербург, Россия 2016 и 2018 гг.; 15-я, 16-я Международные научно-технические конференции «Приборостроение» г. Киев, Украина, 2016–2017 гг.; XI-й Национальный конгресс Венесуэльского физического общества (дистанционно) г. Каракас, Венесуэла, 2018 г.; LXIX Конвенция AsoVAC «Венесуэльская ассоциация содействия развития науки» (дистанционно), г. Каракас, Венесуэла, 2019 г.

В Белорусском национальном техническом университете выполнено внедрение в учебный процесс по дисциплине «Техническая оптика» для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» следующих результатов: описание композиции длиннофокусного объектива с анастигматической коррекцией аберраций из трех несферических зеркал и математический алгоритм расчета позиционирования гексагональных сегментов с применением

языка программирования Python (акт внедрения от 19.02.2020 г.). Результаты исследования по разработке алгоритма и математической модели для геометрического позиционирования асферического составного зеркала внедрены в Национальном центре оптических технологий (CNTO), Национальной обсерватории и Центре астрономических исследований (CIDA) в Венесуэле (акт внедрения от 14.04.2020 г.).

Опубликованность результатов диссертации

На основании исследований, представленных в диссертации, опубликовано 16 работ (3,66 а. л.), из которых 3 статьи в изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (1,38 а. л.) и 4 статьи в сборниках материалов научных конференций (1,14 а. л.), 9 тезисов докладов научных конференций (1,14 а. л.). Результаты, представленные в диссертационной работе, вошли в отчет по НИР (ГБ-16-246).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений.

Диссертация включает 109 страниц машинописного текста, в том числе: 45 рисунков и 28 таблиц на 34 страницах, библиографический список из 68 наименования использованных источников на 5 страницах, список собственных публикаций соискателя из 16 наименований на 2-х страницах, 2 приложения на 14 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены двух- и трехзеркальные системы, содержащие асферические поверхности. Проведена классификация двухзеркальных систем по степени коррекции аберраций: классические, апланатические, анастигматы и по расположению вторичного зеркала: предфокальные и зафокальные. Описаны классические двухзеркальные схемы, предфокальный телеобъектив Кассегрена, зафокальный реверсивный объектив Грегори, апланатические системы Д. Максудова и анастигмат Г. Попова. Представлены трехзеркальные системы с промежуточным изображением после главного зеркала, либо после двух первых зеркал. Рассмотрены в качестве примеров трехзеркальных систем: трехзеркальные объектива В. Чуриловского и А. Мейнела.

Выполнен обзор и проведено исследование отдельных сегментированных зеркальных элементов и анализ основных положений для разработки математической модели позиционирования гексагональных (шестиугольных) сегментов.

Во второй главе предложены методы проектного и компьютерного моделирования зеркальных систем, включающие два этапа: габаритный и аберрационный расчеты, получены уравнения и формулы для расчета зеркальных предфокальных и зафокальных систем. Для габаритного расчета конструктивных параметров: радиусов зеркал r_s и расстояний между поверхностями d_s использованы законы параксиальной оптики; для определения линейного увеличения отдельных элементов введен расчет высот падения нулевых лучей h_s на зеркальные поверхности.

Получены основные аберрационные уравнения для монохроматических аберраций 3-го порядка, предложены аберрационные полиномы с нулями 3-го порядка ($S_p = 0$) B_0 , K_0 , C_0 , D_0 , E_0 , содержащие коррекционный параметр – деформации асферических поверхностей σ_s , равные квадрату эксцентриситета меридиональных

кривых второго порядка асферических поверхностей зеркал, которые используют для коррекции монохроматических aberrаций 3-го порядка (сферической aberrации, комы и астигматизма), позволяющие определять тип поверхности.

Предложена усовершенствованная методика по защите плоскости изображения от попадания постороннего света и вредных потоков при минимальном виньетировании и экранировании. Установлен алгоритм расчета целесообразного расположения светозащитной бленды для двухзеркального зафокального объектива, дана оценка виньетирования. Разработаны теоретические положения и геометрическая схема для установки специальной бленды (рисунок 1), расположенной в центральном отверстии второго зеркала, заданы необходимые условия: для защиты экрана ($\Delta_b < \overline{h_2}$); для прямой паразитной засветки ($\Delta_b \geq 2y$); для нулевой высоты второго отражения главного луча ($|h_2| > R_{b(i)} > R_{b(f)} > 0$); а также конический корпус и условие технологичности ($f' = 1/\alpha_3$). Она срезает опасные лучи прямой засветки A_1 и A_2 и другие возможные лучи постороннего света.

