

федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ  
(МИИГАиК)**

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

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
Бездидько Сергей Николаевич

МОСКВА 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1. Оптические системы для инфракрасной области спектра и методы контроля их погрешностей центрирования.....	12
1.1 Оптические системы для инфракрасной области спектра в современном мире.....	12
1.2 Погрешности центрирования оптических систем.....	13
1.3 Современные методы контроля погрешностей центрирования в оптических системах и средства их реализации.....	16
1.3.1 Коллимационный и автоколлимационный методы контроля погрешностей центрирования.....	17
1.3.1.1 Коллимационный метод и средства его реализации.....	17
1.3.1.2 Автоколлимационный метод и средства его реализации.....	20
1.3.2 Интерференционный метод контроля погрешностей центрирования и средства его реализации.....	26
1.3.3 Дифракционный метод контроля погрешностей центрирования и средства его реализации.....	35
1.3.3.1 Схемы, основанные на анализе дифракционного изображения тест-объекта.....	35
1.3.3.2 Схемы и эксперименты, основанные на анализе топологии волнового фронта.....	39
1.3.4 Анализ характеристик схем и устройств контроля погрешностей центрирования.....	44
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1.....	46

ГЛАВА 2. Разработка оптической схемы прибора для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра.....	47
2.1 Краткий обзор современных приборов для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра.....	47
2.1.1 Приборы серии OptiCentric IR.....	48
2.1.2 Приборы серии OTS.....	51
2.1.3 Приборы серии LAS-IR.....	53
2.1.4 Прибор Point Source Microscope (PSM).....	54
2.1.5 Концепция современных приборов для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра.....	56
2.2 Лазерный Автоколлимационный Микроскоп (ЛАМ): устройство и принцип работы.....	58
2.3 Габаритный расчет оптической схемы ЛАМ.....	61
2.3.1 Автоколлимационный метод контроля погрешностей центрирования с помощью ЛАМ.....	62
2.3.2 Выбор источников и приемников излучения.....	64
2.3.3 Определение фокусных расстояний сменных фокусирующих объективов.....	66
2.3.4 Определение фокусных расстояний регистрирующих объективов.....	67
2.3.5 Оценка линейного поля зрения ЛАМ.....	69
2.3.6 Оценка пороговой чувствительности определения погрешности центрирования.....	71
2.3.7 Общие выводы по характеристикам оптической схемы ЛАМ.....	73
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2.....	75

ГЛАВА 3. Определение положения энергетического центра автоколлимационного изображения.....	76
3.1 Предварительная обработка автоколлимационных изображений.....	78
3.2 Методы определения координат энергетического центра изображения.....	80
3.2.1 Методы без аппроксимации формы анализируемого пятна.....	81
3.2.2 Методы с аппроксимацией формы анализируемого пятна.....	84
3.2.2.1 Геометрическая аппроксимация.....	85
3.2.2.2 Аппроксимация с помощью функции Гаусса.....	85
3.2.2.3 Аппроксимация функцией ошибок.....	87
3.2.2.4 Аппроксимация функцией рассеяния точки (ФРТ) идеальной оптической системы.....	88
3.3 Способы вычисления значений координат энергетического центра.....	89
3.4 Анализ тестовых автоколлимационных изображений в ЛАМ.....	91
3.4.1 Получение тестовых изображений автоколлимационных точек.....	91
3.4.2 Предварительная обработка тестовых изображений .....	96
3.5 Определение положений энергетических центров автоколлимационных изображений в ЛАМ.....	98
3.5.1 Условия проведения эксперимента.....	98
3.5.2 Реализация определения положения энергетического центра автоколлимационного изображения.....	99
3.5.3 Вычисление значений координат энергетического центра.....	104
3.5.3.1 Применение метода наискорейшего спуска.....	104
3.5.3.2 Применение метода Нелдера-Мида.....	107
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3.....	114

ГЛАВА 4. Разработка комплекса автоматизированного	
контроля погрешностей центрирования на основе ЛАМ.....	115
4.1 Функциональная архитектура управляющего ПО ЛАМ.....	116
4.1.1 Графический интерфейс пользователя (GUI).....	117
4.1.2 Исполнительный модуль.....	118
4.1.3 Вычислительный модуль.....	119
4.2 Методы определения погрешностей центрирования и пространственного	
положения элементов исследуемой оптической	
системы.....	121
4.2.1 Координатное соглашение.....	121
4.2.2 Метод определения положений автоколлимационных точек	
исследуемой оптической системы.....	122
4.2.3 Метод определения величины погрешности центрирования	
контролируемой поверхности.....	125
4.2.4 Метод определения пространственного положения	
компонента исследуемой оптической системы.....	128
4.3 Макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа.....	134
4.4 Предварительная оценка точностных характеристик	
макетного образца ЛАМ.....	136
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4.....	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	142

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования**

В современном мире инфракрасные оптические системы получили широкое распространение. Они с успехом используются в различных областях науки и техники, таких как медицина, космические исследования, экология, энергетика, картография, спектроскопия, безопасность, военное дело.

На различных этапах разработки и изготовления данных оптических систем возникает ряд специфических проблем, которые не свойственны оптическим системам, предназначенным для видимой области спектра. В частности, в инфракрасных оптических системах широко применяются материалы, непрозрачные в видимой области спектра. Данное обстоятельство значительно усложняет осуществление контроля погрешностей центрирования оптических элементов, наличие которых приводит к ухудшению показателей качества изготавливаемых оптических систем.

На ПАО «Красногорский механический завод им. С.А. Зверева» выпускаются оптико-электронные приборы, работающие в ближнем, среднем и дальнем поддиапазонах инфракрасного диапазона. К объективам данных приборов предъявляются высокие требования по качеству сборки и, как следствие, контролю погрешностей центрирования. Требуются универсальные средства, позволяющие осуществлять контроль погрешностей центрирования для оптических систем как для видимого диапазона, так и для всех поддиапазонов инфракрасного диапазона: ближнего, среднего и дальнего.

Поэтому исследование и разработка методов и средств контроля погрешностей центрирования оптических систем для инфракрасного диапазона 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**

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, опубликованными в специальной научной литературе;
- 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, среди них – две публикации в журнале, рекомендованном ВАК РФ, и один 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.

# ГЛАВА 1. Оптические системы для инфракрасной области спектра и методы контроля их погрешностей центрирования

## 1.1 Оптические системы для инфракрасной области спектра в современном мире

Оптические системы, предназначенные для работы в инфракрасном (ИК) диапазоне, представляют собой один из наиболее обширных классов оптических систем. Инфракрасный диапазон оптического излучения с длинами волн от 0,74 до 1000 мкм часто разделяют на отдельные поддиапазоны. В работе [1] приведено одно из таких возможных разбиений с учетом «окон прозрачности» атмосферы Земли и наиболее распространённых диапазонов работы приёмников излучения.

Таблица 1 – Поддиапазоны инфракрасного диапазона оптического излучения

Наименование	Длины волн, мкм
Ближний ИК (Near-infrared, NIR)	от 0,74 до 1,1
Коротковолновый ИК (Short-wavelength infrared, SWIR)	от 1,1 до 2,5
Средневолновый ИК (Mid-wavelength infrared, MWIR)	от 3,0 до 5,0
Длинноволновый ИК (Long-wavelength infrared, LWIR)	от 8,0 до 14,0
Дальний ИК (Far-infrared, FIR)	от 15,0 до 1000

В наши дни инфракрасные оптические системы находят широкое применение в различных областях науки и техники: в медицине, в космических исследованиях, экологии, энергетике, картографии, спектроскопии и в военном деле [2 – 11].

В то же время, повышение чувствительности и уменьшение размеров чувствительных элементов современных многоэлементных фотоприемных устройств, а также требования минимизации массогабаритных и совершенствования тактико-технических характеристик приводят к усложнению конструкции оптических систем для инфракрасной области спектра [12 – 25].

Современные оптические системы ИК техники, как правило, представляют собой сочетание множества различных оптических элементов. Они включают в себя линзы со сферическими и асферическими поверхностями, дифракционные оптические элементы (ДОЭ), зеркала, призмы, поляризационные элементы, плоскопараллельные пластины и др. [26 – 30].

Усложнение конструкции оптических систем приводит к ужесточению допусков на качество изготовления оптических и механических деталей, а также сборки и юстировки [31, 32]. Настоящая работа посвящена вопросам контроля погрешностей центрирования.

## 1.2 Погрешности центрирования оптических систем

По определению центрированной оптической системой является оптическая система, в которой центры кривизны сферических поверхностей и центры симметрии асферических поверхностей расположены на одной прямой, называемой оптической осью системы. Однако при изготовлении оптических систем неизбежно возникают погрешности центрирования. Они могут возникать непосредственно при формообразовании самой оптической детали, при склеивании оптических деталей, при установке оптических деталей в оправы, при сборке ряда оптических компонентов в единую оптическую систему. Согласно [33] можно выделить несколько видов погрешностей центрирования одиночного оптического элемента:

1. Линейное смещение центра кривизны произвольной сферической поверхности на расстояние  $c_i$  – децентрировка. Если выполняется условие  $\frac{c_i}{R_i} \ll 1$ , где  $R_i$  – радиус кривизны рассматриваемой сферической поверхности, то данное смещение эквивалентно наклону данной поверхности относительно её вершины на угол  $\theta_i = -\frac{c_i}{R_i}$ .

2. Наклон плоской поверхности на угол  $\theta_i$  вокруг точки пересечения данной поверхности с оптической осью.

3. Погрешность центрирования асферической поверхности, представляющая собой сочетание двух составляющих – смещения оси симметрии асферической поверхности параллельно оптической оси системы  $c_i$  и наклона оси симметрии вокруг вершины поверхности на угол  $\theta_i$ .

4. Линейное смещение произвольного компонента оптической системы, состоящего из нескольких поверхностей, в направлении, перпендикулярном к оптической оси, на расстояние  $c_k$ .

5. Разворот произвольного компонента оптической системы вокруг некоторой точки  $K$ , расположенной на расстоянии  $l_k$  от первой поверхности данного компонента на угол  $\theta_k$  (см. рис. 1).

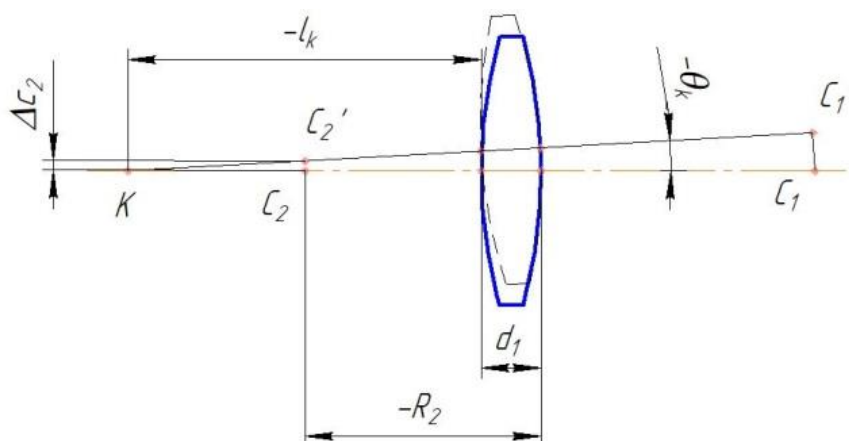


Рисунок 1 – Разворот оптического компонента.

Все перечисленные виды погрешностей центрирования распространены на практике. При этом в каждом конкретном случае может иметь место как только один из данных видов, так и их комбинация. В частности, погрешность центрирования по п.1) представляет собой не что иное как децентрировку одиночной линзы, представленную на рисунке 2.

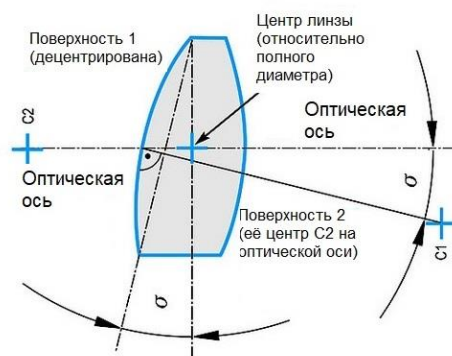


Рисунок 2 – Пример децентрировки одиночной линзы.

На чертежах оптической детали погрешность центрирования могут задавать позиционным допуском, разностью толщин по диаметру линзы или плоской поверхности [34]. Погрешность центрирования поверхностей линзы может привести при последующей сборке к её смещению и развороту относительно базовой оси оправы или корпуса объектива. Поэтому точный контроль погрешностей центрирования важен как на этапе изготовления оптических элементов, так и на этапах их сборки в оправы и в общие корпусные детали.

В то же время, при склейке линз имеет место погрешность центрирования склеенной линзы, обусловленная погрешностями центрирования склеиваемых компонентов, клиновидностью клеящего слоя, смещениями и наклонами приклеиваемой линзы относительно базовой.

При изготовлении оправ также возникают различные погрешности, которые могут привести к изменению положения оптических компонентов относительно базовой оси оправ. Как правило, это погрешности расположения «гнезда под компонент» относительно базовой оси оправы: несоосность, радиальные и торцевые биения, погрешности формы и шероховатость поверхностей. Таким образом, при установке компонентов в оправы и их креплении приклеиванием, завальцовкой, резьбовыми кольцами или другими способами, возникают погрешности центрирования из-за соответствующих ошибок изготовления поверхностей линз и оправ, а также радиальных смещений и наклонов одиночных линз и компонентов в посадочных зазорах (см. рис. 3). Подробное описание возможных погрешностей центрирования линзы при установке в оправу по насыпной конструкции можно найти в работе [35].

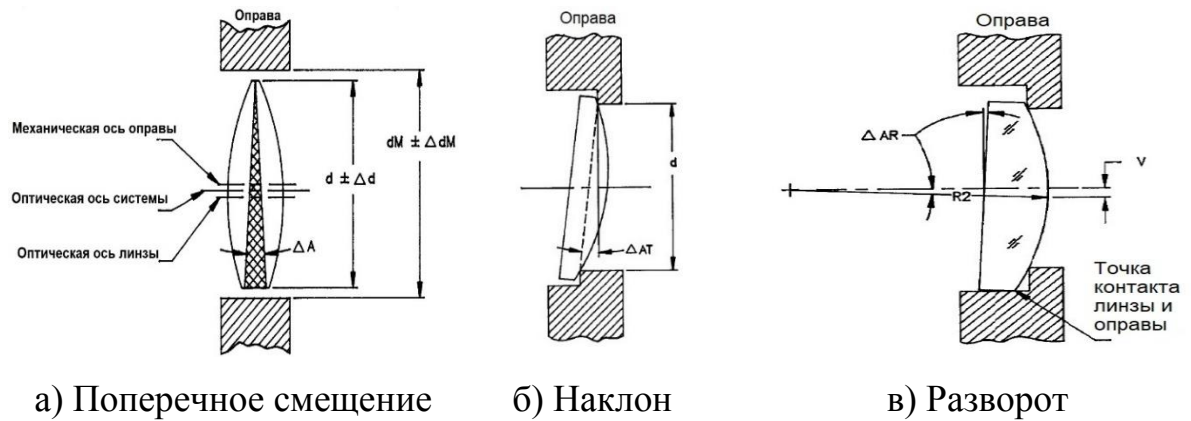


Рисунок 3 – Примеры погрешностей центрирования линз в оправках.

Главными следствиями наличия погрешностей центрирования в оптических системах являются смещение и наклон изображения, а также появление дополнительных aberrаций – aberrаций децентрировки, ухудшающих качество изображения [36 – 42].

### 1.3 Современные методы контроля погрешностей центрирования в оптических системах и средства их реализации

Развитие методов и средств определения погрешностей центрирования в оптических системах было вызвано ростом требований к качеству изготавливаемых оптических систем. На основе анализа существующей литературы по изготовлению, исследованию и контролю оптических систем, можно предложить классификацию методов контроля погрешностей центрирования, представленную на рисунке 4.



Рисунок 4 – Классификация методов контроля погрешностей центрирования.



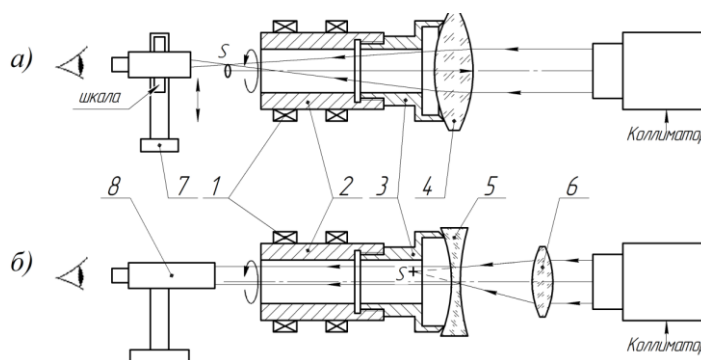
### 1.3.1 Коллимационный и автоколлимационный методы контроля погрешностей центрирования

#### 1.3.1.1 Коллимационный метод и средства его реализации

При коллимационном методе или методе контроля в проходящем свете контролируется смещение главной точки относительно оси вращения, определяемой базовыми поверхностями. Диапазон диаметров контролируемых данным методом линз составляет от 3 до 150 мм. Наименьшая измеряемая погрешность центрирования (пороговая чувствительность) в большинстве случаев составляет от 5 до 10 мкм [43]. Данный метод наиболее распространен в крупносерийном и массовом производстве. Широким распространением коллимационного метода контроля погрешностей центрирования обусловлено большое разнообразие схем его практической реализации.

#### 1) Схема с использованием коллиматора и измерительного микроскопа

Принципиальная схема контроля погрешностей центрирования коллимационным методом приведена на рисунке 5.



а) контроль положительных линз; б) контроль отрицательных линз

- 1 – узлы подшипников; 2 – вращающийся шпиндель; 3 – патрон;  
 4 – положительная контролируемая линза; 5 – отрицательная контролируемая линза; 6 – вспомогательная линза для контроля отрицательных линз;  
 7 – микроскоп с измерительной сеткой; 8 – зрительная труба.

Рисунок 5 – Коллимационный метод контроля погрешностей центрирования.

Параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора, образует изображение перекрестия в фокальной плоскости контролируемой линзы 4  $Q'_F$ . Линза наклеена на патрон 3, закрепленный во вращающемся шпинделе 2 центрировочного станка. Если линза децентрирована, то при вращении линзы изображение сетки коллиматора будет описывать окружность диаметром  $d$ . Биение изображения сетки коллиматора наблюдают в микроскоп с измерительной сеткой 7, с помощью которой численно оценивают величину биения. Для контроля погрешностей центрирования отрицательных линз между коллиматором и контролируемой линзой 5 устанавливают вспомогательную линзу 6. В этом случае биения изображения сетки коллиматора наблюдают в зрительную трубу 8. Значение погрешности центрирования  $C_0$  можно легко вычислить по формуле (1):

$$C_0 = \frac{d}{2} = \frac{mt}{2 \cdot \beta_m}, \quad (1)$$

где  $m$  – число делений сетки микроскопа;

$t$  – цена деления сетки микроскопа;

$\beta_m$  – линейное увеличение объектива микроскопа.

Данная схема часто применяется на операции центрирования при изготовлении одиночных линз. Пороговая чувствительность при контроле погрешности центрирования составляет от 5 до 10 мкм. В угловой мере – от 30" до 1'.

2) *Схема с использованием коллиматора и измерительного микроскопа с увеличенным рабочим отрезком.*

Существует модификация схемы, представленной на рисунке 5, в которой объектив измерительного микроскопа имеет подвижный фокусирующий компонент. Конструкция такого объектива представлена на рисунке 6.

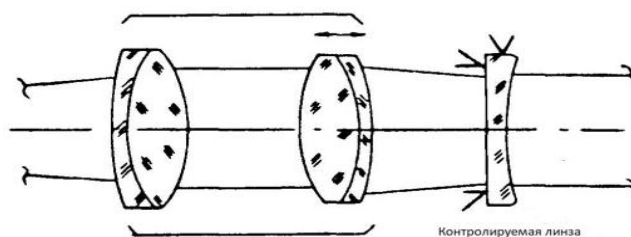


Рисунок 6 – Объектив с подвижным фокусирующим компонентом.

Применение подвижного фокусирующего компонента позволяет увеличить рабочий отрезок объектива измерительного микроскопа, что бывает необходимо при контроле линз с пологими радиусами кривизны, а также при контроле отрицательных линз.

### 3) Схема с использованием зрительной трубы

В данной схеме, представленной на рисунке 7, тест-объект, имеющий форму перекрестия, проецируется в фокальную плоскость контролируемой линзы. После прохождения лучей через контролируемую линзу изображение перекрестия становится локализованным в бесконечности, поэтому для наблюдения за ним используют зрительную трубу. Пороговая чувствительность данной схемы в угловой мере составляет от 30" до 1'.

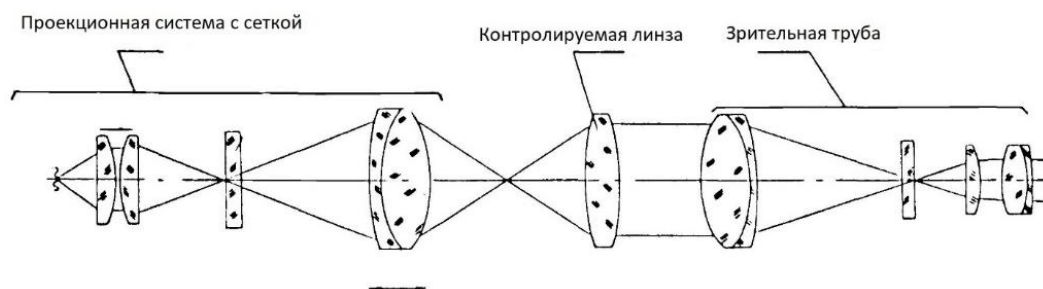
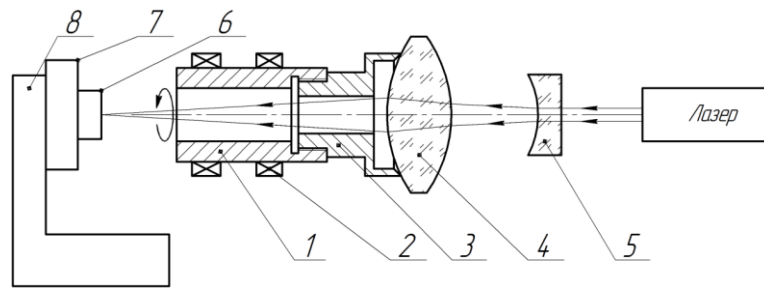


Рисунок 7 – Схема с использованием зрительной трубы.

Объектив проекционной системы имеет подвижку вдоль оптической оси, благодаря чему возможен контроль погрешностей центрирования как положительных, так и отрицательных линз, обладающих малой оптической силой.

### 4) Фотоэлектрическая схема с использованием лазера

Одной из разновидностей схем контроля погрешностей центрирования коллимационным методом является фотоэлектрическая схема с использованием лазера. В этом случае вместо коллиматора используют лазер с системой фокусировки лазерного излучения и координатно-чувствительный приемник излучения – четырехплощадочный фотодиод. Принципиальная схема контроля погрешностей центрирования с помощью лазера приведена на рисунке 8.



- 1 – вращающийся шпиндель; 2 – узел подшипников; 3 – патрон;  
 4 – контролируемая линза; 5 – система фокусировки лазерного излучения;  
 6 – четырехплощадочный фотодиод; 7 – двухкоординатный линейный транслятор;  
 8 – кронштейн.

Рисунок 8 – Контроль погрешностей центрирования с помощью лазера.

Достижимая пороговая чувствительность схемы контроля с использованием лазера составляет от 3 до 10 мкм.

### 1.3.1.2 Автоколлимационный метод и средства его реализации

Автоколлимационным методом непосредственно определяют смещения центров кривизны сферических поверхностей оптических деталей относительно оси вращения, определяемой базовыми поверхностями. Измерения проводятся в отраженном свете, за счет чего увеличивается точность контроля и уменьшаются габаритные размеры основанных на данном методе приборов. Автоколлимационный метод позволяет осуществлять контроль погрешностей центрирования линз с радиусами рабочих поверхностей вплоть до бесконечно больших, однако при стремлении радиуса кривизны к  $\infty$  точность контроля снижается (у приборов увеличивается цена деления на измерительной шкале).

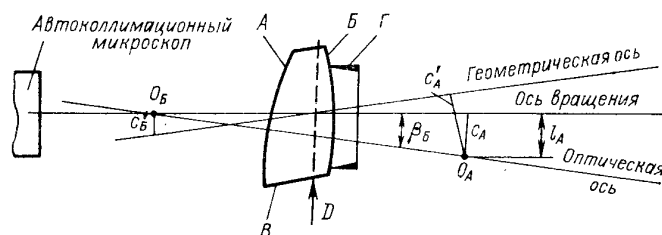


Рисунок 9 – Измерения с помощью автоколлимационного микроскопа.

Автоколлимационный микроскоп фокусируют на автоколлимационную точку контролируемой поверхности, например, поверхности  $A$  (см. рис. 9). Автоколлимационной точкой для сферической поверхности является ее центр кривизны либо его изображение, построенное частью оптической системы, расположенной между данной поверхностью и автоколлимационным микроскопом. Положение автоколлимационной точки, в данном случае центра кривизны  $O_A$  поверхности  $A$ , рассчитывается предварительно. Линза наклеена на патрон  $\Gamma$ . При вращении линзы в базовом патроне  $\Gamma$  автоколлимационное изображение центра кривизны контролируемой поверхности опишет окружность диаметром  $d_A$ . В этом случае значение погрешности центрирования поверхности  $A$  можно вычислить по формуле:

$$C_0 = \frac{d_A}{4} = \frac{mt}{4 \cdot \beta_m}, \quad (2)$$

где  $m$  – число делений сетки микроскопа;

$t$  – цена деления сетки микроскопа;

$\beta_m$  – линейное увеличение микроскопа [44 – 47].

Оптические схемы и контрольно-юстировочные приборы, реализующие автоколлимационный метод измерения погрешностей центрирования, прошли долгий путь своего развития и на сегодняшний день широко распространены в практике производства оптических систем. Они применяются как на этапе изготовления отдельных оптических элементов, так и при установке линз в оправы, при сборке и юстировке отдельных узлов и оптических систем в целом. Наиболее известные из них рассмотрены ниже.

1) *Схема с использованием автоколлимационной трубки (трубки Забелина)*

Данная схема контроля погрешностей центрирования является самой распространенной и наиболее хорошо исследованной. Её можно встретить на любом оптическом производстве. Общий вид схемы контроля погрешностей центрирования с помощью автоколлимационной трубки представлен на рисунке 10.

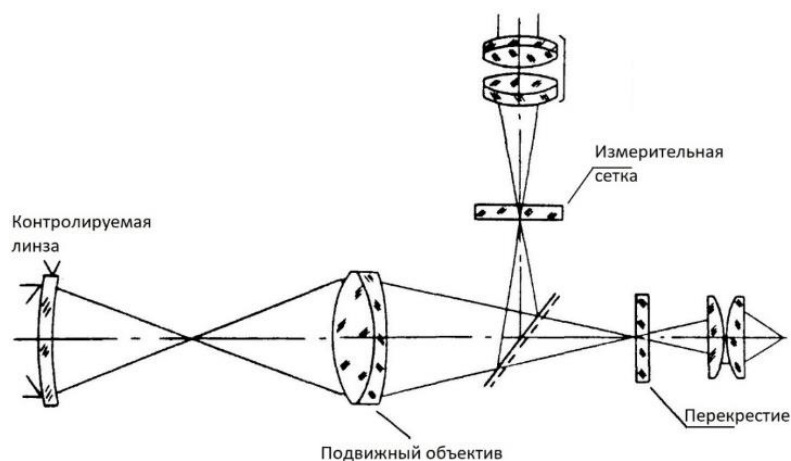
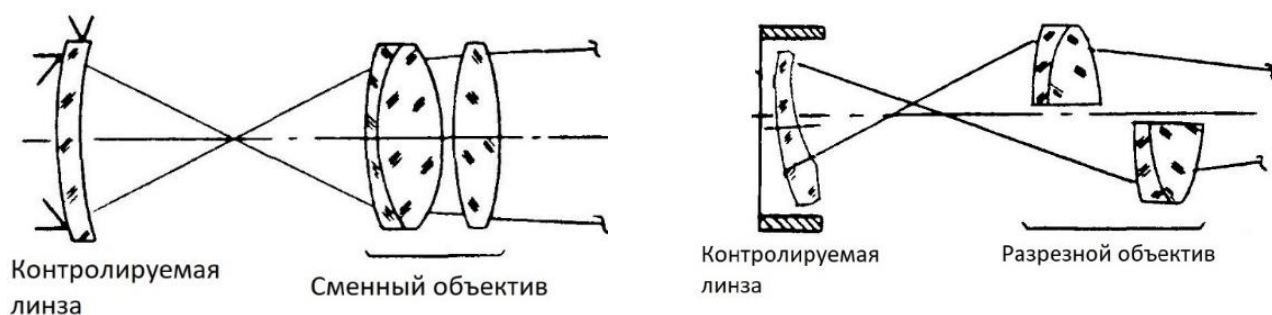


Рисунок 10 – Схема контроля погрешностей центрирования с помощью автоколлимационной трубки.

Тест-объект, представляющий собой перекрестие, подсвечиваемое источником света через конденсор, поочередно проецируется с помощью подвижного объектива в центр кривизны каждой из поверхностей (внешней или внутренней) испытуемой линзы. Автоколлимационное изображение тест-объекта наблюдается оператором в окуляре, снабженный измерительной сеткой. Наведение на центр кривизны осуществляется либо с помощью подвижки объектива вдоль оптической оси, либо перемещением всего прибора вдоль оптической оси. Величина погрешности центрирования вычисляется по формуле (2) исходя из диаметра окружности, которую описывает автоколлимационное изображение тест-объекта в плоскости сетки окуляра.

Использование подвижного объектива позволяет контролировать широкий диапазон радиусов кривизны поверхностей линз, который в пределе достигает бесконечности. Основным недостатком данной схемы является увеличение цены деления сетки в зависимости от положения подвижного объектива. Наибольшая пороговая чувствительность, составляющая от 3 до 5 мкм, достигается при контроле поверхностей, радиус кривизны которых не превосходит 100 мм.

Схема, представленная на рисунке 10, имеет две широко известные модификации, которые представлены на рисунке 11.



а) Схема со сменными объективами

б) Схема с разрезным объективом

Рисунок 11 – Модификации схемы с использованием автоколлимационной трубки.

Использование сменных объективов позволяет расширить диапазон радиусов кривизны контролируемых поверхностей, на которых может быть достигнута максимальная пороговая чувствительность, составляющая так же от 3 до 5 мкм. В данной схеме изменение линейного увеличения автоколлимационной трубки достигается подвижкой компонентов внутри каждого из сменных объективов вдоль оптической оси.

Использование разрезного объектива вместо подвижного объектива позволяет добиться одновременного наблюдения в плоскости сетки окуляра двух автоколлимационных изображений: от внешней и внутренней поверхностей контролируемой линзы. Это достигается тем, что половинки разрезного объектива обладают возможностью независимого перемещения вдоль оптической оси. Данная схема реализована в широко известной автоколлимационной трубке А.А. Забелина. Пороговая чувствительность совпадает с пороговой чувствительностью схем, представленных на рисунках 10 и 11 а). Цена деления сетки увеличивается в зависимости от положения каждой из половинок разрезного объектива.

Отметим, что именно рассмотренная выше схема классической автоколлимационной трубки послужила основой для всех современных автоколлимационных приборов контроля погрешностей центрирования, в т.ч. таких известных комплексов как OptiCentric, OTS, LAS и др. Их устройство и технические характеристики подробно рассмотрены в Главе 2.

2) Схемы с использованием линзы-свидетеля (линзы-имитатора) для центрирования линз, работающих в инфракрасной области спектра.

Контроль погрешностей центрирования линз, работающих в инфракрасной области спектра, представляет собой особенно сложную задачу. Это объясняется тем, что большинство материалов, применяемых для оптических систем инфракрасной области спектра, абсолютно непрозрачны в видимой области. Поэтому использование большинства схем, реализующих коллимационный и автоколлимационный методы контроля погрешностей центрирования, в данном случае становится невозможным.

Однако АО «Новосибирский приборостроительный завод» был разработан способ центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра [48]. Данный способ реализуется с помощью устройства, представленного на рисунке 12.

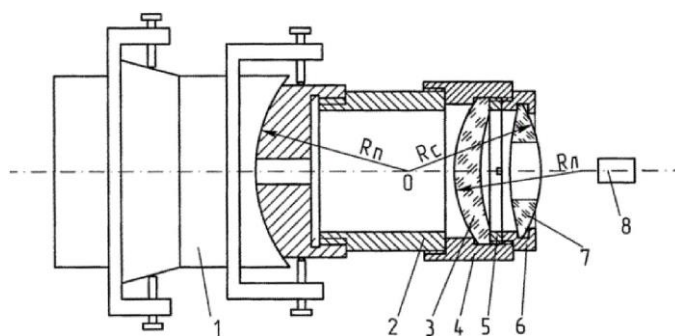


Рисунок 12 – Устройство для центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра.

Устройство содержит центрирующий патрон 1, устанавливаемый в переднюю бабку токарного станка, в котором через переходную оправку 2 закреплена центрируемая линза 3 в оправе 4, зажимное резьбовое кольцо 5, насадку 6 с линзой-свидетелем 7, закрепленной в оправе 4, и автоколлимационный микроскоп 8, установленный в задней бабке токарного станка. Поверхность линзы-свидетеля 7, ближайшая к автоколлимационному микроскопу 8, имеет радиус  $R_C$ , равный радиусу невидимой поверхности  $R_L$  центрируемой линзы 3. Центр кривизны этой поверхности линзы-свидетеля 7 путем подбора длины переходной оправки 2 совмещен с центром кривизны  $O$



поворотной сферической части патрона 1, имеющей радиус  $R_{II}$ . Линза-свидетель 7 выполнена со сквозным центральным отверстием, из стекла марки К8 или ТФ10. Размер отверстия определяется ходом нулевых лучей и зависит от формы поверхности центрируемой линзы 3 и линзы-свидетеля 7.

Центрирование линз, работающих в инфракрасной области спектра, осуществляют следующим образом. В оправу 4 устанавливают центрируемую линзу 3, поджимают ее резьбовым кольцом 5, затем закрепляют насадку 6 с линзой-свидетелем 7 так, чтобы линза-свидетель 7 была на одной оптической оси с линзой 3. Центрируют ближайшую к автоколлимационному микроскопу 8 поверхность линзы-свидетеля 7, т.е. получают автоколлимационное изображение центра кривизны этой поверхности и смещением сдвиговой части патрона 1 перпендикулярно оси вращения шпинделя станка выставляют центр кривизны этой поверхности на ось вращения шпинделя. Поскольку радиус ближайшей к автоколлимационному микроскопу 8 центрированной поверхности линзы-свидетеля 7 равен радиусу невидимой в автоколлимационный микроскоп 8 поверхности центрируемой линзы 3, происходит самоцентрирование невидимой поверхности линзы 3. Затем перемещением поворотной сферической части патрона 1 центрируют видимую в автоколлимационный микроскоп 8 поверхность линзы 3 через отверстие в линзе-свидетеле 7. При этом автоколлимационное изображение центра кривизны поверхности линзы 3 получают без учета хода луча через линзу-свидетель 7. Благодаря этому не сбивается автоколлимационное изображение от центрированной поверхности линзы-свидетеля 7. После этого извлекают насадку 6 с линзой-свидетелем 7 из оправы 4 с линзой 3 и обрабатывают торцевые и цилиндрические поверхности оправы 4.

Пороговая чувствительность предлагаемого способа контроля погрешности центрирования в оправе линзы, работающей в инфракрасной области спектра, составляет 3 мкм.

Известен также способ сборки объективов, работающих в инфракрасной области спектра, разработанный специалистами ОАО «ЛОМО» [49]. Описываемый способ является более ранним аналогом способа, приведенного

выше в [48], поэтому для его описания можно использовать рисунок 12 с указанием существующих отличий.

