

На правах рукописи



Мишин Святослав Валерьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ  
ПОГРЕШНОСТЕЙ ЦЕНТРИРОВАНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ОПТИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре прикладной оптики

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

**Бездидько Сергей Николаевич**

Официальные оппоненты:

**Андреев Лев Николаевич**

доктор технических наук, профессор,

федеральное государственное автономное

образовательное учреждение высшего образования

«Санкт-Петербургский национальный исследовательский

университет информационных технологий, механики и

оптики», профессор кафедры прикладной и

компьютерной оптики

**Полесский Алексей Викторович**

кандидат технических наук,

АО «Научно-производственное объединение «Орион»,

главный метролог

Ведущая организация: АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

Защита диссертации состоится «\_\_» декабря 2019 г. в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском государственном университете геодезии и картографии по адресу: 105064, Москва, К-64, Гороховский пер., 4, МИИГАиК, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии и на сайте [http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionny\\_sovet/dissertatsii](http://www.miigaik.ru/nauka/dissertacionny_sovet/dissertatsii)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Вшивкова Ольга Владимировна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования**

Оптические системы для инфракрасной области спектра применяются в наши дни в различных областях науки и техники. Как правило, в них используются оптические материалы, непрозрачные в видимой области спектра. Данное обстоятельство сильно усложняет осуществление контроля погрешностей центрирования оптических элементов, что приводит к ухудшению показателей качества изготавливаемых оптических систем. Поэтому исследование и разработка методов и средств контроля погрешностей центрирования оптических систем для инфракрасной области спектра являются актуальными задачами современного оптико-электронного приборостроения.

### **Степень разработанности темы**

В наши дни известны различные методы и множество средств контроля погрешностей центрирования. Они подробно описаны в литературе и широко применяются на практике. При этом практически все из них предназначены только для оптических систем видимой области спектра. Анализ известных публикаций и патентных решений показывает, что методы и средства контроля погрешностей центрирования инфракрасных оптических систем, которые непрозрачны в видимой области спектра, встречаются пока крайне редко. Принципы их разработки, а также методики их работы требуют дополнительных исследований.

### **Цель и задачи работы**

Целью настоящей работы является разработка, исследование и повышение эффективности методов и средств, предназначенных для контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем, работающих в инфракрасном диапазоне оптического излучения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выполнить аналитический обзор существующих методов и средств контроля погрешностей центрирования, анализ их характеристик, преимуществ и недостатков.

2. Разработать схему многоспектрального прибора для бесконтактного контроля погрешностей центрирования оптических систем для видимой и инфракрасной областей спектра и выполнить расчет ее основных характеристик.

3. Исследовать методы цифровой обработки и анализа автоколлимационных изображений.

4. Разработать и исследовать методы определения пространственного взаиморасположения оптических компонентов, расположенных внутри объективов, непрозрачных в видимой области спектра.

5. Выполнить экспериментальное макетирование работы модулей и узлов разрабатываемого прибора.

### **Научная новизна работы**

1. Доказана возможность использования автоколлимационного метода для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасного диапазона и видимого диапазона одновременно. Данная возможность впервые технически реализована в устройстве «Лазерный автоколлимационный микроскоп», защищенном патентом Российской Федерации.

2. Впервые для контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем инфракрасного диапазона был использован симплексный метод оптимизации функций многих переменных, метод Нелдера-Мида, что позволило повысить точность контроля погрешностей центрирования.

### **Теоретическая значимость работы**

1. Доказанная возможность использования автоколлимационного метода для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасного диапазона расширяет область его применения в оптическом приборостроении.

2. Сформулированные принципы проектирования многоспектральных автоколлимационных приборов создают теоретическую базу для разработки нового класса универсальных контрольно-юстировочных устройств.

### **Практическая значимость работы**

Разработанные теоретические и аппаратурные решения реализованы в лазерном автоколлимационном микроскопе, который может быть использован в

оптико-электронном приборостроении с целью бесконтактного контроля качества сборки готовых объективов уже собранных оптических систем инфракрасного диапазона. Точность данного устройства сопоставима с мировыми аналогами, а функциональные возможности превосходят их.

### **Методология и методы исследования**

В ходе решения поставленных задач были применены:

- положения теории цифровой обработки оптических сигналов;
- положения теории решения задач оптимизации;
- математический аппарат численных методов, линейной алгебры и аналитической геометрии;
- моделирование оптических систем с использованием программного комплекса Zemax;
- моделирование методов цифровой обработки автоколлимационных изображений с использованием программного комплекса MATLAB;
- экспериментальное макетирование работы измерительных каналов разрабатываемого прибора на действующих макетах.

### **Новые научные положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Разработаны основанные на явлении автоколлимации методы, позволяющие бесконтактно определять погрешности центрирования и взаимные положения в пространстве оптических поверхностей и компонентов, расположенных внутри собранных объективов оптических систем инфракрасного диапазона.

2. Предложены принципы проектирования многоспектральных цифровых автоколлимационных приборов, позволяющие создавать многоспектральные комплексы для автоматизированного контроля автоколлимационным методом погрешностей центрирования оптических систем видимого и инфракрасного диапазонов, превосходящие по функциональным возможностям зарубежные аналоги.

3. Разработана универсальная оптическая схема, реализующая автоколлимационный метод контроля погрешностей центрирования для оптических систем видимого и инфракрасного диапазонов.

4. Разработано основанное на методах оптимизации функции многих переменных программное обеспечение, позволяющее вычислять погрешности центрирования объективов оптических систем инфракрасного диапазона с точностью, не уступающей зарубежным аналогам.