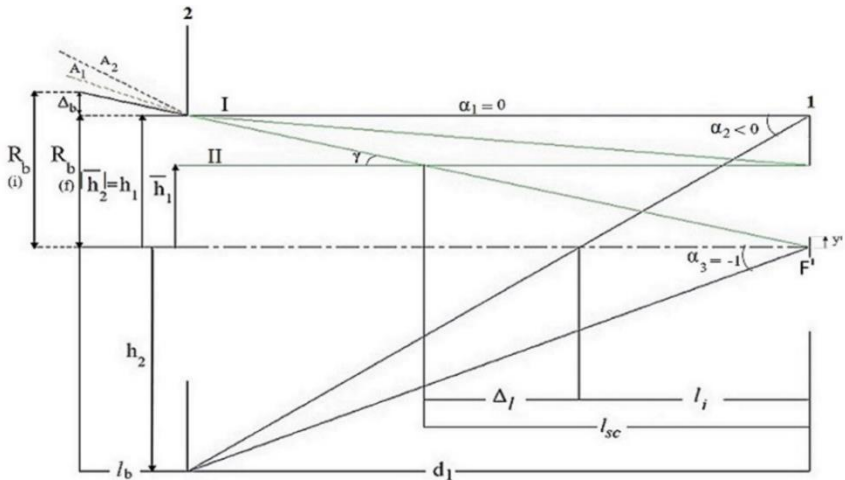


Рисунок 1 – Геометрическая схема для установки бленды в двухзеркальном зафокальном объективе

Коэффициент центрального экранирования:

$$\varepsilon_I = \frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{h_2}, \quad \varepsilon_{II} = \frac{\overline{h_1}}{h_2} = -\overline{h_1},$$

где ε_I – отношение высот первого и второго отражений апертурного луча; ε_{II} – в случае экранированного луча.

Использована методика двух точек (точек пересечения экранированного луча и фокуса системы) для нахождения положения плоскости экранирования, а именно:

$$l_{sc} = \frac{\overline{h_1 d_1}}{h_2} = -\overline{h_1} d_1 = \varepsilon \cdot d_1. \text{ При этом длина бленды } l_b \text{ определяется по формуле}$$

$$l_b = -\Delta_b \cdot d_1 / h_1.$$

В третьей главе даны результаты исследования и разработки новых конфигураций двухзеркальных зафокальных объективов, а также предфокальной схемы с тремя отражениями от двух параболических зеркал. Разработана усовершенствованная анастигматическая система трехзеркального светосильного объектива с промежуточным изображением и вынесенным за пределы системы третьим зеркалом, служащим для развития поля зрения, включая компактный объектив с четырьмя отражениями (модуль с плоским зеркалом).

Исследованы новые двухзеркальные зафокальные объективы, состоящие из двух вогнутых зеркал и формирующие промежуточное изображение в фокальной плоскости первого зеркала, у которых диаметр второго зеркала превышает размер входного зрачка, для пяти вариантов схемных решений по свободным коррекционным параметрам α_2 : $\alpha_2 > -1$; $\alpha_2 = -1$; $-1,618 < \alpha_2 < -1$; $\alpha_2 = -1,618$; $\alpha_2 < -1,618$. Установлены условия нормировки для 1-го нулевого луча при совпадении входного зрачка с главным зеркалом: $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 < 0$, $\alpha_3 = -1$, $h_1 = 1,0$, $h_2 < -1$.

Получены величины конструктивных параметров (таблица 1) в относительных величинах для всех композиций объективов с оптическими характеристиками: $f' = 100$ мм; $D/f' = 1 : 1,3$; $2\omega = 4^\circ$. Проведен абберрационный расчет и определены деформации для каждой поверхности.

Таблица 1 – Конструктивные параметры для всех вариантов двухзеркального объектива

α_2	$r_1 = -r_2$ (мм)	h_2 (мм)	d (мм)	σ_1	σ_2	$ \varepsilon $
-0,5	-400	-115,385	-800	-1,375	-0,03704	0,333
-1,000	-200	-76,9231	-300	0,333	-0,083	0,5
-1,200	-166,7	-64,11	-236,1	-0,101	-0,088	0,545
-1,618	-123,6	-62,2308	-161,8	-0,528	-0,125	0,618
-2	-100	-57,6923	-125	-1,3	-0,0518	0,666

Значения коэффициентов монохроматических aberrаций: сферическая aberrация (B_0) приближенно равна нулю; кома (K_0) незначительна, астигматизм (C_0), кривизна изображения (D_0) и дисторсия (E_0) не были исправлены.

Разработан двухзеркальный предфокальный объектив с тремя отражениями (рисунок 2), при использовании двойного отражения от главного зеркала. Второе зеркало имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей. Установлены условия нормировки для первого нулевого луча: $\alpha_1 = \alpha_3 = 0$, $\alpha_2 < 0$, $\alpha_4 = -1$, $h_1 = 1$. Деформация для каждой отражающей поверхности $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -1$.

Расчитана система с высоким относительным отверстием $D/f' = 1 : 0,5$, но малым полем зрения (порядка $2\omega = 12^\circ$).

С учетом дополнительных условий получен алгоритм параметрического расчета объектива для габаритного этапа:

1. Γ – видимое увеличение ОС из двух зеркал: $-1 = f' = f_1' \cdot \Gamma$.
2. D – диаметр главного зеркала; D_2 – диаметр второго зеркала; D_3 – диаметр центрального отверстия второго зеркала.

$$\frac{D}{D_2} = \frac{f_1'}{f_2'} = \Gamma, \quad \frac{2h_2}{D_3} = \Gamma.$$

3. d_1 – расстояние между первым и вторым зеркалами.

$$d_1 = f_1' - f_2', \quad d_1 = -\frac{\Gamma - 1}{\Gamma^2}.$$

4. f_1', f_2' – фокусные расстояния первого и второго зеркал.

$$f_1' = -\frac{1}{\Gamma}, \quad f_2' = -\frac{1}{\Gamma^2}.$$

5. h_2 – высота попадания второго отражения луча света.

$$h_2 = h_3 = \frac{1}{\Gamma}.$$

6. Свободный коррекционный параметр α_2 , влияющий на конструктивное решение системы.

$$\alpha_2 = -\frac{h_2 - h_1}{d_1} = -\Gamma.$$

7. Радиусы зеркальных поверхностей r_s .