Прежде всего, вместо линзы-свидетеля 7 используется имитатор центрируемой линзы 3, также изготовленный из материала, прозрачного в видимой области спектра, но не имеющий центрального отверстия. В оправу 4 вместо центрируемой линзы устанавливается данный имитатор. Затем оправу 4 с имитатором устанавливают в центрирующий патрон 1. станка таким образом, чтобы центр кривизны базовой поверхности имитатора совпадал с центром качания чашки патрона 1. Подвижками оправы 4 в патроне 1 при контроле автоколлимационным микроскопом 8 выставляют автоколлимационные изображения центров кривизны двух оптических поверхностей линзы на ось вращения шпинделя станка.

После этого вынимают имитатор линзы из оправы 4 и на его место устанавливают центрируемую линзу 3. При этом происходит самоцентрирование невидимой поверхности линзы 3, так как линза 3 устанавливается на то же посадочное место, на которое устанавливался имитатор линзы.

Разворотом чашки патрона 1 при контроле автоколлимационным микроскопом 8 выставляют автоколлимационное изображение центра кривизны видимой оптической поверхности линзы 3 на ось вращения шпинделя станка. Далее обрабатывают торцевые и цилиндрические поверхности оправы 4.

Данную операцию производят со всеми линзами, входящими в конструкцию объектива. Остаточная погрешность центрирования не превосходит 10 мкм.

### 1.3.2 Интерференционный метод контроля погрешностей центрирования и средства его реализации

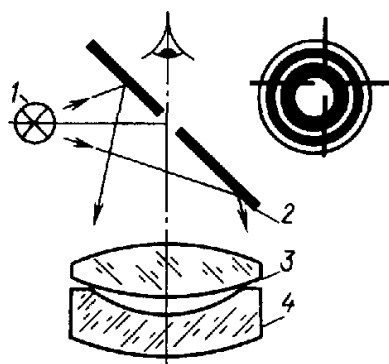
В современном оптико-электронном приборостроении интерферометрические методы контроля широко распространены, что

обусловлено их высокой точностью. Они применяются для контроля общих ( $N$ ) и местных ошибок ( $\Delta N$ ) формы полированных поверхностей, контроля показателей качества оптических систем, в метрологии и т.д. В то же самое время они могут быть использованы для контроля погрешностей центрирования оптических деталей.

Интерференционный метод контроля погрешностей центрирования основан на анализе интерференционной картины исследуемой оптической системы для определения величины погрешности центрирования. Как правило, при использовании интерференционного метода, величина погрешности центрирования контролируемой поверхности определяется исходя из величины смещения интерференционной картины, полученной от данной поверхности. При этом ось интерферометра задает опорную оптическую ось. Погрешность центрирования контролируемой поверхности измеряется относительно данной оси. Рассмотрим кратко наиболее известные схемы, реализующие интерференционный метод определения погрешностей центрирования.

#### 1) Схема Д.Д. Максудова

Одной из самых ранних реализаций интерференционного метода контроля погрешностей центрирования является схема Д. Д. Максудова, описание которой часто встречается в литературе, посвященной оптическим измерениям [50]. Схема Д. Д. Максудова приведена на рисунке 13.



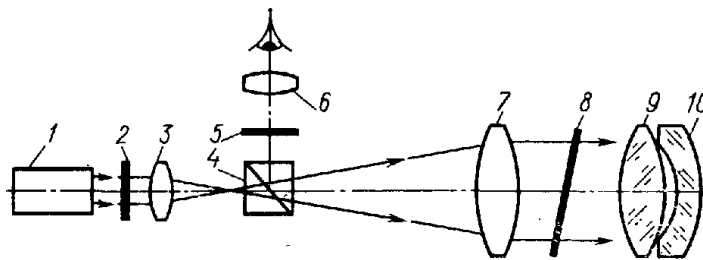
1 – спектральная лампа; 2 – экран; 3, 4 – контролируемая оптическая система.

Рисунок 13 – Схема Д.Д. Максудова.

Спектральная лампа 1 освещает белый экран 2. В центре экрана выполнено отверстие диаметром от 2 до 5 мм. На стороне экрана 2, обращенной к контролируемой оптической системе 3 и 4, начерчено черное перекрестие. Экран 2 установлен так, чтобы изображения перекрестий, полученные от поверхностей линз 3, 4 и наблюдаемые через отверстие в экране, были совмещены между собой. Наряду с перекрестиями наблюдатель видит интерференционную картину в виде колец, возникающую вследствие взаимодействия волновых фронтов, отраженных от стеклянных поверхностей, разделенных тонким воздушным промежутком. Погрешность центрирования будет проявляться в виде клиновидности воздушного зазора между линзами 3 и 4, вследствие чего центр изображений перекрестий не будет совпадать с центром системы интерференционных колец.

## 2) Схема Д.Д. Максудова с использованием лазера

В [50] отмечается, что существует усовершенствованный вариант данной схемы с использованием лазера, который представлен на рисунке 14.



- 1 – He-Ne лазер; 2 – поляризатор; 3 – фокусирующая линза;  
 4 – светоделительный куб; 5 – поляризатор; 6 – окуляр; 7 – объектив;  
 8 – фазовая пластинка; 9, 10 – контролируемая оптическая система.

Рисунок 14 – Схема Д. Д. Максудова с использованием лазера.

Параллельный пучок лучей, выходящий из лазера 1, попадает в телескопическую систему расширителя пучка, состоящую из фокусирующей линзы 3 и объектива 7. Далее пучок направляется на контролируемую систему 9, 10. Волновые фронты, отраженные от поверхностей линз контролируемой системы, интерферируют между собой. Интерференционная картина наблюдается в микроскоп малого увеличения, состоящий из объектива 7, окуляра 6 и светоделительного куба 4. При отсутствии погрешности центрирования линз 9 и 10 относительно опорной оси, которой является ось падающего лазерного пучка,

наблюдаются концентрические интерференционные кольца. Если одна из линз децентрирована, то интерференционные кольца теряют концентричность и смещаются относительно друг друга, что показано на рисунке 15.



Рисунок 15 – Интерференционная картина при наличии погрешности центрирования.

Для устранения паразитных интерференционных картин, возникающих вследствие отражений от поверхностей куба 4 и объектива 7, применяют поляризаторы 2, 5 совместно с фазовой пластинкой 8.

Практический эксперимент по определению децентрировок поверхностей одиночной линзы с использованием схемы (см. рис. 16), построенной на основе схемы Д. Д. Максудова с использованием лазера рассмотрен в работе [51]. Интерференционная картина, вид которой представлен на рисунке 17, возникает вследствие интерференции двух пучков лучей: пучка, отраженного от первой поверхности линзы, и пучка, отраженного от второй поверхности линзы. В проведенном эксперименте пороговая чувствительность при определении погрешности центрирования испытуемой линзы составила 2,8 мкм.

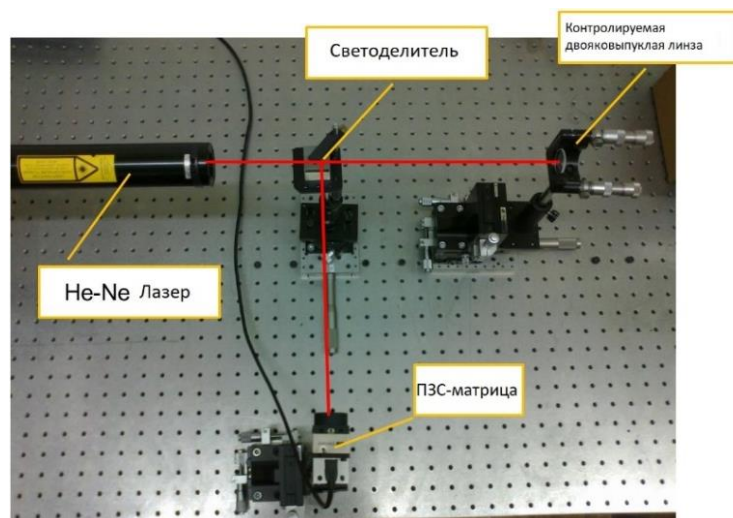


Рисунок 16 – Схема эксперимента по определению погрешности центрирования одиночной линзы.

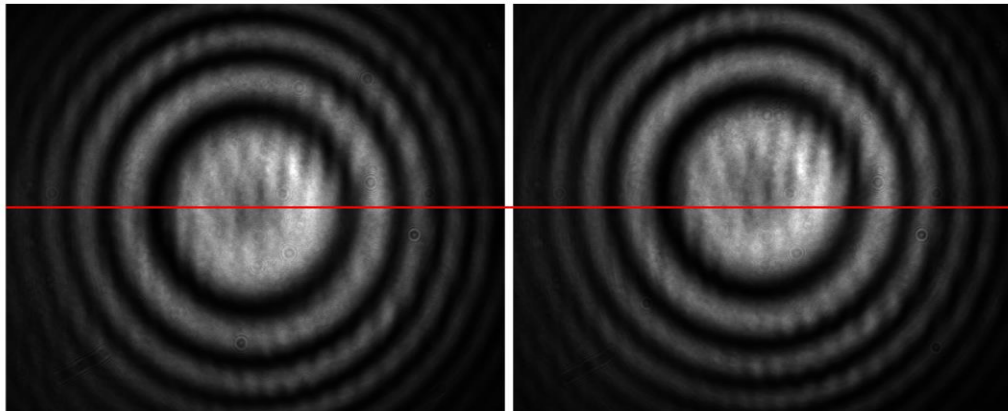
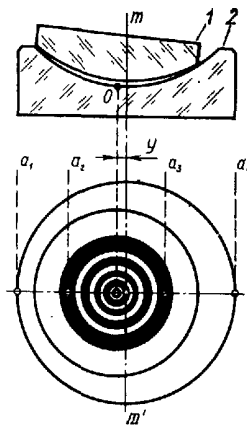


Рисунок 17 – Интерференционная картина в виде колец Ньютона при отсутствии (слева) и наличии погрешности центрирования величиной 0,1 мм (справа).

### 3) Метод В.Г. Зубакова

Известен также интерференционный способ измерения погрешности центрирования асферических поверхностей с помощью сферического пробного стекла, разработанный В.Г. Зубаковым. Реализация данного способа схематично представлена на рисунке 18 [50].



1 – сферическое пробное стекло; 2 – контролируемая поверхность.

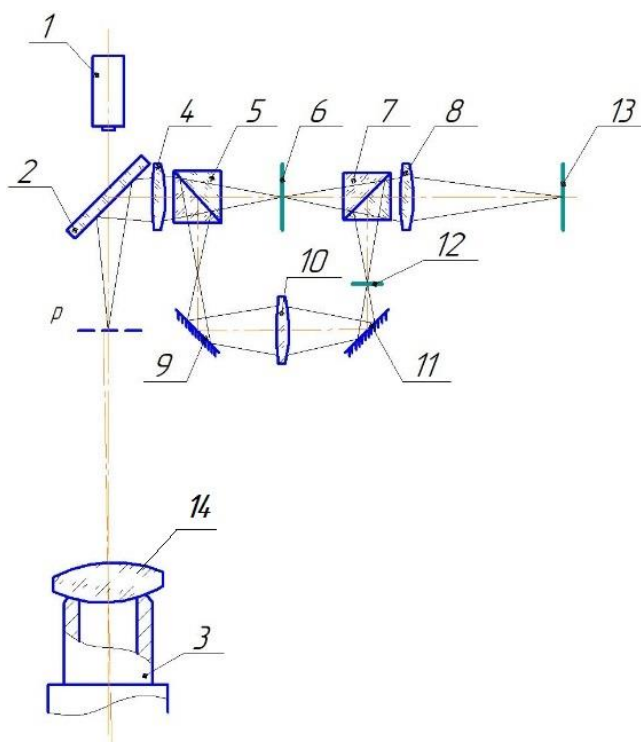
Рисунок 18 – Способ измерения погрешности центрирования асферических поверхностей с помощью сферического пробного стекла.

На контролируемую асферическую поверхность 2 устанавливается сферическое пробное стекло 1. В образовавшемся воздушном зазоре возникает интерференционная картина в виде колец. По смещению центра колец относительно базовой оси  $mm'$ , определяемой цилиндрической поверхностью контролируемой детали, можно определить погрешность центрирования контролируемой поверхности. Измерение смещения центра интерференционной

картины осуществляют с помощью измерительного микроскопа. Пороговая чувствительность данного метода составляет не более 5 мкм для различных типов асферических поверхностей.

4) *Схема Ю. В. Елисеева и Н. П. Ларионова*

В патенте [52] описано интерференционное устройство для контроля погрешности центрирования поверхностей в одиночной линзе, разработанное Ю. В. Елисеевым и Н. П. Ларионовым. Оптическая схема данного устройства представлена на рисунке 19.



- 1 – лазер; 2 – светоделитель; 3 – узел крепления; 4 – объектив;  
 5 – светоделительный кубик; 6 – маска; 7 – светоделительный кубик; 8 – окуляр;  
 9 – зеркало; 10 – проекционный объектив с увеличением минус  $1^x$ ; 11 – зеркало;  
 12 – маска; 13 – экран; 14 – контролируемая линза.

Рисунок 19 – Устройство Ю. В. Елисеева и Н. П. Ларионова.

Пучки лучей лазера 1 проходят через светоделитель 2, отражаются от двух поверхностей контролируемой линзы 14 и, отразившись от светоделителя 2, попадают в объектив 4. При этом после отражения от контролируемой линзы 14 пучки лучей образуют интерференционную картину в виде системы концентрических колец, ширина которых убывает от центра к краю по

параболическому закону. После объектива 4 пучки лучей делятся светоделительным кубиком 5 на два пучка лучей, один из которых проходит через светоделительный кубик 5, маску 6, светоделительный кубик 7 и собирается окуляром 8 на экране 13. Второй пучок лучей отражается от светоделительной грани светоделительного кубика 5, зеркала 9, проходит через объектив 10, отражается от зеркала 11, проходит через маску 1, отражается светоделительной гранью светоделительного кубика 7 и через окуляр 8 попадает на экран 13.

Интерференционная картина в плоскости  $P$  проецируется объективом 4 в плоскость маски 6 и через светоделительный кубик 5 – в предметную плоскость объектива 10. Объектив 10 проецирует изображение интерференционной картины в плоскость маски 12. Окуляр 8 проецирует на экран 13 частично перекрытое нечетными непрозрачными зонами маски 6 и четными непрозрачными зонами маски 12 изображение интерференционной картины.

При отсутствии погрешности центрирования у контролируемой линзы 14 центр интерференционной картины в плоскости  $P$  лежит на оси пучка лучей лазера 1, сопряженной с оптической осью наблюдательной системы. Центры интерференционных колец будут совмещены с центрами масок 6 и 12. При этом маска 6 пропускает, например, четные кольца и перекрывает нечетные кольца перевернутого изображения интерференционной картины, а маска 12 пропускает нечетные кольца и перекрывает четные кольца прямого изображения интерференционной картины. Окуляр 8 образует на экране 13 из неполного прямого и перевернутого изображений интерференционной картины одно полное изображение.

Если контролируемая линза 14 имеет погрешность центрирования, то центр интерференционной картины смещается с оси пучка лучей лазера 1 и на экране 13 наблюдается две системы интерференционных колец, центры которых смещены относительно друг друга в противоположном направлении. Данная интерференционная картина представлена на рисунке 20.





Рисунок 20 – Системы интерференционных колец при наличии погрешности центрирования у контролируемой линзы.

Величина смещения определяет величину погрешности центрирования контролируемой линзы 14, а линия, соединяющая центры двух систем интерференционных колец, – направления вектора погрешности центрирования.

#### 5) *Схема с использованием двух интерферометров*

В докладе [53] на конференции ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting: Manufacture and Metrology of Freeform and Off-Axis Aspheric Surfaces, проходившей летом 2014 г. в США, был заявлен метод контроля погрешностей центрирования поверхностей одиночной линзы с помощью измерительного стенда на основе двух интерферометров. Общий вид данного стенда представлен на рисунке 21.

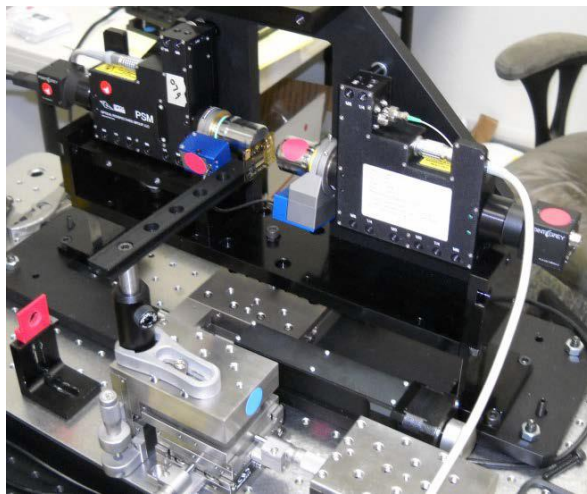


Рисунок 21 – Экспериментальный стенд на основе двух интерферометров.

Интерферометры располагают друг напротив друга. Рабочие точки интерферометров совпадают в трехмерном пространстве, их оптические оси выровнены друг относительно друга. После того, как интерферометры выставлены и откалиброваны, между ними вставляют испытуемую линзу и перемещают её таким образом, чтобы одна из поверхностей оказалась в фокусе одного из интерферометров. Далее снимают показания с одного интерферометра.

Затем линзу перемещают так, чтобы другая поверхность оказалась в фокусе, и снимают показания со второго интерферометра. Взаимная погрешность центрирования поверхностей линзы определяется на основе данных двух измерений. Пороговая чувствительность при определении погрешности центрирования линзы составляет менее 1 мкм. Результаты использования данного метода применительно к асферическим линзам, полученным методом репликационного формования, были изложены авторами указанного доклада в работе [54].

### б) Схемы с использованием интерферометра типа Физо

Способы применения интерферометра типа Физо для измерения погрешности центрирования поверхностей одиночной линзы описаны в статье [55] и патенте [56]. Когда оптическая ось контролируемой поверхности совпадает с осью интерферометра и перпендикулярна волновому фронту, образованному эталонной поверхностью объектива интерферометра, интерференционная картина представляет собой систему концентрических колец, центр которой совпадает с центром интерферограммы. Данный случай представлен на рисунке 22 а).

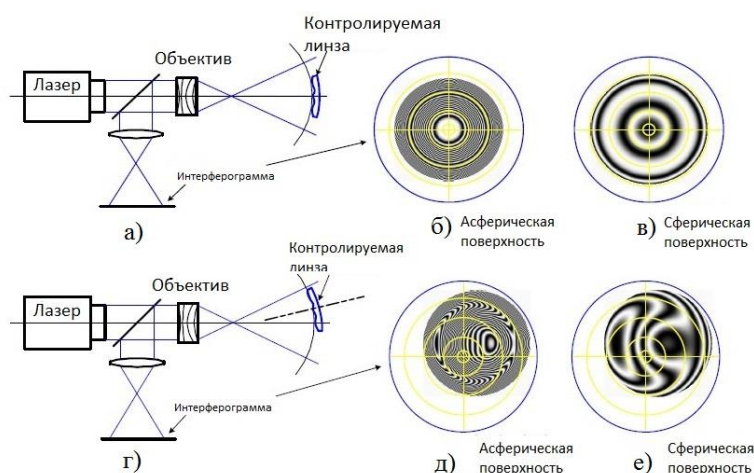


Рисунок 22 – Схема контроля погрешности центрирования с использованием интерферометра типа Физо.

В данной схеме контроля присутствует только остаточная сферическая aberrация. Примеры интерференционных картин в случае контроля асферической и сферической поверхностей, чьи оптические оси совпадают с осью интерферометра, представлены на рисунке 22 б) и 22 в) соответственно.

В случае, представленном на рисунке 22 г), когда оптическая ось контролируемой поверхности децентрирована и наклонена относительно оптической оси интерферометра, интерференционные кольца примут вид, представленный на рисунках 22 д) и 22 е) для асферической и сферической контролируемых поверхностей соответственно. Пороговая чувствительность рассмотренной выше схемы достигает порядка 0,5 мкм.

### 1.3.3 Дифракционный метод контроля погрешностей центрирования и средства его реализации

Исходя из анализа имеющихся научных публикаций, можно говорить о двух направлениях развития данного метода:

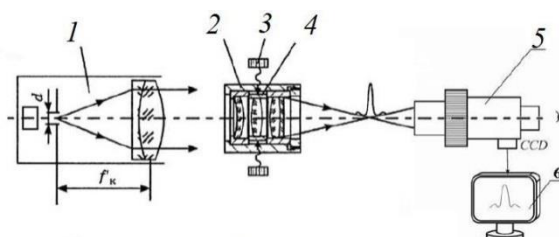
1. Анализ дифракционного изображения тест-объекта, даваемого исследуемой оптической системой.
2. Анализ топологии волнового фронта, прошедшего через исследуемую оптическую систему.

#### 1.3.3.1 Схемы, основанные на анализе дифракционного изображения тест-объекта

Схемы контроля, основанные на анализе дифракционного изображения тест-объекта, на данный момент подробно описаны в литературе. Наличие погрешностей изготовления и сборки оптических систем, в частности погрешностей центрирования оптических поверхностей и взаимного расположения элементов, приводит к возникновению дополнительных aberrаций в изображении, создаваемом исследуемой оптической системой [57 – 59]. Как правило, наличие погрешностей центрирования оптических поверхностей и взаимного расположения элементов проявляется в возникновении комы,

астигматизма, а также хроматической aberrации увеличения. В качестве тест-объекта, изображаемого исследуемой оптической системой, обычно выступает точечная диафрагма.

На рисунке 23 представлена принципиальная схема контроля качества сборки микрообъективов и фотообъективов по анализу дифракционного изображения точечной диафрагмы. Варианты дифракционного изображения тест-объекта при отсутствии и при наличии aberrаций представлены на рисунке 24 [60, 61].



1 – коллиматор; 2- контролируемый объектив; 3 – юстировочный винт;  
4 – юстировочный компонент; 5 – видеокамера; 6 – монитор.

Рисунок 23 – Принципиальная схема для анализа дифракционного изображения тест-объекта (точечной диафрагмы).



а) отсутствие aberrаций; б) наличие сферической aberrации; в) наличие комы, обусловленной децентрировками компонентов исследуемой оптической системы; г) наличие астигматизма, обусловленного цилиндричностью и децентрировками компонентов исследуемой оптической системы.

Рисунок 24 – Варианты дифракционного изображения тест-объекта.

Диаметр точечной диафрагмы  $d$  в фокальной плоскости коллиматора определяется выражением:

$$d \leq \frac{120'' \cdot f' \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{D}, \quad (3)$$

где  $f'$  – фокусное расстояние объектива коллиматора;

$D$  – диаметр входного зрачка контролируемого объектива [62].

Недостатком описанной схемы является качественный характер осуществляемого на ней контроля. В ней по дифракционному изображению точечной диафрагмы можно судить лишь о наличии или отсутствии погрешностей центрирования элементов контролируемого объектива. Какой именно элемент децентрирован и количественную величину погрешности центрирования определить нельзя.

На основе представленной на рисунке 23 принципиальной схемы в настоящее время ведутся работы по созданию автоматизированной системы контроля и устранения погрешностей центрирования линзовых элементов. В частности, экспериментальная модель подобной системы описана в работе [63]. В данной работе в качестве контролируемой оптической системы авторами была рассмотрена одиночная линза. Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке 25.

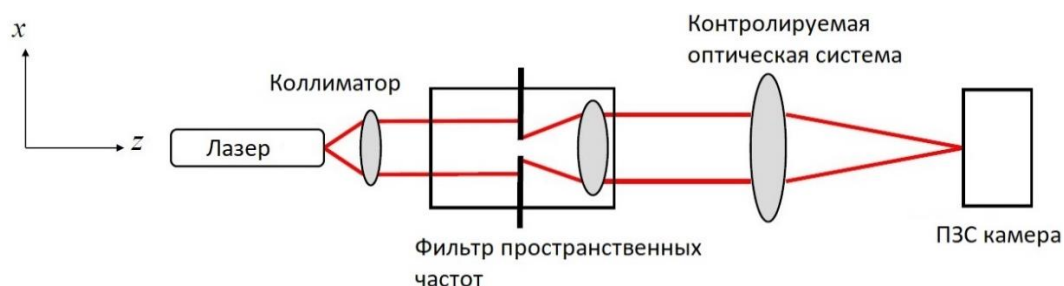


Рисунок 25 – Оптическая схема для контроля погрешностей центрирования по дифракционному изображению тест-объекта

Для создания осесимметричного гауссова пучка используется пространственно-частотный фильтр, представляющий собой точечную диафрагму, освещаемую сфокусированным с помощью асферической линзы лазерным пучком. С другой стороны, точечная диафрагма находится в фокусе второго коллимирующего объектива, формирующего параллельный пучок. Формирование изображения тест-объекта (точечной диафрагмы) происходит в фокальной плоскости контролируемой оптической системы, в которой расположена ПЗС-матрица. Контролируемая линза расположена на системе моторизованных направляющих, обеспечивающих 4 степени свободы: 3 линейных по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , а также одна вращательная вокруг оси  $z$ . Форма

изображения тест-объекта, формируемого на ПЗС-матрице, анализируется измерительным алгоритмом, который, в случае если изображение тест-объекта отличается от эталонного, вычисляет величину полной погрешности центрирования и её составляющие по координатным осям, после чего дает команды контроллеру, управляющему перемещениями направляющих для юстировки положения линзы. Юстировка продолжается до тех пор, пока изображение тест-объекта не будет соответствовать эталонному, т.е. изображению тест-объекта, даваемого центрированной оптической системой. Функциональная блок-схема экспериментальной установки представлена на рисунке 26. Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 27.

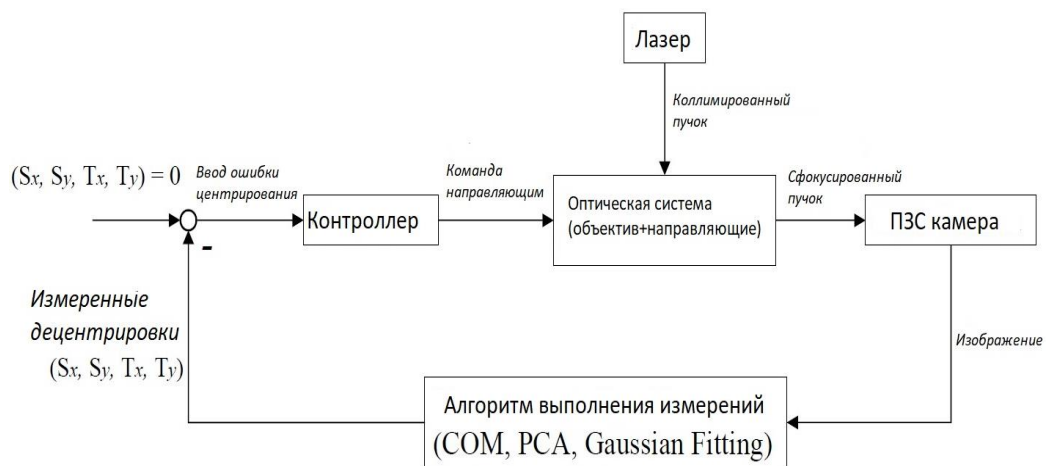


Рисунок 26 – Функциональная блок-схема экспериментальной установки.

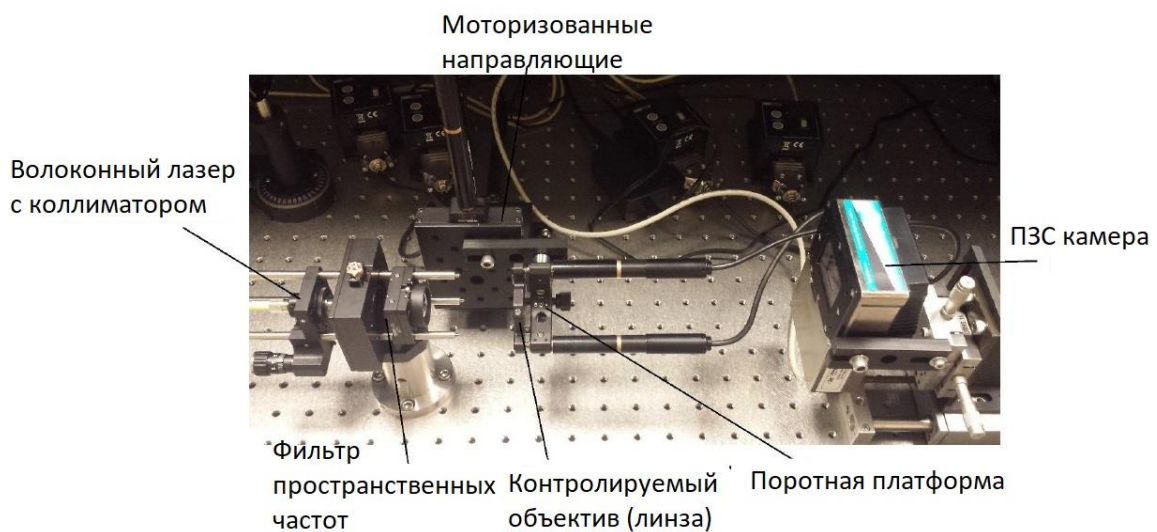


Рисунок 27 – Общий вид экспериментальной установки.

Пороговая чувствительность измерений погрешности центрирования для одиночной линзы составила в описанном исследовании от 1 до 4.5 мкм.



### 1.3.3.2 Схемы и эксперименты, основанные на анализе топологии волнового фронта

В последние 10-15 лет стремительно развиваются методы контроля погрешностей центрирования, основанные на анализе топологии волнового фронта, прошедшего через исследуемую оптическую систему. Анализ топологии волнового фронта проводится с помощью специальных оптических измерительных приборов – датчиков волнового фронта, известных также как датчики Шака-Гартмана.

Датчик волнового фронта Шака-Гартмана был изобретен Рональдом Шаком в 70-х годах прошлого столетия [64]. С тех пор он применялся в основном в области адаптивной оптики для контроля сверхмощных лазеров и астрономии. Однако в последнее время, в связи со значительным удешевлением ПЗС матриц, линзовых растр, и высокими вычислительными возможностями персональных компьютеров, датчик Шака-Гартмана находит новые применения. Одним из таких применений является юстировка и контроль качества сборки оптических систем.

В основе работы этого устройства лежит измерение распределения фазы в поперечном сечении пучка света при помощи линзового растра. Схематично принцип измерения волнового фронта с помощью датчика Шака-Гартмана представлен на рисунке 28.

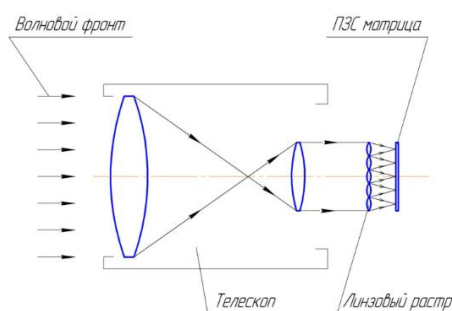


Рисунок 28 – Принцип измерения волнового фронта при помощи датчика Шака-Гартмана.

Для согласования апертуры пучка и оптической части ПЗС матрицы используется телескопическая система. Локальный наклон фазы в пределах одной

микролинзы трансформируется в линейный сдвиг изображения пятна в фокальной плоскости. На основании данных о локальном наклоне фазы в каждой из линз растра восстанавливается поверхность волнового фронта по всему сечению пучка. По сравнению с классическим способом измерения волнового фронта – интерферометрией, метод Шака-Гартмана имеет сразу несколько преимуществ. Во-первых, он не требует опорного пучка. Во-вторых, измерения могут проводиться в широкой спектральной области с высоким разрешением [65]. В-третьих, возможен контроль волновых фронтов в присутствии значительных aberrаций (больше 10 длин волн), когда расшифровка интерферограмм затруднительна или невозможна [66].

Существует три основных этапа в задаче восстановления волнового фронта датчиком Шака-Гартмана. Первый этап – это регистрация фокального пятна каждой из линз микрорастра при помощи ПЗС камеры, обработка изображения соответствующим алгоритмом и вычисление точного положения центра пятна в плоскости приемника. Далее, исходя из этих значений, вычисляется массив локальных градиентов волнового фронта в плоскости линзового микрорастра. Заключительный этап – это восстановление волнового фронта из массива локальных градиентов.

Для определения координат центров пятна исходя из освещенности пикселей в плоскости ПЗС матрицы имеем следующие формулы:

$$x_c = \frac{\sum_{ij} I_{ij} \cdot x_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \quad (4); \quad y_c = \frac{\sum_{ij} I_{ij} \cdot y_{ij}}{\sum_{ij} I_{ij}} \quad (5)$$

Здесь суммирование ведется в некоторой окрестности пятна, называемой областью интереса. С каждой линзой микрорастра  $k$  ассоциирована своя область интереса.

Расчет матрицы локальных градиентов осуществляется при помощи формулы

$$\begin{pmatrix} \partial W / \partial x \\ \partial W / \partial y \end{pmatrix}_k \approx \frac{1}{f'} \cdot \begin{pmatrix} x_c - x_0 \\ y_c - y_0 \end{pmatrix}_k, \quad (6)$$



где  $(x_c; y_c)$  – измеренные координаты центра пятна;

$(x_0; y_0)$  – координаты центра пятна опорного пучка (плоский волновой фронт) для каждой  $k$ -й линзы микроаэра.

Задача реконструкции волнового фронта из матрицы локальных градиентов решается двумя основными способами – зональным, т.е. прямым численным интегрированием, и модальным, в котором волновой фронт представляется в виде функций, имеющих аналитические производные. Чаще всего используются полиномы Цернике ряда Standart или ряда Fringe.

В частности, в работе [67] предлагается методика вычисления погрешностей центрирования, основанная на анализе коэффициентов при полиномах Цернике, описывающих форму волнового фронта, прошедшего через оптическую систему и формирующего изображение осевой точки предмета. Посредством изучения отклика системы при наличии погрешностей центрирования, представляющих собой малые отклонения относительно номинального положения, показано, что изменение коэффициентов полиномов Цернике можно описать с помощью полинома. Коэффициенты при полиномах Цернике используются для создания системы нелинейных уравнений, где неизвестными являются значения составляющих погрешности центрирования. Решив полученную систему уравнений, можно вычислить значения погрешности центрирования. Данная методика прошла проверку путем непосредственного моделирования объектива-триплета, в котором вторая линза была децентрирована. Блок-схема, иллюстрирующая этапы данной методики, представлена на рисунке 29.

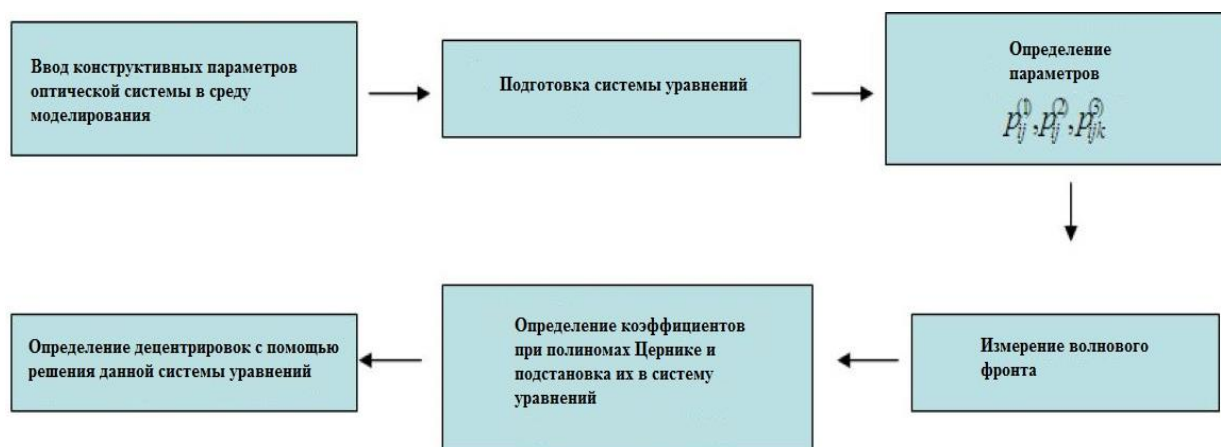


Рисунок 29 – Этапы вычисления погрешностей центрирования.