5. На основе разработанной оптической схемы создан прибор, обеспечивающий контроль качества сборки и юстировки уже собранных инфракрасных оптических систем, в том числе систем, в которых используются непрозрачные в видимом диапазоне оптические материалы.

#### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность представленных в настоящей работе результатов исследований подтверждается:

- практическими экспериментами по моделированию работы измерительных каналов разработанного прибора на их макетных образцах, а также предварительными испытаниями;

- экспериментами компьютерного моделирования по обработке автоколлимационных изображений;

- сопоставлением полученных данных с данными имеющихся научных публикаций;

- результатами работ по внедрению разработок автора на ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и семинарах:

- I Всероссийской научно-технической конференции «Инновационные проекты в оптико-электронном приборостроении», г. Москва, 2016;

- XII Международной конференции «Прикладная Оптика - 2016», г. Санкт-Петербург, 2016;

– 74 Научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, г. Москва, 2019;

– Международной научно-технической конференции «Пространственные данные – основа стратегического планирования, управления и развития» МИИГАиК, г. Москва, 2019.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 4 статьи, две из которых – в журнале, рекомендованном ВАК РФ. Получен патент на изобретение.

### **Личный вклад автора**

Все исследования, представленные в работе, выполнены лично автором или в соавторстве. Автором исследованы существующие методы и средства контроля погрешностей центрирования, разработаны варианты оптической схемы представленного прибора для контроля погрешностей центрирования, разработаны теоретические методы для определения взаимного положения в пространстве оптических элементов внутри оптических систем, непрозрачных в видимой области спектра, исследованы возможности применения методов многомерной оптимизации для контроля погрешностей центрирования.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 153 страницы. Работа содержит 20 таблиц, 74 рисунка.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** описана актуальность выбранной темы исследования, определена цель проводимого исследования и сформулирован перечень поставленных задач, изложена научная новизна, теоретическая и практическая ценность работы, приведены выносимые на защиту положения, представлены сведения о достоверности и апробации результатов работы.

**В первой главе** описаны роль и место оптических систем инфракрасной области спектра в современном мире и проблемы контроля погрешностей центрирования в указанных системах, описаны известные методы контроля

погрешностей центрирования и средства их реализации с указанием технических характеристик, достоинств и недостатков.

Основываясь на анализе существующей литературы, была предложена классификация методов контроля погрешностей центрирования, представленная на рисунке 1.

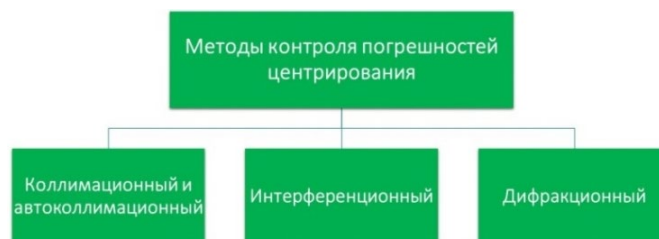


Рисунок 1 – Классификация методов контроля погрешностей центрирования.

Обзор данных методов контроля погрешностей центрирования показывает, что наиболее точным является интерференционный метод. Однако коллимационный и автоколлимационный методы получили наибольшее распространение в практике опико-электронного приборостроения.

В то же время, контроль погрешностей центрирования оптических систем для инфракрасной области спектра существенно затруднен по сравнению с оптическими системами для видимой области спектра. Это объясняется широким использованием материалов, непрозрачных в видимой области спектра, поскольку в этом случае для контроля доступны только внешние поверхности контролируемой оптической системы. Поверхности и элементы, расположенные внутри, остаются недоступными для контроля. Поэтому задача исследования и совершенствования методов и средств контроля погрешностей центрирования оптических систем для инфракрасной области спектра остается актуальной.

**Во второй главе** рассмотрены современные приборы для контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем для инфракрасной области спектра, основанные на автоколлимационном методе.

Сформулированы основные принципы проектирования прибора для контроля погрешностей центрирования автоколлимационным методом:

1. Регистрация автоколлимационного изображения осуществляется с помощью многоэлементных матричных фотоприемных устройств (МФПУ).



2. Обеспечение точности контроля погрешностей центрирования реализуется не только за счет характеристик оптической схемы и входящих в нее узлов, но и за счет применения методов цифровой обработки автоколлимационных изображений.

3. Управление процессом измерения осуществляется с помощью управляющего программного обеспечения.

4. Прибор должен быть многоспектральным.

5. Габаритные размеры и масса прибора должны быть минимально возможными.

На основании приведенных выше принципов разработана оптическая схема многоспектрального автоколлимационного прибора для автоматизированного контроля погрешностей центрирования линз и компонентов оптических систем видимой и инфракрасной области спектра – Лазерного Автоколлимационного Микроскопа (далее – ЛАМ).

Оптическая схема ЛАМ представлена на рисунке 2.