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma}, \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2} = -\frac{2}{\Gamma^2}, \quad r_3 = -\frac{2h_2}{\alpha_4}.$$

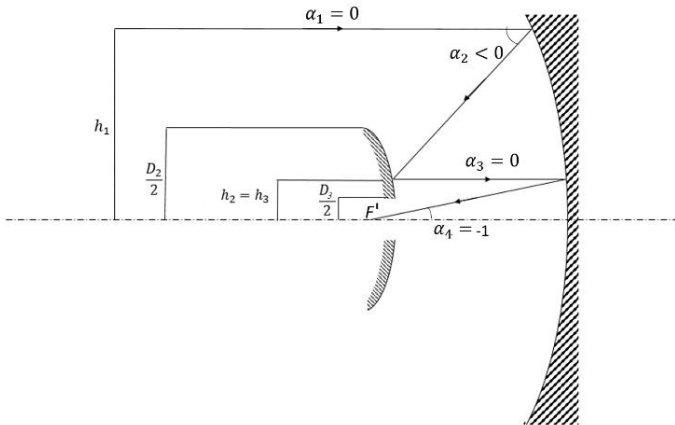


Рисунок 2 – Схема двухзеркального объектива с двойным отражением

Рассчитана система с высоким относительным отверстием $D/f' = 1 : 0,5$, но малым полем зрения (порядка $2\omega = 12'$). Наибольший эффект укорочения получается при условии $f_1/D = 0,25$.

Расчетные значения конструктивных параметров системы (радиусов кривизны, диаметров и расстояний между поверхностями) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Конструктивные параметры системы в мм ($\alpha_2 = -2$)

$R_1 = R_3$	R_2	d_1	D_1	D_2	h_2	D_3
-2000	-500	-750	2000	1000	500	250

Исследован светосильный объектив с промежуточным изображением (рисунок 3) и вынесенным третьим зеркалом. Использована концепция двухступенчатой оптики (ДО).

Установлены условия нормировки для первого нулевого луча: $h_1 = 1$; $h_3 = -1$; $h_2 > 0$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 < 0$; $\alpha_3 > 0$; $\alpha_4 = -\alpha_3$; $\alpha_5 = 1$; $f' = 1$.

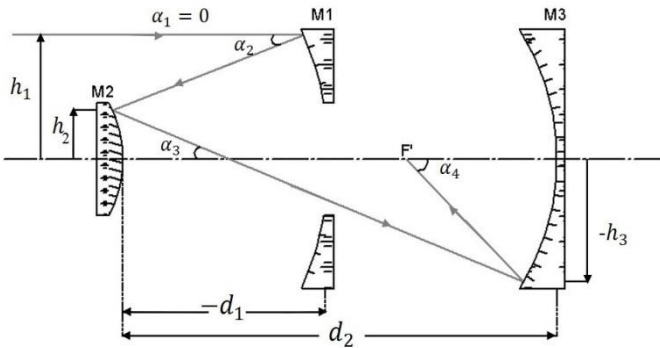


Рисунок 3 – Схема трехзеркального светосильного объектива с промежуточным изображением

Разработан алгоритм габаритного расчета.

1. Значение свободного коррекционного параметра α_2 :

$$\alpha_2 = -\frac{1-h_2}{h_1} \alpha_3.$$

2. Значение угла α_3 из условия Петцваля для концепции ДО.

$\varphi \cdot \beta_3 = \varphi_{1,2}$ для $\varphi = 1$; $\varphi_{1,2} = \varphi_1$ (оптическая сила I ступени), $\varphi_{II} = \varphi_4 = -(-\alpha_3 + 1)$ (оптическая сила II ступени).

$$\text{Условие Петцваля } \sum_1^2 \frac{\varphi_i}{n_i} = \varphi_{1,2} - \varphi_4 = -2\alpha_3 + 1 = 0.$$

Параметр $\alpha_3 = 1/2$.

Получены значения конструктивных параметров в относительных величинах (таблица 3) и деформации для каждой поверхности.

Таблица 3 – Значения конструктивных параметров системы (в относительных величинах)

α_2	α_3	α_4	d_1	d_2	r_1	r_2	r_3	h_2	$h_3 = -h_1$
-1,2808	0,5	1	-0,5615	2,5615	-1,5615	-0,7192	-1,333	0,2808	-1

Объектив имеет высокое относительное отверстие $D/f' = 1 : 1,5$ и поле зрения (порядка $2\omega = 6^\circ$) для $f' = 100$ мм.

Рассчитанные значения коэффициентов монохроматических aberrаций показывают, что исправлены aberrации 3-го порядка: кома (K_0) и сферическая aberrация (B_0); астигматизм (C_0) и кривизна изображения (D_0) приблизительно к нулю; дисторсия (E_0) не исправлена.