Рассмотренная методика показала хороший результат для случая отдельного независимого рассмотрения смещений и наклонов. Отклонения полученных значений составляли приблизительно 20% для смещений и 3,7% для угла наклона. Авторами работы для случая одновременного анализа смещений и наклонов разрабатывается новый метод на основе теории нейронных сетей.

Исследование о возможности использования волнового фронта на выходе исследуемой оптической системы, описываемого рядом полиномов Цернике, для определения погрешностей центрирования входящих в исследуемую оптическую систему элементов описано в работе [68]. При этом в данной работе исследовано влияние погрешностей центрирования на топологию волнового фронта и изменение коэффициентов при описывающих его полиномах.

Эксперимент по определению линейного смещения и наклона одиночной линзы и одиночной плоскопараллельной пластины с помощью зарегистрированной топологии волнового фронта описан в исследовании [69]. Регистрация волнового фронта осуществлялась с помощью датчика Шака-Гартмана. Вычисление линейного смещения и наклона по топологии волнового фронта осуществлялось с помощью двух методов: метода поиска аналогий среди предварительно зарегистрированных образцов волнового фронта и метода регуляризации Тихонова. Приведено сравнение данных методов. Исследовано влияние на точность результатов типа источника излучения – точечного и протяженного. Как отмечают авторы, предложенный метод применим для контроля смещений оптических элементов во время работы исследуемой оптической системы, т.к. не оказывает на неё влияния. Пороговая чувствительность при определении наклона для двояковыпуклой линзы составила 45'', а для плоскопараллельной пластинки – 20''.

Другим примером экспериментального определения погрешностей центрирования элементов оптической системы с помощью датчика Шака-Гартмана является работа [70]. В ней проведен анализ для случая линейных смещений и для наклона одиночной двояковыпуклой линзы. Принципиальные

схемы проведенных экспериментов приведены на рисунке 30 и рисунке 31 соответственно.

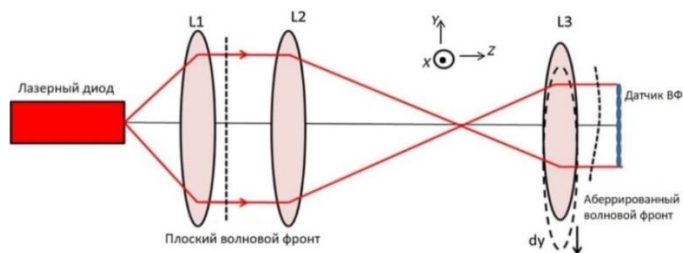


Рисунок 30 – Схема определения линейных смещений контролируемой линзы.

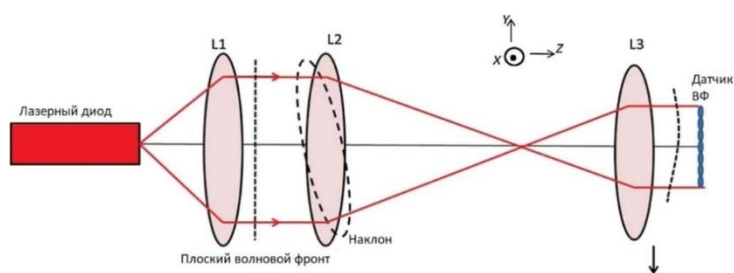


Рисунок 31 – Схема определения наклона контролируемой линзы.

Источником излучения в данных схемах является лазерный диод с длиной волны излучения  $\lambda = 0,633$  мкм. L1 – линза с фокусным расстоянием  $f' = 150$  мм, в фокальной плоскости которой расположен источник излучения. Линза L1 создает пучок лучей, параллельный оптической оси системы, что соответствует плоскому волновому фронту. Линзы L2 и L3 образуют телескопическую систему, предназначенную для уменьшения диаметра анализируемого пучка излучения. Уменьшение диаметра пучка излучения необходимо для согласования апертуры анализируемого пучка и анализатора волнового фронта. Разложение анализируемого волнового фронта производилось по 44 полиномам Цернике.

В данном эксперименте наименьшие величины линейных смещений и наклонов составили 0,3 мм и 15' соответственно. При этом, точность определения погрешностей центрирования определяется рядом факторов, такими как:

1. Число оптических компонентов.
2. Оптические силы компонентов.
3. Конструктивные параметры оптических компонентов.
4. Параметры ПЗС матрицы и микролинз анализатора волнового фронта.
5. Используемые алгоритмы анализа волнового фронта.

### 1.3.4 Анализ характеристик схем и устройств контроля погрешностей центрирования

В таблице 2 приведены характеристики рассмотренных выше схем контроля погрешностей центрирования, относящихся к различным методам.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики схем и устройств контроля погрешностей центрирования

Наименование схемы	Пороговая чувствительность	Выявленные недостатки
<b>1. Коллимационный метод</b>		
1.1 Схема с использованием коллиматора и измерительного микроскопа	От 5 до 10 мкм. В угловой мере – от 30" до 1'.	Невозможность определить клиновидность клеящего слоя в склейках
1.2 Схема с использованием коллиматора и измерительного микроскопа с увеличенным рабочим отрезком	От 5 до 10 мкм. В угловой мере – от 30" до 1'.	
1.3 Схема с использованием зрительной трубы	В угловой мере от 30" до 1'	Ограниченный диапазон подвижки объектива проекционной системы
1.4 Фотоэлектрическая схема с использованием лазера	От 3 до 10 мкм	Ограниченный диапазон фокусировки лазерного излучения
<b>2. Автоколлимационный метод</b>		
2.1 Схема с использованием автоколлимационной трубки и её разновидностей	От 3 до 5 мкм	Снижение точности при изменении положения фокусирующего объектива или его фокусного расстояния, если он сменный
2.2 Схемы с использованием линзы-свидетеля (имитатора) для линз инфракрасной области спектра	От 3 до 10 мкм	Невозможность получения автоколлимационного изображения от внутренней поверхности линзы

## Продолжение таблицы 2

3. Интерференционный метод		
3.1 Схема Д.Д. Максудова	-	Низкий контраст интерференционной картины. Качественный характер измерения
3.2 Схема Д.Д. Максудова с использованием лазера	До 2.8 мкм	Точность измерения зависит от параметров используемого приемника излучения и устройств позиционирования контролируемой детали. Трудность использования в серийном производстве
3.3 Метод В.Г. Зубакова	До 5 мкм	Контактный метод: необходимо накладывать пробное стекло на готовую деталь, что повышает риск её повреждения
3.4 Схема Ю.В. Елисеева и Н.П. Ларионова	Не известна	Трудность практической реализации, низкая технологическая эффективность
3.5 Схема с использованием двух интерферометров	Менее 1 мкм	Имеет экспериментальный характер, низкая технологическая эффективность
3.6 Схемы с использованием интерферометра типа Физо	До 0,5 мкм	Низкая технологическая эффективность
4. Дифракционный метод		
4.1 Схемы, основанные на анализе дифракционного изображения тест-объекта	От 1 до 4.5 мкм	Трудность локализации обнаруженной погрешности центрирования. Трудность количественного определения величины погрешности центрирования
4.2 Схемы, основанные на анализе волнового фронта	-	Носят экспериментальный характер. Трудность количественного определения величины погрешности центрирования

## ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Инфракрасные оптические системы представляют собой один из наиболее востребованных и быстро развивающихся классов оптических систем, применяемых в различных областях науки и техники.

2. Стремительное развитие элементной базы ИК техники вызывает рост требований к показателям качества и ужесточение допусков на изготовление и сборку оптических систем для инфракрасной области спектра.

3. Наиболее часто основной причиной ухудшения качества оптических систем являются погрешности центрирования, возникающие на различных этапах изготовления и сборки данных систем.

4. Существуют различные методы контроля погрешностей центрирования, среди которых наибольшее распространение получил автоколлимационный метод.

5. Контроль погрешностей центрирования оптических систем для инфракрасной области спектра затруднен по сравнению с оптическими системами для видимой области спектра в связи с использованием материалов, непрозрачных в видимой области спектра, и возможен только автоколлимационным методом.

6. Рост требований к показателям качества оптических систем для инфракрасной области спектра требует разработки новых и повышения точности имеющихся методов и средств контроля погрешностей центрирования инфракрасных оптических систем. В современной научно-технической и технологической литературе крайне мало информации о данных методах и технологиях.

## ГЛАВА 2. Разработка оптической схемы прибора для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра

### 2.1 Краткий обзор современных приборов для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра

Как уже было отмечено в выводах к главе 1, в практике современного оптического приборостроения наиболее распространены коллимационный и автоколлимационный методы контроля погрешностей центрирования. Достоинствами данных методов являются:

1. Простота реализации и наглядность выполнения измерений.
2. Невысокая длительность операций контроля.
3. Соизмеримая с другими методами пороговая чувствительность измерений.

Однако среди измерительных приборов, основанных на автоколлимационном методе, лишь немногие позволяют осуществлять контроль погрешностей центрирования для элементов оптических систем инфракрасной области спектра. В то же время, суть автоколлимационного метода контроля постоянна для любых оптических систем. Поэтому в приведенном ниже обзоре рассмотрены наиболее современные автоколлимационные приборы для контроля погрешностей центрирования, в том числе и те, которые не имеют от возможности работы в инфракрасной области спектра.

Среди указанных приборов для контроля погрешностей центрирования на сегодняшний день можно выделить следующие:

1. Приборы серии OptiCentric фирмы Trioptics GmbH (Германия).
2. Приборы серии OTS фирмы OEG GmbH (Германия).
3. Приборы серии LAS фирмы Optoalignment (США).
4. Прибор Point Source Microscope фирмы Davidson Optronics (США).

Изучение принципиальных схем данных приборов, а также анализ их возможностей и технических характеристик позволит определить требования современного оптического производства.

### 2.1.1 Приборы серии OptiCentric IR

В работах [71 – 74] рассмотрены теоретические аспекты и опыт практического применения автоматизированных комплексов контроля погрешностей центрирования серии OptiCentric немецкой фирмы TRIOPTICS GmbH. В частности, для работы с инфракрасными оптическими системами предназначены приборы серии OptiCentric IR.

Они представляют собой автоматизированные цифровые измерительные комплексы, которые позволяют контролировать как типовые погрешности центрирования одиночных линз, (например, наклон сферической поверхности линзы к ее оптической оси или смещение и наклон образующей цилиндрической линзы к ее основанию), так и определять наклон и смещение оптической оси каждой линзы в объективе. Общий вид прибора серии OptiCentric IR представлен на рисунке 32.



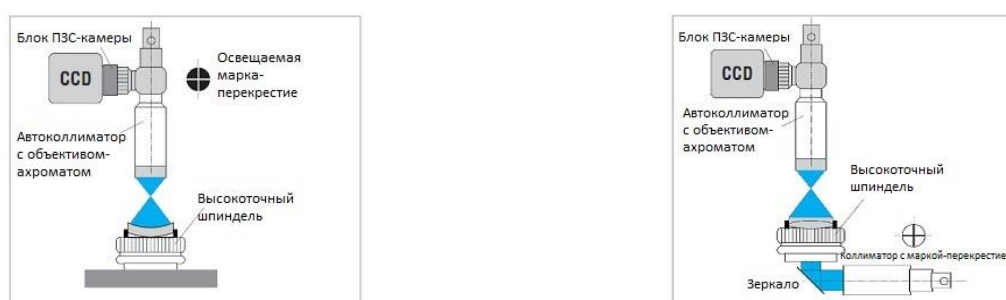
Рисунок 32 – Общий вид прибора серии OptiCentric IR.

Каждый прибор оснащен прецизионным аэроостатическим шпинделем с юстировочным столиком, на который устанавливается исследуемый объектив. Кроме того, в состав прибора входит персональный компьютер (ПК), с



предустановленным программным обеспечением, обеспечивающим управление процессом выполнения измерений и вычисление погрешностей центрирования.

С точки зрения конструктивного исполнения прибор может быть укомплектован как одним автоколлиматором, позволяющим измерять погрешности центрирования одной или нескольких линз в режиме отраженного света (автоколлимационный метод), так и иметь дополнительный коллиматор – для выполнения измерений в проходящем свете (коллимационный метод). Указанные режимы измерений на приборе серии OptiCentric IR схематично показаны на рисунке 33.

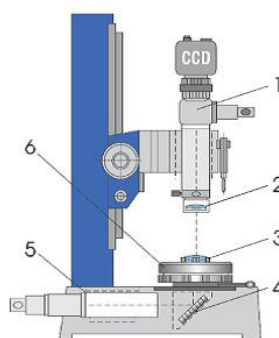


а) Измерение в отраженном свете

б) Измерение в проходящем свете

Рисунок 33 – Режимы измерений прибора OptiCentric IR.

Согласно информации, представленной в патенте [75], а также в заявке на изобретение [76] и официальном веб-сайте фирмы TRIOPTICS GmbH, принципиальная схема приборов серии OptiCentric выглядит следующим образом (см. рис. 34).



- 1 – автоколлиматор с осветителем и ПЗС камерой; 2 – объектив-ахромат;  
3 – контролируемая деталь; 4 – зеркало; 5 – дополнительный коллиматор;  
6 – устройство вращения контролируемой детали.

Рисунок 34 – Принципиальная схема прибора серии OptiCentric IR.

Данные приборы построены на модульной основе, за счет чего их функциональность может быть существенно расширена. В частности доступны дополнительные аппаратные модули, такие как OptiSurf и OptiSpheric, а также более 10 программных дополнений. При совместном использовании они позволяют вычислять положения автоколлимационных точек оптических поверхностей, получать визуальную картину смещения линз и групп линз в объективе, определять погрешности центрирования поверхностей линз, их фокусные расстояния и рабочие отрезки.

Основные технические характеристики приборов серии OptiCentric IR приведены в таблице 3.

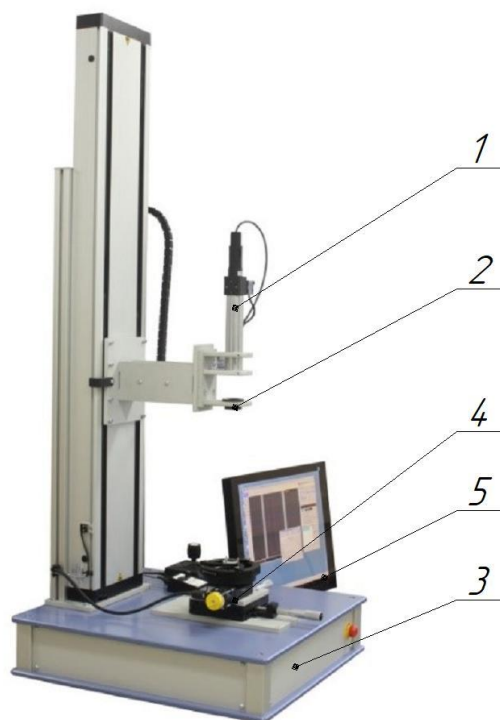
Таблица 3 – Основные характеристики приборов серии OptiCentric IR

Параметр	Значение		
Спектральный диапазон измерения, мкм	от 0,4 до 0,7	от 3,5 до 4,8	от 8 до 12
Источник излучения	Светодиод	He-Ne лазер	CO <sub>2</sub> лазер
Рабочая длина волны, мкм	неизвестна	3,39	10,3
Пороговая чувствительность, мкм	0,1	1	
Диапазон световых диаметров контролируемого объектива, мм	От 0,5 до 225		
Диапазон радиусов контролируемых поверхностей, мм	От 0 до ±450		
Измеряемые параметры	Погрешности центрирования поверхностей в одиночных линзах, склейках и собранных объективах. Как опция: фокусное расстояние, фокальные отрезки, радиусы кривизны сферических поверхностей.		
Число контролируемых поверхностей, не более	20 (с одним автоколлиматором) 40 (с дополнительным коллиматором)		

Особенностью данных приборов является возможность контроля объективов как для видимой области спектра, так и для инфракрасной. Однако данная возможность реализуется за счет использования двух независимых друг от друга измерительных частей (автоколлиматоров) – одна для видимой области спектра и одна – для инфракрасной. Одновременный контроль оптических систем видимой и инфракрасной области спектра невозможен.

## 2.1.2 Приборы серии OTS

Несмотря на то, что приборы серии OTS (Optics Test Station) по данным фирмы-производителя не предназначены для работы с инфракрасными оптическими системами, по своей принципиальной схеме они аналогичны приборам серии OptiCentric, поэтому в данном обзоре целесообразно ознакомиться и с ними. Приборы серии OTS представляют собой многофункциональные цифровые измерительные комплексы для осуществления контроля различных параметров как одиночных линз, так и более сложных оптических систем. Измерения могут производиться как в режиме отраженного света, так и в режиме проходящего света. Общий вид прибора серии OTS представлен на рисунке 35.



- 1 – автоколлиматор; 2 – сменный объектив ахромат; 3 – основание с дополнительным коллиматором для измерений в проходящем свете; 4 – устройство позиционирования контролируемой детали (объектива); 5 – ПК с вычислительным программным обеспечением LensTest.

Рисунок 35 – Общий вид прибора серии OTS.

Как и приборы OptiCentric приборы OTS имеют возможность расширения функциональных возможностей за счет дополнительных аппаратных и программных модулей. Кроме того, по данным фирмы-производителя приборы серии OTS имеют следующие особенности по сравнению с аналогичными измерительными комплексами:

- для определения погрешностей центрирования не требуется осуществлять вращение контролируемой детали или объектива;
- наличие алгоритмов автофокусировки для уточнения наведения на расчетное положение автоколлимационной точки;
- возможность измерения геометрических параметров аноморфотных линз.

Основные технические характеристики приборов серии OTS приведены в таблице 4.

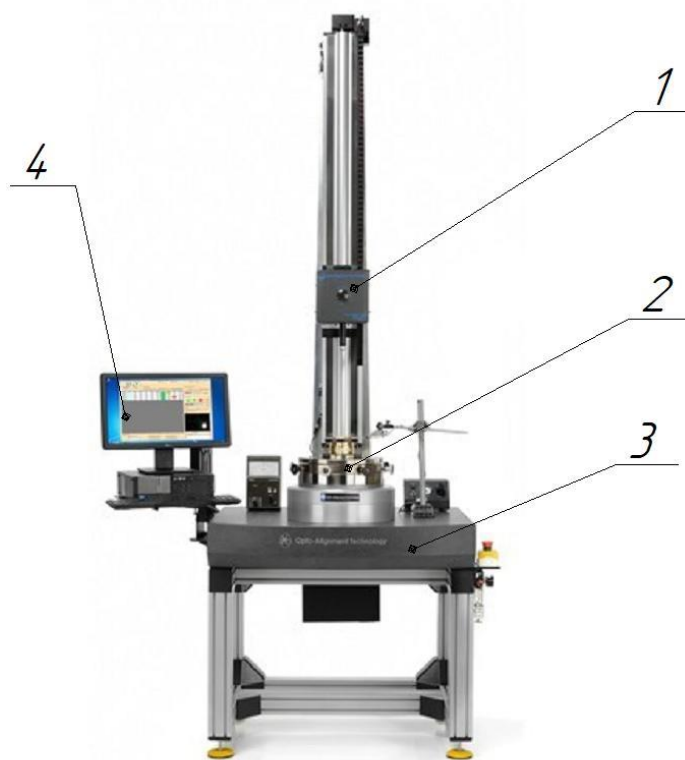
Таблица 4 – Основные характеристики приборов серии OTS

Параметр	Значение
Спектральный диапазон измерения, мкм	От 0,4 до 0,7
Источник излучения	Светодиод
Рабочая длина волны, мкм	Неизвестна
Пороговая чувствительность, мкм	1,0
Максимальный световой диаметр контролируемого объектива, мм	100
Диапазон радиусов контролируемых поверхностей, мм	От 0 до $\pm 1200$
Измеряемые параметры	Фокусное расстояние, фокальные отрезки, радиусы кривизны сферических поверхностей. Как опция: Погрешности центрирования поверхностей в одиночных линзах, склейках и собранных объективах; МПФ, геометрические параметры аноморфотных линз.

### 2.1.3 Приборы серии LAS-IR

Приборы серии LAS-IR (IR Laser Alignment Station) предназначены для контроля погрешностей центрирования линз и объективов, работающих в различных поддиапазонах инфракрасной области спектра. Как и приборы серии OptiCentric IR, данные приборы имеют в наличии дополнительную независимую измерительную головку (автоколлимационный микроскоп), работающую в видимой области спектра. Благодаря этому, каждый из приборов данной серии может быть использован для контроля погрешностей центрирования объективов как для инфракрасной, так и для видимой области спектра. Однако одновременный контроль оптических систем видимой и инфракрасной области спектра невозможен.

Общий вид прибора серии LAS-IR представлен на рисунке 36.



1 – автоколлимационный микроскоп; 2 – устройство позиционирования контролируемой детали (объектива); 3 – основание; 4 – управляющий ПК.

Рисунок 36 – Общий вид прибора серии LAS-IR.

Основные технические характеристики приборов серии LAS-IR приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Основные характеристики приборов серии LAS-IR

Параметр	Значение		
Спектральный диапазон измерения, мкм	0,4 – 0,7	3,5 – 4,8	8 – 12
Источник излучения	Лазерный диод	Лазер	CO <sub>2</sub> лазер
Рабочая длина волны, мкм	0,532 (0,650)	2,94	10,6
Пороговая чувствительность, мкм	1		
Максимальный световой диаметр контролируемого объектива, мм	250		
Диапазон радиусов контролируемых поверхностей, мм	От 2 до $\pm\infty$		
Измеряемые параметры	Погрешности центрирования поверхностей в одиночных линзах, склейках и собранных объективах		

Управление работой прибора и вычисление погрешностей центрирования осуществляется встроенным ПО CalcuLens, аналогичным по своим возможностям управляющему ПО в приборах серии OptiCentric IR или OTS.

#### 2.1.4 Прибор Point Source Microscope (PSM)

В наши дни приборы, реализующие автоколлимационный метод контроля погрешностей центрирования, продолжают успешно совершенствоваться и развиваться. В частности, в работе [77] дано описание процесса центрирования линз объектива с помощью прибора Point Source Microscope (PSM) [78], работающего в ближнем поддиапазоне инфракрасной области спектра (от 0,74 мкм до 1,1 мкм).

Данный прибор представляет собой малогабаритное устройство с размерами 100мм x 150мм x 30мм, которое может использоваться не только как автоколлимационный микроскоп или цифровой автоколлиматор, но и как

обычный инструментальный цифровой видеомикроскоп. Указанная особенность отличает данный прибор от приборов, рассмотренных ранее. Общий вид прибора представлен на рисунке 37.

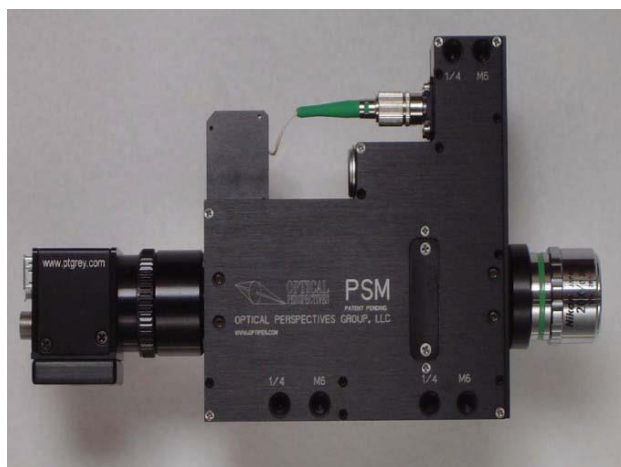


Рисунок 37 – Общий вид прибора PSM.

Оптическая принципиальная схема прибора PSM включает в себя точечный источник когерентного излучения, светоделитель, микрообъектив и ПЗС-матрицу для регистрации автоколлимационных изображений. Дополнительно в данную оптическую схему введена схема освещения по Келлеру, используемая для работы в режиме цифрового видеомикроскопа. В качестве микрообъектива в данном приборе могут быть использованы серийно выпускающиеся микрообъективы Nikon с бесконечной длиной тубуса.

Оптическая схема прибора PSM с обозначенным ходом лучей приведена на рисунке 38.

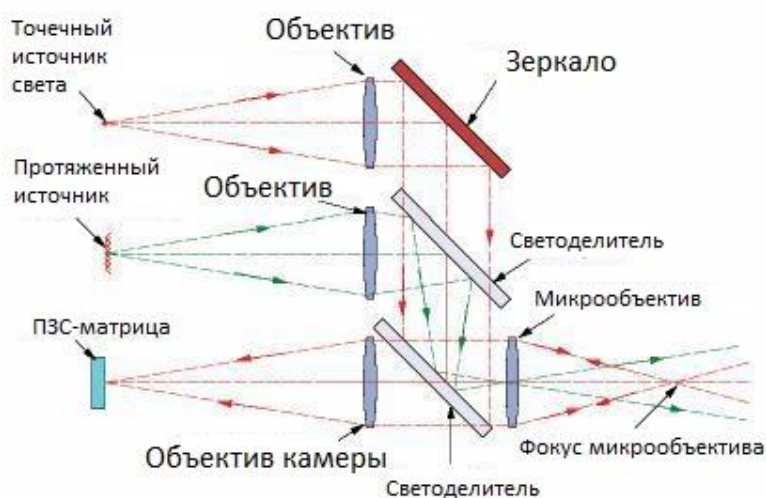


Рисунок 38 – Оптическая схема прибора PSM.

В качестве точечного источника когерентного излучения в данном приборе используется лазерный диод, излучение которого вводится в прибор с помощью оптического волокна. Таким образом, торец данного волокна играет роль светящегося тест-объекта – точечной диафрагмы. Протяженный источник в сочетании с конденсором обеспечивает равномерное освещение предметной плоскости. Работа обоих источников света контролируется управляющим ПО.

Приемником излучения служит монохромная 1/3" ПЗС-матрица 1024x760 пикселей с разрядностью 12 бит. В зависимости от используемого микрообъектива пороговая чувствительность при измерении погрешности центрирования для сферической поверхности может достигать 1 мкм, при угловых измерениях в режиме автоколлиматора – 5".

#### 2.1.5 Концепция современных приборов для контроля погрешностей центрирования оптических систем инфракрасной области спектра

Рассмотренные выше приборы являются результатом многих лет развития и совершенствования коллимационного и автоколлимационного методов контроля погрешностей центрирования. Высокая точность и одновременная простота выполнения измерений, достижимые с их помощью, являются одними из главных потребностей современного оптического приборостроения. На основании изучения принципиальных схем данных приборов, а также анализа их возможностей и технических характеристик можно прийти к следующим заключениям.

1. Основой наиболее распространенных в практике современного оптико-электронного приборостроения приборов для контроля погрешностей центрирования является автоколлимационный метод.

2. Рассмотренные приборы построены на модульной основе, за счет чего их функциональность может быть существенно расширена. При наличии дополнительных аппаратных и программных модулей возможны измерения



автоколлимационным методом не только погрешностей центрирования, но и геометрических параметров сферических (радиусы, толщины), аноморфотных и асферических линз, фокальных отрезков объективов.

3. Рассмотренные приборы имеют в своем составе одинаковые основные узлы: автоколлиматор с цифровой камерой для регистрации видеосигнала, фокусирующий объектив-ахромат, персональный компьютер с управляющим программным обеспечением.

4. Предельно достижимые значения пороговой чувствительности измерений обеспечиваются с помощью аппаратных средств (прецизионные линейные направляющие и устройства позиционирования и вращения контролируемых деталей (объективов)), а также алгоритмов работы управляющего программного обеспечения в сочетании с методами обработки цифровых изображений автоколлимационных бликов.

Кроме того, на основании проведенного анализа у рассмотренных приборов можно выделить следующие недостатки:

1. Широкая функциональность рассмотренных приборов достигается при помощи дополнительных аппаратных модулей и дополнений к программному обеспечению, приобретаемых отдельно. Как следствие цена прибора резко возрастает.

2. Не все приборы могут осуществлять контроль объективов, предназначенных для инфракрасной области спектра.

3. Рассмотренные приборы направлены в основном на решение метрологических задач, т.е. оценки качества уже готовых, собранных оптических систем. Они не могут быть использованы для коррекции погрешностей центрирования линз методом автоколлимационной вточки на токарных станках, распространенной в практике отечественного оптического приборостроения.

4. Среди рассмотренных приборов только приборы серии OptiCentric IR и LAS IR предусматривают контроль оптических систем видимого, а также ближнего, среднего и дальнего диапазонов инфракрасного излучения на одном устройстве. Однако данная возможность реализуется за счет наличия в этих

приборах двух независимых измерительных головок: одна для видимой области спектра, а другая – для инфракрасной области спектра.

Таким образом, разработка универсального автоколлимационного прибора для контроля погрешностей центрирования линз и оптических систем видимой и инфракрасной области спектра является актуальной задачей.

Сформулируем основные принципы проектирования данного прибора:

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 неё 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.

## 2.2 Лазерный Автоколлимационный Микроскоп (ЛАМ):

### устройство и принцип работы

Лазерный Автоколлимационный Микроскоп (далее – ЛАМ) представляет собой универсальный оптико-электронный прибор, предназначенный для визуального и автоматизированного контроля погрешностей центрирования, как отдельных линз, так и линз, входящих в состав многоэлементных объективов, работающих как в видимой области спектра, так и в ближнем, среднем и дальнем поддиапазонах инфракрасного излучения.

Оптическая схема ЛАМ представлена на рисунке 39.

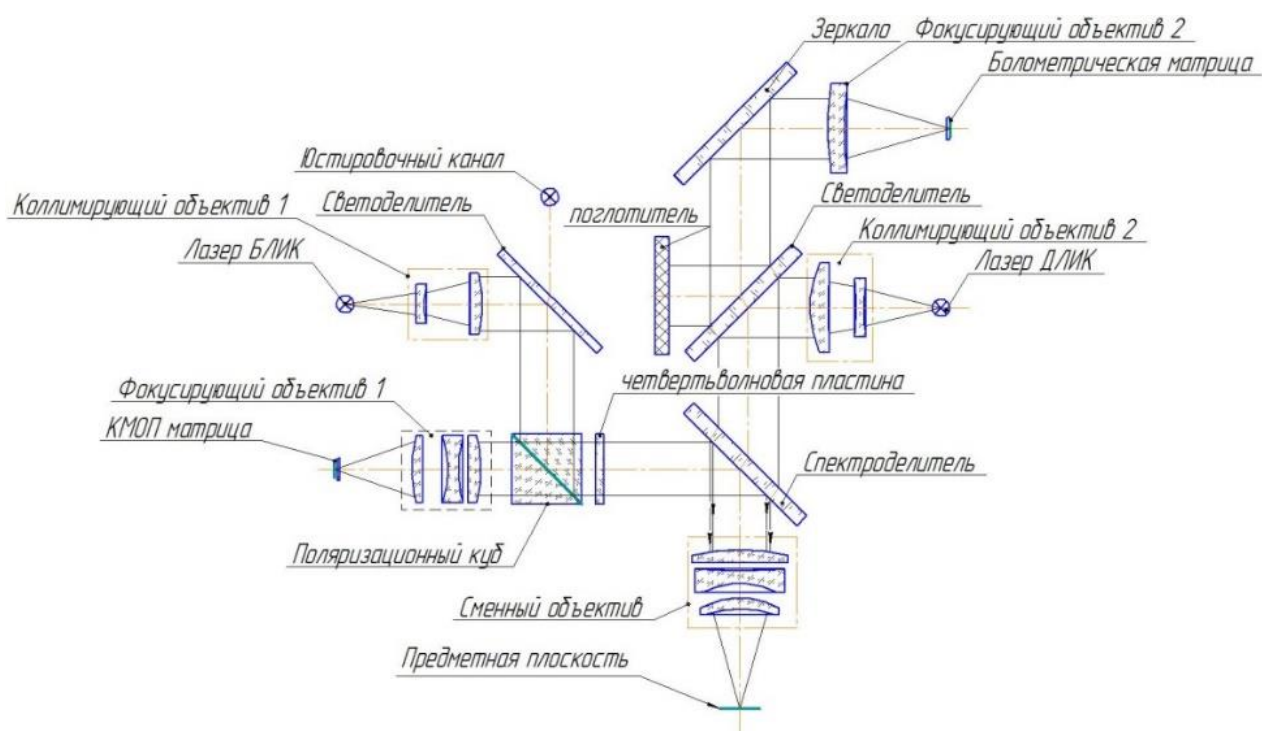


Рисунок 39 – Оптическая схема ЛАМ.

Принцип работы ЛАМ основан на автоколлимационном методе измерения угловых и линейных величин. Прибор комплектуется набором фокусирующих объективов, позволяющих проводить линейные измерения. ЛАМ включает в себя два измерительных канала и один юстировочный канал.

В первом измерительном канале излучение от лазерного модуля ДЛИК, пройдя коллимирующий объектив 2, попадает на светоделитель. Часть излучения, пройдя светоделитель, поглощается поглотителем излучения. Оставшаяся часть излучения отражается от светоделителя, проходит спектроделитель и направляется на контролируруемую плоскую поверхность. Отраженное от контролируемой поверхности излучение проходит в обратном ходе спектроделитель, светоделитель и попадает на зеркало. Отразившись от зеркала, излучение попадает в фокусирующий объектив 2, который формирует изображение автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов матричного фотоприемного устройства (МФПУ).

Во втором измерительном канале излучение от лазерного модуля БЛИК проходит коллимирующий объектив 1, далее отражается от светоделителя и попадает на поляризационный куб. Отразившись от внутренней грани куба,

излучение проходит четвертьволновую пластину, отражается от спектроделителя и направляется на контролируемую плоскую поверхность.

Отраженное от контролируемой поверхности излучение в обратном ходе отражается от спектроделителя, проходит через четвертьволновую пластину, поляризационный куб и попадает в фокусирующий объектив 1, который формирует автоколлимационное изображение плоскости чувствительных элементов МФПУ.

Юстировочный канал визуализирует общую оптическую ось устройства.

Если контролируемая поверхность перпендикулярна оптической оси прибора, то центр автоколлимационного изображения будет совпадать с центральным пикселом регистрирующей камеры.

При наклоне исследуемой поверхности на угол  $\alpha$  относительно оптической оси ЛАМ отраженные от нее лучи отклоняются на двойной угол  $2\alpha$  по отношению к первоначальному направлению и изображение на фоточувствительной поверхности регистрирующего фотоприемного устройства изменяет свое положение относительно центрального пиксела. Зная фокусное расстояние объектива регистрирующей камеры, по величине смещения изображения точки можно определить величину угла наклона  $\alpha$  исследуемой поверхности.

Для обеспечения возможности проведения линейных измерений, в частности измерения погрешности центрирования линз, ЛАМ комплектуется набором сменных объективов. При проведении линейных измерений устанавливается один из сменных фокусирующих объективов.

По сравнению с рассмотренными выше современными приборами для контроля погрешностей центрирования ЛАМ обладает следующими преимуществами:

1. Расширенный рабочий спектральный диапазон без изменения конструкции или замены отдельных узлов и элементов – от видимой области спектра до длинноволнового поддиапазона инфракрасной области спектра (до 14 мкм).

2. Малые габариты и вес.

3. Возможность установки на существующие центрировочные станки.

4. Поляризационное деление светового потока, что позволяет обеспечить контроль оптических систем с большим числом просветленных поверхностей без дополнительного коллиматора.

Благодаря своей оптической системе и используемым источникам излучения, разрабатываемый прибор является универсальным средством контроля качества сборки оптических систем, работающих как в видимом, так и в ближнем, среднем и дальнем поддиапазонах инфракрасного излучения.

По аналогии с современными цифровыми автоколлимационными приборами для контроля погрешностей центрирования, ЛАМ предполагает наличие персонального компьютера (ПК) с управляющим программным обеспечением (ПО). Это позволит осуществлять процесс измерения в автоматизированном режиме, а результаты измерений выводить в удобной для оператора форме на экран обычного монитора.