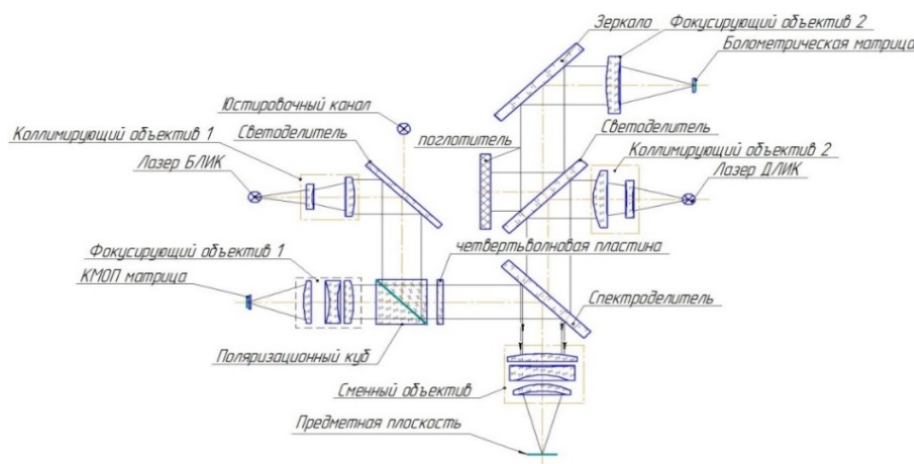


Рисунок 2 – Оптическая схема ЛАМ

ЛАМ включает в себя два измерительных канала и один юстировочный канал.

Первый измерительный канал (ИК-канал) предназначен для контроля погрешностей центрирования оптических систем, работающих в средневолновом (от 3 мкм до 5 мкм) и длинноволновом (от 8 мкм до 14 мкм) поддиапазонах инфракрасного диапазона.

Лазерный модуль ИК-канала (Лазер ДЛИК) работает в длинноволновом поддиапазоне инфракрасного диапазона  $\Delta\lambda = (8 - 14)$  мкм. Приемником излучения является микроболометрический модуль, чувствительный в диапазоне  $\Delta\lambda = (8 - 14)$  мкм, с форматом 384x288 пикселей и размером пикселя  $a = 25$  мкм.

Второй измерительный канал (В-канал) предназначен для контроля погрешностей центрирования оптических систем, работающих в видимом диапазоне (от 0,38 мкм до 0,74 мкм), а также ближнем (от 0,74 мкм до 1,1 мкм) и коротковолновом (от 1,1 мкм до 2,5 мкм) поддиапазонах инфракрасного излучения.

Лазерный модуль В-канала (Лазер БЛИК) работает в ближнем поддиапазоне инфракрасного излучения  $\Delta\lambda = (0,74 - 1,1)$  мкм, где прозрачны все оптические бесцветные стекла. Приемник излучения – цифровая телевизионная камера с КМОП-матрицей МТ9V032М. Размеры пикселя 6x6 мкм, формат матрицы 752x480 элементов.

Согласно диаграмме прозрачности оптических материалов, применяемых в современном оптико-электронном приборостроении (см. рис. 3), подобная комбинация рабочих длин волн измерительных каналов является наиболее универсальной.

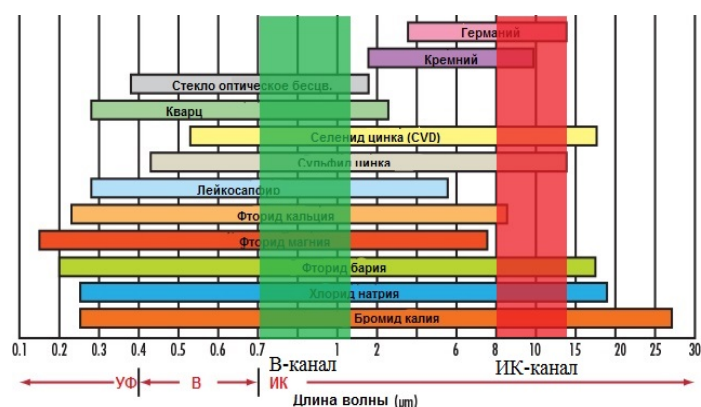


Рисунок 3. Диаграмма прозрачности оптических материалов.

В ИК-канале излучение от лазерного модуля ДЛИК, пройдя коллимирующий объектив 2, попадает на светоделитель. Часть излучения поглощается поглотителем излучения. Оставшаяся часть излучения отражается от светоделителя, проходит спектроделитель и с помощью сменного объектива

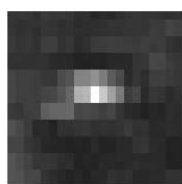
фокусируется в автоколлимационной точке контролируемой поверхности. Отраженное от контролируемой поверхности излучение проходит в обратном ходе сменный объектив, спектроделитель, светоделитель и, отразившись от зеркала, попадает в фокусирующий объектив 2, формирующий автоколлимационное изображение.

В В-канале излучение от лазерного модуля БЛИК проходит коллимирующий объектив 1, отражается от светоделителя, отражается от внутренней грани куба, проходит четвертьволновую пластину, отражается от спектроделителя и с помощью сменного объектива фокусируется в автоколлимационной точке контролируемой поверхности. Отраженное от контролируемой поверхности излучение в обратном ходе проходит через сменный объектив, отражается от спектроделителя, проходит через четвертьволновую пластину, поляризационный куб и попадает в фокусирующий объектив 1, который формирует автоколлимационное изображение.

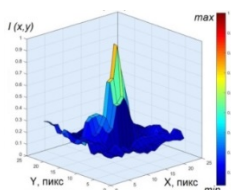
Юстировочный канал визуализирует общую оптическую ось устройства. Источник излучения – лазерный диодный модуль со встроенным коллиматором. Рабочая длина волны модуля  $\lambda = 0,635$  мкм.

**В третьей главе** исследованы методы определения координат энергетического центра автоколлимационного изображения. Практическая реализация исследуемых методов была проведена на примере тестовых автоколлимационных изображений размером 21x21 пиксель. Для их получения были собраны экспериментальные макеты обоих измерительных каналов ЛАМ в соответствии с оптической схемой прибора (см. рис. 2).