При использовании метода зеркальной развертки разработан анастигматический трехзеркальный объектив с «ломающим» плоским зеркалом, имеющий промежуточное изображение. В таком объективе четыре монохроматические aberrации 3-го порядка устранены за счет использования достаточного числа коррекционных параметров.

На рисунке 4 представлена компактная композиция. Данный объектив рассчитан для высокого относительного отверстия $D/f' = 1 : 1,5$, и поля зрения (порядка $2\omega = 6^\circ$ для $f' = 100$ мм).

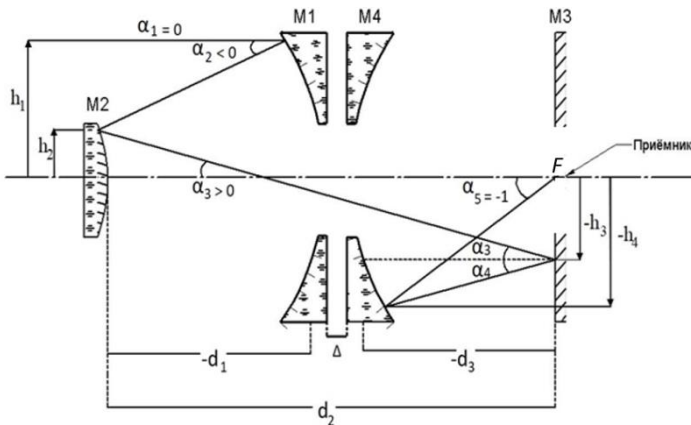


Рисунок 4 – Анастигматический трехзеркальный объектив

Установлены условия нормировки для первого нулевого луча: $h_1 = 1$; $h_2 > 0$; $h_3 < 0$; $h_4 = -1$; $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 < 0$; $\alpha_3 > 0$; $\alpha_3 = -\alpha_4$; $-d_3 = 1$; $\alpha_5 = -1$; $f' = -1$; $r_3 = \infty$.

Алгоритм расчета модифицирован за счет введения дополнительного параметра Δ , определяющего расположение промежуточного изображения; имеем выражения для свободных коррекционных параметров: α_2 , α_3 и α_4 :

$$\alpha_2 = -\frac{1-h_2}{h_2}\alpha_3, \quad \alpha_3 = -\alpha_4 = \frac{1}{2+\Delta};$$

а также габаритные формулы параметрического расчета радиусов зеркальных поверхностей r_s , осевых расстояний d_s и высот h_s :

$$d_1 = -\frac{h_2}{\alpha_3}, \quad d_2 = -d_1 + 1 + \Delta; \quad h_3 = -\frac{1+\Delta}{2+\Delta}, \quad h_2 = \frac{1}{2} \frac{-3 + \sqrt{17+4\Delta}}{2+\Delta} \quad (h_2 > 0).$$

Конструктивные параметры выбранных композиций в относительных величинах при заданных условиях нормировки приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Значения конструктивных параметров системы (в относительных величинах)

α_2	$\alpha_3 = -\alpha_4$	d_1	d_2	r_1	r_2	r_4	h_2	h_3	σ_1	σ_2	σ_3	Δ
-1,23	0,48	-0,59	1,69	-1,62	-0,74	1,35	0,28	-0,52	-0,92	-5,20	-0,17	0,1

Из полученных значений коэффициентов монохроматических aberrаций следует, что: сферическая aberrация (B_0), кома (K_0) и астигматизм (C_0) были исправлены; кривизна изображения (D_0) приблизительно равна нулю, а дисторсия (E_0) остается неисправленной.

Выполнено компьютерное моделирование в программной среде *Zemax*, получены характеристики качества изображения системы. Для данного объектива проведена оптимизация для практического случая $\Delta = 0,1$. Сохранение значений радиусов кривизны и осевых расстояний, путем изменения деформаций зеркал и введением коэффициентов высокого порядка в профиль поверхности; был разработан совершенный трехзеркальный объектив. При оптимизации в ПП *Zemax* использовался оператор -EFFL (*Effective Focal Length*), позволяющий контролировать величину эффективного фокусного расстояния системы и определять оценочную функцию. Уравнения профиля поверхности высокого порядка с учетом оптимизации для $\Delta = 0,1$ показывают, что величина деформации для первой и четвертой поверхностей соответствует форме вытянутого эллипсоида и для второй поверхности форме гиперболоида.

Качество изображения после оптимизации характеризуется числом Штреля, равным 0,986, т. е. полученное изображение близко к дифракционному пределу, т. е. разработан анастигматический трехзеркальный объектив с высоким качеством изображения.

Четвертая глава посвящена решению дополнительных задач технологической адаптации зеркальных систем. Разработан компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования гексагональных сегментов в составном зеркале. Проведено исследование и рассчитаны технологические параметры асферических зеркальных поверхностей.

Приведены уравнения для геометрического позиционирования составного зеркала из сегментов на асферической поверхности.

Разработан алгоритм и проведено имитационное моделирование крупногабаритных составных зеркал из гексагональных сегментов.

На рисунке 5 показана блок-схема, которая иллюстрирует компьютерный алгоритм определения положений сегментов на несферической поверхности. При этом в качестве несферической поверхности выбрана парабола с диаметром 9 м.