### 2.3 Габаритный расчет оптической схемы ЛАМ

Целью данного расчета является определение основных оптических характеристик измерительных каналов ЛАМ, а именно:

- фокусные расстояния сменных фокусирующих объективов;
- фокусные расстояния объективов, регистрирующих наблюдаемые автоколлимационные изображения в плоскости чувствительных элементов МФПУ;
- линейное поле зрения в предметной плоскости;
- пороговая чувствительность при измерении погрешностей центрирования сферических поверхностей контролируемого объектива.

### 2.3.1 Автоколлимационный метод контроля погрешностей центрирования с помощью ЛАМ

Для определения основных характеристик оптической схемы рассмотрим принцип формирования изображения автоколлимационной точки в измерительных каналах ЛАМ, представленный на рисунке 40.

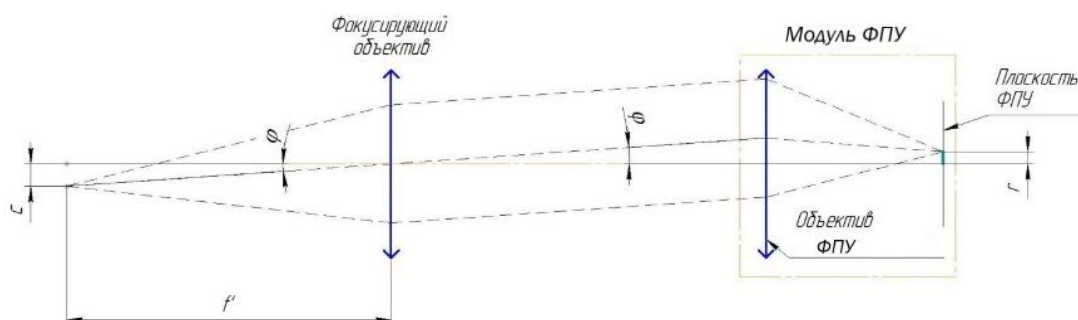


Рисунок 40 – Формирование изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов фотоприемного устройства (ФПУ).

ЛАМ, оснащенный сменным фокусирующим объективом, наводят на автоколлимационную точку контролируемой сферической поверхности. Для сферической поверхности автоколлимационной точкой является её центр кривизны либо его изображение, образованное оптическими поверхностями, расположенными между данной контролируемой поверхностью и сменным фокусирующим объективом ЛАМ. Таким образом, автоколлимационная точка находится в заднем (действительном) фокусе сменного фокусирующего объектива. Данное положение автоколлимационной точки называют также предфокальным. Отметим, что существует также и метод измерения с т.н. зафокальным положением автоколлимационной точки контролируемой поверхности. В данном методе измерения автоколлимационная точка расположена в заднем фокусе фокусирующего объектива, который является мнимым. Данный метод предпочтителен при контроле поверхностей с большим радиусом кривизны  $R > 1000$  мм. В обоих случаях погрешностью центрирования контролируемой поверхности является величина смещения  $s$  центра кривизны данной поверхности относительно оптической оси системы.

Величину поперечного смещения  $r$ , являющуюся изображением смещения центра кривизны  $c$  в плоскости чувствительных элементов матричного фотоприемного устройства (МФПУ) можно определить следующим образом:

$$r = 2c \cdot \beta_m \cdot \beta_{нов} = 2c \cdot \beta_{нов} \cdot \frac{f'_{об.ФПУ}}{f'_{ф.об}}, \quad (7)$$

где  $\beta_m = \frac{f'_{об.ФПУ}}{f'_{ф.об}}$  (8) – линейное увеличение измерительного канала ЛАМ;

$f'_{об.ФПУ}$  – фокусное расстояние объектива фотоприемного устройства;

$f'_{ф.об}$  – фокусное расстояние фокусирующего объектива;

$\beta_{нов}$  – линейное увеличение, даваемое преломляющими поверхностями между контролируемой поверхностью и ЛАМ.

Если осуществляется контроль погрешности центрирования поверхности, ближайшей к ЛАМ, то  $\beta_{нов} = 1$ . Если осуществляется контроль погрешности центрирования внутренней поверхности линзы, т.е. через слой оптического материала, то  $\beta_{нов} = 1/\gamma$ , где  $\gamma$  – расчетный коэффициент. В случае центрирования одиночных линз или склеенных линз данный коэффициент указан в таблице автоколлимационных точек на данную деталь при данном положении в центрирующем патроне станка. В случае контроля погрешностей центрирования поверхностей и элементов внутри объектива данный коэффициент рассчитывается по формулам, приведенным в Главе 4.

Множитель 2 перед величиной погрешности центрирования контролируемой поверхности обусловлен тем, что контроль производится в отраженном от контролируемой поверхности свете.

Тогда, при наличии у контролируемой поверхности погрешности центрирования  $c$ , изображение автоколлимационной точки будет описывать в плоскости чувствительных элементов МФПУ окружность диаметром  $d'$ :

$$d' = 2 \cdot r = 2 \cdot 2c \cdot \beta_{нов} \cdot \beta_m = d \cdot \beta_{нов} \cdot \beta_m, \quad (9)$$

где  $d = 4c$  – диаметр биения автоколлимационной точки в предметной плоскости ЛАМ, т.е. в фокальной плоскости фокусирующего объектива.

### 2.3.2 Выбор источников и приемников излучения

Для дальнейшего выполнения габаритного расчета необходимо выбрать источники излучения и определить параметры приемников излучения. Как было отмечено выше, в состав ЛАМ входят два измерительных канала и один юстировочный канал. В данных каналах в качестве источников излучения предлагается использовать лазерные модули, работающие на различных длинах волн. Рабочие длины волн обоих измерительных каналов были выбраны таким образом, чтобы обеспечить возможность контроля объективов, работающих во всех поддиапазонах инфракрасного излучения (NIR, SWIR, MWIR, LWIR), а также видимой области спектра.

Первый измерительный канал предназначен для контроля погрешностей центрирования линз, работающих в средневолновом (от 3 до 5 мкм – MWIR) и длинноволновом (от 8 до 14 мкм – LWIR) поддиапазонах инфракрасного излучения. Как правило, данные линзы выполнены из оптических материалов непрозрачных в видимой области спектра (см. рис. 41) – «тёмная оптика». Поэтому, первый измерительный канал ЛАМ далее по тексту будем называть «ИК-канал».

Лазерный модуль ИК-канала работает в длинноволновом ИК диапазоне  $\Delta\lambda = (8 - 14)$  мкм. В качестве приемника излучения в данном канале был выбран микроболометрический модуль, чувствительный в диапазоне  $\Delta\lambda = (8 - 14)$  мкм, с форматом 384x288 пикселей и размером пиксела  $a = 25$  мкм.

Второй измерительный канал предназначен для контроля погрешностей центрирования линз, работающих в видимой области спектра (от 0,38 до 0,74 мкм – VIS), а также ближнем (от 0,74 до 1,1 мкм – NIR) и коротковолновом (от 1,1 до 2,5 мкм – SWIR) поддиапазонах инфракрасного излучения. Как правило, такие линзы выполнены из оптических материалов, прозрачных в видимой области спектра (см. рис. 41) – «светлая оптика». В связи с



этим, второй измерительный канал ЛАМ далее по тексту будем называть «В-канал».

Лазерный модуль В-канала работает в ближнем поддиапазоне инфракрасного излучения  $\Delta\lambda = (0,74 - 1,1)$  мкм. Данный спектральный диапазон удобен тем, что, помимо кристаллических и поликристаллических материалов, в нем прозрачны все оптические бесцветные стекла. Это позволяет осуществлять контроль объективов, работающих не только ближнем и коротковолновом поддиапазонах инфракрасного излучения, но также и в видимой области спектра. В качестве приемника излучения в данном канале была выбрана цифровая телевизионная камера с КМОП-матрицей МТ9V032М. Эта матрица отличается повышенной чувствительностью в ближнем поддиапазоне инфракрасного излучения (до 1050 нм) и высоким соотношением сигнал-шум. Размер пиксела  $a = 6$  мкм, формат 752x480 пикселей.

Рассмотрев диаграмму прозрачности оптических материалов, применяемых в современном оптико-электронном приборостроении (см. рис. 41), легко видеть, что предложенная комбинация рабочих длин волн измерительных каналов является наиболее универсальной.

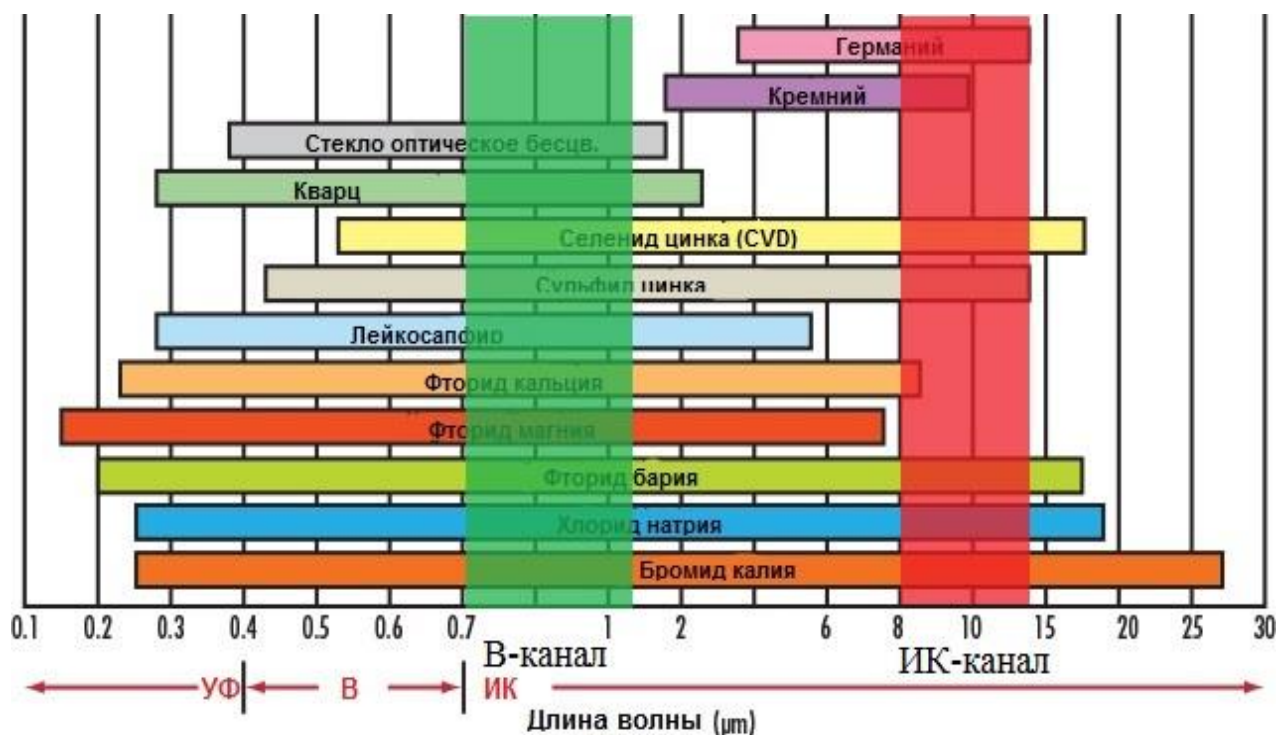


Рисунок 41 – Диаграмма прозрачности оптических материалов.

### 2.3.3 Определение фокусных расстояний сменных фокусирующих объективов

Определение фокусных расстояний сменных фокусирующих объективов позволит нам решить следующие задачи:

1. Определить диапазон радиусов контролируемых поверхностей.
2. Определить наибольшую длину контролируемых объективов.

В качестве прототипов для сменных фокусирующих объективов ЛАМ используем объективы-ахроматы модельного ряда фирмы Trioptics, применяемые в цифровых автоколлиматорах в т.ч. и в приборах серии OptiCentric IR той же фирмы. Характеристики данных объективов указаны в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики объективов-ахроматов фирмы Trioptics

Наименование объектива	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Диаметр входного зрачка $D$ , мм
АМТ 50-38	50	18
АМТ 100-38	100	30
АМТ 150-38	150	
АМТ 200-38	200	
АМТ 300-38	300	
АМТ 500-38	500	
АМТ 1000-115	1000	100

В ЛАМ было решено применить ряд сменных фокусирующих объективов с диапазоном фокусных расстояний от 50 мм до 1000 мм. Характеристики указанных объективов представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики объективов-ахроматов ЛАМ

Наименование объектива	Фокусное расстояние $f'$ , мм	Диаметр входного зрачка $D$ , мм
F50	50	30
F100	100	
F300	300	
F500	500	
F1000	1000	

Объективы с фокусными расстояниями  $f' < 50$  мм и  $f > 1000$  мм было решено не проектировать по технологическим соображениям. Кроме того, приведенные в таблице 7 объективы, как и их прототипы, приведенные в таблице 6, позволяют контролировать сферические поверхности с радиусом кривизны  $R_{кн} = (10 \div 1000)$  мм, т.е. наиболее распространенные.

Данные объективы предназначены для измерений с предфокальным положением автоколлимационной точки, т.е. должны иметь действительный задний фокус. Поэтому, можно сделать вывод о том, что наибольшая длина контролируемой оптической системы вдоль опорной оси не должна превышать величины заднего рабочего отрезка сменного объектива ЛАМ с наибольшим задним фокусным расстоянием  $f' = 1000$  мм.

#### 2.3.4 Определение фокусных расстояний регистрирующих объективов

Для определения фокусных расстояний объективов, регистрирующих автоколлимационные изображения в плоскостях чувствительных элементов МФПУ измерительных каналов, в качестве исходных данных были приняты следующие положения:

1. Будем считать, что все регистрирующие объективы и все фокусирующие объективы являются дифракционно ограниченными.

2. Будем считать, что изображение автоколлимационной точки, формируемое в каждом из измерительных каналов фокусирующим объективом и регистрирующим объективом, является близким к дифракционному изображению точки, т.е. за его размер можно принять диаметр диска Эйри.

3. Для определения координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов МФПУ методами цифровой обработки оптических сигналов необходимо, чтобы диск Эйри вписывался в сетку размером не менее  $2 \times 2$  чувствительных элемента.

Тогда для ИК-канала получим:

$$\delta_1 = 2 \cdot 25 \text{ мкм} = 50 \text{ мкм} \quad (10),$$

Для В-канала:

$$\delta_2 = 2 \cdot 6 \text{ мкм} = 12 \text{ мкм} \quad (11).$$

Основываясь на данных допущениях, определим относительные отверстия  $D/f'$  регистрирующих объективов. Для этого используем известное выражение для определения диаметра диска Эйри:

$$\delta = \frac{2,44 \cdot \lambda}{D} \cdot f', \quad (12)$$

где  $\delta$  – диаметр диска Эйри;

$\lambda$  – рабочая длина волны соответствующего измерительного канала;

$f'$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива;

$D$  – диаметр входного зрачка регистрирующего объектива.

Для ИК-канала наименьший диаметр диска Эйри при неизменном относительном отверстии  $D/f'$  регистрирующего объектива будет при наименьшей длине волны рабочего спектрального диапазона данного канала, т.е. при  $\lambda_1 = 8,0$  мкм. Тогда, используя равенство (10) и формулу (12), получим:

$$D_1 / f'_1 \leq \frac{2,44 \cdot \lambda_1}{\delta_1} = \frac{2,44 \cdot 8 \text{ мкм}}{50 \text{ мкм}} \approx 1:2,6 \approx 1:3 \quad (13)$$

Для расчета относительного отверстия  $D/f'$  регистрирующего объектива В-канала примем  $\lambda_2 = 1,0$  мкм, что близко к наименьшей длине волны. Кроме того для данного значения длины волны шире номенклатура лазерных диодных модулей, которые предполагается использовать в качестве источников излучения. Тогда, используя равенство (11) и формулу (12), получим:

$$D_2 / f'_2 \leq \frac{2,44 \cdot \lambda_2}{\delta_2} = \frac{2,44 \cdot 1,0 \text{ мкм}}{12 \text{ мкм}} \approx 1:4,9 \approx 1:5 \quad (14)$$

Поскольку регистрирующие объективы в обоих измерительных каналах работают с параллельным пучком лучей, формируемым фокусирующим объективом, для определения фокусных расстояний регистрирующих объективов нам достаточно установить для каждого из них рабочее значение диаметра входного зрачка. Исходя из технологических соображений и минимизации

габаритных размеров для регистрирующего объектива ИК-канала был установлен диаметр входного зрачка  $D_1 = 30$  мм, для регистрирующего объектива В-Канала соответственно  $D_2 = 20$  мм. Тогда из равенств (13) и (14) получим:

$$f'_1 = 30 \text{ мм} \cdot 3 = 90 \text{ мм}; f'_2 = 20 \text{ мм} \cdot 5 = 100 \text{ мм}$$

Приведя  $f'_1$  и  $f'_2$  к стандартным значениям фокусных расстояний, получим  $f'_1 = f'_2 = 100$  мм.

### 2.3.5 Оценка линейного поля зрения ЛАМ

Из формулы (8) следует, что линейное поле зрения в предметной плоскости ЛАМ будет изменяться при смене фокусирующих объективов. Предельная величина линейного поля зрения ЛАМ  $2y$  определяется наименьшим размером  $d' = 2y'$  оптической части МФПУ, используемого измерительного канала. Для расчетов используется именно наименьший размер, поскольку только в этом случае окружность диаметром  $d' = 2y'$ , описываемая изображением автоколлимационной точки, не выйдет за границу оптической части МФПУ.

В частности, для ИК-канала размеры оптической части микроболометрического модуля составляют 9,6 мм x 7,2 мм. Следовательно,  $d' = 2y' = 7,2$  мм. Тогда, приняв  $\beta_{нов} = 1$  и используя формулу (9), линейное поле зрения в предметной плоскости ЛАМ для ИК-канала можно найти по формуле (15):

$$2y = d = \frac{d'}{\beta_m} = \frac{2y'}{\beta_m} \quad (15)$$

С другой стороны, линейным полем зрения прибора в предметной плоскости определяется наибольшая измеряемая величина погрешности центрирования. Из формул (9) и (15) следует, что:

$$c_{\text{lim}} = \frac{d}{4} = \frac{1}{4} \cdot 2y \quad (16)$$

Результаты вычислений по формулам (15) и (16) приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Линейное поле зрения в предметной плоскости ЛАМ в зависимости от  $f'_{ф.об}$  для ИК-канала

Фокусирующий объектив	Фокусное расстояние фокусирующего объектива, $f'_{ф.об}$	Линейное поле зрения в пространстве предметов, $2y$	Наибольшая измеряемая величина погрешности центрирования, $C_{lim}$
F50	50 мм	3,6 мм	0,9 мм
F100	100 мм	7,2 мм	1,8 мм
F300	300 мм	21,6 мм	5,4 мм
F500	500 мм	36 мм	9,0 мм
F1000	1000 мм	72 мм	18,0 мм

Для В-канала размеры оптической части КМОП-матрицы МТ9V032М составляют 4,51 мм x 2,88 мм. Следовательно,  $d' = 2y' = 2,88$  мм. Тогда, используя формулы (15) и (16) при условии  $\beta_{нов} = 1$ , определим линейное поле зрения в предметной плоскости и наибольшую измеряемую величину погрешности центрирования для В-канала. Результаты проведенных вычислений приведены в таблице 9.

Таблица 9 – Линейное поля зрения в предметной плоскости ЛАМ в зависимости от  $f'_{ф.об}$  для В-канала

Фокусирующий объектив	Фокусное расстояние фокусирующего объектива, $f'_{ф.об}$	Линейное поле зрения в пространстве предметов, $2y$	Наибольшая измеряемая величина погрешности центрирования, $C_{lim}$
F50	50 мм	1,44 мм	0,36 мм
F100	100 мм	2,88 мм	0,72 мм
F300	300 мм	8,64 мм	2,16 мм
F500	500 мм	14,4 мм	3,6 мм
F1000	1000 мм	28,8 мм	7,2 мм

### 2.3.6 Оценка пороговой чувствительности определения погрешности центрирования

Для каждого из измерительных каналов определим пороговую чувствительность определения погрешности центрирования. Для данной оценки были использованы следующие допущения:

1. Пороговой чувствительностью будем считать наименьшую величину погрешности центрирования  $\Delta C$ , которую прибор способен зарегистрировать.
2. Вычисления будем производить для поверхности, ближайшей к прибору, т.е. полагая  $\beta_{нов} = 1$ .
3. Отсутствуют случайные погрешности, вызванные биением шпинделя устройства вращения и позиционирования, в котором закреплена контролируемая деталь.
4. Фокусирующие объективы и регистрирующие объективы будем считать дифракционно-ограниченными.

Тогда наименьшая величина погрешности центрирования  $\Delta C$ , регистрируемая прибором, будет определяться лишь применяемыми методами цифровой обработки изображения, а именно алгоритмами определения энергетического центра автоколлимационной точки. Принимая во внимание сделанное в п. 2.3.4 допущение о размере изображения автоколлимационной точки, а также возможности современных методов определения энергетического центра изображений, рассмотренных далее в Главе 3, можно предположить, что величина наименьшего регистрируемого смещения энергетического центра не будет превышать 1/4 размера чувствительного элемента МФПУ.

Таким образом, наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования  $\Delta C$  будет соответствовать наименьшему смещению изображения автоколлимационной точки  $r_{min}$ , детектируемому прибором.

Из формулы (9) имеем:

$$r_{min} = 2\Delta C \cdot \beta_{нов} \cdot \beta_m \quad (17)$$

Принимая во внимание допущение, что  $\beta_{нов} = 1$ , окончательно получаем:

$$\Delta C = \frac{r_{\min}}{2 \cdot \beta_m} = \frac{r_{\min}}{2} \cdot \frac{f'_{\text{ф.об}}}{f'_{\text{об.ФПУ}}} \quad (18)$$

Как было отмечено ранее, величина наименьшего смещения  $r_{\min}$  определяется возможностями применяемого в приборе метода определения энергетического центра автоколлимационной точки. Как будет показано далее в Главе 3 настоящей работы, данные методы могут детектировать смещения изображения, величина которых значительно меньше размера чувствительного элемента. Однако для предварительной оценки мы будем руководствоваться наименьшей точностью, а именно 1/4 размера чувствительного элемента МФПУ. Тогда будет справедливо равенство:

$$r_{\min} = \frac{1}{4} \cdot a, \quad (19)$$

где  $a$  – размер чувствительного элемента МФПУ измерительного канала.

Результаты расчетов наименьшей регистрируемой величины погрешности центрирования  $\Delta C$  по формуле (18) с учетом равенства (19) для ИК-канала и В-канала приведены в таблицах 10 и 11 соответственно.

Таблица 10 – Наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования  $\Delta C$  линз для ИК-канала

Фокусное расстояние фокусирующего объектива, $f'_{\text{ф.об}}$	Наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования $\Delta C$
50 мм	1,56 мкм (0,002мм)
100 мм	3,12 мкм (0,003 мм)
300 мм	9,38 мкм (0,009 мм)
500 мм	15,62 мкм (0,016 мм)
1000 мм	31,25 мкм (0,031 мм)



Таблица 11 – Наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования  $\Delta C$  линз для В-канала

Фокусное расстояние фокусирующего объектива, $f'_{ф.об}$	Наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования $\Delta C$
50 мм	0,4 мкм (0,0004мм)
100 мм	0,8 мкм (0,0008 мм)
300 мм	2,4 мкм (0,0024 мм)
500 мм	4,0 мкм (0,004 мм)
1000 мм	8,0 мкм (0,008 мм)

### 2.3.7 Общие выводы по характеристикам оптической схемы ЛАМ

На основании проведенных выше расчетов, можно сделать следующие заключения:

1. При выбранных значениях фокусных расстояний фокусирующих объективов, являющихся общими для ИК-канала и В-канала, а также фокусных расстояний регистрирующих объективов данных каналов, оптическая принципиальная схема ЛАМ обеспечивает характеристики, приведенные в таблице 12.

Таблица 12 – Характеристики оптической схемы ЛАМ

Фокусное расстояние фокусирующего объектива, $f'_{ф.об}$	Линейное поле зрения в предметной плоскости ЛАМ, $2y$		Наибольшая измеряемая величина погрешности центрирования, $c_{lim}$		Наименьшая регистрируемая величина погрешности центрирования $\Delta C$	
	Измерительный канал					
	ИК	В	ИК	В	ИК	В
50 мм	3,6 мм	1,44 мм	0,9 мм	0,36 мм	1,56 мкм	0,4 мкм
100 мм	7,2 мм	2,88 мм	1,8 мм	0,72 мм	3,12 мкм	0,8 мкм
300 мм	21,6 мм	8,64 мм	5,4 мм	2,16 мм	9,38 мкм	2,4 мкм
500 мм	36 мм	14,4 мм	9,0 мм	3,6 мм	15,62 мкм	4,0 мкм
1000 мм	72 мм	28,8 мм	18,0 мм	7,2 мм	31,25 мкм	8,0 мкм

2. Для увеличения точности измерения погрешностей центрирования в текущей схеме возможны следующие способы:

2.1 Уменьшение фокусного расстояния в фокусирующем объективе.

Однако объективы с  $f' < 50$  мм при условии высокой степени коррекции аберраций будут обладать достаточно сложной конструкцией и малым значением рабочего отрезка, что негативно скажется на технологичности измерений.

2.2 Увеличение фокусных расстояний регистрирующих объективов  $f'_1$  и  $f'_2$ .

Данный способ, как и предыдущий, приводит к уменьшению линейного поля зрения в предметной плоскости ЛАМ  $2u$  и, как следствие, к уменьшению диапазона измеряемых значений погрешности центрирования. Также увеличение  $f'_1$  и  $f'_2$  вызывает увеличение габаритов ЛАМ.

2.3 Разработка и исследование методов определения энергетического центра изображения автоколлимационной точки.

Данный метод является наиболее трудоемким в плане практической реализации, но, в тоже время, он позволяет избежать уменьшения линейного поля зрения, а также увеличения габаритов прибора. Исследованию и разработке алгоритмов определения энергетического центра изображения посвящено множество научных работ. Некоторые из данных алгоритмов рассмотрены в Главе 3 настоящей работы.

## ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

1. Современные приборы для контроля погрешностей центрирования оптических систем, работающих в инфракрасной области спектра, основаны на автоколлимационном методе контроля.

2. Применением единого метода контроля погрешностей центрирования, автоколлимационного, обусловлены общие принципы построения оптических схем современных приборов для контроля погрешностей центрирования. Принципиально данные приборы являются автоколлимационными микроскопами, функциональные возможности которых могут быть существенно расширены за счет аппаратного и программного обеспечения (ПО).

3. Практическая реализация возможности контроля погрешностей центрирования оптических систем как видимой области спектра, так и ближнего, среднего и дальнего поддиапазонов инфракрасного излучения одновременно, т.е. без замены отдельных узлов, все еще редко встречается на практике. Решение данной задачи остается актуальным.

4. Примером практической реализации контроля погрешностей центрирования оптических систем как видимой области спектра, так и ближнего, среднего и дальнего поддиапазонов инфракрасного излучения одновременно является оптическая схема Лазерного Автоколлимационного Микроскопа (ЛАМ).

5. Расчетные значения характеристик оптической схемы ЛАМ, представленные в таблице 12, соответствуют требованиям практики современного отечественного оптико-электронного приборостроения.

6. Главным способом повышения точности контроля погрешностей центрирования при условии сохранения минимальных габаритных размеров ЛАМ является совершенствование методов определения энергетического центра изображения автоколлимационной точки.

### ГЛАВА 3. Определение положения энергетического центра автоколлимационного изображения

Основным критерием качества контрольно-измерительных оптических приборов и, в частности, автоколлимационных приборов для контроля погрешностей центрирования, является их точность. В современных цифровых автоколлимационных приборах она может зависеть от множества различных факторов, таких как характеристики оптической системы, параметры анализаторов изображения, методы и алгоритмы цифровой обработки изображения и другие.

Как было отмечено в Главе 2, в качестве анализаторов оптического сигнала в разрабатываемом ЛАМ, применяются многоэлементные матричные фотоприёмные устройства (МФПУ). В этом случае, точность измерения погрешностей центрирования будет непосредственно зависеть от точности определения положения энергетических центров изображений автоколлимационных точек.

Среди факторов, влияющих на точность определения положения энергетического центра исследуемого изображения, можно выделить следующие [79]:

1. Размеры и топология расположения пикселей МФПУ.
2. Аберрации оптической системы, формирующей автоколлимационное изображение.
3. Распределение энергии в автоколлимационном изображении.
4. Шумы изображения, обусловленные эффектами светорассеяния и остаточного отражения от оптических поверхностей.
5. Собственные шумы МФПУ.
6. Используемые методы определения положения энергетического центра и др.

Данная глава посвящена исследованию методов определения положения энергетического центра автоколлимационного изображения. С помощью найденных координат энергетического центра автоколлимационного изображения и методик, рассматриваемых в Главе 4, может быть вычислена как погрешность взаимного центрирования поверхностей отдельных линз (децентрировка), так и погрешности центрирования линз и их групп в составе многокомпонентных объективов оптических систем инфракрасной области спектра.

Таким образом, выбор оптимального метода определения положения энергетического центра автоколлимационного изображения позволит решить следующие практические задачи:

1. Получить исходные данные для расчета величин погрешностей центрирования.
2. Обеспечить требуемую точность контроля погрешностей центрирования.
3. Предотвратить уменьшение линейного поля зрения, а также увеличение габаритов прибора.
4. Увеличить скорость выполнения контроля погрешностей центрирования собранных объективов в автоматизированном режиме.

Для дальнейшего рассмотрения будем исходить из положения о том, что, в общем случае, любое автоколлимационное изображение можно представить в виде распределения интенсивности  $I$  в пространственных координатах  $x$  и  $y$  плоскости чувствительных элементов МФПУ –  $I(x,y)$ . Соответственно, совокупность дискретных значений интенсивности  $I(x,y)$ , регистрируемых чувствительными элементами МФПУ, можно представить в виде матрицы размером  $M \times N$ , которую можно записать так:

$$I(x,y) = \begin{pmatrix} I(1;1) & \dots & I(1;N) \\ \vdots & & \vdots \\ I(M;1) & \dots & I(M;N) \end{pmatrix}, \quad (20)$$

где  $(x,y)$  – координаты текущего чувствительного элемента (пиксела) приемника излучения,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ .

Анализ литературы, посвященной проблемам определения положения энергетического центра изображения в виде пятна в плоскости чувствительных элементов МФПУ, показывает, что данная задача может быть решена в два основных этапа:

1. Предварительная обработка изображения.
2. Определение координат энергетического центра.

### 3.1 Предварительная обработка автоколлимационных изображений

Основная цель предварительной обработки – выделить из зарегистрированного МФПУ кадра (кадров) область интереса, содержащую анализируемое автоколлимационное изображение. Это необходимо для сокращения временных и вычислительных затрат. Структурная схема этапа предварительной обработки автоколлимационных изображений представлена на рисунке 42.



Рисунок 42 – Схема предварительной обработки автоколлимационных изображений.

Предварительная обработка изображения, в общем случае, сводится к последовательному выполнению трех основных операций: удаление шумов, пороговая фильтрация и сегментация.

Удаление шумов изображения может осуществляться с помощью применения различных пространственных фильтров (медианный, Гаусса и др.) [80], суперпозиции (усреднения или взаимного вычитания) нескольких кадров [81, 82] или иных специальных алгоритмов шумоподавления (*SUSAN*-алгоритм и др.) [83].

После выполнения операции удаления шумов осуществляется пороговая фильтрация по некоторому значению интенсивности  $I$  – пороговому уровню (порогу). Значение порога может быть задано эмпирически [80, 84] – глобальный (фиксированный) порог, либо вычислено аналитически [83] – адаптивный порог. После пороговой обработки переходят к сегментации изображения.

Цель процесса сегментации – выделение из исходного кадра области интереса, содержащей анализируемое автоколлимационное изображение. При этом можно выделить два основных подхода: с определением границ (контуров) и без определения границ (контуров) анализируемого изображения.

Для определения границ пятна могут быть использованы различные методы: функции геометрических моментов, в частности моменты Лежандра и Цернике [81, 83, 85], детекторы краев [83, 84, 86], преобразование Хафа [84, 87]. Отметим, что выделение границ анализируемого пятна может быть выполнено с помощью сочетания нескольких приведенных выше методов. В этом случае данная процедура осуществляется в два этапа: предварительное определение – с точностью до размера одного пикселя, и уточняющее – с субпиксельной точностью.

Зачастую сегментация с определением границ пятна используется в тех случаях, когда для последующего определения энергетического центра выделенного пятна предполагается использовать методы, использующие геометрическую аппроксимацию пятна, либо методы без аппроксимации формы пятна. Данные методы будут рассмотрены далее в разделе 3.2.

С другой стороны, осуществление сегментации возможно и без определения границ (контуров) пятна. Данный подход подразумевает создание области интереса вокруг некоторой точки или группы точек (пикселей), которые выбирают в качестве центра создаваемой области. Выбор может быть осуществлен с помощью оценки соответствия всех элементов изображения определенному уровню интенсивности [88], либо с помощью известной формулы энергетического центра масс [80]:

$$C_x = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M I(x, y) \cdot x}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M I(x, y)} \quad (21), \quad C_y = \frac{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M I(x, y) \cdot y}{\sum_{x=1}^N \sum_{y=1}^M I(x, y)} \quad (22)$$

где  $C_x$ ,  $C_y$  – координаты центральной точки (пикселя) создаваемой области интереса;

$M$ ,  $N$  – число строк и столбцов соответственно матрицы интенсивностей анализируемого кадра;

$I(x, y)$  – величина интенсивности (сигнала) в пикселе с текущими координатами  $(x; y)$ .

После выбора центральной точки вокруг неё формируется область интереса, представляющая собой квадрат. Размер стороны квадрата является фиксированным и устанавливается таким образом, чтобы гарантировать охват всего анализируемого пятна и окружающих его элементов фона [88]. С получением области интереса этап предварительной обработки изображения завершается. Все дальнейшие операции по определению энергетического центра изображения производятся уже в выделенной области интереса.

### 3.2 Методы определения координат энергетического центра изображения

Методы определения координат энергетического центра изображения прошли достаточно долгий путь развития и продолжают совершенствоваться и в наши дни. В настоящей работе невозможно описать все их разнообразие, однако,



мы попытаемся систематизировать те из них, которые наиболее часто используются на практике и могут быть адаптированы для анализа изображений автоколлимационных точек. На рисунке 43 представлена предлагаемая классификация данных методов.



Рисунок 43 – Классификация методов определения координат энергетического центра изображения.

Существующие методы определения координат энергетического центра изображения условно можно разделить на две категории: методы без аппроксимации формы анализируемого пятна и методы, основанные на аппроксимации формы анализируемого пятна.

### 3.2.1 Методы без аппроксимации формы анализируемого пятна

К первой категории относятся методы, которые позволяют вычислить координаты положения энергетического центра используя напрямую дискретные значения интенсивности  $I(x,y)$ , регистрируемые чувствительными элементами МФПУ. При этом не производится восстановление формы непрерывного

распределения оптического сигнала. Т.е. характер распределения интенсивности  $I$  как функции координат  $(x,y)$  плоскости чувствительных элементов МФПУ не учитывается [88].

Многие современные МФПУ позволяют непосредственно получать координаты пикселя или пикселей, которые регистрируют максимальное значение интенсивности  $I(x,y)$  – метод опроса МФПУ. Таким образом, можно сразу определить положение энергетического центра анализируемого пятна. Однако такой способ чаще всего применяют только для грубой оценки положения энергетического центра, либо для приблизительного определения центральных точек формирования областей интереса, о которых было сказано в разделе 3.1. Это объясняется тем, что при наличии дефектов в изображении (шумы, блики, засветки), а также несимметричной форме пятна, обусловленной аберрациями регистрирующей оптической системы, опрос МФПУ может дать координаты пикселей, регистрирующих паразитный, а не полезный сигнал.

К рассматриваемой группе относятся также широко известные метод центра масс и метод взвешенного центра масс. В методе центра масс координаты положения энергетического центра определяются по формулам (21) и (22), представленным выше.

