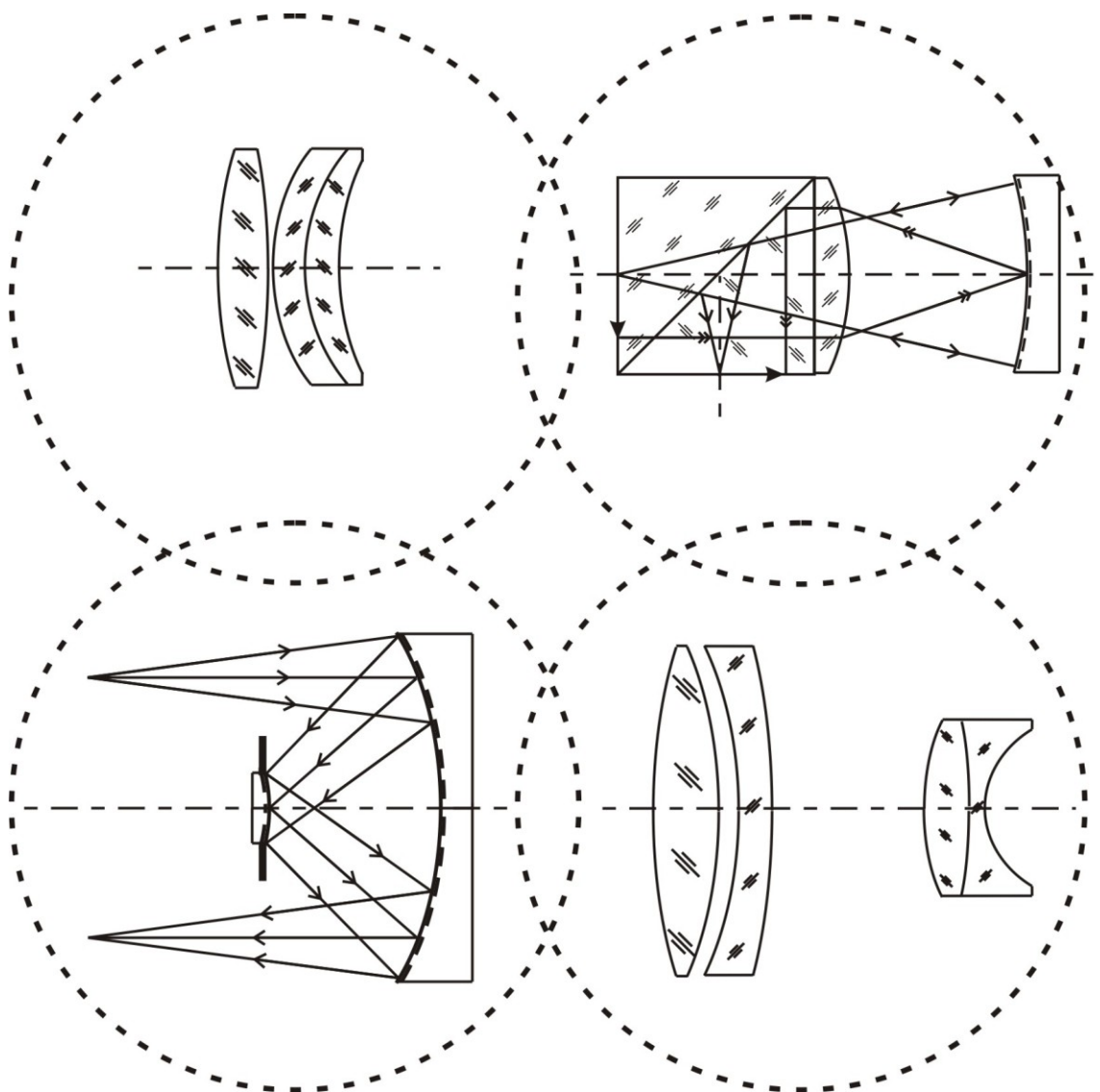


А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН, СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Методические указания к лабораторным работам



Санкт-Петербург
2011

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

А.П.Грамматин, Г.Э.Романова, Е.А.Цыганок

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН,
СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ
ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**Методические указания к лабораторным
работам**



Санкт-Петербург

2011

А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем. Методические указания к лабораторным работам. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 111 с.