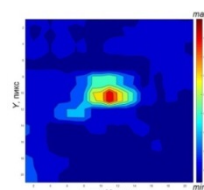
Тестовые изображения автоколлимационных точек в ИК-канале и В-канале представлены на рисунке 4 и рисунке 5 соответственно.



а) Снимок в градациях серого

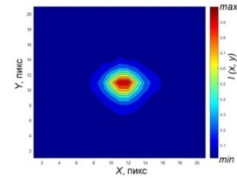
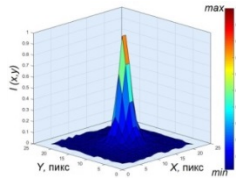
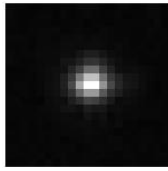


б) Распределение яркости в снимке (трехмерный график)



в) Распределение яркости (проекция на плоскость XOY)

Рисунок 4. Тестовое изображение автоколлимационной точки в ИК-канале



а) Снимок в градациях серого      б) Распределение яркости в снимке (трехмерный график)      в) Распределение яркости (проекция на плоскость  $XOY$ )  
Рисунок 5. Тестовое изображение автоколлимационной точки в В-канале

Для проверки результатов использовалось дополнительное контрольное изображение размером  $21 \times 21$  пиксель, в котором точное положение энергетического центра было задано точкой с координатами  $(7,25; 8,50)$ .

Определение энергетического центра изображения автоколлимационной точки в ЛАМ основано на минимизации оценочной функции:

$$\Delta = f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{M=21} \sum_{j=1}^{N=21} (\delta(x; y))^2}, \quad (1)$$

где  $\delta(x; y) = |I(x; y) - I_0(x; y)|$  – разность между распределением интенсивности в анализируемом автоколлимационном изображении  $I(x; y)$  и идеальным распределением интенсивности  $I_0(x; y)$ , вычисляемая для каждого пикселя.

Идеальное распределение интенсивности было задано двумерной функцией Гаусса:

$$I_0(x, y) \approx g(x, y) = \exp\left(-4 \ln(2) \left( \left( \frac{x - x_0}{w_x} \right)^2 + \left( \frac{y - y_0}{w_y} \right)^2 \right)\right), \quad (2)$$

где  $(x; y)$  – координаты текущего пикселя МФПУ;

$(x_0; y_0)$  – координаты положения максимума функции Гаусса;

$w_x$  и  $w_y$  – значения полуширины центрального максимума функции Гаусса по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

Считая регистрирующие объективы измерительных каналов ЛАМ дифракционно-ограниченными, можно полагать:

$$w_x = w_y = w = (1.22 \cdot \lambda \cdot f) / (D \cdot a), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина волны источника излучения;

$D$  – диаметр входного зрачка регистрирующего объектива;

$f'$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива;

$a$  – размер чувствительного элемента (пикселя) матричного фотоприемного устройства (МФПУ).

Для вычисления значений координат были использованы 2 метода: метод наискорейшего спуска и один из симплексных методов – метод Нелдера-Мида. Выбор начальных точек может быть произвольным, хотя рекомендуется выбирать точки, близкие к предполагаемому энергетическому центру.

Для контрольного изображения начальной точкой была выбрана точка с координатами (6;7). Для тестовых изображений ИК-канала и В-канала начальная точка имела координаты (10;10). Результаты вычислений координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для контрольного и тестовых изображений представлены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1. Результаты вычисления координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для контрольного изображения

Изображение	Вычисленные значения	Истинные значения	Число итераций
Контрольное	(7,2500; 8,5000)	(7,2500; 8,5000)	6

Таблица 2. Результаты вычисления координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для тестовых изображений ИК-канала и В-канала

Изображение	Вычисленные значения	Число итераций
ИК-канал	(11,2919; 10,4829)	19
В-канал	(11,4994; 10,9210)	23

Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для контрольного и тестовых изображений ИК-канала и В-канала представлены в таблицах 3 и 4 соответственно.

Таблица 3. Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для контрольного изображения

Изображение	Вычисленные значения	Истинные значения	Число итераций
Контрольное	(7,2354; 8,5264)	(7,2500; 8,5000)	11

Таблица 4. Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для тестовых изображений ИК-канала и В-канала

Изображение	Вычисленные значения	Число итераций
ИК-канал	(11,2463; 10,4603)	23
В-канал	(11,5175; 10,8668)	14

Для тестовых изображений ИК-канала и В-канала была вычислена ошибка рассогласования (в долях размера пикселя) между двумя исследованными методами в определении положения энергетического центра  $\delta$ :

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (4)$$

где  $(x_1; y_1)$  – координаты энергетического центра автоколлимационного изображения, вычисленные методом наискорейшего спуска;

$(x_2; y_2)$  – координаты энергетического центра автоколлимационного изображения, вычисленные методом Нелдера-Мида.

Для перевода в линейные единицы величина  $\delta$  умножалась на размер пикселя  $a$  МФПУ соответствующего измерительного канала.

Результаты вычислений по формуле (4) представлены в таблице 5.

Таблица 5. Ошибка рассогласования

Тестовое изображение	Ошибка рассогласования (в долях размера пикселя)	Ошибка рассогласования (в линейных единицах)
ИК-канал	0,051	1,27 мкм
В-канал	0,057	0,34 мкм

Таким образом было установлено, что:

1. Оба метода получили близкие результаты за малое число итераций (менее 25) при заданном выборе начальных точек.
2. Ошибка рассогласования между методами оказалась менее 0,06 размера пикселя, что соответствует уровню современных автоколлимационных приборов для контроля погрешностей центрирования.
3. Корректность работы указанных методов подтверждается верным нахождением заранее определённых координат энергетического центра контрольного тестового изображения.