Модификацией данного метода является метод взвешенного центра масс, в котором в формулы (21) и (22) вводятся дополнительные коэффициенты, определяемые весовой функцией  $W(x,y)$ , являющейся приближенной моделью распределения интенсивности  $I(x,y)$  [88, 89]:

$$C_x = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M W(x,y) \cdot I(x,y) \cdot x}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M W(x,y) \cdot I(x,y)} \quad (23), \quad C_y = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M W(x,y) \cdot I(x,y) \cdot y}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M W(x,y) \cdot I(x,y)} \quad (24)$$

где  $W(x,y)$  – весовая функция.

В качестве весовой функции наиболее часто используют двумерную функцию Гаусса:

$$W(x,y) = A \cdot e^{-\left[ \frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2} \right]}, \quad (25)$$

где  $(x;y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; M]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

$(x_0;y_0)$  – координаты максимума весовой функции;

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – параметры распределения, определяющие ширину функции Гаусса;

$A$  – амплитуда весовой функции.

На практике данное значение принимают равным максимальному значению величины интенсивности (сигнала)  $I(x,y)$  в исследуемом изображении.

Известно также использование в качестве весовой функции  $W(x,y)$  непосредственно совокупности дискретных значений интенсивности  $I(x,y)$  в исследуемом изображении. Тогда формулы (23) и (24) соответственно примут вид:

$$C_x = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M I^2(x,y) \cdot x}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M I^2(x,y)} \quad (26), \quad C_y = \frac{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M I^2(x,y) \cdot y}{\sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^M I^2(x,y)} \quad (27)$$

Как отмечено в [89], подобный подход оправдывает себя в случае слабого полезного сигнала  $I(x,y)$  и низком уровне шумов изображения.

Достоинствами данных методов являются высокая скорость вычислений, простота аппаратной и программной реализации, а также возможность определения координат энергетического центра анализируемого пятна с субпиксельной точностью вплоть до 0,05 – 0,1 размера пикселя [80, 90 - 93].

Основными недостатками являются [83, 93, 94]:

- высокие требования к однородности распределения интенсивности в анализируемом пятне;
- высокие требования к симметричности его формы, которая должна быть близка к идеальной;
- значительная систематическая ошибка, которая может возникать, когда размер анализируемого пятна близок к размеру чувствительного элемента МФПУ (для метода центра масс) и недостаточная коррекция данной ошибки (в методе взвешенного центра масс).

Данные недостатки обусловлены главным образом отличительной особенностью данных методов – отсутствием восстановления (аппроксимации) формы непрерывного распределения оптического сигнала  $I(x,y)$ .

### 3.2.2 Методы с аппроксимацией формы анализируемого пятна

Поиск путей преодоления указанных выше недостатков приводит ко второй группе методов определения координат энергетического центра. Данные методы основаны на аппроксимации реального распределения интенсивности  $I(x;y)$  в анализируемом пятне, представленного совокупностью дискретных значений, регистрируемых чувствительными элементами МФПУ. Аппроксимация осуществляется с помощью некоторой аналитической функции, которую можно считать моделью идеального распределения интенсивности  $I_0(x;y)$  в анализируемом пятне. С помощью данной аппроксимации для каждого пикселя изображения вычисляют разности между реальным  $I(x;y)$  и идеальным распределением интенсивности  $I_0(x;y)$ . Их совокупность для всех пикселей анализируемого изображения образует оценочную функцию вида:

$$\Delta = f(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N (\delta(x; y))^2}{M \cdot N}}, \quad (28)$$

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

Координаты минимума оценочной функции (28) принимают за искомые координаты положения энергетического центра изображения пятна.

Существует два ключевых фактора, определяющих эффективность рассматриваемых методов:

1. Выбор аппроксимирующей функции, используемой в качестве модели идеального распределения интенсивности  $I_0(x; y)$  в анализируемом пятне.
2. Выбор способа вычисления значений координат минимума оценочной функции (28).

### 3.2.2.1 Геометрическая аппроксимация

Одним из способов определения аппроксимирующей функции является геометрическая аппроксимация. В этом случае анализируемое пятно на плоскости чувствительных элементов МФПУ с предварительно определенной границей (контуром) аппроксимируется геометрической фигурой, контур которой представляет из себя простую замкнутую кривую второго порядка с известными параметрами (центр, радиус). Чаще всего применяется уравнение окружности или, что встречается реже, эллипса [80, 81, 83, 84, 92]:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 - r^2 = 0, \quad (29)$$

где  $(x; y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; M]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

$(x_0; y_0)$  – искомые координаты энергетического центра пятна;

$r$  – радиус аппроксимирующей окружности.

Точность определения координат энергетического центра в данном случае достигает 0,05 – 0,1 размера пикселя [92, 95].

### 3.2.2.2 Аппроксимация с помощью функции Гаусса

Альтернативный подход заключается в аппроксимации формы непрерывного распределения оптического сигнала  $I(x; y)$  – т.н. функциональная аппроксимация анализируемого пятна.

При решении различных задач систем технического зрения и оптических измерений, связанных с обработкой и анализом изображений, в качестве

аппроксимирующей функции  $I_0(x;y)$  наиболее часто применяется двумерная функция Гаусса [88, 90, 96-98]:

$$I_0(x, y) \approx g(x, y) = \frac{E}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} + \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right]}, \quad (30)$$

где  $(x;y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

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

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – параметры распределения, определяющие ширину функции Гаусса;

$E$  – суммарная энергия, регистрируемая МФПУ.

Очевидно, что данное представление полностью совпадает с выражением (25), в котором значение амплитуды выражено через суммарную энергию  $E$ , регистрируемую МФПУ, а также параметры распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ :

$$A = \frac{E}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \quad (31)$$

Известны также и более сложные варианты аппроксимации двумерной функцией Гаусса, в которую вводятся дополнительные параметры [100]:

$$I_0(x, y) \approx g(x, y) = \frac{E}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{(1-\rho)^2}} \cdot \exp\left\{\frac{-1}{2(1-\rho^2)} \left[ \left(\frac{x-x_0}{\sigma_x}\right)^2 - \frac{2\rho(x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x\sigma_y} + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y}\right)^2 \right]\right\}, \quad (32)$$

где параметры  $E$ ,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ ,  $(x; y)$ ,  $(x_0; y_0)$  имеют тот же смысл, что и в формуле (30), а параметр  $\rho$  – коэффициент корреляции, который подбирается экспериментально, если анализируемое пятно имеет искаженную форму, например, эллипс. Как правило, если анализируемое пятно симметрично и имеет форму близкую к кругу, то параметр  $\rho$  принимают равным нулю.

Характерной особенностью применения аппроксимации двумерной функцией Гаусса является зависимость точности определения координат энергетического центра анализируемого пятна от значений параметров распределения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  [100]. Можно выделить несколько подходов к определению подходящих значений параметров  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ :

1. Параметры  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , определяемые аналитически, например с помощью оптимизации методом наименьших квадратов (МНК) [94] или с помощью некоторого аналитического выражения [101].

2. Параметры  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$ , определяемые экспериментальным подбором [96, 102].

### 3.2.2.3 Аппроксимация функцией ошибок

Развитием функциональной аппроксимации с помощью функции Гаусса является предлагаемый в работе [88] метод аппроксимации анализируемого пятна с помощью обобщённой функции распределения ошибок:

$$I_0(x, y) \approx \tilde{F}(x, y) = \frac{A_0}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \cdot \exp\left(-\frac{|x-x_0|^{n_x}}{2\sigma_x^{n_x}}\right) \cdot \exp\left(-\frac{|y-y_0|^{n_y}}{2\sigma_y^{n_y}}\right), \quad (33)$$

где  $A_0$  – суммарная энергия, регистрируемая МФПУ, по аналогии с (30);

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

$\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – параметры распределения, определяющие ширину пятна по осям  $X$  и  $Y$  соответственно;

$n_x, n_y \in (0; \infty)$  – параметры внутренней формы анализируемого пятна.

Как отмечается в [88], за счет введения дополнительных параметров  $n_x$  и  $n_y$  и правильном определении их значений для каждого конкретного случая можно значительно снизить различие формы между реальным распределением интенсивности в анализируемом пятне  $I(x; y)$  и аппроксимирующим его идеальным распределением интенсивности  $I_0(x; y)$ . Это приводит к повышению точности определения искомым координат энергетического центра за счет снижения систематической ошибки.

Очевидным недостатком данного подхода является необходимость определения данных дополнительных параметров  $n_x, n_y$ .

### 3.2.2.4 Аппроксимация функцией рассеяния точки (ФРТ) идеальной оптической системы

Данный вид аппроксимации применим в случае, когда анализируемое пятно можно представить в качестве изображения бесконечно-удаленного точечного источника. Обычно используют непосредственно выражение для ФРТ оптической системы, регистрирующей анализируемое пятно, считая эту систему дифракционно ограниченной [78, 90]:

$$I_0(x, y) = \left( \frac{2J_1(m(r))}{m(r)} \right)^2, \quad (34)$$

где  $J_1(m(r))$  – функция Бесселя 1 рода;

$$m(r) = \frac{2\pi}{\lambda \cdot NA \cdot r} \quad \text{– аргумент функции Бесселя;}$$

$NA$  – числовая апертура регистрирующей оптической системы;

$\lambda$  – рабочая длина волны;

$r(x, y) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$  – радиус-вектор в плоскости чувствительных элементов МФПУ;

$(x; y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

$(x_0; y_0)$  – координаты максимума функции.

Известно также использование упрощенной модели ФРТ регистрирующей оптической системы, определяемой функцией *sinc* ( $x, y$ ) [103]:

$$I_0(x, y) = I_0 \cdot \left[ \frac{\sin(x - x_0)}{\omega_x x} \cdot \frac{\sin(y - y_0)}{\omega_y y} \right], \quad (35)$$

где  $(x; y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

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

$\omega_x, \omega_y$  – масштабирующие коэффициенты, регулирующие ширину данной аппроксимирующей функции для приближения к размеру пятна. Назначение данных параметров аналогично назначению параметров  $n_x, n_y$  при аппроксимации функцией ошибок, рассмотренной в п. 3.2.2.3.



### 3.3 Способы вычисления значений координат энергетического центра

Как было отмечено в п. 3.2.2, эффективность методов определения положения энергетического центра определяется не только выбором аппроксимирующей функции, но и выбором способа вычисления координат минимума оценочной функции (28). Данный вопрос представляет из себя один из основных вопросов теории решения задач оптимизации. В целом, задача оптимизации сводится к задаче поиска экстремума (в нашем случае – минимума) оценочной функции (28) с заданными ограничениями (в нашем случае – точность определения положения энергетического центра) [104]:

$$\Delta = f(x, y) = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N (\delta(x; y))^2}{M \cdot N}} \rightarrow \min \quad (36)$$

В настоящей работе мы коснемся только той части этой теории, которая поможет выбрать метод поиска минимума оценочной функции (28).

На рисунке 44 представлена возможная классификация способов вычисления значений координат энергетического центра.

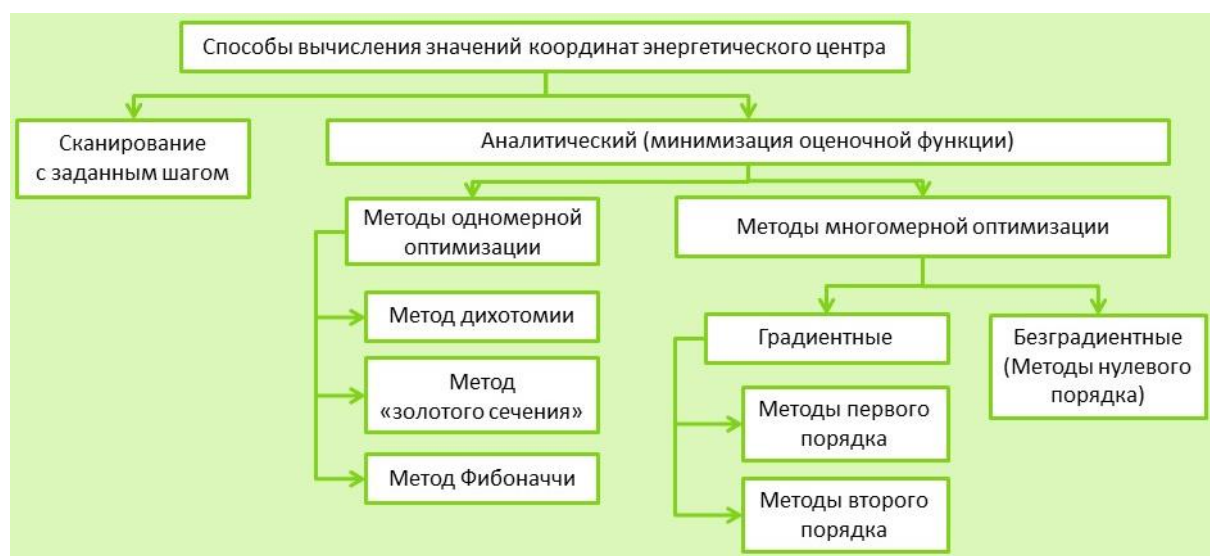


Рисунок 44 – Способы вычисления значений координат энергетического центра

Наиболее простым в реализации способом вычисления значений координат является последовательное сканирование анализируемого пятна

аппроксимирующей функцией. В этом случае задаются фиксированные шаги  $\Delta_x$  и  $\Delta_y$  изменения координат  $(x_0; y_0)$  – координат максимума аппроксимирующей функции. При совпадении координат  $(x_0; y_0)$  с точкой, являющейся энергетическим центром анализируемого пятна, оценочная функция (28) имеет минимум. Соответственно, полученные значения  $(x_0; y_0)$  являются искомыми значениями координат энергетического центра [90, 105].

Существенный недостаток данного метода заключается в объеме производимых вычислений. Если  $K$  – шаг изменения координат, то для матрицы анализируемого изображения размером  $M \times N$  может потребоваться  $(N \cdot M)/K$  итераций для получения искомым значений [90].

Аналитический способ вычисления заключается в применении к оценочной функции (28) различных методов оптимизации. При использовании для данной задачи методов одномерной оптимизации, таких как метод дихотомии, метод «золотого сечения», метод Фибоначчи, поиск минимума оценочной функции (28) осуществляется независимо для каждой из координатных осей  $X$  и  $Y$  [90], что и является основным недостатком данных методов.

Данного недостатка лишены методы многомерной оптимизации, которые можно условно разделить на градиентные и безградиентные. Безградиентные методы оптимизации – это методы нулевого порядка или прямого поиска. Эти методы используют информацию только о самой функции и не требуют сведений о её производных (градиентах) первого и второго порядков. Примерами методов нулевого порядка являются метод Хука-Дживса, метод Гаусса, симплексные методы, а также метод Пауэлла.

Градиентные методы, как следует из их названия, используют в своей работе информацию не только о самой минимизируемой функции, но и её производных (градиентах) первого и второго порядка. К данной группе методов относятся методы градиентного спуска (методы первого порядка), а также метод Ньютона (метод второго порядка) [106].

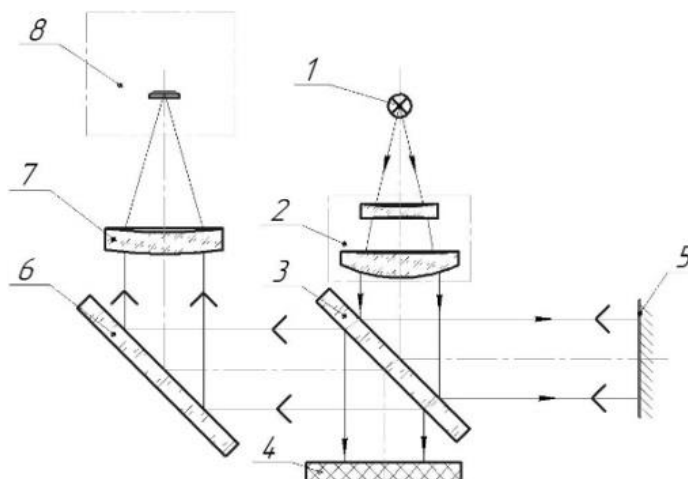
Таким образом, мы рассмотрели основные этапы решения задачи поиска энергетического центра изображения в виде пятна в плоскости чувствительных

элементов МФПУ. Далее рассмотрим применение описанных выше методов к определению координат энергетического центра изображения автоколлимационных точек в ЛАМ.

### 3.4 Анализ тестовых автоколлимационных изображений в ЛАМ

#### 3.4.1 Получение тестовых изображений автоколлимационных точек

Для получения тестовых изображений автоколлимационных точек и последующих исследований, связанных с определением положений их энергетических центров, были собраны две лабораторные установки, каждая из которых представляет собой действующий макет одного из измерительных каналов разрабатываемого прибора. Схема лабораторной установки, являющейся макетом ИК-канала ЛАМ, представлена на рисунке 45.



- 1 – Лазер; 2 – Коллимирующая оптическая система;  
 3 – Светоделительная пластина; 4 – Поглотитель излучения; 5 – Зеркало;  
 6 – Зеркало; 7 – Регистрирующий объектив; 8 – Микроболометрический модуль

Рисунок 45 – Макет ИК-канала ЛАМ.

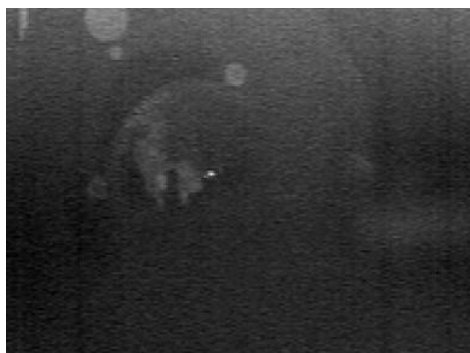
В представленном макете в качестве заявленного на рисунке 39 лазерного модуля ДЛИК был использован одномодовый газоразрядный  $\text{CO}_2$ -лазер 1 с рабочей длиной волны  $\lambda = 10,6$  мкм. Данный лазер использовался совместно с

коллимирующей оптической системой 2, предназначенной для уменьшения расходимости пучка излучения. На выходе из коллимирующей системы 2 пучок лучей, параллельных оптической оси, через светоделительную пластину 3 направляется на поверхность плоского зеркала 5. Оставшаяся часть излучения уходит в поглотитель излучения 4. Отразившись от зеркала 5, лучи в обратном ходе проходят светоделительную пластину 3 и, отразившись от наклонного зеркала 6, попадают в регистрирующий объектив 7, который формирует автоколлимационное изображение в плоскости фоточувствительных элементов неохлаждаемого микроболометрического модуля 8. Аналоговый сигнал с микроболометрического модуля 8 поступает через плату видеозахвата, выполняющую функцию аналого-цифрового преобразователя (АЦП), на персональный компьютер (ПК), где уже оцифрованное изображение автоколлимационной точки сохраняется в виде снимка в формате BMP в градациях серого. Основные характеристики узлов макета ИК-канала представлены в таблице 13.

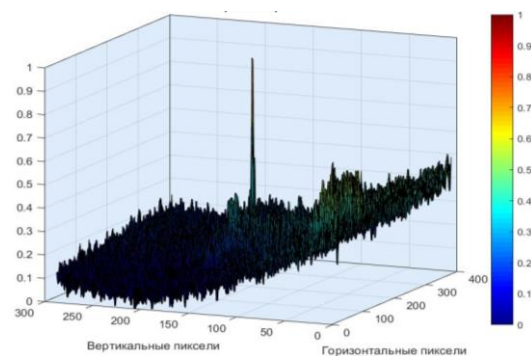
Таблица 13 – Основные характеристики узлов макета ИК-канала

Наименование параметра	Значение
Тип источника излучения	Одномодовый газоразрядный CO <sub>2</sub> -лазер
Длина волны излучения, мкм	10,6
Мощность излучения, мВт	100
Фокусное расстояние регистрирующего объектива, мм	100
Относительное отверстие регистрирующего объектива	1:3
Угловое поле регистрирующего объектива в пространстве предметов	4°
Тип фотоприёмного устройства	Неохлаждаемый микроболометр
Формат	384x288
Размер чувствительного элемента, мкм	25 x 25

Полученное в ходе эксперимента исходное цифровое изображение автоколлимационной точки для ИК-канала представлено на рисунке 46.



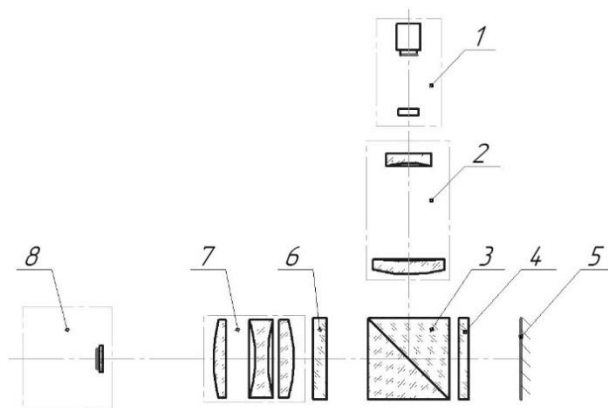
а) Снимок в градациях серого



б) Распределение яркости в снимке

Рисунок 46 – Исходное цифровое изображение автоколлимационной точки для ИК-канала.

Схема лабораторной установки, являющейся макетом В-канала ЛАМ, представлена на рисунке 47.



- 1 – Лазерный диодный модуль; 2 – Расширитель пучка;  
 3 – Поляризационный светоделительный куб;  
 4 – Фазовая пластинка  $\lambda/4$ ; 5 – Зеркало; 6 – Светофильтр;  
 7 – Регистрирующий объектив; 8 – КМОП-камера.

Рисунок 47 – Макет В-канала ЛАМ.

Параллельный оптической оси линейно поляризованный пучок лучей от лазерного диодного модуля 1, работающего в ближнем ИК поддиапазоне (NIR), направляется через расширитель пучка 2 на поляризационный светоделительный куб 3. Плоскость поляризации излучения лазерного модуля ориентирована перпендикулярно плоскости поляризатора куба, что обеспечивает максимальный коэффициент отражения от светоделительной грани. После отражения от светоделительной грани куба 3 излучение проходит через четвертьволновую фазовую пластинку 4 и попадает на поверхность зеркала 5. Отразившись от

зеркала 5, излучение в обратном ходе вторично проходит четвертьволновую фазовую пластинку 4. В результате двойного прохода через фазовую пластинку 4 излучение будет иметь линейную поляризацию, перпендикулярную первоначальному направлению и параллельную плоскости поляризатора светоделительного куба 3. Таким образом, для данного пучка лучей поляризационный светоделительный куб 3 будет работать на пропускание. Далее излучение проходит поглощающий светофильтр 6, убирающий паразитные засветки и блики, и попадает в регистрирующий объектив 7, который формирует автоколлимационное изображение в виде точки в плоскости чувствительных элементов КМОП-камеры 8. Цифровое изображение автоколлимационной точки сохраняется в виде снимка в формате BMP в градациях серого. Основные характеристики узлов макета В-канала представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Основные характеристики узлов макета В-канала

Наименование параметра	Значение
Тип источника излучения	Лазерный диодный модуль
Длина волны излучения, мкм	0,98
Мощность излучения, мВт	5
Фокусное расстояние регистрирующего объектива, мм	100
Относительное отверстие регистрирующего объектива	1:5
Угловое поле регистрирующего объектива в пространстве предметов	5°
Тип фотоприёмного устройства	Монохромная КМОП-матрица
Формат	752x480
Размер чувствительного элемента, мкм	6 x 6

В отличие от способов шумоподавления, описанных в п. 3.1 и применяемых к уже полученному для анализа изображению, в случае ЛАМ было принято решение дополнительно снизить влияние шумов и помех в виде бликов и переотражений лазерного излучения уже на этапе разработки оптической принципиальной схемы. Основная цель – получение автоколлимационного изображения с удобной для дальнейшего анализа экспозицией (один явно выраженный максимум, отсутствие вторичных изображений и бликов). Для этого в схему макета В-канала (см. рис. 47) была введена комбинация из

поляризационного куба 3 и фазовой пластинки 4, а также перед регистрирующим объективом 7 был установлен поглощающий светофильтр 6.

Комбинация куба 3 и пластинки 4 позволяет менять интенсивность излучения лазерного модуля 1, регистрируемую камерой 8 в соответствии с известным законом Малюса:

$$I'(x, y) = I_{\max}(x, y) \cdot \cos^2 \varphi, \quad (37)$$

где  $I'(x; y)$  – фактическая интенсивность излучения, регистрируемая камерой 8;

$I_{\max}(x; y)$  – максимальная интенсивность излучения лазерного модуля 1 на камере 8, без учета взаимной ориентации линейной поляризации пучка от лазерного модуля 1 и направлением поляризатора в кубе 3;

$\varphi$  – между направлением линейной поляризации пучка от лазерного модуля 1 и направлением поляризатора в кубе 3.

Изменение интенсивности излучения, регистрируемого камерой 8, в зависимости от угла поворота лазерного модуля 1, представлено на рисунке 48.

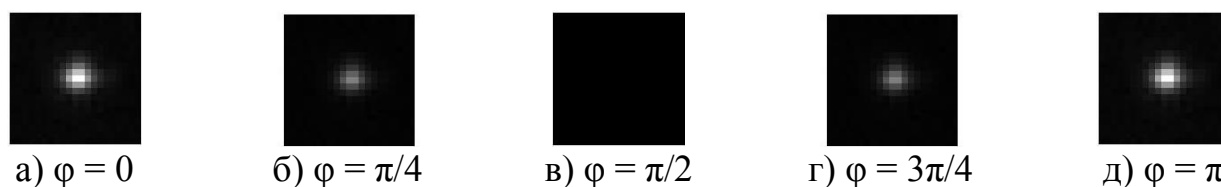


Рисунок 48 – Изменение мощности излучения в зависимости от угла поворота лазерного модуля.

Поглощающий светофильтр 6 был выбран подбором из нескольких образцов цветного оптического стекла ГОСТ 9411-91 толщиной  $t = 2$  мм, обеспечивающих наибольший показатель ослабления  $K(\lambda)$  для рабочей длины волны лазерного модуля 1  $\lambda = 0,98$  мкм. Подбор осуществлялся при максимальном пропускании поляризационного куба 3 ( $I'(x; y) = I_{\max}(x; y)$ , см. формулу (37)) и минимальных значениях чувствительности и времени накопления камеры 8 без изменения данных параметров в процессе подбора.

На рисунке 49 показано влияние светофильтров, выполненных из различных марок цветного стекла по ГОСТ 9411-91, на автоколлимационное изображение в В-канале.

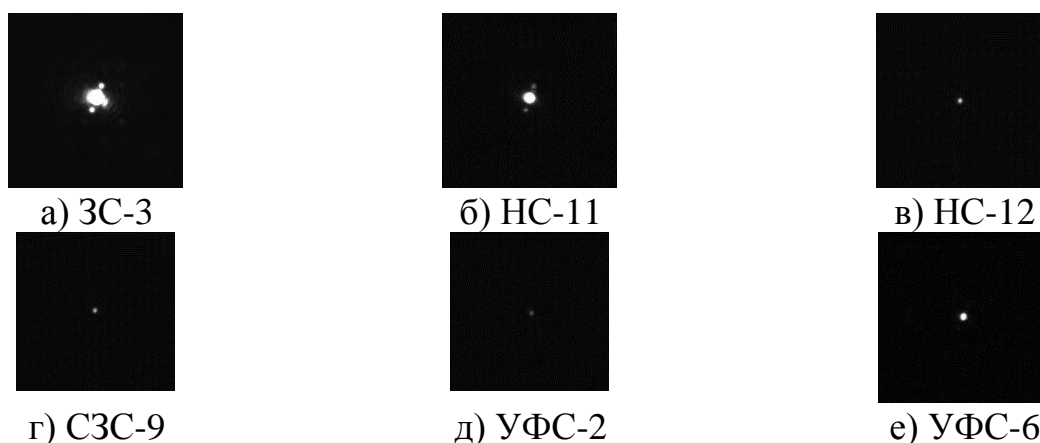
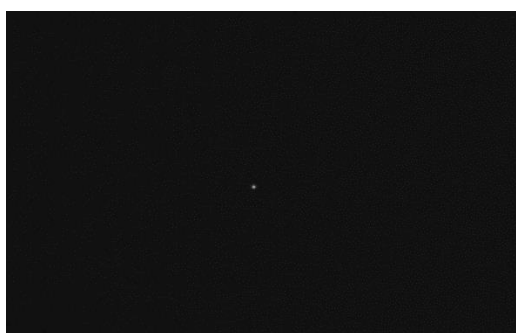


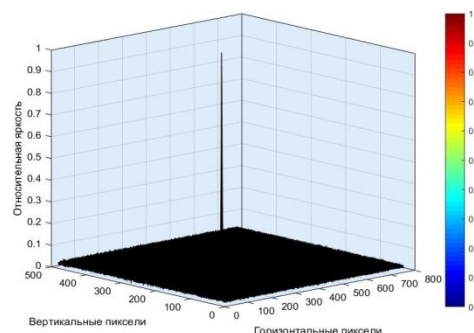
Рисунок 49 – Влияние различных светофильтров на автоколлимационное изображение в В-канале.

Как видно из рисунка 49, переэкспонирования не наблюдалось у пятна, полученного при использовании светофильтра из цветного оптического стекла марки УФС-2 ГОСТ 9411-91 толщиной  $t = 2$  мм.

Полученное в ходе эксперимента исходное цифровое изображение автоколлимационной точки для В-канала представлено на рисунке 50.



а) Снимок в градациях серого



б) Распределение яркости в снимке

Рисунок 50 – Исходное цифровое изображение автоколлимационной точки для В-канала.

### 3.4.2 Предварительная обработка тестовых изображений

Предварительная обработка тестового изображения для ИК-канала и тестового изображения для В-канала включала в себя только сегментацию без определения границ (контуров) пятна. Вокруг центральной точки, определённой методом опроса МФПУ, была выделена квадратная область размером



21x21 пиксель – по 10 пикселей в каждом из четырех ортогональных направлений от найденной центральной точки. На рисунке 51 представлена область интереса для ИК-канала, содержащая тестовое изображение автоколлимационной точки.

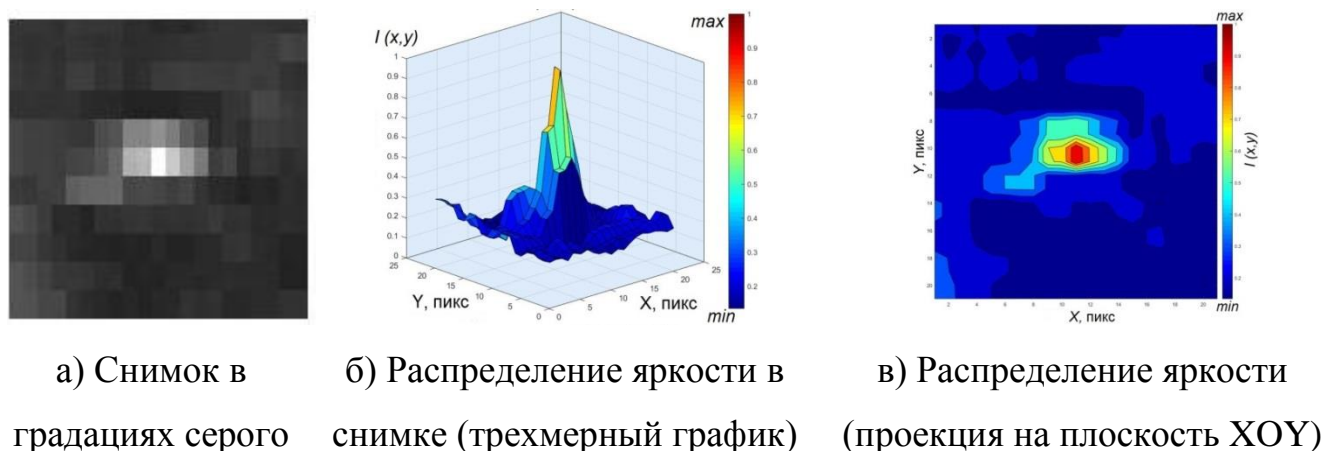


Рисунок 51 – Область интереса с тестовым изображением автоколлимационной точки для ИК-канала.

Область интереса для В-канала, содержащая тестовое изображение автоколлимационной точки, представлена на рисунке 52.

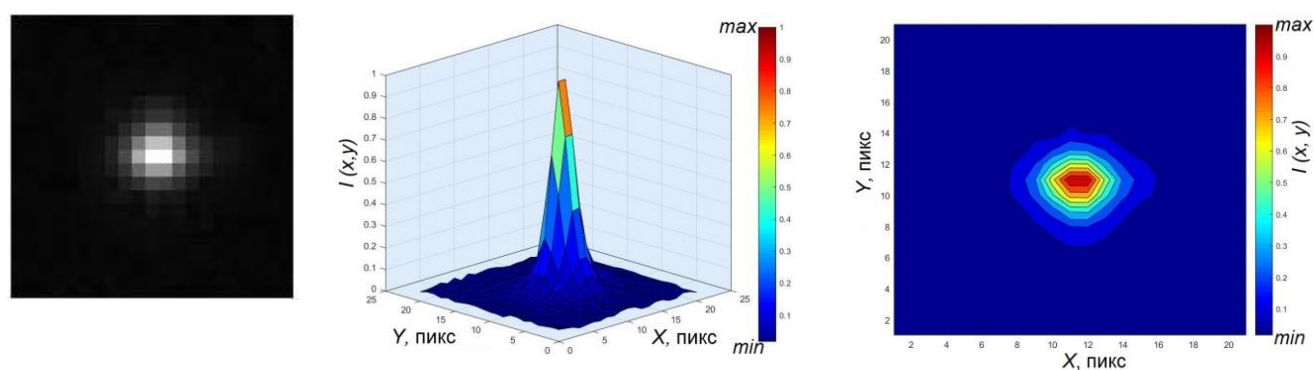


Рисунок 52 – Область интереса с тестовым изображением автоколлимационной точки для В-канала.

Полученные тестовые изображения автоколлимационных точек были в дальнейшем использованы для реализации в ЛАМ методов определения положения энергетического центра и моделирования их работы.

### 3.5 Определение положений энергетических центров автоколлимационных изображений в ЛАМ

#### 3.5.1 Условия проведения эксперимента

Моделирование работы методов определения положения энергетических центров автоколлимационных изображений, а также способов вычисления их координат осуществлялось в программном комплексе MATLAB.

В качестве анализируемых изображений использовались тестовые изображения автоколлимационных точек для ИК-канала и В-канала ЛАМ (см. рис. 51 и рис. 52 соответственно). Распределение интенсивности в каждом из анализируемых изображений обозначено как  $I(x;y)$ .

Поскольку в каждом из данных тестовых изображений координаты энергетического центра заранее неизвестны, то для проверки результатов тестируемых методов было принято решение ввести дополнительное контрольное тестовое изображение, в котором точные координаты энергетического центра заранее определены. Данное изображение представляет собой модель автоколлимационной точки, заданную с помощью выражения для функции рассеяния точки регистрирующего объектива В-канала ЛАМ, считая его дифракционно-ограниченным [107, 108]:

$$I(x, y) = \left[ \frac{2J_1(v)}{v} \right]^2 \quad (38)$$

Аргумент  $v$  в выражении (38) определяется соотношением:

$$v = \frac{2\pi\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{\lambda \cdot \frac{D}{2}} = \frac{4\pi\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{\lambda \cdot D \cdot f'}, \quad (39)$$

где  $(x_0; y_0)$  – координаты энергетического центра, которые мы зададим произвольно и которые должны быть найдены тестируемыми методами;

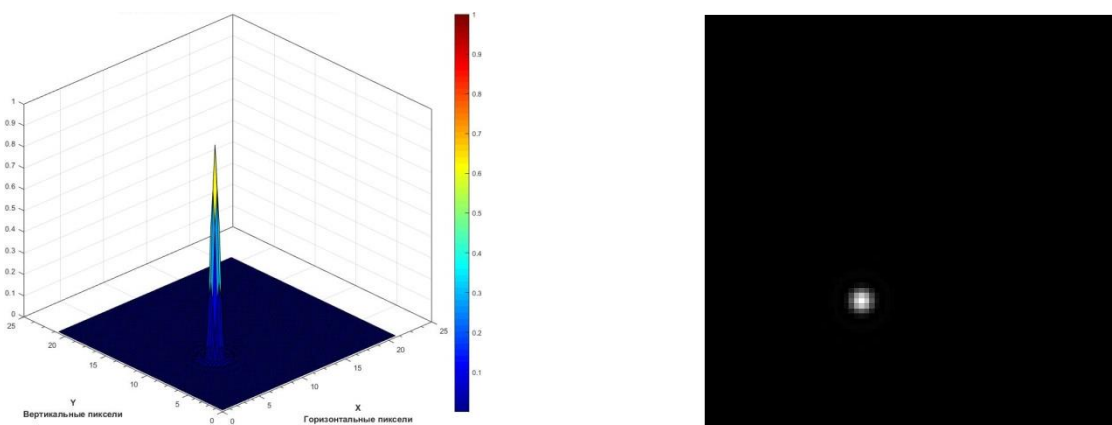
$(x; y)$  – координаты текущего пиксела изображения,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

$\lambda$  – длина волны источника излучения – лазерного модуля 1 (см. рис. 47);

$D$  – диаметр входного зрачка регистрирующего объектива 7 (см. рис. 47);

$f'$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива 7 (см. рис. 47);

Подобный подход позволяет аналитически задать точные координаты энергетического центра изображения и, используя их в качестве истинных, сравнить с ними результаты работы исследуемых методов. В проведенных экспериментах энергетический центр контрольного тестового изображения был помещен в точку с координатами (7,25; 8,50). Размер данного изображения идентичен размерам тестовых изображений ИК-канала и В-канала – 21x21 пиксель. Общий вид контрольного тестового изображения представлен на рисунке 53.