В учебном пособии представлены краткие теоретические сведения, варианты индивидуальных заданий и порядок выполнения лабораторных работ, проводимых в рамках дисциплин «Расчет и автоматизация проектирования оптических систем», «Расчет оптических систем», «Методы проектирования оптических систем».

Учебное пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению подготовки 200400 «Оптотехника», и магистров, обучающихся по направлению 200400 «Оптотехника» в рамках образовательной программы «Прикладная оптика».

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров 200400 «Оптотехника» (протокол № 8 от 25 ноября 2011 г.)

Рецензент: д.т.н., профессор Коняхин И.А. (СПб ГУ ИТМО)



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011

© А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	стр. 5
РАЗДЕЛ 1. Свойства aberrаций	
Лабораторная работа №1.1 Изучение сферической aberrации третьего порядка	6
Лабораторная работа №1.2 Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации при наличии третьих и пятых ее порядков	13
Лабораторная работа № 1.3 Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала	17
Лабораторная работа № 1.4 Среднеквадратическая волновая aberrация как критерий качества изображения для дифракционно ограниченных оптических систем.....	22
Лабораторная работа № 1.5 Использование формул Марешаля для оптимальной коррекции среднеквадратической волновой сферической aberrации	27
Лабораторная работа № 1.6 Изучение свойств комы третьего порядка.....	29
Лабораторная работа № 1.7 Исследование пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка	36
Лабораторная работа № 1.8 Связь между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма	40
Лабораторная работа № 1.9 Исследование кривизны поверхности изображения на примере объектива микроскопа из двух сферических зеркал.....	44
Лабораторная работа № 1.10 Исследование астигматизма на примере объектив «Авангард»	48
Лабораторная работа № 1.11 Исследование свойств хроматизма положения.....	53
Лабораторная работа № 1.12 Вторичный спектр и его свойства..	57
Лабораторная работа № 1.13 Исследование сферохроматической aberrации.....	61
Лабораторная работа № 1.14 Исследование хроматизма увеличения.....	64
РАЗДЕЛ 2. Методы расчета оптических систем	
Лабораторная работа № 2.1 Расчет схем контроля асферических поверхностей второго порядка	68
Лабораторная работа № 2.2 Расчет объектива для считывания информации с кодового диска.....	72
Лабораторная работа № 2.3 Исследование предельных возможностей одиночной линзы в инфракрасной области спектра	76

Лабораторная работа № 2.4 Исследование сферической аберрации пятого порядка объективов, склеенных из двух линз ...	80
Лабораторная работа № 2.5 Расчет и исследование объектива из двух линз с воздушным промежутком	84
Лабораторная работа № 2.6 Расчет и исследование зеркального объектива Ричи-Кретьена.....	88
Лабораторная работа № 2.7 Расчет трубы Галилея как системы скачкообразной смены увеличения с использованием основных параметров Г.Г. Слюсарева	93
Лабораторная работа № 2.8 Синтез и расчет четырехлинзового безабберационного объектива	98
Лабораторная работа № 2.9 Синтез и расчет объектива Петцваля с линзой Смита	103
Лабораторная работа № 2.10 Модернизация оптической системы монокуляра бинокля 8 x 30	107
ЛИТЕРАТУРА	111

Введение

Учебное пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины «Расчет оптических систем», «Методы расчета оптических систем», «Автоматизация проектирования оптических систем».