**В четвертой главе** рассмотрены вопросы создания комплекса автоматизированного контроля погрешностей центрирования на основе ЛАМ и принципы работы его управляющего программного обеспечения (ПО). Представлены математические методы для определения погрешностей центрирования и пространственного положения оптических элементов внутри собранных объективов, непрозрачных в видимой области спектра:

1. Метод определения положений автоколлимационных точек;
2. Метод определения величины погрешности центрирования контролируемой поверхности;
3. Метод определения пространственного положения компонента.

Для оптических систем инфракрасной области спектра метод определения положений автоколлимационных точек основан на известных формулах углов и высот нулевого луча и полностью аналогичен методу расчета, используемому для оптических систем видимой области спектра.

Метод определения величины погрешности центрирования контролируемой поверхности заключается в следующем.

1. С помощью МФПУ через равные углы поворота устройства вращения контролируемой оптической системы регистрируются  $m$  положений изображения автоколлимационной точки (см. рис. 6) с координатами  $(x_i; y_i)$ .

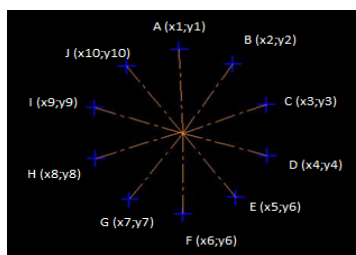


Рисунок 6 – Биение изображения автоколлимационной точки.

2. Парно соединить каждую  $i$ -ю точку с противоположащей ей точкой, которая будет иметь индекс  $(0,5m + i)$  и получить набор векторов  $\overline{AF}, \overline{BG}, \overline{CH}, \overline{DI}, \overline{EJ}$ .

3. Вычислить координаты  $(x_{M_i}; y_{M_i})$  точек  $M_i$ , представляющих собой середины полученных выше векторов:

$$M_i \left( \frac{x_{\frac{m}{2}+i} - x_i}{2}; \frac{y_{\frac{m}{2}+i} - y_i}{2} \right) \quad (5)$$

4. Вычислить координаты точки  $\bar{M}$ , которую приближенно можно считать серединой всех полученных векторов:

$$x_{\bar{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{m/2} x_{M_i}}{m/2}, \quad (6) \quad y_{\bar{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{m/2} y_{M_i}}{m/2} \quad (7)$$

5. Вычислить среднее значение радиуса вращения, а следовательно, и диаметра биения изображения автоколлимационной точки:

$$d' = 2 \cdot \bar{r}' = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{((x_i - x_M) \cdot a)^2 - ((y_i - y_M) \cdot a)^2}}{m}, \quad (8)$$

где  $d'$  – диаметр биения изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов МФПУ, мкм;

$r'$  – радиус вращения изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов МФПУ, мкм;

$a$  – размер пикселя МФПУ, мкм.

Данная формула справедлива при условии, что чувствительные элементы МФПУ имеют квадратную форму.

6. Вычислить погрешность центрирования  $c$  контролируемой поверхности по формуле:

$$c = \frac{d'}{4 \cdot \beta_m} \cdot \gamma = \frac{d'}{4} \cdot \frac{f'_{\text{ф.об}}}{f'_{\text{об.ФПУ}}} \cdot \gamma, \quad (9)$$

где  $d'$  – диаметр биения изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов МФПУ, мкм;

$f'_{\text{ф.об}}$  – фокусное расстояние фокусирующего объектива, мм;

$f'_{\text{об.ФПУ}}$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива, мм;

$\gamma$  – угловое увеличение, с которым будет изображаться децентрировка исследуемой поверхности после прохождения луча через предшествующие поверхности исследуемой оптической системы.

Метод определения пространственного положения компонента исследуемой оптической системы рассмотрен на примере одиночной линзы и заключается в следующем.

1. Пусть  $C_1'(x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1'})$  – фактическое положение центра кривизны первой поверхности линзы,  $C_2'(x_{C2'}; y_{C2'}; z_{C2'})$  – фактическое положение центра кривизны второй поверхности линзы.

2. Если  $(x_{C1'} = y_{C1'} = 0)$  и  $(x_{C2'} = y_{C2'} = 0)$ , то  $(C_1' \in OZ)$  и  $(C_2' \in OZ)$  – линза не имеет погрешностей центрирования.



3. Если для одного из центров кривизны хотя бы одна из координат  $x$  или  $y$  отлична от нуля, а другой центр кривизны остается на опорной оси  $OZ$ , то данный случай соответствует наклону одной из поверхностей линзы относительно своей вершины: ( $C_1' \notin OZ$ ) и ( $C_2' \in OZ$ ) (см. рис. 7)

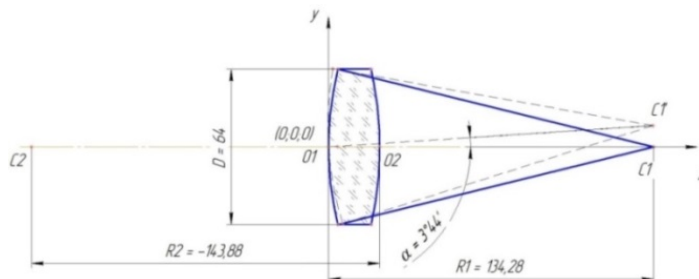


Рисунок 7 – Наклон поверхности 1 линзы относительно своей вершины  $O1$ .