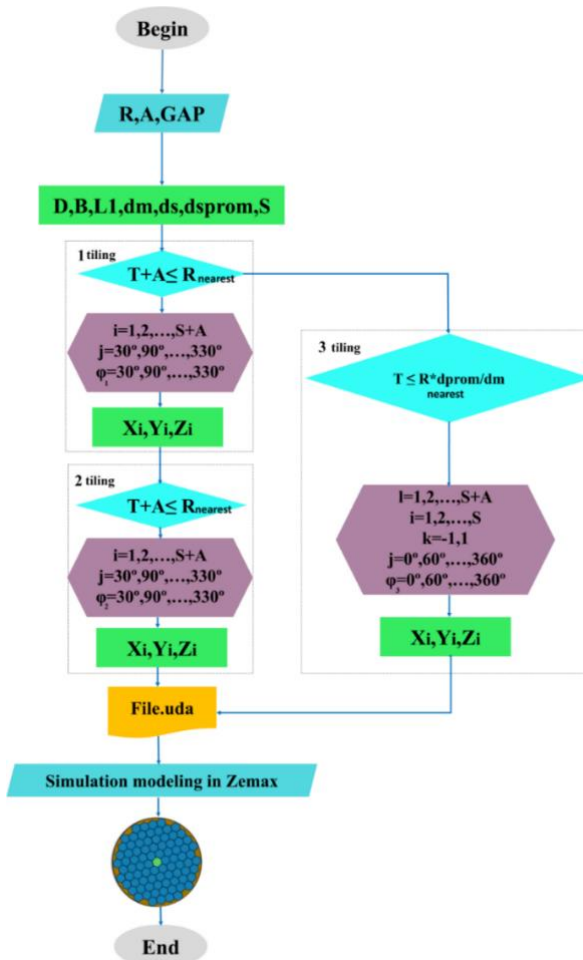


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма для геометрического позиционирования сегментированных зеркал

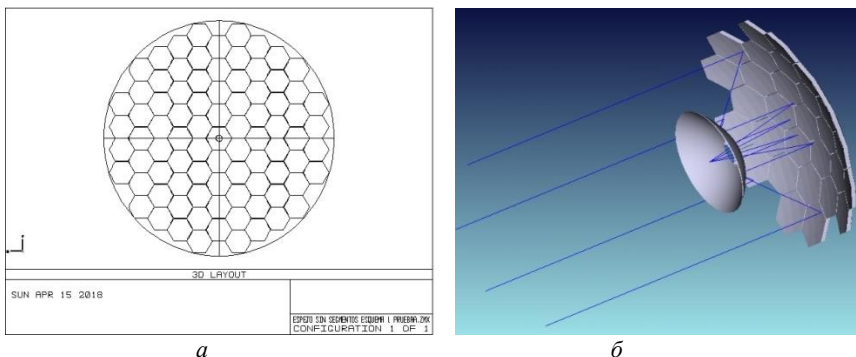
Значения параметров, используемых для имитационного моделирования составного зеркала, представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Конструктивные параметры асферического составного зеркала из сегментов

Форма	Гексагональная
Коническая постоянная	1
Радиус кривизны R	9000 мм
Количество сегментов	85 шт. (79 шт. – без первого кольца)
Межсегментный зазор GAP	10 мм
Длина сегмента A	500 мм
Апофема B	433 мм
Диаметр зеркала D	9000 мм

На рисунке 6 показано имитационное моделирование крупногабаритного двухзеркального объектива с тремя отражениями с главным составным зеркалом, имеющий параболическую поверхность в ПП *Zemax*.

Компьютерный алгоритм был разработан на языке программирования *Python* для геометрического позиционирования сегментов. С помощью алгоритма получен один из видов файлов с расширением “*.uda”, показывающий список с положениями каждого сегмента в системе координат OXYZ. При этом использовался результирующий файл в ПП *Zemax* для имитационного моделирования составного зеркала.



**Рисунок 6 – Имитационное моделирование крупногабаритного двухзеркального объектива с тремя отражениями в ПП *Zemax*:
а – главное зеркало; б – двухзеркальный объектив**

В таблице 6 приведены конструктивные параметры для крупногабаритного двухзеркального объектива с тремя отражениями с главным составным зеркалом.

Таблица 6 – Конструктивные параметры для двухзеркального объектива с главным составным зеркалом (мм)

$r_1 = r_3$	r_2	D_1	D_2	D_3	d_1	h_2
-3000	-750	1500	750	375	-1125	1

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Проведено исследование аберрационных свойств оптических систем предфокальных и зафокальных зеркальных объективов и определены схемные решения, позволяющие получать апланатическую и коррекцию полевых аберраций.

Разработаны новые композиции объективов из двух зеркал:

– двухзеркальный зафокальный объектив со вторым зеркалом, диаметр которого превышает диаметр входного зрачка, с улучшенными оптическими характеристиками по полю зрения до 4° ;

– предфокальный двухзеркальный объектив с тремя отражениями от двух параболических зеркал с улучшенной апертурой до $1 : 0,5$, но с малым угловым полем зрения.

Установлены базовые зеркальные модули из двух зеркал для практического использования. Зафокальная композиция перспективна для фокусного расстояния $f' = -100$ мм, относительного отверстия $D/f' = 1 : 1,3$; предфокальный модуль целесообразно использовать для зеркальных объективов с увеличенным полем зрения до $2\omega = 6^\circ$ за счет использования дополнительных коррекционных элементов для устранения астигматизма [1; 4–6; 8; 11; 15].