В пособии представлена методика преподавания дисциплин, связанных с расчетом оптических систем, в которой общепринятый вывод формул заменяется компьютерным моделированием, базирующимся на непосредственном расчете хода лучей. В результате могут быть получены эмпирические формулы, позволяющие оценить коррекционные возможности различных типов оптических систем.

В учебном пособии представлены работы, посвященные изучению отдельных типов aberrаций третьего порядка на примерах тестовых систем, в каждой из которых имеет место одна конкретная aberrация, а остальные отсутствуют. Второй раздел пособия посвящен проектированию некоторых распространенных типов оптических систем, в том числе зрительных труб и объективов, с применением методов Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова и методов автоматизированной коррекции.

Предложенные методы расчета и исследования оптических систем могут применяться при выполнении лабораторных работ, домашних заданий и выпускных квалификационных работ. Полученные при выполнении лабораторных работ результаты можно успешно применять в практике расчета и проектирования реальных оптических систем.

РАЗДЕЛ 1. Свойства aberrаций

Лабораторная работа № 1.1

Изучение сферической aberrации третьего порядка

Цель работы: изучение сферической aberrации третьего порядка, закрепление теоретического материала.

Задачи работы: изучение сферической aberrации третьего порядка на примере модифицированного объектива «Микронар».

Краткие теоретические сведения:

Сферическая aberrация проявляется в нарушении гомоцентричности пучка лучей при сохранении его симметрии. Характерным свойством сферической aberrации третьего порядка является её наличие и постоянство в пределах всего поля изображения, включая его центр. Поскольку в центре поля другие монохроматические aberrации отсутствуют, то для определения сферической aberrации необходимо и достаточно рассчитать ход лучей осевых пучков.

В практике расчетов оптических систем используются четыре численных представления сферической aberrации:

1. Поперечная aberrация $Y'(0)$. Измеряется по оси OY , то есть перпендикулярно оптической оси. Моделирует визуальное восприятие изображения точки.
2. Продольная aberrация $DS'(0)$ Измеряется вдоль оси OZ , то есть вдоль оптической оси. Используется, главным образом, при проектировании оптических систем по частям, например, телескопических.
3. Угловая aberrация $C'(0)$. Является аналогом поперечной aberrации. Используется в случае, когда изображение находится на бесконечности.
4. Волновая aberrация $W(0)$. Используется при расчете так называемых дифракционно-ограниченных оптических систем, то есть систем, качество изображения которых определяется дифракцией.

В графическом представлении в системе САРО по требованию 5 выдается поперечная сферическая aberrация как функция $\text{tg}\sigma'$ или как функция радиуса выходного зрачка H' . Волновая сферическая aberrация в графическом представлении выдается по требованию 51 в длинах волн в зависимости от таких же аргументов.

По требованию 28 в системе САРО выдается пятно рассеяния для центра поля и двух точек, соответствующих краю поля Y' и точке, приблизительно соответствующей $0,707Y'$. Пятно рассеяния образовано точками пересечения 1200 лучей с плоскостью изображения, равномерно распределенных в плоскости входного зрачка.

В качестве тестовой системы для изучения свойств сферической aberrации третьего порядка используется репродукционный объектив «Микронар», модифицированный с целью ее введения.