Найдем угол наклона  $\alpha$  поверхности 1 относительно своей вершины.

$O1C1$  – исходная ось поверхности 1.  $O1C1'$  – ось поверхности 1 после наклона вокруг  $O1$  на угол  $\alpha$ . Тогда уравнение прямой  $O1C1$  имеет вид:

$$\frac{x - x_{O1}}{x_{C1} - x_{O1}} = \frac{y - y_{O1}}{y_{C1} - y_{O1}} = \frac{z - z_{O1}}{z_{C1} - z_{O1}}, \quad (10)$$

где координаты исходных положений точек  $O1(x_{O1}; y_{O1}; z_{O1})$  и  $C1(x_{C1}; y_{C1}; z_{C1})$  известны из конструктивных параметров. Направляющий вектор  $\overline{O1C1} = (0; 0; z_{C1})$ .

Аналогично для прямой  $O1C1'$ :

$$\frac{x}{x_{C1'}} = \frac{y}{y_{C1'}} = \frac{z}{z_{C1'}} \quad (11)$$

Для малых углов  $\alpha$  можно полагать:

$$z_{C1'} \approx z_{C1} \quad (12)$$

Тогда уравнение (11) прямой  $O1C1'$  примет вид:

$$\frac{x}{x_{C1'}} = \frac{y}{y_{C1'}} = \frac{z}{z_{C1}} \quad (13)$$

Направляющий вектор  $\overline{O1C1'} = (x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1})$ .

Угол  $\alpha$  будет углом между направляющими векторами  $\overline{O1C1}$  и  $\overline{O1C1'}$ :

$$\cos \alpha = \frac{\overline{O1C1} \cdot \overline{O1C1'}}{|\overline{O1C1}| \cdot |\overline{O1C1'}|} = \frac{|z_{C1}|}{\sqrt{z_{C1}^2} + \sqrt{x_{C1'}^2 + y_{C1'}^2 + z_{C1}^2}} \quad (14)$$

4. Если ( $x_{C1'} = x_{C2'} \neq 0$ ) и ( $y_{C1'} = y_{C2'} \neq 0$ ), то  $C1'C2' \parallel OZ$  – оптическая ось линзы  $C1'C2'$  параллельна опорной оси  $OZ$ , т.е. имеет место только линейное

смещение  $c$  (параллельный перенос) исследуемой линзы с оптической оси. Величину смещения легко определить по формуле:

$$c = \sqrt{x_{C_1'}^2 + y_{C_1'}^2} = \sqrt{x_{C_2'}^2 + y_{C_2'}^2} \quad (15)$$

Если  $(x_{C_1'} \neq x_{C_2'} \neq 0)$  и  $(y_{C_1'} \neq y_{C_2'} \neq 0)$ , то результирующая погрешность центрирования состоит из смещения и разворота в пространстве вокруг некоторой точки, удаленной от первой поверхности компонента. Положение линзы представлено на рисунке 8 в проекциях на плоскости  $YOZ$  и  $YOX$ .

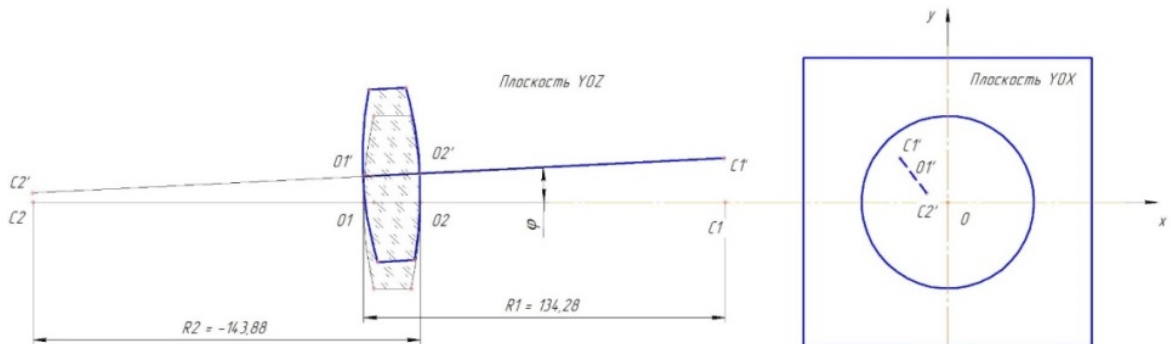


Рисунок 8 – Линза смещена и развернута в пространстве.

Для определения погрешности центрирования в данном случае исследуется взаимное расположение прямых  $C_1'C_2'$  и  $OZ$  в пространстве.

Проведем радиус вектор из исходной точки к точке  $C_1'$ . Его координаты:

$$\overline{OC_1'} = (x_{C_1'} - 0; y_{C_1'} - 0; z_{C_1'} - 0) = (x_{C_1'}; y_{C_1'}; z_{C_1'}) \quad (16)$$

С учетом условия (12) получим:

$$\overline{OC_1'} = (x_{C_1'}; y_{C_1'}; z_{C_1'}) \quad (17)$$

Направляющий вектор прямой  $C_1'C_2'$ :

$$\overline{C_1'C_2'} = (x_{C_2'} - x_{C_1'}; y_{C_2'} - y_{C_1'}; z_{C_2'} - z_{C_1'}) \quad (18)$$