а) График распределения интенсивности  $I(x,y)$       б) Визуализация в виде снимка

Рисунок 53 – Контрольное тестовое изображение автоколлимационной точки.

Отметим, что принципиально не имеет значения, параметры какого канала будут использованы для создания контрольного тестового изображения.

### 3.5.2 Реализация определения положения энергетического центра автоколлимационного изображения

Определение положения энергетического центра изображения автоколлимационной точки в ЛАМ было реализовано с помощью методов,

основанных на функциональной аппроксимации формы пятна, которые были рассмотрены в п. 3.2.2.

Оценочная функция была задана в виде, соответствующем формуле (28), где из знаменателя было убрано произведение размерностей матрицы анализируемого изображения –  $M \times N$ :

$$\Delta = f(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^{M=21} \sum_{j=1}^{N=21} (\delta(x; y))^2} \quad (40)$$

Исключение произведения  $M \times N$  обусловлено упрощением дальнейших вычислений при выполнении методов оптимизации, используемых для вычисления значений искомым координат.

Для описания идеального распределения интенсивности в изображении автоколлимационной точки  $I_0(x; y)$  была использована двумерная функция Гаусса. В отличие от непосредственного описания идеального распределения интенсивности в изображении точки через выражение для функции рассеяния точки (ФРТ), описанного в п. 3.2.2.3, применение функции Гаусса позволяет значительно упростить вычисления и их программную реализацию, что приводит к повышению скорости измерений.

В ходе проведенных экспериментов была использована двумерная функция Гаусса, выраженная непосредственно через полуширину своего центрального максимума:

$$I_0(x, y) \approx g(x, y) = e^{-\left[ \frac{4 \cdot \ln(2) \cdot (x-x_0)^2}{w_x^2} + \frac{4 \cdot \ln(2) \cdot (y-y_0)^2}{w_y^2} \right]}, \quad (41)$$

где  $(x; y)$  – координаты текущего пикселя,  $x \in [1; N]$ ,  $y \in [1; M]$ ;

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

$w_x$  и  $w_y$  – значения полуширины центрального максимума функции  $g(x, y)$  по осям  $X$  и  $Y$  соответственно.

В то же время, в отличие от приведенных в п. 3.2.2.2 методов, для определения значений параметров полуширины  $w_x$  и  $w_y$  было использовано выражение для функции рассеяния точки идеальной оптической системы.

Поскольку в ЛАМ в качестве тест-объекта используются точечные источники излучения, а также считая регистрирующие объективы ЛАМ дифракционно-ограниченными, полученные изображения автоколлимационных точек можно считать близкими к идеальному дифракционному изображению точки. Поэтому, в формуле (41) можно полагать:

$$w_x = w_y = w \quad (42)$$

Поскольку данный параметр представляет собой полуширину центрального максимума, определим его через выражение для радиуса центральной части дифракционного изображения точки, даваемого идеальной оптической системой, – диска Эйри:

$$w_x = w_y = w = \frac{1.22 \cdot \lambda}{D} \cdot f' \cdot \frac{1}{a}, \quad (43)$$

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), используемого для регистрации автоколлимационного изображения.

Множитель  $1/a$  был введен в выражение (43) для приведения единиц измерения к долям размера пикселя, поскольку координаты в выражении (41) и искомые координаты положения энергетического центра автоколлимационного изображения выражены в пикселях.

Таким образом, подставляя в (43) параметры нужного регистрирующего объектива из таблиц 14 и 15, из выражения (41) мы будем получать модель идеального распределения интенсивности в изображении автоколлимационной точки  $I_0(x; y)$  для ИК-канала и для В-канала соответственно. Общий вид данной модели представлен на рисунке 54.

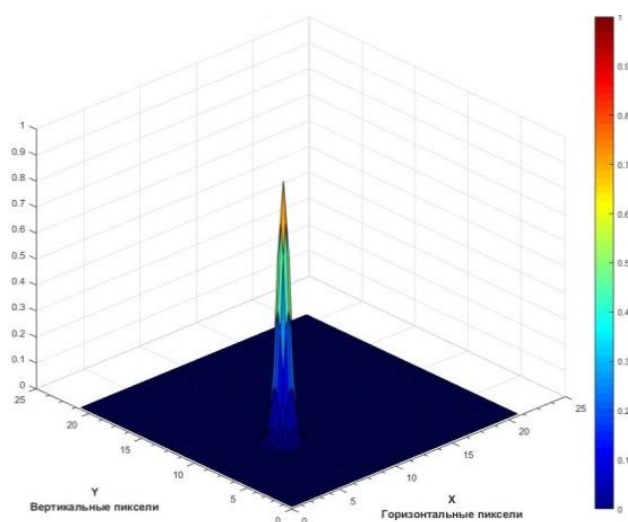
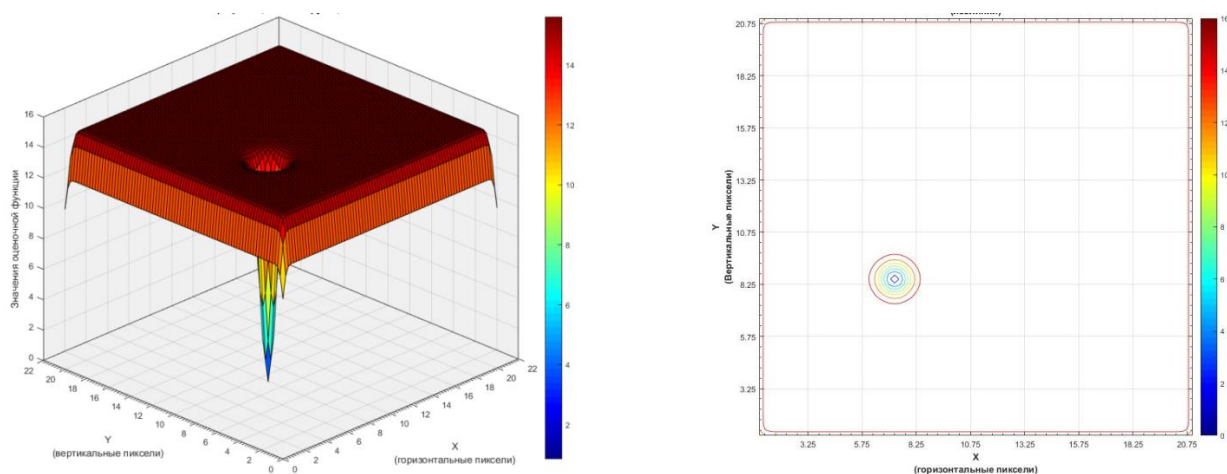


Рисунок 54 – Модель идеального распределения интенсивности –  
двумерная функция Гаусса.

Общий вид оценочной функции, определённой по формуле (40) при заданных контрольном тестовом изображении автоколлимационной точки (см. рис. 53, формулы (38) и (39)) и модели идеального распределения интенсивности (см. рис. 54, формулы (41) и (43)), представлен на рисунке 55.

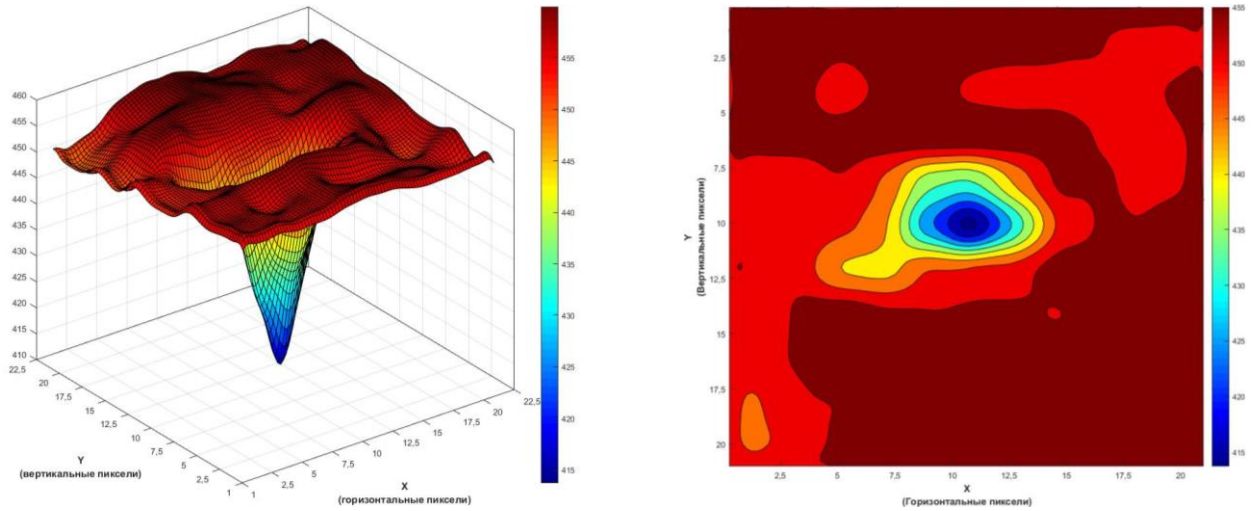


а) Трёхмерное представление

б) Проекция на плоскость  $XOY$

Рисунок 55 – Оценочная функция для случая контрольного тестового изображения.

Общий вид оценочной функции, определённой по формуле (40) при имеющемся тестовом изображении ИК-канала (см. рис. 51) и заданной модели идеального распределения интенсивности (см. рис. 54, формулы (41) и (43)), представлен на рисунке 56.

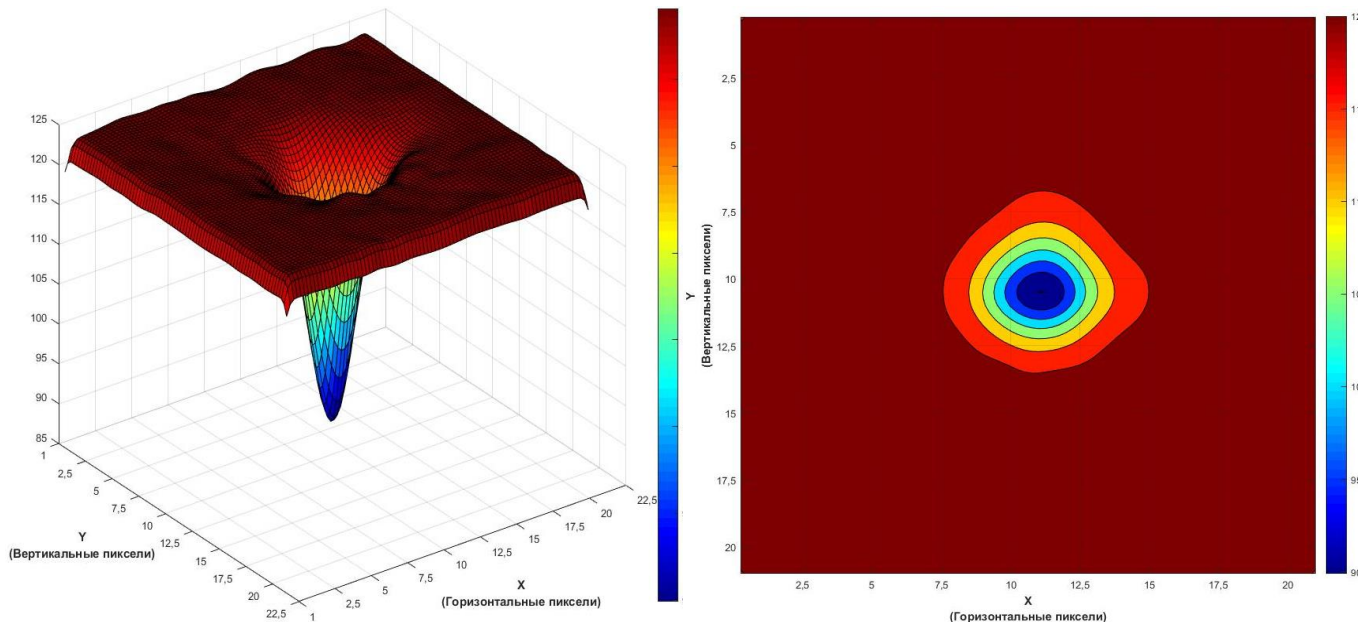


а) Трёхмерное представление

б) Проекция на плоскость  $XOY$ 

Рисунок 56 – Оценочная функция для случая тестового изображения ИК-канала.

Общий вид оценочной функции, определённой по формуле (40) при имеющемся тестовом изображении В-канала (см. рис. 52) и заданной модели идеального распределения интенсивности (см. рис. 54, формулы (41) и (43)), представлен на рисунке 57.



а) Трёхмерное представление

б) Проекция на плоскость  $XOY$ 

Рисунок 57 – Оценочная функция для случая тестового изображения В-канала.

Как видно из рисунков 55 – 57, график оценочной функции для всех тестовых изображений представляет собой поверхность, имеющую одну

выраженную «впадину», соответствующую минимальному значению данной функции. Точка минимума – точка, соответствующая искомому положению энергетического центра, координаты которой нужно вычислить.

### 3.5.3. Вычисление значений координат энергетического центра

Для вычисления координат были использованы методы многомерной оптимизации. В частности, были рассмотрены 2 метода: градиентный – метод наискорейшего спуска (метод первого порядка) и один из симплексных методов – метод Нелдера-Мида.

#### 3.5.3.1 Применение метода наискорейшего спуска

Как было отмечено в п. 3.3, градиентные методы используют в своей работе производные оценочной функции для определения направления ее убывания или возрастания. В данной работе для решения задачи поиска минимума оценочной функции (40) был выбран метод наискорейшего спуска. Данный метод реализует итерационную процедуру движения к минимуму из произвольно выбранной точки начального приближения  $(x_0; y_0)$  в направлении наиболее сильного уменьшения оценочной функции  $f(x, y)$ , определенном в окрестности текущего значения её аргумента [108, 119]. Такое направление противоположно направлению, задаваемого вектором градиента  $\nabla f(\vec{u})$  оценочной функции  $f(\vec{u}) = f(x, y)$ :

$$\nabla f(\vec{u}) = \nabla f(x, y) = \left[ \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right]^T \quad (44)$$



Общая формула для нахождения значения векторного аргумента  $\vec{u} = [x, y]^T$  функции  $f(\vec{u}) = f(x, y)$  на каждой итерации метода наискорейшего спуска выглядит следующим образом:

$$\vec{u}^{(k+1)} = \vec{u}^{(k)} + |\lambda^{(k)}| \cdot \vec{s}^{(k)}, \quad (45)$$

где  $\vec{u}^{(k+1)}$  – значение векторного аргумента на шаге  $k+1$ ;

$\vec{u}^{(k)}$  – значение векторного аргумента на предыдущем шаге  $k$ ;

$\vec{s}^{(k)}$  – вектор единичной длины в направлении антиградиента  $-\nabla f(\vec{u})$  функции  $f(\vec{u}) = f(x, y)$  в точке  $\vec{u}^{(k)}$ .

Формула для единичного вектора  $\vec{s}^{(k)}$  имеет вид:

$$\vec{s}^{(k)} = -\frac{\nabla f(\vec{u}^{(k)})}{\|\nabla f(\vec{u}^{(k)})\|}, \quad (46)$$

где  $\|\nabla f(\vec{u}^{(k)})\| = \sqrt{(\partial f(\vec{u}^{(k)}) / \partial x)^2 + (\partial f(\vec{u}^{(k)}) / \partial y)^2}$  – модуль вектора градиента;

$\lambda^{(k)}$  – число векторов единичной длины, которое укладывается в направлении антиградиента  $-\nabla f(\vec{u})$  при совершении  $(k+1)$ -го шага.

Таким образом,  $\lambda^{(k)}$  представляет собой шаг метода наискорейшего спуска. Формула для определения шага  $\lambda^{(k)}$  имеет вид:

$$\lambda^{(k)} = -\frac{[\nabla f(\vec{u}^{(k)})]^T \cdot \vec{s}^{(k)}}{[\vec{s}^{(k)}]^T \cdot \nabla^2 f(\vec{u}^{(k)}) \cdot \vec{s}^{(k)}}, \quad (47)$$

где  $[\nabla f(\vec{u}^{(k)})]^T$  – транспонированный вектор градиента оценочной функции  $f(\vec{u}) = f(x, y)$  в точке векторного аргумента  $\vec{u}^{(k)}$ ;

$[\vec{s}^{(k)}]^T$  – транспонированный вектор единичной длины;

$\nabla^2 f(\vec{u}^{(k)}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f(\vec{u}^{(k)})}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 f(\vec{u}^{(k)})}{\partial x \partial y} \\ \frac{\partial^2 f(\vec{u}^{(k)})}{\partial y \partial x} & \frac{\partial^2 f(\vec{u}^{(k)})}{\partial y^2} \end{pmatrix}$  – матрица вторых производных, вычисляемая

в точке  $\vec{u}^{(k)}$ .

Последовательность операций, реализующая в системе MATLAB применение метода наискорейшего спуска для вычисления координат

энергетических центров тестовых автоколлимационных изображений, представлена ниже.

Шаг 1. Исходные тестовые изображения загружаются в среду MATLAB.

Шаг 2. Задается точка начального приближения  $\vec{u}^{(0)} = [x_0^{(0)}; y_0^{(0)}]^T = [6,0; 7,0]^T$ .

Координаты данной точки были заданы произвольно. Однако они могут быть получены с помощью метода энергетического центра масс по формулам (21) и (22), приведенным в п. 3.1.

Шаг 3. Задается условие останова итерационной процедуры  $\|\nabla f(\vec{u}^{(k)})\| < 1 \cdot 10^{-5}$ .

Для упрощения отладки и процесса тестирования описываемого метода, а также снижения вычислительной нагрузки было установлено дополнительное условие останова в виде максимального числа выполненных итераций:  $k \leq k_{max} = 100$ .

Шаг 4. По формуле (40) составляется оценочная функция  $\Delta = f(x, y)$ .

Шаг 5. С помощью формул (44) – (47) осуществляется итерационный процесс вычисления координат минимума оценочной функции  $(x_0; y_0)$ .

Результаты вычисления координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для контрольного тестового изображения и тестовых изображений ИК-канала и В-канала представлены в таблицах 15 и 16 соответственно.

Таблица 15 – Результаты вычисления координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для контрольного тестового изображения

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

Таблица 16 – Результаты вычисления координат энергетического центра методом наискорейшего спуска для тестовых изображений ИК-канала и В-канала

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

Из таблицы 15 видно, что для контрольного тестового изображения вычисленные значения координат совпали с истинными. Следовательно, можно

говорить о том, что описанная выше процедура применения метода наискорейшего спуска работает верно.

### 3.5.3.2 Применение метода Нелдера-Мида

Для определения положений энергетических центров тестовых изображений автоколлимационных точек путем минимизации оценочной функции (40) был адаптирован метод Нелдера-Мида, известный также как метод деформируемого многогранника. Он представляет собой один из симплексных методов, являющихся методами безусловной оптимизации вещественной функции нескольких переменных, не использующих градиенты оптимизируемой функции (безградиентные методы – методы нулевого порядка).

Принципиально метод Нелдера-Мида является развитием симплексного метода Спендли, Хекста и Химсворта [110]. Согласно определению, симплексом (точнее,  $n$ -мерным симплексом, где число  $n$  называется размерностью симплекса) называется выпуклая оболочка множества  $(n+1)$ -й равноудаленной точки в  $n$ -мерном пространстве [111, 112]. Таким образом, симплекс является  $n$ -мерным многогранником с количеством вершин  $n + 1$ . Плоскость чувствительных элементов приемника излучения является частным случаем двумерного пространства, в котором симплексом будет являться треугольник.

Основная идея рассматриваемого метода состоит в поочередном сравнении значений функции оценочной функции (40) в  $(n+1)$  вершинах симплекса и дальнейшем его деформировании в направлении точки экстремума исследуемой функции с помощью итерационной процедуры. Деформирование симплекса осуществляется с помощью четырех операций: отражение, растяжение, сжатие и редукция. Схематичное изображение преобразований симплекса в двумерном пространстве, при применении указанных операций показано на рисунке 58.

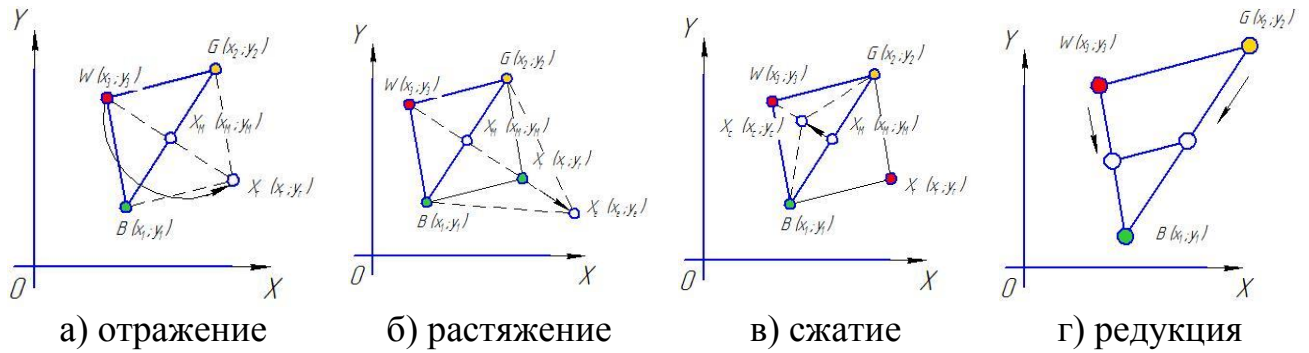


Рисунок 58 – Операции деформирования симплекса.

В общем виде, последовательность операций, реализованная в ходе моделирования в системе MATLAB применения метода Нелдера-Мида для вычисления координат энергетических центров тестовых автоколлимационных изображений, представлена ниже [113 – 124].

На предварительном этапе тестовые изображения были загружены в MATLAB и по формуле (40) сформирована оценочная функция  $\Delta = f(x, y)$ .

Шаг 1 «Подготовка». На данном этапе формируется симплекс, посредством выбора  $n+1$  случайных точек  $n$ -мерного пространства, являющихся его вершинами. Как было отмечено выше, для двумерного пространства ( $n=2$ ) симплекс будет представлять собой треугольник. Пусть в нашем случае его вершинами будут  $V_1(x_1; y_1) = (6; 7)$ ,  $V_2(x_2; y_2) = (6, 5; 7)$  и  $V_3(x_3; y_3) = (6; 7, 5)$ . В полученных точках, используя формулу (40), вычисляются значения оценочной функции  $f(V_1), f(V_2), f(V_3)$ .

Шаг 2 «Сортировка». Сортируются точки  $V_1(x_1; y_1)$ ,  $V_2(x_2; y_2)$  и  $V_3(x_3; y_3)$  по значениям функции в этих точках. Так как мы ищем минимум оценочной функции, то лучшей считаем ту точку, в которой оценочная функция имеет наименьшее значение. Тогда, получим двойное неравенство вида:

$$f_b \leq f_g \leq f_w, \quad (48)$$

где  $f_b$  – наименьшее среди  $f(V_1), f(V_2), f(V_3)$  (и, следовательно, наилучшее) значение оценочной функции. Точку, соответствующую этому значению, назовем  $B(x_1; y_1)$  ( $B$  – «best»).

$f_g$  – промежуточное значение оценочной функции среди  $f(V_1), f(V_2), f(V_3)$ . Точку, соответствующую этому значению, назовем  $G(x_2; y_2)$  ( $G$  – «good»).

$f_w$  – наибольшее значение оценочной функции среди  $f(V_1)$ ,  $f(V_2)$ ,  $f(V_3)$ . Точку, соответствующую этому значению, назовем  $W(x_3; y_3)$  ( $W$  – «worst»).

Шаг 3. Найдем центр тяжести всех точек, за исключением  $W$  по формуле:

$$X_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X^{(i)} \quad (49)$$

Для двумерного пространства, использование формулы (49) равносильно нахождению середины отрезка, концами которого являются точки  $B(x_1; y_1)$  и  $G(x_2; y_2)$ :

$$X_M = \left( \frac{x_1 + x_2}{2}; \frac{y_1 + y_2}{2} \right) \quad (50)$$

Шаг 4 «Отражение». Применяем операцию отражения точки  $W(x_3; y_3)$  относительно точки  $X_M(x_M; y_M)$  и получаем точку  $X_R(x_R; y_R)$ , координаты которой вычисляются по формуле:

$$X_R = (1 + \alpha) \cdot X_M - \alpha \cdot W, \quad (51)$$

где  $\alpha > 0$  – коэффициент отражения, который обычно принимают равным 1. В таком случае точка  $W$  будет симметрично отражена относительно точки  $X_M$  (см. рис. 58, а)).

Тогда, из формулы (51) получим следующие координаты точки  $X_R(x_R; y_R)$ :

$$x_R = (1 + \alpha) \cdot x_M - \alpha \cdot x_3 \quad (52), \quad y_R = (1 + \alpha) \cdot y_M - \alpha \cdot y_3 \quad (53)$$

В полученной точке  $X_R(x_R; y_R)$  вычисляем значение оценочной функции  $f_r = f(X_R) = f(x_R; y_R)$ .

Шаг 5 «Сравнение». Сравним полученное в точке  $X_R$  значение оценочной функции  $f_r$  с известными её значениями  $f_b$ ,  $f_g$  и  $f_w$ . В зависимости от результатов сравнения возможен один из вариантов, представленных ниже.

Если  $f_r < f_b$ , то направление поиска минимума оценочной функции является верным и можно попробовать увеличить шаг в данном направлении. Для этого используется операция растяжения (см. рис. 58, б)), в результате которой получаем новую точку  $X_e(x_e; y_e)$  и значение оценочной функции  $f_e = f(X_E) = f(x_E; y_E)$ :

$$X_E = (1 - \gamma) \cdot X_M + \gamma \cdot X_R, \quad (54)$$

где  $\gamma > 0$  – коэффициент растяжения, который обычно принимают равным 2.

Соответственно, по формуле (54) получим следующие координаты точки  $X_E(x_E; y_E)$ :

$$x_E = (1-\gamma) \cdot x_M + \gamma \cdot x_R \quad (55), \quad y_E = (1-\gamma) \cdot y_M + \gamma \cdot y_R \quad (56)$$

При  $f_e < f_r$  точке  $W$  присваиваем значение  $X_e$  и переходим на шаг 7.

При  $f_e > f_r$  перемещение произошло слишком далеко, поэтому точке  $W$  присваиваем значение  $X_r$  и переходим на шаг 7.

Если  $f_b < f_r < f_g$ , то точке  $W$  присваиваем значение  $X_r$  и переходим на шаг 7.

Если  $f_g < f_r < f_w$  или  $f_r > f_w$ , то операция отражения дала неверное направление поиска минимума оценочной функции. В этом случае производим операцию сжатия.

Шаг 6 «Сжатие». Данная операция позволяет определить координаты точки  $X_C(x_C; y_C)$  внутри симплекса  $BGW$  (см. рис. 58, в)):

$$X_C = \beta \cdot W + (1-\beta) \cdot X_M, \quad (57)$$

где  $\beta > 0$  – коэффициент сжатия, который обычно принимают равным 0,5. Тогда, по формуле (57) получим следующие координаты точки  $X_C(x_C; y_C)$ :

$$x_C = \beta \cdot x_3 + (1-\beta) \cdot x_M \quad (58), \quad y_C = \beta \cdot y_3 + (1-\beta) \cdot y_M \quad (59)$$

Вычисляем значение оценочной функции  $f_c = f(X_C) = f(x_C; y_C)$ .

Если  $f_c < f_w$ , то точке  $W$  присваиваем значение  $X_C$  и переходим на шаг 7.

Если  $f_c > f_w$ , то необходимо переопределить весь симплекс с помощью операции редукции. При данной операции мы оставляем только точку  $B(x_1; y_1)$ , соответствующую наименьшему значению оценочной функции  $f_b$ . Остальные точки  $G$  и  $W$  смещаем по направлению к точке  $B$  (см. рис. 58, г)):

$$X^{(i)} \leftarrow B + \delta \cdot (X^{(i)} - B), \quad (60)$$

где  $\delta > 0$  – коэффициент редукции, который обычно принимают равным 0,5.

После переопределения симплекса повторяют шаги 2 – 7.

Шаг 7. Проверка условия окончания алгоритма. Окончание алгоритма можно инициировать выполнением одного из следующих условий:

1. Достижение заданного числа выполненных итераций.
2. Достижение определенной величины площади симплекса.

3. Текущее значение оценочной функции достигло необходимой точности.

4. Текущие значения искомых координат достигли необходимой точности.

Если выполнения одного из данных условий не происходит, то начинается новая итерация и шаги 2 – 7 повторяются.

В проведенном эксперименте для контрольного тестового изображения в качестве условия останова было выбрано последнее из представленных выше. Оно было выражено через абсолютную погрешность  $\varepsilon$  определения положения энергетического центра, которая должна быть меньше 0,1 размера пикселя:

$$\varepsilon = \sqrt{(x_{0 \text{ факт}} - x_0)^2 + (y_{0 \text{ факт}} - y_0)^2} < 1 \cdot 10^{-1}, \quad (61)$$

где  $(x_{0 \text{ факт}}; y_{0 \text{ факт}})$  – фактические значения координат энергетического центра контрольного тестового изображения, вычисленные с помощью метода Нелдера-Мида;

$(x_0; y_0) = (7,25; 8,50)$  – истинные значения координат энергетического центра контрольного тестового изображения.

На рисунке 59 приведено графическое представление каждой итерации метода Нелдера-Мида. На нем представлена оценочная функция из рисунка 55 как проекция на плоскость  $XOY$  в виде линий уровня, а также построенные на данной плоскости симплексы.

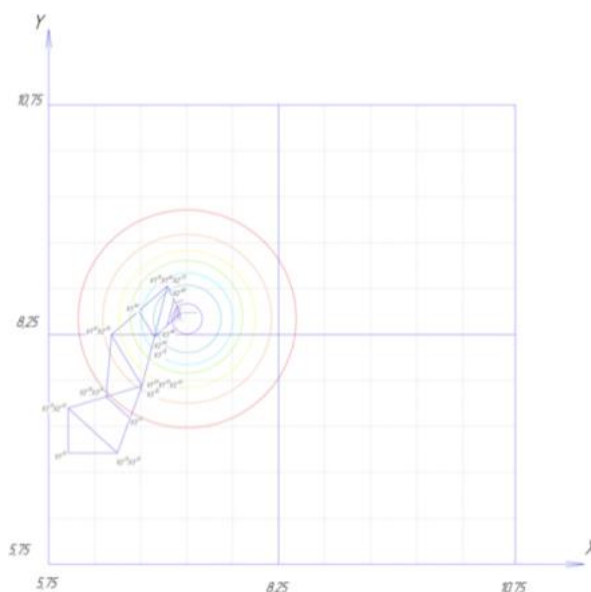


Рисунок 59 – Графическое представление итерационного процесса поиска минимума оценочной функции методом Нелдера-Мида.

Для тестовых изображений ИК-канала и В-канала в качестве условия останова было выбрано условие достижения определенной величины  $S$  площади симплекса:

$$S = \frac{1}{2} \cdot \left| \det \begin{pmatrix} x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{pmatrix} \right| \leq 1 \cdot 10^{-3}, \quad (62)$$

где  $V_1(x_1; y_1)$ ,  $V_2(x_2; y_2)$  и  $V_3(x_3; y_3)$  – координаты вершин текущего симплекса. Значение  $S < 1 \cdot 10^{-3}$  получено из эксперимента с контрольным тестовым изображением путем вычисления площади симплекса из последней итерации.

Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для контрольного тестового изображения и тестовых изображений ИК-канала и В-канала представлены в таблицах 17 и 18 соответственно.

Таблица 17 – Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для контрольного тестового изображения

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

Таблица 18 – Результаты вычисления координат энергетического центра методом Нелдера-Мида для тестовых изображений ИК-канала и В-канала

Тестовое 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  $\delta$ :

$$\delta = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, \quad (63)$$

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 (63) представлены в таблице 19.

Таблица 19 – Ошибка рассогласования в определении положения энергетического центра

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, установлено:

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 уровням точности современных автоколлимационных приборов для контроля погрешностей центрирования.
3. Корректность работы указанных методов подтверждается верным нахождением заранее определённых координат энергетического центра контрольного тестового изображения.

## ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

1. Точность измерения погрешностей центрирования непосредственно зависит от точности определения положения энергетических центров изображений автоколлимационных точек в плоскости чувствительных элементов регистрирующего МФПУ. Решение данной задачи, в общем случае, включает в себя два этапа: предварительную обработку и непосредственно определение координат. Каждый них предполагает множество вариантов реализаций.

2. В настоящей Главе рассмотрены различные методы анализа автоколлимационных изображений, предложены варианты их классификации. Несмотря на ряд общих принципов, единый подход к выбору методов определения координат энергетических центров автоколлимационных изображений отсутствует.

3. В оптической схеме ЛАМ устранение оптических помех в виде шумов, бликов и переотражений лазерного излучения реализовано не программными методами, как описано в большинстве публикаций, а на элементном уровне – с помощью введения источников когерентного поляризованного излучения, поляризационных элементов и светофильтров.

4. При имеющейся степени устранения оптических помех, а также коррекции aberrаций оптических узлов измерительных каналов ЛАМ, изображения автоколлимационных точек становятся близкими к идеальному, которое аналитически может быть аппроксимировано двумерной функцией Гаусса, выраженной через полуширину своего центрального максимума.

5. Вычисление значений координат энергетических центров автоколлимационных изображений можно реализовать с помощью метода наискорейшего спуска и метода Нелдера-Мида. Корректность работы указанных методов подтверждается верным нахождением заранее определённых координат энергетического центра контрольного тестового изображения.

## ГЛАВА 4. Разработка комплекса автоматизированного контроля погрешностей центрирования на основе ЛАМ

Как было отмечено в Главе 2, современные цифровые автоколлимационные приборы для контроля погрешностей центрирования обладают существенно большими функциональными возможностями нежели классические автоколлимационные трубки. Они представляют собой универсальные измерительные комплексы, которые позволяют контролировать как типовые погрешности центрирования одиночных линз, например наклон сферической поверхности линзы к ее оптической оси или смещение и наклон образующей цилиндрической поверхности линзы к ее основанию, так и определять наклон и смещение оптической оси каждой линзы в уже собранном объективе. Измерения, как правило, осуществляются в автоматизированном режиме. Оператору достаточно установить в устройство позиционирования контролируемый объектив, ввести вручную или импортировать из подготовленного файла его конструктивные параметры и запустить процесс измерения. После этого остается лишь получить готовые результаты.