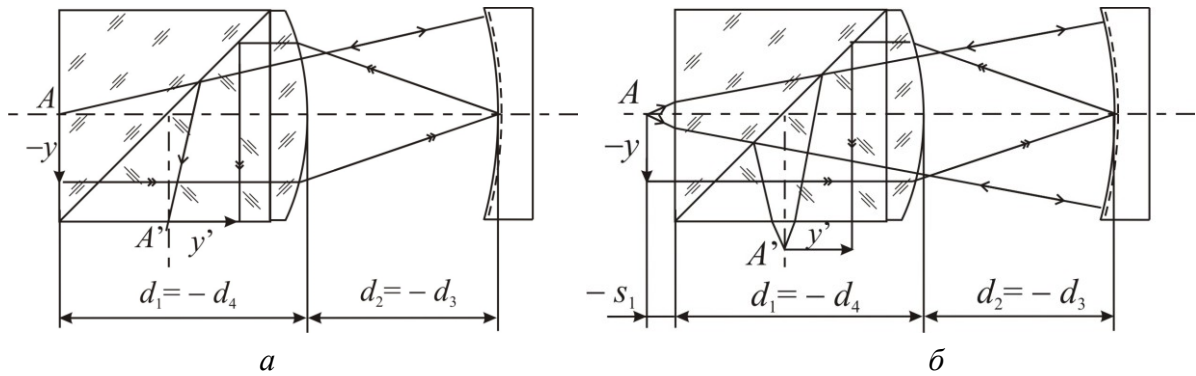


Рис. 1.1.1 Схема объектива «Микронар»

Объектив «Микронар» состоит из призмы-куб с полупрозрачной гипотенузной гранью (см. рис. 1.1.1). Ко второй поверхности призмы присоединена плосковыпуклая линза, за которой расположено сферическое зеркало. Центры сферической поверхности линзы и зеркала совпадают и совмещены с осевой точкой предмета A (рис. 1.1.1), то есть эти поверхности являются конфокальными. Предмет располагается на первой поверхности призмы, изображение – на последней, апертурная диафрагма – на оправе сферического зеркала. Поскольку первая плоская поверхность является апланатической, а поверхности линзы и зеркала также апланатичны (конфокальны), то объектив строго апланатичен.

Главные лучи как в пространстве предметов, так и изображений идут параллельно оптической оси. Благодаря этому, как показано в теории aberrаций, устраняются кривизна поверхности изображения и меридиональная составляющая астигматизма. Сагиттальная составляющая

и aberrации широкого сагиттального пучка лучей полностью устранены. Объектив построен с использованием метода М.М. Русинова.

Объектив модифицирован путем смещения плоскостей предмета и изображения относительно первой и последней поверхностей объектива соответственно (рис. 1.1.1б), благодаря чему возникает сферическая aberrация третьего порядка.

Порядок выполнения работы:

1. Ввести в компьютер начальные данные в соответствии с индивидуальным заданием (см. таблицу). Рассчитать ход лучей по требованию 1 САРО, определить параксиальные характеристики. Убедиться, что линейное увеличение системы $V = -1$, а входной и выходной зрачки практически находятся на бесконечности. Это свидетельствует о правильности ввода начальных данных. Вывести вид пятен рассеяния по требованию 28. Убедиться, что пятно рассеяния по всему полю одинаково, что свидетельствует об отсутствии других aberrаций, кроме сферической aberrации.
2. Вновь рассчитать ход лучей по требованию 1 и изучить столбцы, содержащие продольную сферическую aberrацию $DS'(0)$, поперечную сферическую aberrацию $Y'(0)$ и волновую сферическую aberrацию $W(0)$. Принимая во внимание, что входные апертуры $\sin \sigma$ для первого и третьего лучей соотносятся как $1:\sqrt{0.5}$, найти показатели степени x , y , z , а также коэффициенты a , b и c в выражениях:

$$DS'(0) = a(\sin \sigma)^x, \quad (1.1.1)$$

$$D^y Y(0) = b(\sin \sigma)^y, \quad (1.1.2)$$

$$W(0) = c(\sin \sigma)^z. \quad (1.1.3)$$

Округлить показатели степени до целых значений и убедиться, что сферическая aberrация третьего порядка в продольном выражении имеет второй порядок, поперечная – третий, а волновая – четвертый. Третий луч в общепринятой терминологии называется зоной зрачка.