Направляющий вектор опорной оси  $OZ$ :

$$\overline{OZ} = (0; 0; 1) \quad (19)$$

Проверяем условие компланарности направляющих векторов  $\overline{OC_1'}$ ,  $\overline{C_1'C_2'}$  и  $\overline{OZ}$ , которое с учетом равенств (17) – (19) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} x_{C_1'} & y_{C_1'} & z_{C_1'} \\ x_{C_2'} - x_{C_1'} & y_{C_2'} - y_{C_1'} & z_{C_2'} - z_{C_1'} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (20)$$

Если (20) верно, то прямые  $CI'C2'$  и  $OZ$  лежат в одной плоскости и пересекаются. Угол  $\varphi$  между прямыми  $CI'C2'$  и  $OZ$ :

$$\cos \varphi = \frac{\overline{OZ} \cdot \overline{CI'C2'}}{|\overline{OZ}| \cdot |\overline{CI'C2'}|} = \frac{|z_{C2} - z_{C1}|}{\sqrt{(x_{C2'} - x_{C1'})^2 + (y_{C2'} - y_{C1'})^2 + (z_{C2} - z_{C1})^2 + \sqrt{0+0+1}}} \quad (21)$$

Если (20) не верно, то прямые  $CI'C2'$  и  $OZ$  будут скрещивающимися с углом скрещивания  $\psi$ , определяемый также по формуле (21).

Найдем смещение линзы относительно оси  $OZ$ . За это смещение предлагается считать расстояние от точки  $OI'$ , нового положения вершины первой поверхности исследуемой линзы, до оси  $OZ$ .

Найдем координаты точки  $OI'$ . Для этого, полагая, что  $z_{C1'} \approx z_{C1}$  и  $z_{C2'} \approx z_{C2}$ , достаточно решить систему уравнений:

$$\begin{cases} |R_1| = \sqrt{(x_{O1'} - x_{C1'})^2 + (y_{O1'} - y_{C1'})^2 + (z_{O1'} - z_{C1'})^2} \\ |R_2| - d = \sqrt{(x_{C2'} - x_{O1'})^2 + (y_{C2'} - y_{O1'})^2 + (z_{C2'} - z_{O1'})^2}, \quad (22) \\ \frac{x_{O1'} - x_{C1'}}{x_{C2'} - x_{C1'}} = \frac{y_{O1'} - y_{C1'}}{y_{C2'} - y_{C1'}} \end{cases}$$

где  $R_1$  – радиус кривизны первой поверхности линзы;

$R_2$  – радиус кривизны второй поверхности линзы;

$d$  – толщина линзы по центру.

Поскольку  $OI' \in CI'C2'$ , то это справедливо и для проекции в плоскости  $YOX$ , поэтому смещение линзы  $c$  можно определить по формуле:

$$c = \sqrt{x_{O1'}^2 + y_{O1'}^2} \quad (23)$$

При известных конструктивных параметрах исследуемой оптической системы метод применим для склеенных линз, а также групп линз в оптических системах, например, для подвижных групп или вбрасываемых вставок в панкратических объективах.

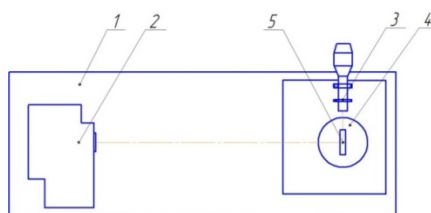
В конце главы кратко описан собранный на ПАО «Красногорский завод им. С. А. Зверева» макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа. Общий вид макетного образца представлен на рисунке 9.



1 – блок питания и коммутации каналов; 2 – ЛАМ; 3 – корпус станка ИЖ-250.

Рисунок 9 – Макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа.

Для данного образца была проведена предварительная оценка точностных характеристик. В эксперименте определялись значения абсолютной погрешности измерения угла отклонения контрольного плоского зеркала относительно оптической оси ЛАМ. Схема лабораторной установки приведена на рисунке 10.



1 – виброизолированный стол; 2 – ЛАМ; 3 – гониометр; 4 – поворотный столик;  
5 – контрольное плоское зеркало с углом клина 1 угл. сек.

Рисунок 10 – Схема лабораторной установки для измерения угла отклонения.

Абсолютная погрешность  $\Delta\alpha_{abc}$  измерения угла отклонения вычислялась по формуле:

$$\Delta\alpha_{abc} = |\alpha_{\Gamma} - \alpha_{M}|, \quad (24)$$

где  $\alpha_{\Gamma}$  – показания угла отклонения зеркала по гониометру;

$\alpha_{M}$  – показания ЛАМ.

Погрешности измерения угла отклонения приведены в таблице 6. Дополнительно в таблице 6 приведены соответствующие им погрешности измерения в линейной мере, рассчитанные по формуле:

$$\Delta l_{abc} = f'_{об\PhiПУ} \cdot tg(\Delta\alpha_{abc}) \cdot \frac{1}{\beta_M}, \quad (25)$$

где  $\Delta l_{abc}$  – погрешность измерения в линейной мере;

$\Delta\alpha_{abc}$  – абсолютная погрешность измерения угла отклонения;

$f'_{об \Phi ПУ}$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива в измерительном канале ЛАМ;

$\beta_m = f'_{об.ФПУ} / f'_{ф.об}$  – линейное увеличение измерительного канала ЛАМ, которое в эксперименте было равно 1.