Высокая точность контроля погрешностей центрирования и определения пространственного взаиморасположения элементов у данных приборов обеспечивается не только за счет параметров их оптических схем и точности изготовления их механических узлов и устройств позиционирования. Максимальная точность определения погрешностей центрирования достигается также за счет применения в данных приборах специального управляющего программного обеспечения (ПО) и лежащих в его основе алгоритмов работы в сочетании с методами обработки цифровых изображений автоколлимационных бликов. Именно поэтому разработка такого ПО, определение его функциональной архитектуры, исследование и разработка алгоритмов его работы, а также математических методов, является актуальной задачей, требующей постоянного поиска новых решений.

#### 4.1 Функциональная архитектура управляющего ПО ЛАМ

Опыт применения приборов серии OptiCentric на ПАО КМЗ, а также различные практические примеры применения приборов данной серии и приборов OTS, LAS-IR, PSM, рассмотренные в ряде публикаций [71-77], позволяют определить функциональную архитектуру управляющего ПО и сформулировать круг выполняемых им задач для достижения наибольшей точности определения погрешностей центрирования. На рисунке 60 представлена функциональная архитектура управляющего ПО ЛАМ, которую можно считать характерной для современных цифровых автоколлимационных приборов контроля погрешностей центрирования.



Рисунок 60 – Функциональная архитектура управляющего ПО ЛАМ

Как видно из рисунка 60, управляющее ПО состоит из трех основных модулей:

1. Графический интерфейс пользователя.
2. Исполнительный модуль.
3. Вычислительный модуль.

Рассмотрим назначение и особенности работы каждого из них подробнее.

#### 4.1.1 Графический интерфейс пользователя (GUI)

Графический интерфейс пользователя отвечает за взаимодействие между оператором, выполняющим измерения, и измерительным прибором. По типу решаемых задач в нем условно можно выделить модуль ввода данных, модуль управления и модуль вывода данных.

Модуль ввода данных отвечает за выполнение следующих задач:

1. Ввод конструктивных параметров исследуемой оптической системы (радиусы кривизны, толщины, показатели преломления) и их редактирование.
2. Выбор и редактирование пользователем группы поверхностей или компонентов, для которых необходимо провести измерение. Для остальных поверхностей и компонентов в данном случае измерения проводиться не будут.

Модуль управления необходим для управления настройками измерений и общими настройками устройства. К его задачам относятся:

1. Выбор режима выполняемых измерений (линейный – для сферических и асферических поверхностей, угловой – для плоских поверхностей).
2. Установка минимально допустимого расстояния между фокусирующим объективом и первой поверхностью измеряемой оптической системы, чтобы в процессе перемещения фокусирующий объектив гарантированно не пришел в соприкосновение с ближайшей к нему поверхностью контролируемой оптической системы.
3. Управление параметрами подвижных приводов, осуществляющих наведение автоколлимационного микроскопа на автоколлимационную точку контролируемой поверхности.
4. Управление параметрами устройства вращения контролируемой оптической системы.
5. Управление параметрами источников излучения (например, выходной мощностью излучения).

6. Управление параметрами приемников излучения (время выдержки, коэффициент усиления и др.).

7. Управление настройками программного обеспечения.

Модуль вывода служит для наглядного представления результатов проведенных измерений.

#### 4.1.2 Исполнительный модуль

Исполнительный модуль предназначен для реализации непосредственно процесса измерения. Для каждой исследуемой поверхности процесс выполнения измерения включает в себя 2 этапа:

1. Наведение автоколлимационного микроскопа с выбранным фокусирующим объективом на автоколлимационную точку контролируемой поверхности.

2. Поворот исследуемой оптической системы на  $360^\circ$  для определения диаметра биения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов приемника излучения.

Перед началом проведения измерений необходимо навести автоколлимационный микроскоп на начальную, т.н. «нулевую» точку, относительно которой будут отсчитываться поступательные перемещения. В качестве такой точки обычно используется вершина первой поверхности контролируемой оптической системы. Степень точности наведения определяется по наиболее резкому изображению тест-объекта, используемого в автоколлимационном приборе (окружность, перекрестие и т.п.).

Современные автоколлимационные приборы в процессе выполнения измерения в режиме реального времени позволяют осуществлять вывод на экран устройства отображения информации (монитора) изображение с приемника излучения, что позволяет наблюдать автоколлимационные точки контролируемых поверхностей. В данном окне может дополнительно отображаться информация об

используемом фокусирующем объективе, текущей поверхности и координате ее автоколлимационной точки. Также могут быть доступны команды по перемещению узла автоколлиматора с информацией о текущем положении; вращению поворотного устройства; запоминанию положения узла автоколлиматора для данной автоколлимационной точки.

Общий вид диалогового окна с изображением от приемника излучения на примере приборов серии OptiCentric IR представлен на рисунке 61.

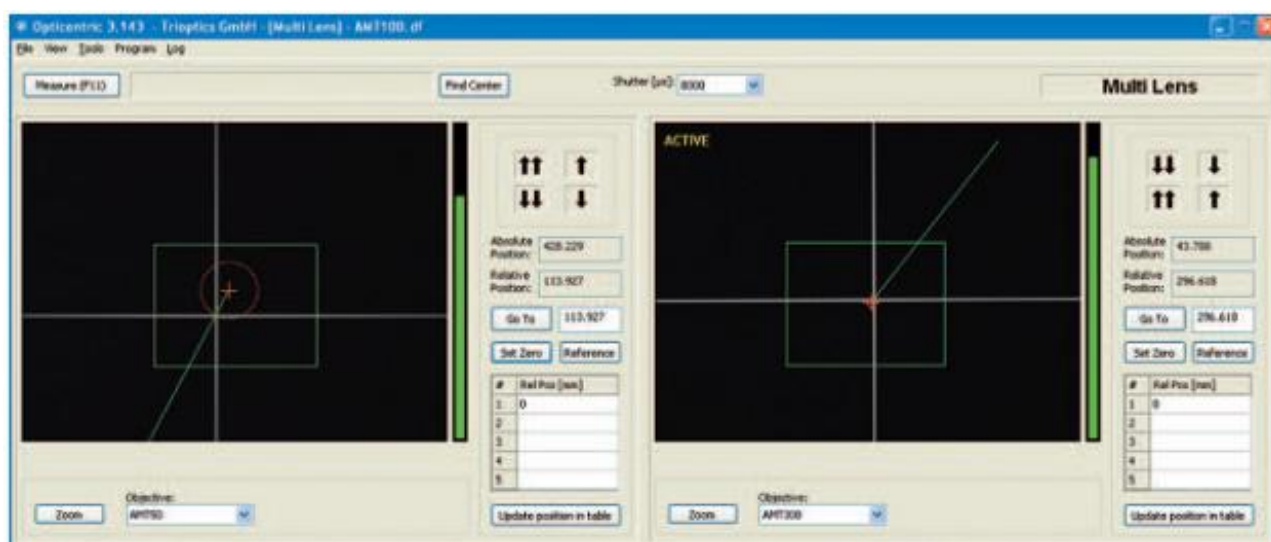


Рисунок 61 – Диалоговое окно ПО прибора OptiCentric IR, показывающее получаемое видеоизображение.

#### 4.1.3 Вычислительный модуль

Вычислительный модуль управляющего ПО отвечает за выполнение всех операций, связанных с вычислениями. К данным операциям можно отнести:

1. Расчет положения автоколлимационных точек по введенным конструктивным параметрам исследуемой оптической системы.
2. Определение положения энергетического центра автоколлимационного изображения.
3. Вычисление величин погрешностей центрирования для поверхностей исследуемой оптической системы.

4. Вычисление линейных смещений и углов наклона компонентов исследуемой оптической системы.

5. Определение пространственного взаиморасположения элементов исследуемой оптической системы в установленной системе координат.

Все приведенные в данном перечне операции можно разделить на две функциональные категории, в соответствии со схемой, представленной на рисунке 60:

1. Вычисление координат центра автоколлимационного изображения. Методы для решения задачи данной категории были рассмотрены в Главе 3.

2. Определение погрешностей центрирования и пространственного взаиморасположения элементов исследуемой оптической системы. Математические методы, предлагаемые, для решения задач данной категории рассмотрены далее.

Как уже отмечалось выше, эффективность решения данных задач в современных автоколлимационных приборах в значительной степени определяется используемыми математическими методами и алгоритмами. Поэтому вполне очевидно, что данные методы являются охраняемыми объектами интеллектуальной собственности: информация о том, какие именно из них используются в конкретном автоколлимационном приборе, отсутствует в открытом доступе. В следующих разделах представлены математические методы вычисления погрешностей центрирования, разработанные для использования в создаваемом в рамках настоящей исследовательской работы приборе для контроля погрешностей центрирования объективов оптических систем инфракрасных диапазонов – Лазерном Автоколлимационном Микроскопе (ЛАМ).



## 4.2 Методы определения погрешностей центрирования и пространственного положения элементов исследуемой оптической системы

### 4.2.1 Координатное соглашение

Первым шагом при решении задач, связанных с определением погрешностей центрирования и пространственного взаиморасположения элементов исследуемой оптической системы, является введение некоторой системы координат, в которой данные задачи и будут решаться. Иными словами, необходимо установить некое координатное соглашение. Для простоты вычислений и большей наглядности предлагается использовать трёхмерную декартову систему координат, учитывающую правило знаков, принятое в геометрической оптике. Данная система координат представлена на рисунке 62.

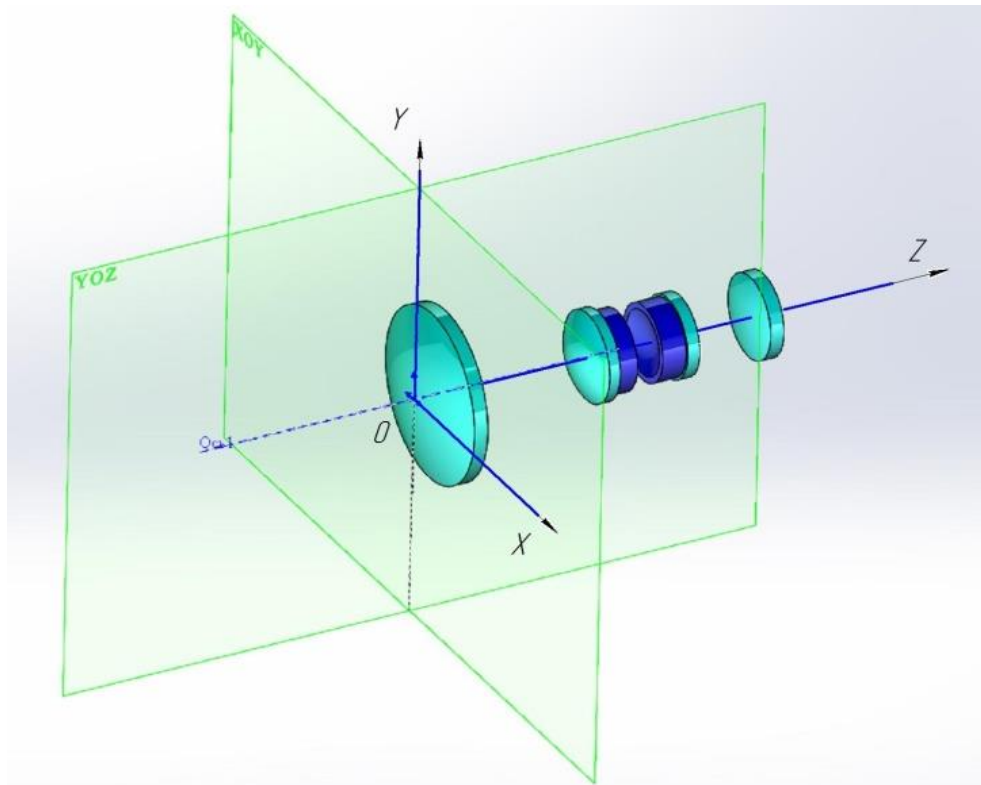


Рисунок 62 – Система координат для определения погрешностей центрирования и пространственного взаиморасположения элементов исследуемой оптической системы.

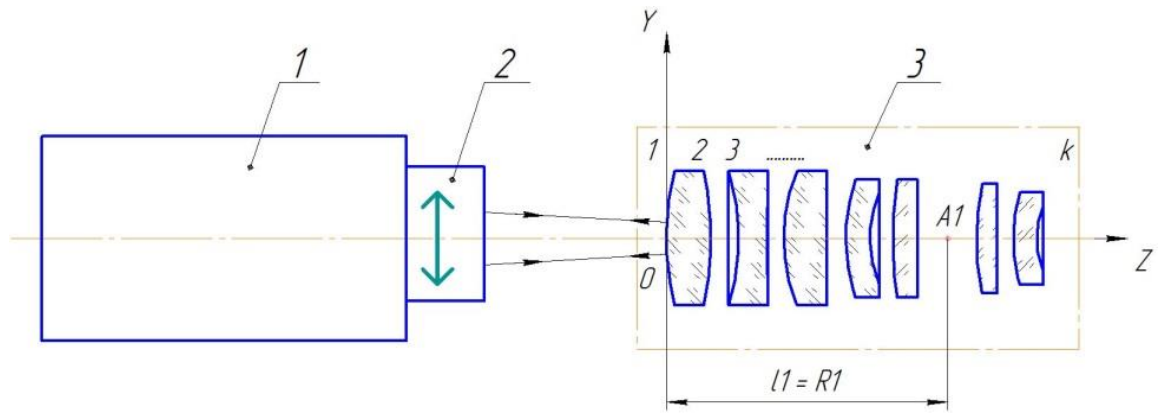
В предлагаемой системе координат точкой начала координат  $O(0;0;0)$  предлагается считать вершину ближайшей к автоколлимационному прибору поверхности исследуемой оптической системы. Точку  $O(0;0;0)$  будем называть исходной точкой. Ось  $OZ$  направим внутрь исследуемой оптической системы, ось  $OY$  – вертикально вверх, ось  $OX$  – к плоскости рисунка. Плоскость  $YOZ$  будет являться меридиональной плоскостью, а плоскость  $XOZ$  – сагиттальной. Представленная система координат является левосторонней. Все дальнейшие расчеты и математические преобразования выполнены в данной системе координат. Нумерация поверхностей осуществляется вдоль оси  $OZ$ , начиная с первой поверхности.

#### 4.2.2 Метод определения положений автоколлимационных точек исследуемой оптической системы

Согласно определению, автоколлимационной точкой сферической поверхности является центр её кривизны или его изображение, даваемое оптическими поверхностями, расположенными между данной поверхностью и автоколлимационным прибором. Метод определения положений автоколлимационных точек контролируемых поверхностей основан на применении известных формул углов и высот хода нулевых лучей.

Положение автоколлимационной точки некоторой  $i$ -ой поверхности исследуемой системы принято задавать расстоянием  $l_i$  от ближайшей к автоколлимационному прибору поверхности до данной автоколлимационной точки. В частности, для первой поверхности исследуемой системы расстояние до её автоколлимационной точки  $l_1$  будет равно радиусу данной поверхности с учетом правила знаков (см. рис. 63):

$$l_1 = R_1 \quad (64)$$



1 – автоколлимационный микроскоп; 2 – объектив микроскопа 1;

3 – исследуемая оптическая система

Рисунок 63 – Автоколлимационная точка первой поверхности.

Для определения положения автоколлимационной точки любой произвольной  $i$ -той поверхности, расположенной за первой поверхностью исследуемой системы, расчет хода луча осуществляется в обратном ходе – луч направляют из центра кривизны поверхности, для которой определяется положение автоколлимационной точки, в направлении автоколлимационного прибора. На рисунке 64 показано определение положения автоколлимационной точки  $A_1$  для последней поверхности исследуемой оптической системы с учетом преломления луча на последующих поверхностях. Поскольку расчет идет в обратном ходе, то последняя поверхность будет иметь индекс 1, а первая поверхность в обратном ходе будет соответственно иметь индекс  $K$ .

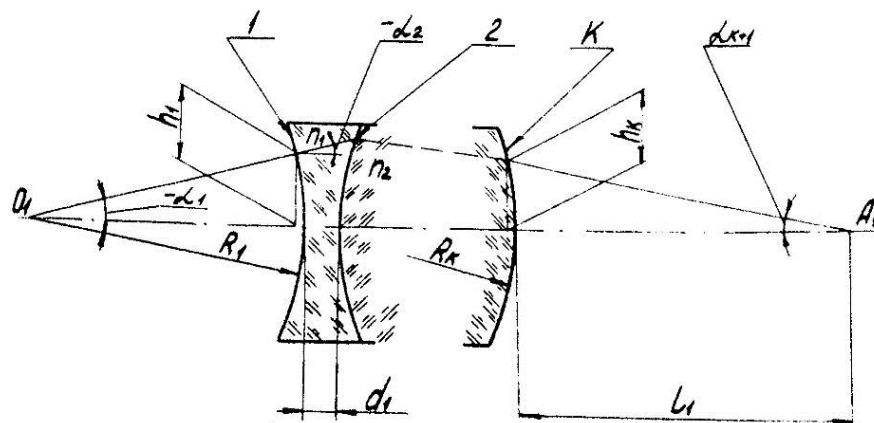


Рисунок 64 – Определение положения автоколлимационной точки от поверхности, расположенной внутри оптической системы.

Для поверхности  $i+1$ , расположенной за анализируемой поверхностью  $i$ , величины углов  $\alpha_{i+1}$  и высот  $h_{i+1}$  хода луча определяются следующими формулами:

$$h_{i+1} = h_i - d_i \cdot \operatorname{tg} \alpha_{i+1}, \quad (65)$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{i+1} = \operatorname{tg} \alpha_i \cdot \frac{n_i}{n_{i+1}} + \frac{h_i \cdot (n_{i+1} - n_i)}{R_i \cdot n_{i+1}}, \quad (66)$$

где  $h_i$  – высота падения луча на  $i$ -й поверхности;

$R_i$  – радиус поверхности линзы;  $d_i$  – толщина линзы;

$n_i, n_{i+1}$  – показатели преломления сред  $i$  и  $i+1$ .

Начальными условиями расчета принимают  $h_{i=1} = R_{i=1}$ ,  $\operatorname{tg} \alpha_{i=1} = \operatorname{tg} \alpha_{i+1=2} = 1$ .

Правило знаков при расчете соответствует правилу знаков, принятому в геометрической оптике в отечественной литературе.

Тогда положение автоколлимационной точки  $l_i$  для анализируемой поверхности  $i$  будет определяться по формуле:

$$l_i = \frac{h_k}{\operatorname{tg} \alpha_{k+1}}, \quad (67)$$

где  $h_k$  – высота падения луча на  $K$ -ю поверхность;

$\alpha_{k+1}$  – угол между оптической осью и лучом за  $K$ -й поверхностью;

$K$  – номер поверхности, ближайшей к автоколлимационному прибору;

$i$  – номер поверхности, лежащей между 1-й и  $K$ -й поверхностями, для которой производится расчет.

Увеличение, с которым будет изображаться биение изображения автоколлимационной точки анализируемой поверхности  $i$  после прохождения луча через оптические компоненты, расположенные между ней и автоколлимационным прибором, определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{1}{\beta_{oc}} = \frac{n_{k+1}}{n_i} \cdot \frac{\operatorname{tg} \alpha_{k+1}}{\operatorname{tg} \alpha_i}, \quad (68)$$

где  $\beta_{oc}$  – линейное увеличение оптической системы, состоящей из поверхностей  $2 \div K$  (см. рис. 64).

#### 4.2.3 Метод определения величины погрешности центрирования контролируемой поверхности

В Главе 2 отмечено, что если исследуемая поверхность имеет погрешность центрирования  $c$ , то в плоскости чувствительных элементов МФПУ изображение автоколлимационной точки от данной поверхности будет описывать окружность диаметром  $d'$ . Для определения погрешности центрирования  $c$  предлагается метод, который можно описать последовательностью операций, представленной ниже.

Условия и начальные допущения:

1. Оптическая ось автоколлимационного прибора и ось устройства вращения контролируемой оптической системы совпадают. Данную ось будем считать опорной осью  $OZ$ .
2. Базовая ось исследуемой оптической системы, определяемая элементами конструкции данной системы, совмещена с осью устройства вращения.

Далее приведена последовательность операций, реализующая метод.

1. Автоколлимационный микроскоп навести на автоколлимационную точку контролируемой поверхности. Положение данной точки находится в соответствии с формулами, приведенными в разделе 4.2.2.
2. С помощью МФПУ через равные углы поворота устройства вращения контролируемой оптической системы регистрируются  $m$  положений изображения автоколлимационной точки, каждое из которых будет иметь координаты  $(x_i; y_i)$ . Методы определения данных координат были рассмотрены в Главе 3.

Зарегистрированные МФПУ положения изображения автоколлимационной точки контролируемой поверхности схематично представлены на рисунке 65.

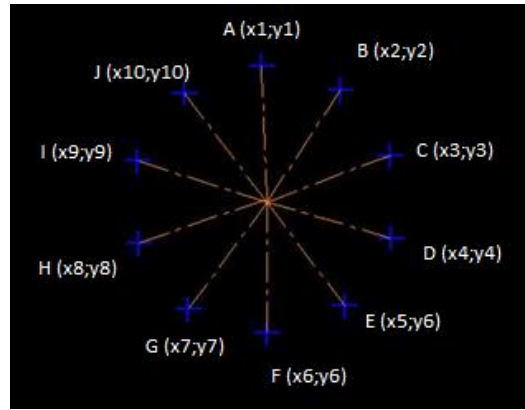


Рисунок 65 – Биение изображения автоколлимационной точки.

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

4. По формуле середины отрезка вычислить координаты  $(x_{M_i}; y_{M_i})$  точек  $M_i$ , представляющих собой середины полученных выше векторов:

$$M_i \left( \frac{x_{\frac{m}{2}+i} - x_i}{2}; \frac{y_{\frac{m}{2}+i} - y_i}{2} \right) \quad (69)$$

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

$$x_{\bar{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{m/2} x_{M_i}}{m/2}, \quad (70) \quad y_{\bar{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{m/2} y_{M_i}}{m/2} \quad (71)$$

Полученные координаты точки  $\bar{M}$  фактически будут являться координатами центра, вокруг которого описывает окружность изображение автоколлимационной точки.

6. Зная координаты центра вращения  $(x_{\bar{M}}; y_{\bar{M}})$ , а также координаты каждого из зарегистрированных МФПУ положений изображения автоколлимационной точки  $(x_i; y_i)$ , можно вычислить среднее значение радиуса вращения и, следовательно, диаметр биения изображения автоколлимационной точки в плоскости чувствительных элементов МФПУ:

$$d' = 2 \cdot \bar{r}' = 2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \sqrt{((x_i - x_{\bar{M}}) \cdot a)^2 - ((y_i - y_{\bar{M}}) \cdot a)^2}}{m}, \quad (72)$$

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, что справедливо для большинства современных матричных приемников излучения.

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

$$c = \frac{d'}{4 \cdot \beta_m} \cdot \gamma = \frac{d'}{4} \cdot \frac{f'_{\text{ф.об}}}{f'_{\text{об.ФПУ}}} \cdot \gamma, \quad (73)$$

где  $c$  – величина погрешности центрирования контролируемой поверхности, мкм;

$d'$  – 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 биение изображения автоколлимационной точки исследуемой поверхности после прохождения луча через линзы между ней и фокусирующим объективом, определяемый по формуле (68).

Представленная формула (73) легко получается из формул (7) – (9), представленных ранее в Главе 2.

#### 4.2.4 Метод определения пространственного положения компонента исследуемой оптической системы

Ранее в Главе 1 были рассмотрены различные виды погрешностей центрирования. Представленный метод позволяет определить пространственное положение компонента исследуемой оптической системы и, тем самым, определить вид погрешности центрирования, который наблюдается в данном конкретном случае.

Условия и начальные допущения:

1. Под компонентом исследуемой оптической системы будем понимать одиночную линзу, склеенную линзу или группу линз, расположенных внутри собранного объектива.

2. Оптическая ось автоколлимационного прибора и ось устройства вращения контролируемой оптической системы совпадают. Данную ось будем считать опорной осью  $OZ$ .

3. Базовая ось исследуемой оптической системы, определяемая элементами конструкции данной системы, совмещена с осью устройства вращения.

4. Под оптической осью компонента будем понимать линию, соединяющую центры кривизны оптических поверхностей данного компонента – назовем её  $C_1C_2$ .

5. Рассматриваемый компонент центрирован на этапе своего изготовления – его геометрическая и оптическая оси совпадают.

6. Рассмотрение ведется на примере одиночной линзы с заданными конструктивными параметрами для простоты графического представления и примера результатов вычислений по предлагаемой методике. Положения методики справедливы также для склеенных линз и для групп линз, с тем отличием, что в качестве второй исследуемой поверхности будем брать последнюю поверхность рассматриваемого компонента.



7. Координаты по оси  $Z$  являются известными величинами, т.к. определяются конструктивными параметрами исследуемой оптической системы (толщины линз и воздушных промежутков) и расчетом положений автоколлимационных точек.

Для определения пространственного положения одиночного компонента предлагается метод, описываемый ниже.

1. При фиксированном положении устройства вращения контролируемой оптической системы получить изображения автоколлимационных точек от первой и последней поверхности исследуемой линзы и их координаты в плоскости МФПУ. 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. В зависимости от полученных значений координат  $(x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1'})$  и  $(x_{C2'}; y_{C2'}; z_{C2'})$  возможны различные варианты расположения исследуемой линзы в пространстве. Рассмотрим их подробнее.

2. Если  $(x_{C1'} = y_{C1'} = 0)$  и  $(x_{C2'} = y_{C2'} = 0)$ , то  $(C_1' \in OZ)$  и  $(C_2' \in OZ)$ . Тогда центры кривизны обеих поверхностей исследуемой линзы лежат на опорной оси  $OZ$  – линза не имеет погрешностей центрирования (см. рис. 66).

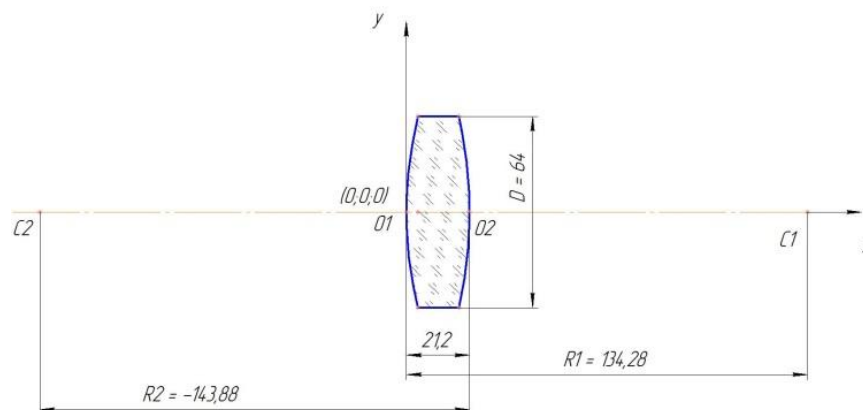


Рисунок 66 – Линза без погрешностей центрирования.

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  $(C_2' \in OZ)$ . Пример линзы с указанной погрешностью центрирования представлен на рисунке 67.

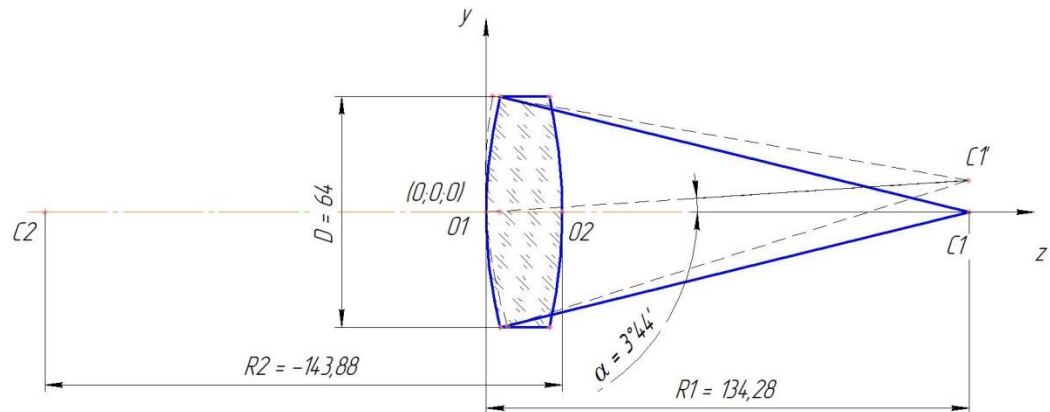


Рисунок 67 – Наклон поверхности 1 линзы относительно своей вершины  $O1$ .

Найдем угол наклона  $\alpha$  поверхности относительно своей вершины. Рассмотрение будем вести для наклона поверхности 1, представленной на рисунке 67.

$O1C1$  – исходная ось поверхности 1.  $O1C1'$  – ось поверхности 1 после наклона вокруг  $O1$  на угол  $\alpha$ . Запишем уравнение прямой  $O1C1$  через уравнение прямой в пространстве, проходящей через две точки:

$$\frac{x - x_{O1}}{x_{C1} - x_{O1}} = \frac{y - y_{O1}}{y_{C1} - y_{O1}} = \frac{z - z_{O1}}{z_{C1} - z_{O1}}, \quad (74)$$

где координаты исходных положений точек  $O1(x_{O1}; y_{O1}; z_{O1})$  и  $C1(x_{C1}; y_{C1}; z_{C1})$  известны из конструктивных параметров. Подставив их в формулу (74), для прямой  $O1C1$  получим:

$$\frac{x}{0} = \frac{y}{0} = \frac{z}{z_{C1}} \quad (75)$$

Направляющий вектор данной прямой  $\overline{O1C1} = (0; 0; z_{C1})$ .

Аналогично для прямой  $O1C1'$ :

$$\frac{x - x_{O1}}{x_{C1'} - x_{O1}} = \frac{y - y_{O1}}{y_{C1'} - y_{O1}} = \frac{z - z_{O1}}{z_{C1'} - z_{O1}};$$

$$\frac{x}{x_{C1'}} = \frac{y}{y_{C1'}} = \frac{z}{z_{C1'}} \quad (76)$$

Для малых углов  $\alpha$ , которые, как правило, имеют место при современных технологических возможностях изготовления оптических деталей и сборки оптических систем, можно полагать:

$$z_{C1'} \approx z_{C1} \quad (77)$$

Тогда уравнение (76) прямой  $OIC1'$  примет вид:

$$\frac{x}{x_{C1'}} = \frac{y}{y_{C1'}} = \frac{z}{z_{C1}} \quad (78)$$

Направляющий вектор данной прямой  $\overline{OIC1'} = (x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1})$ .

Угол  $\alpha$  будет также углом между направляющими векторами  $\overline{OIC1}$  и  $\overline{OIC1'}$ , поэтому его можно найти через скалярное произведение данных векторов:

$$\cos \alpha = \frac{\overline{OIC1} \cdot \overline{OIC1'}}{|\overline{OIC1}| \cdot |\overline{OIC1'}|} = \frac{|z_{C1}|^2}{\sqrt{z_{C1}^2} + \sqrt{x_{C1'}^2 + y_{C1'}^2 + z_{C1}^2}} \quad (79)$$

4. Рассмотрим случай, когда центры кривизны обеих поверхностей исследуемой линзы не лежат на опорной оси  $OZ$ : ( $C_1' \notin OZ$ ) и ( $C_2' \notin OZ$ ).

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:

$$c = \sqrt{x_{C1'}^2 + y_{C1'}^2} = \sqrt{x_{C2'}^2 + y_{C2'}^2} \quad (80)$$

Если имеет место общий случай: ( $x_{C1'} \neq x_{C2'} \neq 0$ ) и ( $y_{C1'} \neq y_{C2'} \neq 0$ ), – то результирующая погрешность центрирования исследуемой линзы носит более сложный характер, представляющий собой совокупность двух типов погрешностей центрирования: смещения и разворота в пространстве вокруг некоторой точки, удаленной от первой поверхности компонента. Данные типы погрешностей центрирования были описаны в разделе 1.2 Главы 1. Положение линзы представлено на рисунке 68 в проекциях на плоскости  $YOZ$  и  $YOX$ .

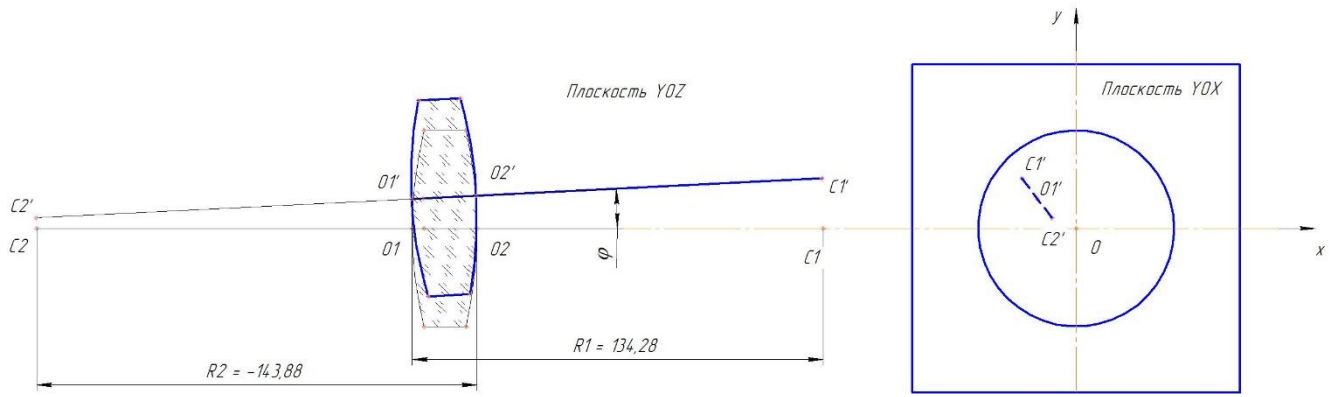


Рисунок 68 – Линза смещена и развернута в пространстве.

Для определения погрешности центрирования в данном случае исследуем взаимное расположение прямых  $C1'C2'$  и  $OZ$  в пространстве.

Поскольку случай  $C1'C2' \parallel OZ$  уже рассмотрен и определен, то остаются ещё три возможных случая: прямые  $C1'C2'$  и  $OZ$  перпендикулярны; прямые  $C1'C2'$  и  $OZ$  лежат в одной плоскости и пересекаются; прямые  $C1'C2'$  и  $OZ$  являются скрещивающимися.

Проведем радиус вектор из исходной точки к точке  $C1'$ . Его координаты:

$$\overline{OC1'} = (x_{C1'} - 0; y_{C1'} - 0; z_{C1'} - 0) = (x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1'}) \quad (81)$$

С учетом условия (77) получим:

$$\overline{OC1'} = (x_{C1'}; y_{C1'}; z_{C1'}) \quad (82)$$

Направляющий вектор прямой  $C1'C2'$ :

$$\overline{C1'C2'} = (x_{C2'} - x_{C1'}; y_{C2'} - y_{C1'}; z_{C2'} - z_{C1'}) \quad (83)$$

Направляющий вектор опорной оси  $OZ$ :

$$\overline{OZ} = (0; 0; 1) \quad (84)$$

Проверяем условие компланарности направляющих векторов  $\overline{OC1'}$ ,  $\overline{C1'C2'}$  и  $\overline{OZ}$ , которое с учетом равенств (82) – (84) имеет вид:

$$\begin{vmatrix} x_{C1'} & y_{C1'} & z_{C1'} \\ x_{C2'} - x_{C1'} & y_{C2'} - y_{C1'} & z_{C2'} - z_{C1'} \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (85)$$

Если данное равенство верно, то прямые  $C1'C2'$  и  $OZ$  будут лежать в одной плоскости и пересекаются. При этом, в проекции на плоскость  $YOX$  прямая  $C1'C2'$  или её продолжение будет проходить через исходную точку  $O$ . Угол  $\varphi$  между

прямыми  $C1'C2'$  и  $OZ$  будет определяться через скалярное произведение векторов  $\overline{C1'C2'}$  и  $\overline{OZ}$ :

$$\cos \varphi = \frac{\overline{OZ} \cdot \overline{C1'C2'}}{|\overline{OZ}| \cdot |\overline{C1'C2'}|} = \frac{|z_{C2} - z_{C1}|}{\sqrt{(x_{C2'} - x_{C1'})^2 + (y_{C2'} - y_{C1'})^2 + (z_{C2} - z_{C1})^2} + \sqrt{0+0+1}} \quad (86)$$

Если равенство (86) не верно, то прямые  $C1'C2'$  и  $OZ$  будут скрещивающимися. В проекции на плоскость  $YOX$  прямая  $C1'C2'$  или её продолжение не будет проходить через исходную точку  $O$ . Угол  $\psi$  в этом случае будет определяться также по формуле (86).