2. Предложена усовершенствованная методика по защите плоскости изображения от попадания постороннего света и вредных потоков при минимальном виньетировании и экранировании и методика расчета диаграмм виньетирования. Разработан алгоритм расчета целесообразного расположения светозащитной бленды для конструкторской адаптации двухзеркального зафокального объектива, разработаны теоретические положения и геометрическая схема для установки светозащитной бленды, расположенной в центральном отверстии второго зеркала, позволяющей обеспечивать виньетирование 56 % для углового поля 4° [2; 8; 9].

3. Разработаны математическая модель и компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования гексагональных сегментов с равными зазорами в составном зеркале, образующих единую параболическую поверхность, где каждый сегмент является локальной кривой от параболической поверхности. Компьютерный алгоритм реализован в программном пакете *Python* как самостоятельный модуль, интегрируемый в ПП *Zemax*, при учете различных значений диаметров зеркал и длины сегментов. По результатам моделирования показана степень корреляции в пределах 80–90 % [3; 9; 12].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработаны различные композиции схем двух и трехзеркальных объективов с апланатической, астигматической и план-астигматической коррекцией аберраций [1; 4–6; 8; 11; 13; 15]. Результаты разработки совершенной методики для защиты плоскости изображения от постороннего света (расчет бленд и защитных экранов) в двухзеркальных зафокальных объективах [2; 7; 8; 9] будут использоваться в фундаментальных и прикладных исследованиях новых композиций зеркальных фокусирующих систем.

Научные результаты диссертационной работы могут найти применение в науке и образовании, приборах для областей медицины, оборонной промышленности и других стратегических направлений в Венесуэле и Беларуси.

Разработка предложенных новых зеркальных объективов является приоритетным вопросом для Национального центра оптических технологий и Центра астрономических исследований в Венесуэле.

На кафедре «Лазерная техника и технология» БНТУ выполнено внедрение в учебный процесс по дисциплине «Техническая оптика» для студентов специальности 1-38 01 02 «Оптико-электронные и лазерные приборы и системы» следующих результатов диссертационной работы: описание композиции длиннофокусного объектива с анастигматической коррекцией аберраций из трех несферических зеркал [11; 15] и математический алгоритм расчета для геометрического позиционирования гексагональных сегментов с применением языка программирования *Python* в асферическом составном зеркале (акт внедрения от 19.02.2020 г.). Результаты исследования по разработке алгоритма и математической модели для геометрического позиционирования асферического составного зеркала [3; 9; 12; 14] внедрены в Национальном центре оптических технологий (CNTO), Национальной обсерватории и Центре астрономических исследований им. Франциско Х. Дуарте (CIDA) в Венесуэле (акт внедрения от 14.04.2020 г.).

Научные результаты исследований по диссертационной работе предлагается использовать в Республике Беларусь на приборостроительном факультете БНТУ, на физическом факультете БГУ.

Результаты исследования по моделированию и разработке зеркальных анастигматов с увеличенным полем зрения до $2\omega = 6^\circ$ при обеспечении достаточной светосилы рекомендуется реализовать на предприятиях оптического приборостроения РБ (БелОМО, ОАО «Пеленг», институт физики НАН Беларуси), в Венесуэле: Национальном Центре оптических технологий (CNTO) и Центре астрономических исследований им. Франциско Х. Дуарте (CIDA), Астрономической обсерватории.

Lustaby Alex

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1. Артюхина, Н. К. Двухзеркальный светосильный зафокальный объектив / Н. К. Артюхина, В. А. Марчик, Л. Ф. Самбрано // Вестник НТУУ «КПИ» серия «Приборостроение». – Киев, 2016. – № 56. – С. 21–25.
2. Самбрано, Л. Ф. Расчет светозащитной бленды двухзеркального зафокального объектива / Л. Ф. Самбрано, Н. К. Артюхина, Л. В. Пероса // Приборы и методы измерений. – 2017. – № 4(8). – С. 327–333.
3. Conquet, B. Algorithm and mathematical model for geometric positioning of segments on aspherical composite mirror / B. Conquet, L. F. Zambrano, N. K. Artyukhina, R. V. Fiodortsev, A. R. Silie // Devices and Methods of Measurements. – 2018. – № 3 (9). – С. 234–247.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

4. Артюхина, Н. К. Расчет зафокальных объективов из двух зеркал / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано // Приборостроение: состояние и перспективы: материалы пятнадцатой Международной научно-технической конференции: Киев 17–18 мая 2016 г. НТУУ «КПИ». – Киев, 2016. – С. 72–74.
5. Artioukhina, N. K. Two-mirror extra-focal system with intermediate image / N. K. Artioukhina, L. F. Zambrano: в 3 т. // Доклады Труды ОО им. Д. С. Рождественского. 7-й Международный оптический конгресс «Оптика XXI век», XII МК «Прикладная оптика», г. С-Петербург 15–18 ноября 2016 г. – Т. 1. – С. 31–34.
6. Артюхина, Н. К. Двухзеркальная система зафокального типа / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано, Н. С. Власовец // Приборостроение: материалы сборника трудов 9-й МНТК: Минск 23–25 ноября 2016 г. – БНТУ. – Минск, 2016. – С. 260–262.
7. Алешкевич, К.В. Зеркальные концентрические системы с различным числом отражений / К. В. Алешкевич, В. А. Стуканова, Л. Ф. Самбрано, Н. К. Артюхина // Материалы 16-й МНПК «Приборостроение 2023», БНТУ, Минск, 17–19.11.2023. Сборник трудов 16-й международной НТК «Приборостроение – 2023» – С. 306–307.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