Таблица 6 – Результаты измерения угла отклонения контрольного зеркала

Направление	Угол отклонения зеркала, заданный по гониометру							
	2'	-2'	5'	-5'	10'	-10'	30'	-30'
	$\Delta\alpha_{абс}$ В-канала							
Горизонтальное	2"	3"	1"	3"	2"	4"	2"	3"
Вертикальное	5"	2"	6"	2"	2"	4"	2"	6"
	$\Delta l_{абс}$ В-канала, мкм							
Горизонтальное	1,45	2,2	0,72	2,2	1,45	2,9	1,45	2,2
Вертикальное	3,63	1,45	4,36	1,45	1,45	2,9	1,45	4,36
Направление	$\Delta\alpha_{абс}$ ИК-канала							
Горизонтальное	2"	2"	4"	4"	6"	8"	6"	8"
Вертикальное	2"	2"	5"	4"	4"	5"	6"	6"
	$\Delta l_{абс}$ ИК-канала, мкм							
Горизонтальное	1,45	1,45	2,9	2,9	4,36	5,8	4,36	5,8
Вертикальное	1,45	1,45	3,63	2,9	2,9	3,63	4,36	4,36

### Заключение

**Итогом** настоящей работы являются полученные автором теоретические и практические результаты, внедрение которых повысит эффективность контроля погрешностей центрирования и, как следствие, качественные показатели объективов оптических систем, работающих в инфракрасном диапазоне оптического излучения:

1. Произведен обзор существующих методов и средств контроля погрешностей центрирования оптических систем, предложен вариант их классификации, выполнен анализ их характеристик, преимуществ и недостатков.

2. Обоснован выбор автоколлимационного метода в качестве метода контроля погрешностей центрирования и пространственного взаиморасположения компонентов внутри объективов оптических систем инфракрасного диапазона, выполненных из непрозрачных в видимой области спектра оптических материалов.

3. Разработана оптическая принципиальная схема прибора для контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем инфракрасного диапазона автоколлимационным методом – Лазерного Автоколлимационного Микроскопа. Новизна разработанной оптической схемы, а также вариантов её реализации подтверждена Патентом РФ №2630196 ЛАЗЕРНЫЙ АВТОКОЛЛИМАЦИОННЫЙ МИКРОСКОП.

4. Выполнено исследование существующих методов цифровой обработки и анализа автоколлимационных изображений, предназначенных для повышения точности контроля погрешностей центрирования оптических систем. Предложены способы их практической реализации для использования с Лазерным Автоколлимационным Микроскопом.

5. Показана возможность применения симплексного метода поиска минимума функции многих переменных для цифровой обработки и анализа автоколлимационных изображений с целью повышения точности контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасного диапазона.

6. Определена структурная модель построения управляющего программного обеспечения для возможности создания на базе Лазерного Автоколлимационного Микроскопа оптико-электронного комплекса для автоматизированного контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем, работающих в видимой области, а также в ближнем, среднем и дальнем поддиапазонах инфракрасного излучения.

7. Предложены теоретические методы для вычисления значений погрешностей центрирования погрешностей центрирования линз и групп линз в составе сложных оптических систем, а также определения пространственного взаиморасположения элементов внутри объективов оптических систем инфракрасного диапазона.

8. Разработаны и реализованы макеты измерительных каналов Лазерного Автоколлимационного Микроскопа, получены тестовые автоколлимационные изображения.

9. Спроектирован и реализован экспериментальный макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа, проведен эксперимент по оценке его точностных характеристик.

10. Получены автоколлимационные изображения от обеих поверхностей тестовой линзы, выполненной из непрозрачного в видимой области оптического материала – кристаллического кремния.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования**

Результаты данного исследования могут быть использованы на отечественных предприятиях оптико-электронного приборостроения для решения следующих производственно-технологических задач:

1. Центрирование автоколлимационным методом поверхностей оптических элементов инфракрасных оптических систем, выполненных из непрозрачных в видимой области спектра оптических материалов.

2. Сборка и юстировка инфракрасных оптических систем гражданского и специального назначения, в которых используются непрозрачные оптические материалы.

3. Неразрушающий контроль качества сборки и юстировки инфракрасных оптических систем гражданского и специального назначения, в которых используются непрозрачные оптические материалы.

К перспективам использования результатов работы можно отнести:

1. Внедрение на отечественных предприятиях оптико-электронного приборостроения технологии автоколлимационной сборки и юстировки для оптических систем инфракрасного диапазона, выполненных из непрозрачных в видимой области спектра оптических материалов. Данная технология давно успешно зарекомендовала себя при сборке оптических систем видимого диапазона, но для инфракрасных оптических систем она не могла быть использована.

2. Разработку отечественных многоспектральных цифровых комплексов для автоматизированного контроля погрешностей центрирования автоколлимационным методом оптических систем видимого и инфракрасного диапазонов, превосходящих по функциональным возможностям зарубежные аналоги.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Н.Н. Кулакова, С.В. Мишин. Расчет объектива малогабаритного тепловизора // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2014, № 3. С. 125-133.
2. С.В. Мишин, Н.Н. Кулакова, А.В. Тарасишин. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, 2014, № 2. С. 117-124.

### **Прочие публикации:**

1. Патент 2630196С2, РФ, МПК G02В 21/00, G01В 9/04. Лазерный автоколлимационный микроскоп. Тарасишин А.В., Скляр С.Н., Кушнарёв К.Г., Мишин С.В. – Оpubл. 05.09.2017
2. С.В. Мишин. Расчет допусков на изготовление объектива малогабаритного тепловизора // Электронный журнал Молодежный научно-технический Вестник №2, февраль 2013. URL: <http://ainsnt.ru/doc/544685.html>
3. С.Н. Бездидько, С.В. Мишин, А.В. Тарасишин. Применение метода наискорейшего спуска для поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки // Сборник трудов XII Международной конференции «Прикладная оптика-2016», Том 2, С. 180-184, 2016.