Угол разворота линзы  $\varphi$  или  $\psi$  относительно опорной оси  $OZ$  найден. Осталось найти смещение линзы относительно оси  $OZ$ . За это смещение предлагается считать расстояние от точки  $O1'$ , нового положения вершины первой поверхности исследуемой линзы, до оси  $OZ$ .

Найдем координаты точки  $O1'$ . Для этого, полагая, что  $z_{C1'} \approx z_{C1}$  и  $z_{C2'} \approx z_{C2}$ , достаточно решить систему уравнений:

$$\begin{cases} |R_1| = \sqrt{(x_{O1'} - x_{C1'})^2 + (y_{O1'} - y_{C1'})^2 + (z_{O1'} - z_{C1'})^2} \\ |R_2| - d = \sqrt{(x_{C2'} - x_{O1'})^2 + (y_{C2'} - y_{O1'})^2 + (z_{C2'} - z_{O1'})^2}, \quad (87) \\ \frac{x_{O1'} - x_{C1'}}{x_{C2'} - x_{C1'}} = \frac{y_{O1'} - y_{C1'}}{y_{C2'} - y_{C1'}} \end{cases}$$

где  $R_1$  – радиус кривизны первой поверхности линзы;

$R_2$  – радиус кривизны второй поверхности линзы;

$d$  – толщина линзы по центру.

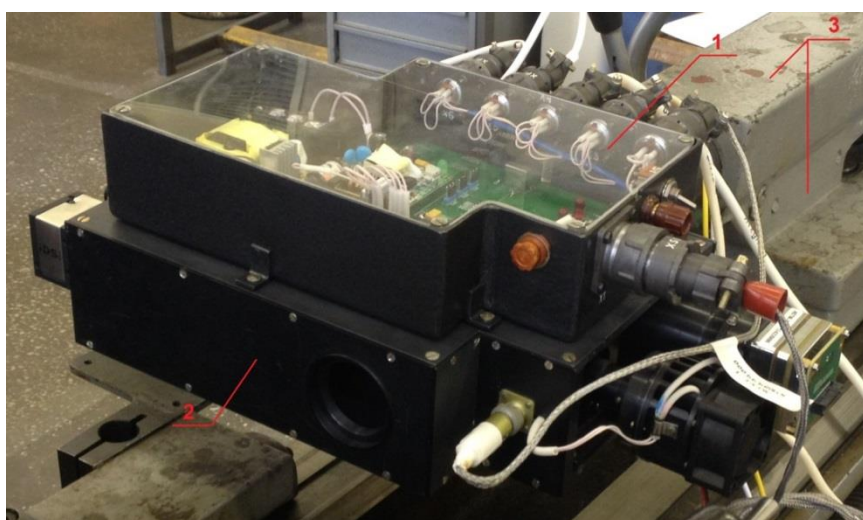
Поскольку  $O1' \in C1'C2'$ , то это справедливо и для проекции в плоскости  $YOX$ , поэтому смещение линзы  $c$  можно определить по формуле:

$$c = \sqrt{x_{O1'}^2 + y_{O1'}^2} \quad (88)$$

При известных конструктивных параметрах исследуемой оптической системы данный метод может быть применен не только к одиночной линзе, но и для склеенных линз, а также групп линз в оптических системах, например, для подвижных групп или вбрасываемых вставок в панкратических объективах.

### 4.3 Макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа

Для практической реализации положений и результатов, представленных выше, на ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» был изготовлен макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа, а также разработано управляющее программное обеспечение. Общий вид собранного макетного образца Лазерного Автоколлимационного Микроскопа, установленного на станке ИЖ-250, представлен на рисунке 69.



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

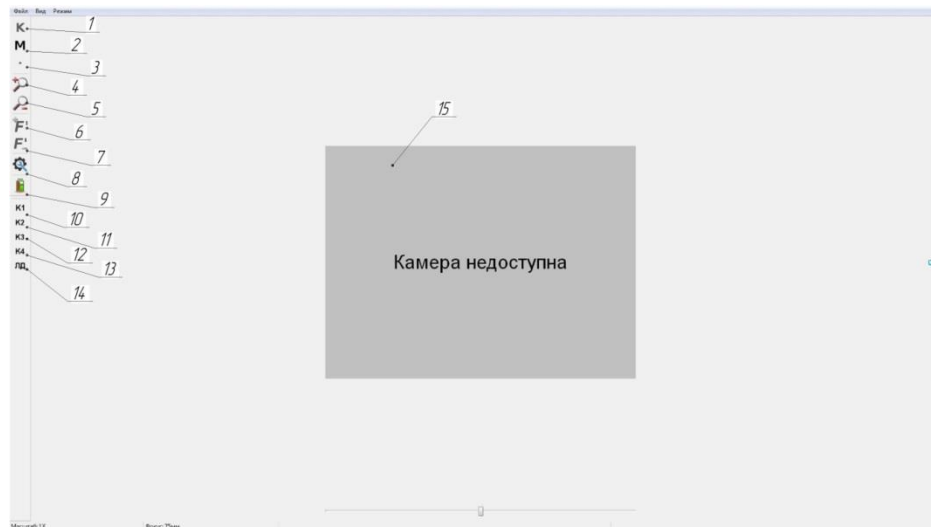
Рисунок 69 – Макетный образец Лазерного Автоколлимационного Микроскопа.

На рисунке 70 представлены разработанные сменные фокусирующие объективы-ахроматы F50, F100 и F300, предназначенные для наведения на автоколлимационные точки контролируемых оптических систем. Данные объективы ахроматизованы для рабочих длин волн В-канала и ИК-канала.



Рисунок 70 – Фокусирующие объективы-ахроматы F50, F100 и F300.

На рисунке 71 представлен общий вид главного окна управляющего программного обеспечения (ПО).



1 – кнопка режима угловых измерений; 2 – кнопка режима линейных измерений;  
3 – кнопка включения перекрестия; 4, 5 – цифровое масштабирование кадра;  
6, 7 – выбор сменного объектива; 8 – управление настройками экспозиции МФПУ каналов; 9 – кнопка выхода; 10 – включение ИК-канала; 11 – включение В-канала;  
12 – включение источника излучения ИК-канала; 13 – включение источника излучения В-канала; 14 – включение источника излучения юстировочного канала

Рисунок 71 – Общий вид главного окна управляющего ПО.

На рисунке 72 показано окно модуля ввода данных управляющего ПО, в котором осуществляется ввод конструктивных параметров контролируемого объектива.

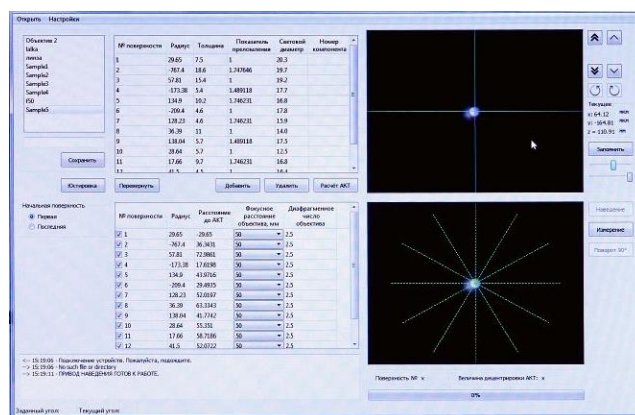
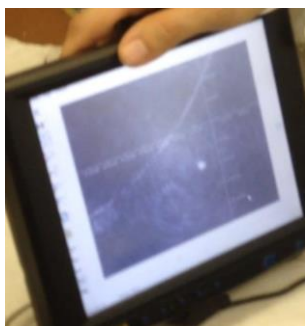
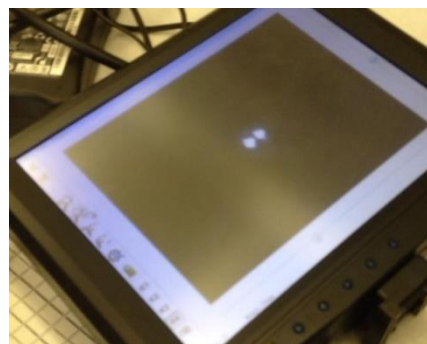


Рисунок 72 – Окно модуля ввода данных.

На рисунке 73 показаны фотографии экрана монитора ЛАМ с автоколлимационными бликами, наблюдаемыми в ИК-канале прибора.



а) Блик от плоского зеркала



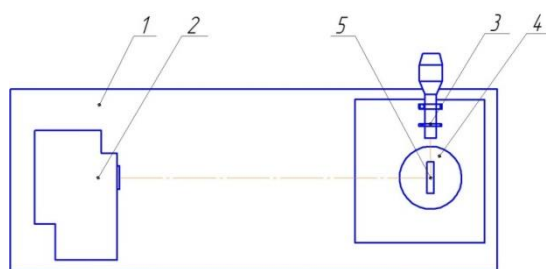
б) Блики от обеих поверхностей линзы

Рисунок 73 – Наблюдение автоколлимационных бликов в ИК-канале прибора.

#### 4.4 Предварительная оценка точностных характеристик макетного образца ЛАМ

Целью данного эксперимента было определение значений абсолютной погрешности измерений угла отклонения контрольного плоского зеркала относительно оптической оси ЛАМ. Контроль угла отклонения плоского зеркала последовательно производился в горизонтальной и вертикальной плоскостях для В-канала, затем для ИК-канала.

Схема лабораторной установки, реализованная для данного испытания, представлена на рисунке 74.



- 1 – виброизолированный стол Standa; 2 – макетный образец ЛАМ;  
3 – гониометр PrismMaster HR; 4 – поворотный столик; 5 – контрольное плоское зеркало с углом клина 1 угл. сек.

Рисунок 74 – Схема лабораторной установки для измерения угла отклонения.

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

$$\Delta\alpha_{abc} = |\alpha_{Г} - \alpha_{М}|, \quad (89)$$



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

$\alpha_{\text{М}}$  – показания ЛАМ.

Результаты измерения угла отклонения приведены в таблице 20. Дополнительно в таблице 20 приведены соответствующие им погрешности измерения в линейной мере, рассчитанные по формуле:

$$\Delta l_{abc} = f'_{об.ФПУ} \cdot \text{tg}(\Delta \alpha_{abc}) \cdot \frac{1}{\beta_{\text{М}}}, \quad (90)$$

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

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

$f'_{об.ФПУ}$  – фокусное расстояние регистрирующего объектива в измерительном канале ЛАМ;

$\beta_{\text{М}} = \frac{f'_{об.ФПУ}}{f'_{ф.об}}$  – линейное измерительного канала ЛАМ, которое для данного

расчета примем равным 1.

Таблица 20 – Результаты измерения угла отклонения контрольного зеркала

Направление	Угол, заданный по гониометру							
	2'	-2'	5'	-5'	10'	-10'	30'	-30'
	$\bar{\Delta \alpha}_{abc}$ В-канала							
Горизонтальное	2"	3"	1"	3"	2"	4"	2"	3"
Вертикальное	5"	2"	6"	2"	2"	4"	2"	6"
	$\Delta l_{abc}$ 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
	$\bar{\Delta \alpha}_{abc}$ ИК-канала							
Горизонтальное	2"	2"	4"	4"	6"	8"	6"	8"
Вертикальное	2"	2"	5"	4"	4"	5"	6"	6"
	$\Delta l_{abc}$ 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

## ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

1. В современных автоколлимационных приборах определение погрешностей центрирования не ограничивается лишь отдельными оптическими деталями. Оно подразумевает также определение пространственного взаиморасположения множества оптических элементов внутри собираемых или уже собранных объективов. Для этого необходимо наличие в данных приборах специального управляющего программного обеспечения (ПО).

2. Современные автоколлимационные приборы для контроля погрешностей центрирования имеют схожую функциональную архитектуру управляющего ПО.

3. Определена структурная модель построения управляющего ПО 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 диапазонах инфракрасного излучения.

4. Производители современных автоколлимационных приборов для автоматизированного контроля погрешностей центрирования не раскрывают реализованные в управляющем ПО принципы определения пространственного взаиморасположения оптических элементов внутри контролируемых объективов. Анализ научных публикаций также показывает недостаток информации по данному вопросу. Поэтому определение указанных принципов является актуальной задачей, требующей постоянного поиска новых решений.

5. На основе положений аналитической геометрии предложены теоретические методы для определения пространственного взаиморасположения элементов внутри объективов оптических систем, работающих в видимой области, а также в ближнем, среднем и дальнем поддиапазонах инфракрасного диапазона.

## 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 диапазонах 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков, В. Г. Тепловизионные приборы для спецтехники / В. Г. Волков // Спецтехника и связь. – 2011. – №1. – С. 2-10
2. Московченко, Л. В. Концепция построения перспективных систем оптико – электронной пассивной локации для надводных кораблей / Л. В. Московченко, В. А. Тупиков, Э. Л. Лысенко // Национальная оборона. – 2012. – №9. – С. 60-61.
3. Развитие новых направлений в отечественном оптическом и оптико-электронном приборостроении / В. А. Балоев [и др.] // Оптический журнал. – 2010. – Т.77, №8. – С. 75-80.
4. Пантелеев, Н. Л. Тепловизионный прицел для крупногабаритного стрелкового оружия / Н. Л. Пантелеев, Н. Г. Мирханов // Оборонная техника. – 2010. – №6 – С. 69-73.
5. Григорьев, А. Израильские оптоэлектронные средства обнаружения огневых позиций противника / А. Григорьев // Зарубежное военное обозрение. – 2013. – №1. – С. 46-49.
6. Применение инфракрасной термографии в современной медицине (обзор литературы) / И. С. Кожевникова [и др.] // Экология человека. – 2017. – №02 – С. 39-46.
7. Тарасов, В. В. Инфракрасные системы смотрящего типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Логос, – 2004. – 444 с.
8. Тарасов, В. В. Современное состояние и перспективы развития зарубежных тепловизионных систем / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №3 (85) – С. 1-13.
9. Якушенков, Ю. Г. Тенденции развития малогабаритных инфракрасных систем 3-го поколения, работающих активно-пассивным методом /

Ю. Г. Якушенков // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – №3 (79) – С. 11-14.

10. Гришин, Е. А. Инфракрасная камера на основе барьеров Шоттки для дневных наблюдений звёзд / Е. А. Гришин, С. Н. Мелков, В. Л. Миловидов // Приборы и техника эксперимента. 2003 – №2. – С. 83-86.

11. Горбунов, Г. Г. Гиперспектральная аппаратура для дистанционного зондирования земли / Г. Г. Горбунов [и др.] // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, №10 – С. 75-82.

12. Тарасов, В. В. Современные проблемы инфракрасной техники / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Изд-во МИИГАиК, 2011. – 84 с.

13. Тарасов, В. В. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. – М.: Университетская книга; Логос, – 2007. – 192 с.

14. Corsi, Carlo. Tutorial review. History highlights and future trends of infrared sensors / Carlo Corsi // Journal of Modern Optics. – 2010. – Vol. 57, №18. – P. 1663-1686.

15. The Laser Technology: New Trends in Biology and Medicine / Luc G. Legres, Christophe Chamot, Mariana Varna et al. // Journal of Modern Physics. – 2014. – №5. – P. 267 – 279.

16. Chalcogenide glass with good thermal stability for the application of molded infrared lens. / Ju Hyeon Choi, Young Jun Jang, Du Hwan Cha [et al.] // SPIE Proc. – 2014. – Vol. 9253. – P.925310

17. Сенник, Б. Н. Асферические и градиентные элементы для оптического и оптико-электронного приборостроения : дис. ...д-ра технич. наук : 05.11.07 / Сенник Богдан Николаевич. – М., 2007. – 256 с.

18. Super-polishing of Zerodur aspheres by means of conventional polishing technology / Jaroslav Polak, Eva Klepetková, Josef Pořmourný [et al.] // SPIE Proc. – 2015. Vol. 9442. – P. 944212

19. Dun, Xiong. Material selection and corresponding optimal surface relief height for multilayer diffractive optical element / Xiong Dun, Weiqi Jin, Xia Wang // *Optical Engineering*. – 2015. – Vol 54, №11. – P. 115105
20. Волков, В. Г. Современные тенденции в разработках и технологиях изготовления объективов для тепловизионных оптических приборов / В. Г. Волков, Е. А. Моисеев, Б. Н. Сеник // *Научно-технический журнал «Контенант»*. – 2016. – Т. 15, №4 – С. 77-80.
21. Mann, Allen. *Infrared Optics and Zoom Lenses* / Allen Mann; Second Edition. – SPIE Press, 2009. – 182 p.
22. Yamanashi, T. Solutions on a high-speed wide-angle zoom lens with aspheric surfaces / Takanori Yamanashi // *SPIE Proc.* – 2012. Vol. 8488. – P. 848801
23. Сайт Edmund Optics [Электронный ресурс]. Barrington, NJ, USA, 2016. URL: <http://www.edmundoptics.com/> (дата обращения: 15.04.2016).
24. Сайт Thorlabs Inc [Электронный ресурс]. Newton, NJ, USA, 1999 – 2016. URL: <http://www.thorlabs.com/> (дата обращения: 15.04.2016).
25. Sun, Haiyin. *Lens Design. A practical guide* / Haiyin Sun. – CRC Press, 2017. – 373 p.
26. Laikin, Milton. *Lens Design* / Milton Laikin; Fourth Edition. – CRC Press, 2006. – 512 p.
27. Инфракрасные объективы тепловизионных приборов и лазерные средства измерения их параметров / В. П. Иванов [и др.] // *Прикладная физика*. – 2005. – №2. – С. 91-93.
28. Объективы для работы с матричными приёмниками излучения в области спектра 8 – 12мкм / Ю. В. Бажанов [и др.] // *Оптический журнал*. – 2002. – Т. 69, №12 – С. 35-36.
29. Объективы с переменным фокусным расстоянием для инфракрасной области спектра с асферическим и киноформным оптическим элементом / Ю. В. Бажанов [и др.] // *Оптический журнал*. – 2002. – Т. 69, №12 – С. 33-34.



30. Объективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием для работы в инфракрасной области спектра / В. П. Иванов [и др.] // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, №1 – С. 70-73.
31. Потапова, Н. И. Малогабаритные светосильные объективы для инфракрасной области / Н. И. Потапова, А. Д. Цветков // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, №9 – С. 45-48.
32. Сокольский, М. Н. Допуски и качество оптического изображения / М. Н. Сокольский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 221 с., ил.
33. Соколова, Н. С. О допусках на децентрировку линз / Н. С. Соколова // Оптико-механическая промышленность. – 1973. – №7. – С. 53-57.
34. Вычислительная оптика: Справочник / М.М. Русинов [и др.]; под общ. ред. М.М. Русинова. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с., ил.
35. Латыев, С. М. Конструирование точных (оптических) приборов / С. М. Латыев. – СПб.: Политехника, 2007. – 580 с.
36. Disruptive advancement in precision lens mounting / Frédéric Lamontagne [et al.] // SPIE Proc. – 2015. – Vol. 9582. – P.95820D
37. Марешаль, А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон. – М.: «Мир», 1964. – 296 с.
38. Hopkins, H. H. A theoretical and experimental study of lens centring errors and their influence on optical image quality / H. H. Hopkins, H. J. Tiziani // British Journal of Applied Physics – 1966. – Vol. 17. – P. 33-55.
39. Губель, Н. Н. Аберрации децентрированных оптических систем / Н. Н. Губель. – Л.: «Машиностроение», 1975. – 272 с.
40. Зверев, В. А. Влияние децентрировки поверхностей вращения на положение плоскости изображения / В. А. Зверев, Е. С. Рытова, И. Н. Тимошук // Оптический журнал. – 2010. – Т.77, №6 – С. 8-13.
41. Burge, J. H. An easy way to relate optical element motion to system pointing stability / J. H. Burge // SPIE Proc. – 2006. – Vol. 6288. – P.62880I

42. Liao, Te-Tan. Decentration error analysis using optical centering device and skew ray tracing / Te-Tan Liao // *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*. –2007. – Vol. 1, №5 – P. 605-615.
43. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]: под общ. ред. М.А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.: ил.
44. Крынин, Л. И. Основы проектирования конструкций объективов: учебное пособие / Л. И. Крынин – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 254 с.
45. Афанасьев, В. А. Оптические измерения: Учебник для вузов / В. А. Афанасьев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 229 с.
46. Zaltz, A. Methods for the control of errors in the fabrication and assembly of optical elements / A. Zaltz, D. Christo // *SPIE Proc.* – 1982. – Vol. 330. – P. 39-48
47. Parks, Robert E. Conjugate selection for precision lens centering / Robert E. Parks // *SPIE Proc.* – 2010. – Vol. 7793. – P. 779304
48. Способ центрирования в оправе линз, работающих в инфракрасной области спектра : пат. 2634078 Рос. Федерация: МПК G 01 В 11/27, G 01 М 11/02, G 02 В 7/02 / Дьякова И.И.; заявитель и патентообладатель Новосибирск, АО «Новосибирский приборостроительный завод» - № 2016117796; заявл. 04.05.2016; опубл. 23.10.2017, Бюл. №30. – 2 с.: ил.
49. Способ сборки объективов, работающих в инфракрасной области спектра : пат. 2355002 Рос. Федерация: МПК G 02 В 7/02 / Хитрик А.С., Быстров В.А., Крынин Л.И., Стырикович Т.В.; заявитель и патентообладатель ОАО «ЛЮМО» - №2007131027/28; заявл. 14.08.2007; опубл. 10.05.2009, Бюл. №13. – 2 с.
50. Пуряев, Д.Т. Оптические измерения: Учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технология оптического приборостроения» / Г. В. Креопалова, Н. Л. Лазарева, Д. Т. Пуряев; под общ. ред. Д.Т. Пуряева. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.: ил.
51. Sereni, G. The study of Newton's rings for alignment of astronomical's instruments / G. Sereni. – *Universita' degli Studi di Padova*, 2015. – 58 p.

52. Интерференционное устройство для контроля децентрировки линзы : пат. 1497450 СССР: МПК G 01 B 9/02 / Елисеев Ю.В., Ларионов Н.П. – заявл. 25.12.1987; опубл. 30.07.1989, Бюл. №28. – 4 с.: ил.
53. Parks, Robert E. Compact dual-interferometer for measuring lens centration and wedge / Robert E. Parks, William P. Kuhn // Proc. ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting: Manufacture and Metrology of Freeform and Off-Axis Aspheric Surfaces, 2015.
54. Parks, Robert E. Dual-interferometer for measuring molded lens tilt and decenter / Robert E. Parks, William P. Kuhn // SPIE Proc. – 2014. – Vol. 9195. – P. 91950E
55. Hung, Min-Wei. Lens decenter and tilt measurement by interferogram / Min-Wei Hung, Wen-Hong Wu and Kuo-Cheng Huang // SPIE Proc. – 2009. – Vol. 7506. – P. 75060R
56. Lens measuring method and device for determining decenter and tilt of the lens : пат. 7535557 США: МПК G 01 B 11/272 / Wen-Hong Wu, Kuo-Cheng Huang, Chien-Shing Lee, Jung-Ru Yu; заявитель и патентообладатель Hsinchu (TW) Instrument Technology Research Center - №2007/0201037; заявл. 30.08.2007; опубл. 19.05.2009 – 19 с.: ил.
57. Зверев, В. А. Анализ aberrаций изображения, образованного системой нецентрированных оптических поверхностей / В. А. Зверев, Е. С. Рытова, И. Н. Тимощук // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 117, №10 – С. 652-662
58. Рытова, Е.С. Исследование влияния децентрировки оптических поверхностей на положение и качество образованного изображения: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.11.07 / Рытова Елена Сергеевна. – СПб., 2011. – 20 с.
59. Кулакова, Н. Н. Расчет допусков объектива тепловизионной системы [Электронный ресурс] / Н. Н. Кулакова, С. В. Мишин // Инженерный журнал: Наука и инновации, – 2013. – вып. 7. Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/831.html>

60. Латыев, С. М. Конструкторские и технологические методы обеспечения центрировки линзовых систем / С. М. Латыев, Д. М. Румянцев, П. А. Курицын // Оптический журнал. – 2013. – Т 80, №3 – С. 92-96.
61. Бао, Буй Динь. Автоматизация центрировки линз при вклейке в оправы / Буй Динь Бао, С. М. Латыев, Р. Тезка // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2015. – Т 15, №6 – С. 1030-1035.
62. Латыев, С. М. Методы центрировки линз в оптических системах / С. М. Латыев, Буй Динь Бао // Известия вузов, сер. «Приборостроение». – 2013. – Т.56, №11, – С. 66-72.
63. Fang, Joyce. Automated Optical System Alignment and Low Order Wavefront Sensing / Joyce Fang, Dmitry Savransky // SPIE Proc. – 2015. – Vol. 9481.– P. 94810W
64. Shack, R.V. Production and use of a lenticular Hartmann screen (abstract only) / R. V. Shack and B. C. Platt // JOSA, – 1971. – Vol. 61. – p. 656.
65. Birch, Gabriel C. Hyperspectral Shack-Hartmann test / Gabriel C. Birch, Michael R. Descour, Tomasz S. Tkaczyk // Appl. Opt. – 2010. – Vol. 49(28). – p. 5399-5406.
66. Testing highly aberrated large optics with a Shack-Hartmann wavefront sensor / Daniel R. Neal [et al.] // SPIE Proc. – 2003. – Vol. 5162.– P. 5162-19
67. Oteo, Esther. Method for determining individual element misalignments in optical systems / Esther Oteo, J. A. Diaz, J. Arasa // SPIE Proc. – 2012. – Vol. 8486.– P. 848617
68. Xiang, Li. Inspection of misalignment factors in lens assembly / Li Xiang, Zhao Liping, Fang Zhong Ping // SPIE Proc. – 2009. – Vol. 7390.– P. 739006
69. Inverse calculation of position and tilt errors of optical components from wavefront data / H. Gilbergs [et al.] // SPIE Proc. – 2011. – Vol. 8083.– P. 808314
70. Tolerance analysis of misalignment in an optical system using Shack-Hartmann wavefront sensor: experimental study / Venkataramana Kalikivayi [et al.] // Optical Engineering. – 2015. – Vol. 54, №7 – P.075104

71. Heinisch, J. Complete characterization of assembled optics with respect to centering error and lens distances / J. Heinisch, P. Langehanenberg, H. Pannhoff // SPIE Proc. – 2011. – Vol. 8082.– P. 80821M
72. Heinisch, J. Novel Technique for Measurement of Centration Errors of Complex, Completely Mounted Multi-Element Objective Lenses / J. Heinisch, E. Dumitrescu, S. Krey // SPIE Proc. – 2006. – Vol. 6288.– P. 628810
73. Precise opto-mechanical characterization of assembled infrared optics / Daniel Winters [et al.] // SPIE Proc. – 2013. – Vol. 8704.– P. 87042D
74. Способ центрировки линз объектива штабельной конструкции и оправы линз для его осуществления : пат. 2602419 Рос. Федерация: МПК G 01 М 11/02, G 01 В 11/27, G 02 В 7/02 / Латыев С.М., Буй Динь Бао, Белойван П.А., Табачков А.Г.; заявитель и патентообладатель Санкт-Петербург, Университет ИТМО - № 2015109310; заявл. 17.03.2015; опубл. 10.10.2016, Бюл. №28. – 9 с.: ил.
75. Measurement of the positions of centres of curvature of optical surfaces of multi-lens optical system : пат. 8913234 США: МПК G 01 М 11/0221 / Josef Heinisch, Stefan Krey, Eugen Dumitrescu, Aiko Ruprecht, Patrik Langehanenberg; заявитель и патентообладатель Wedel (DE) Trioptics GmbH - №2012/0133924; заявл. 31.05.2012; опубл. 16.12.2014 – 15 с.: ил.
76. Measurement of the positions of centres of curvature of optical surfaces of multi-lens optical system : з из. 20120133924 США: МПК G 01 М 11/0221 / Josef Heinisch, Stefan Krey, Eugen Dumitrescu, Aiko Ruprecht, Patrik Langehanenberg; заявитель Wedel (DE) Trioptics GmbH; заявл. 22.11.2011; опубл. 31.05.2012 – 15 с.: ил.
77. Parks, R. E. Lens centering using the Point Source Microscope / R. E. Parks // SPIE Proc. – 2007. – Vol. 6676.– P. 667603
78. Point source module and methods of aligning and using the same : пат. 6924897 США: МПК G 02 В 26/06 / Robert E. Parks, William P. Kuhn; заявитель и патентообладатель Optical Perspectives Group LLC - №20020054296; заявл. 09.05.2002; опубл. 02.08.2005 – 12 с.: ил.

79. Старостников, Н. О. Оценка точности определения координат энергетического центра тяжести тест-объекта коллиматора в схемах контроля оптико-электронных приборов с матричными фотоприемниками / Н. О. Старостников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. – 2015. – №5 – С. 71-74
80. Application of Area CMOS Image Processing for 2-D Optoelectronic Autocollimator / Liu Yusheng [et al.] // International Conference on Mechatronic Sciences, Electric Engineering and Computer (MEC), 2013.
81. Optimized Algorithm of Laser Spot Center Location in Strong Noise / J. W. Cui [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2005. – Vol. 13. – P. 312-315
82. Research on sub-pixel location of the laser spot center / Liming Song [et al.] // Fifth International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2013
83. An improved sub-pixel algorithm for laser spot center determination based on Zernike moments / Zhang Kun [et al.] // SPIE Proc. – 2009. – Vol. 7382.– P. 738244
84. Jia-ju, Ying. High Speed Gradient Hough Transform Algorithm / Ying Jia-ju, He Yong-quiang, Zhou Zhong-liang // SPIE Proc. – 2008. – Vol. 6625.– P. 66250J
85. Бабкина, Л. А. Использование моментов Цернике при анализе изображений / Л. А. Бабкина [и др.] // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. – 2013. – Т. 16, №2. – С. 147–163.
86. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс; пер. с англ. – 3-е изд. испр. и доп. – М.: Техносфера, 2012. – 1104 с.
87. New algorithm of sub-pixel locating laser spot center / Ruifang Ye [et al.] // SPIE Proc. – 2009. – Vol. 7282.– P. 72821T
88. Осадчий, И. С. Методы обработки графической информации для повышения точности приборов астроориентации космического базирования: дис. ... канд. технич. наук: 05.13.01 / Осадчий Иван Сергеевич; МФТИ. – М., 2015. – 167 с.

89. Vyas, Akondi. Improved Iteratively Weighted Centroiding for accurate spot detection in Laser Guide Star based Shack Hartmann Sensor / Akondi Vyas, M. B. Roopashree, B. Raghavendra Prasad // SPIE Proc. – 2010. – Vol. 7588.– P. 758806
90. Стороженко, А. И. Измерение координат энергетических центров пятен рассеяния на матричном приемнике / А. И. Стороженко, Н. Д. Толстоба // Международный оптический конгресс «Оптика-XXI век», 2002.
91. Молев, Ф. В. Исследование оптико-электронной системы определения взаимного рассогласования элементов космического телескопа: дис. ... канд. технич. наук: 05.11.07 / Молев Федор Владимирович; СПбГУ ИТМО. – СПб., – 2014. – 143 с.
92. A High Accuracy Sub-pixel Light Spot Positioning Algorithm / Ligu Sheng [et al.] // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vols. 644-650. – P.1459-1463.
93. Xin, Lei. Laser spot center location by using the gradient-based and least square algorithms / Lei Xin, Lijun Xu, Zhang Cao // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2013
94. Dong, Hongjun. Non-iterative spot center location algorithm based on Gaussian for fish-eye imaging laser warning system / Hongjun Dong, Long Wang // Optik – International Journal for Light and Electron Optics. – 2012. – Vol.123(23). – p. 2148– 2153.
95. Старостников, Н. О. Сравнение по точности алгоритмов определения координат центров изображений в оптико-электронных приборах / Н. О. Старостников, Р. В. Фёдорцев // Наука и техника. – 2018. – Т.17, №1 – С.79-86
96. Осадчий, И. С. Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования / И. С. Осадчий // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – №5. – С.5
97. Howell, S. B. Handbook of CCD Astronomy / S. B. Howell. – Cambridge, 2006. – 224 pp.

98. Крюкова, К. А. Анализ методологических погрешностей определения угловых координат в устройстве сопряжения осей [Электронный ресурс] / К. А. Крюкова // Международный студенческий научный вестник. – 2018. – №1. – Режим доступа: <http://www.eduherald.ru/ru/article/view?id=18046>
99. Shortis, M. R. Comparison of some techniques for subpixel location of discrete target images / M. R. Shortis, T. A. Clarke, T. A. Short // SPIE Proc. – 1994. – Vol. 2350. – P. 239-250
100. A High Precision Laser Spot Center Location Method Based on Multi-scale Image Analysis / Zhen Lui [et al.] // Frontiers in Computer Education, AISC. – 2012. – Vol. 133. – P.1019–1025.
101. Auer, L. H. Digital Image Centering / L. H. Auer, W.F. van Altena // The Astronomical Journal. – 1975. – Vol. 83. – №5. – P. 411-418
102. Аванесов, Г. А. Исследование смещения энергетического центра изображений звезд относительно геометрического центра изображений звезд относительно геометрического центра на ПЗС-матрице и коррекция методической ошибки / Г. А. Аванесов, Т. В. Кондратьева, А. В. Никитин // Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов. – 2008. – С. 420-446.
103. Nightingale, Alice M. Shack-Hartmann wavefront sensor image analysis: a comparison of centroiding methods and image-processing techniques / Alice M. Nightingale, Stanislav Gordeyev // Optical Engineering. – 2013. – Vol. 52(7). – P. 071413
104. Захарова, Е. М. Обзор методов многомерной оптимизации / Е. М. Захарова, И. К. Минашина // Информационные процессы. – 2014. – Т.14, №3 – с. 256-274.
105. Мишин, С. В. Адаптация алгоритма поиска координат энергетического центра изображения автоколлимационной точки для работы с цифровым автоколлиматором / С. В. Мишин, Н. Н. Кулакова, А. В. Тарасишин // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2016. – №2. – С. 117 – 124.



106. Лемешко, Б. Ю. Методы оптимизации: Конспект лекций / Б.Ю. Лемешко. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – 126 с.
107. Борн, М. Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф; изд. 2-е, пер. с англ. Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1973. – 720 с.
108. Калиткин, Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин; 2-е изд., испр. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 592 с.
109. Алгоритмы поиска экстремума функции многих переменных: Методические указания / Сост. О. В. Барабашова, Е. Г. Крушель; ВолгГТУ, Волгоград, 2000. – 30 с.
110. Spendley, W. Sequential Application of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operation / W. Spendley, G. R. Nekt, F. R. Himsworth // Technometrics. – 1962. – Vol. 4. – P.441–461.
111. Александров П. С. Введение в теорию размерности. Введение в теорию топологических пространств и общую теорию размерности / П. С. Александров, Б. А. Пасынков. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
112. Залгаллер В. А. Симплекс // Математическая энциклопедия. Т.4 / Гл. ред. И. М. Виноградов. – М.: Советская энциклопедия, 1984. – 1216 стб. – Стб. 1151.
113. Nelder, J. A. A simplex method for function minimization / J. A. Nelder, R. Mead // Computer Journal. – 1965. – Vol. 7. – P. 308–313.
114. Иванов, А. В. Компьютерные методы оптимизации оптических систем. Учебное пособие / А. В. Иванов. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. – 114 с.
115. Методы оптимизации / А. И Сафронов [и др.] – М.: РУТ (МИИТ), 2017. – 63 с.
116. Губарь Ю.В. Введение в математическое программирование [Электронный ресурс] / Губарь Ю. В. – М.: ИНТУИТ, 2016. – 226 с. – Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/73663.html>.
117. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б. Банди. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.