8. Артюхина, Н. К. Зафокальные объективы с малым главным и большим вторичным зеркалами / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано, А. А. Шиманович // «Новые направления развития приборостроения»: матер. 9-й МСНТК, Минск, 20–22 апреля 2016. МО РБ. – Минск: БНТУ, 2016. – Т. 2 – С. 51.
9. Артюхина, Н. К. Расчет диаграммы виньетирования в двухзеркальных зафокальных системах / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано, Л. В. Пероса // Новые направления развития приборостроения: материалы 10-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов: Минск, 26–28 апреля 2017 г. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 54.

10. Артюхина, Н. К. Анализ основных перспективных проблем в зеркальных системах / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано, Л. В. Пероса // Приборостроение: состояние и перспективы: материалы шестнадцатой Международной научно-технической конференции: Киев 16–17 мая 2017 г. / НТУУ «КПИ». – Киев, 2017. – С. 31–32.

11. Артюхина, Н. К. Аберрационный расчет двухзеркального объектива с тремя отражениями / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано // Приборостроение: материалы Сборника трудов 10-й МНТК: Минск, 1–3 ноября 2017 г. – Минск: БНТУ, 2017. – С. 327–328.

12. Артюхина, Н. К. Некоторые аспекты технологической адаптации систем с составными зеркалами / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано, Л. В. Пероса // Новые направления развития приборостроения: материалы 11-й МСНТК: Минск, 18–22 апреля 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 54.

13. Артюхина, Н. К. Метод зеркальной развертки для габаритного моделирования объективов / Н. К. Артюхина, Д. А. Чернавчиц, Л. Ф. Самбрано, Т. Р. Ключко // Приборостроение: материалы Сборника трудов 11-й МНТК: Минск, 14–16 ноября 2018 г. – Минск: БНТУ, 2018. – С. 373–374.

14. Zambrano, L. F. Algoritmo y un innovador método para el posicionamiento geométrico de los segmentos hexagonales en un espejo compuesto esférico // L. F. Zambrano, B. Conquet, N. K. Artiyukhina, R. V. Fiodortsev, A. R. Silie // Abstract en XI Congreso Nacional de Física de la Sociedad Venezolana de la Física. Sesión Instrumentación: Caracas 21–23 de noviembre 2018. – Universidad metropolitana de Caracas, 2018. – С. 46.

15. Артюхина, Н. К. Зеркальная светосильная регистрирующая система / Н. К. Артюхина, Л. Ф. Самбрано: в 3 т. // Доклады Труды ОО им. Д. С. Рождественского. 8-й Международный оптический конгресс «Оптика XXI век», XIII МК «Прикладная оптика». – С-Петербург 18–21 декабря 2018 г. – СПб., 2018. – Т. 1. – С. 28.

16. Zambrano, L. F. Modelado y optimización de un sistema objetivo de dos espejos no-esféricos con corrección aplanática / L. F. Zambrano, N. K. Artiyukhina // Abstract en LXIX Convención anual de la AsoVAC (Asociación Venezolana para el Avance de la Ciencia). Sesión Física: Caracas 20–22 noviembre del 2019. – Universidad Católica Andrés Bello. – Caracas, 2019. – С. 28.

РЭЗІЮМЭ

Самбрано Рывас Лус Фабіёла Аляксандра

Разлік і праектаванне постфакальных і прадфакальных люстравак аб'ектыў з карэкцый апланаткы і карэкцый палявых аберацый

Ключавыя словы: люстраныя сістэмы, карэкцыя аберацый, разлік аптычных схем, абарона малюнка, экранаванне, віньетирование, тэхналогіі адаптацый, складовае люстэрка, гексагональныя сегменты

Мэта працы: пошук асноўных аспектаў, якія вызначаюць распрацоўку новых кампазіцыі люстраных аб'ектываў, якія ўключаюць даследаванне тэхналагічных адаптацый люстраных сістэм.

Метады даследавання: алгебраічны метады на аснове тэорыі параксіяльнай аптыкі і тэорыі аберацый трэцяга парадку, камп'ютэрнае мадэляванне аптычных сістэм з ужываннем сучасных праграм разліку аптыкі, метады для абароны плоскасці малюнка, метады для пабудовы дыяграмы віньетирования, кампутарны алгарытм для пазіцыянавання гексагональных сегментаў з ужываннем мовы праграмавання python.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны схемы двухзеркальных АС тыпу аб'ектыва, якія змяшчаюць асферычныя паверхні, якія забяспечваюць поўнае выпраўленне сферычнай аберацый і валодаюць нязначнай комай. Выкананы аналіз асноўных аспектаў, якія ўплываюць на якасць малюнка і ўскладняюць распрацоўку люстраных сістэм: ўстаноўка святлоахоўнай блэнды ад траплення старонняга святла і шкодных патокаў у плоскасці выявы ў выпадку двухзеркальнага зафокальнага аб'ектыва. Праведзены разлікі блэнды і дыяграмы віньетирования; распрацавана схема трохзеркальнага анастигматическага аб'ектыва, якая ўтварае прамежкавае малюнак, знойдзены розныя канструктыўныя варыянты; даследаваны тэхналагічныя адаптацыі люстраных сістэм. Прапанаваны матэматычная мадэль і кампутарны алгарытм для геаметрычнага пазіцыянавання сегментаў у складовым люстэрку.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна карыстання: Распрацаваныя ў рамках дысертацыйнай працы навукова-тэхнічныя рашэнні рэкамендуюцца выкарыстоўваць у фундаментальных і прыкладных даследаваннях новых кампазіцый люстраных сістэм тыпу аб'ектыва, а таксама ў іншых галінах, што якія выкарыстоўваюць тэхналогію адаптацыі іх аптычных элементаў. У галіне навукі і тэхнікі, буйнагабарытная оптыка для даследавання космасу.

РЕЗЮМЕ

Самбрано Ривас Лус Фабиола Александра

Расчет и проектирование зафокальных и предфокальных зеркальных объективов с апланатической коррекцией и коррекцией полевых аберраций

Ключевые слова: зеркальные системы, коррекция аберраций, расчет оптических схем, защита изображения, экранирование, виньетирование, технологии адаптаций, составное зеркало, гексагональные сегменты

Цель работы: поиск основных аспектов, определяющих разработку новых композиции зеркальных объективов, включающих исследование технологических адаптаций зеркальных систем.

Методы исследования: алгебраический метод на основе теории парааксиальной оптики и теории аберраций третьего порядка, компьютерное моделирование оптических систем с применением современных программ расчета оптики, методика для защиты плоскости изображения, методика для построения диаграммы виньетирования, компьютерный алгоритм для позиционирования гексагональных сегментов с применением языка программирования python.

Полученные результаты и их новизна: Разработаны схемы двухзеркальных ОС типа объектива, содержащие асферические поверхности, которые обеспечивают полное исправление сферической аберрации и обладают незначительной комой. Выполнен анализ основных аспектов, влияющих на качество изображения и усложняющих разработку зеркальных систем: установка светозащитной бленды от попадания постороннего света и вредных потоков в плоскости изображения в случае двухзеркального зафокального объектива. Проведены расчеты бленды и диаграммы виньетирования; разработана схема трехзеркального анастигматического объектива, образующая промежуточное изображение, найдены различные конструктивные варианты; исследованы технологические адаптации зеркальных систем. Предложены математическая модель и компьютерный алгоритм для геометрического позиционирования сегментов в составном зеркале.

Рекомендации по использованию и область применения: Разработанные в рамках диссертационной работы научно-технические решения рекомендуются использовать в фундаментальных и прикладных исследованиях новых композиций зеркальных объективов, а также в других областях, где используется технология адаптации их оптических элементов. В области науки и техники, крупногабаритная оптика для исследования космоса.

SUMMARY

Zambrano Rivas Luz Fabiola Alexandra

Calculation and design of post-focal and pre-focal mirror objectives with correction aplanatics and field aberration correction

Key words: mirror systems, aberration correction, and calculation of optical schemes, image protection, shielding, vignetting, adaptation technologies, composite mirror, and hexagonal segments

The aim of the work: search of the main aspects that determine the development of new compositions of mirror objectives include the study on technological adaptations of mirror systems.

Research methods: algebraic method based on the theory of paraxial optics and the theory of third-order aberrations, computer simulation of optical systems by use modern programs for optics calculation, methodology for protecting the image plane, methodology for constructing a vignetting diagram, computer algorithm for positioning hexagonal segments using a programming language python.

The results obtained and their novelty: Schemes of two-mirror for optical systems objective type have been developed, containing aspherical surfaces, which provide complete correction of spherical aberration and minor coma. Analysis of the main aspects affecting image quality and complicating their development of mirror systems; installation of a glare stop against extraneous light and harmful streams in the image plane in the case of a two-mirror extra-focal objective; calculation of a glare stop and vignetting diagram; a scheme of a three-mirror anastigmatic objectives has been developed, which forms an intermediate image, there are various design options; technological adaptations of mirror systems are studied. A mathematical model and a computer algorithm are proposed for the geometric positioning of segments in a composite mirror.

Recommendations for use and an application area: Developments within the framework of the thesis, scientific and technical solutions are recommended to be use in fundamental and applied research of new compositions of mirror systems such as objective, as well as in any area to use optical adaptation technologies on their optical elements. Field of science and technique, large-sized optics for space exploration.

Научное издание

САМБРАНО РИВАС
Лус Фабиола Александра

**РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАФОКАЛЬНЫХ И ПРЕДФОКАЛЬНЫХ
ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ С АПЛАНТИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИЕЙ
И КОРРЕКЦИЕЙ ПОЛЕВЫХ АБЕРРАЦИЙ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные
приборы и комплексы

В авторской редакции

Подписано в печать 20.05.2024. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 1,22. Уч.-изд. л. 1,24. Тираж 60. Заказ 355.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.