3. Изучить влияние смещения плоскости установки $DS'Y$ на поперечную сферическую aberrацию. Путем подбора найти положение плоскости установки, при котором $Y'(0)_1 = -Y'(0)_4$, где индексы обозначают номера лучей. Нетрудно убедиться, например, используя требование 28 САРО, что пятно рассеяния при этом имеет

минимальный диаметр. Сравнить диаметр пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки и в плоскости Гаусса, используя численные значения из таблицы. Сравнить смещение плоскости наилучшей установки со значениями продольной сферической aberrации относительно плоскости Гаусса. Убедиться, что $DS'Y=DS'(0)_2$.

4. Ознакомиться с графической формой выдачи сферической aberrации, для чего выполнить требование 5. График, расположенный в левом верхнем углу экрана представляет зависимость поперечной сферической aberrации (отложена по оси OX) от тангенса апертурного угла в пространстве изображений $\text{tg}\sigma'$. На экране представлен также масштаб графика: цена одного деления шкалы в мм. По оси абсцисс штрихами отмечены значения $\text{tg}\sigma'$, соответствующие первому, второму, третьему и четвертому лучам. Нетрудно видеть, что и для внеосевых точек поля (второй и третий графики), кривые линии идентичны таковым для осевой точки, что свидетельствует об отсутствии внеосевых aberrаций и постоянстве сферической aberrации по полю изображения.
5. Для получения графиков волновой aberrации необходимо выполнить требование 51. Волновая aberrация в длинах волн представлена по оси ординат.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей:

Положение предмета $s_j = -10$ ($A_0=1$; $HA = -10$);

положение входного зрачка определяется положением апертурной диафрагмы на третьей поверхности: $ND=3$, $DD=0$. Так как изображение апертурной диафрагмы окажется близким к бесконечности, то для второго параксиального луча можно задать $s_p=1000$ ($B_0=1$; $HB=1000$);

Размер предмета $Y_{MAX} = -8$ мм;

Размер зрачка задается синусом апертурного угла в пространстве предметов $MU_{MAX} = -0.1$;

Длина волны 0,000е. Повторить шесть раз. При этом графики aberrаций изображаются наиболее контрастно.

№ вар.	Исходные данные		
1	$r_1 = \infty$ $r_2 = -121.34$ $r_3 = -354.34$ $r_4 = -121.34$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 234.07$ $d_3 = -234.07$ $d_3 = -100$	1 К8 1 -1 -К8 -1
2	$r_1 = \infty$ $r_2 = -121.45$ $r_3 = -377.42$ $r_4 = -121.45$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 257.28$ $d_3 = -257.28$ $d_3 = -100$	1 ЛК6 1 -1 -ЛК6 -1
3	$r_1 = \infty$ $r_2 = -121.60$ $r_3 = -344.75$ $r_4 = -121.60$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 224.25$ $d_3 = -224.25$ $d_3 = -100$	1 БК6 1 -1 -БК6 -1
4	$r_1 = \infty$ $r_2 = -121.69$ $r_3 = -342.31$ $r_4 = -121.69$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 221.70$ $d_3 = -221.70$ $d_3 = -100$	1 БК8 1 -1 -БК8 -1
5	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.12$ $r_3 = -334.59$ $r_4 = -122.12$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 213.71$ $d_3 = -213.71$ $d_3 = -100$	1 БК10 1 -1 -БК10 -1
6	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.06$ $r_3 = -333.27$ $r_4 = -122.06$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 212.34$ $d_3 = -212.34$ $d_3 = -100$	1 ТК2 1 -1 -ТК2 -1

№ вар.	Исходные данные		
7	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.48$ $r_3 = -320.34$ $r_4 = -122.48$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 198.98$ $d_3 = -198.98$ $d_3 = -100$	1 TK14 1 -1 -TK14 -1
8	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.49$ $r_3 = -317.56$ $r_4 = -122.49$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 196.12$ $d_3 = -196.12$ $d_3 = -100$	1 TK20 1 -1 -TK20 -1
9	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.54$ $r_3 = -316.04$ $r_4 = -122.54$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 194.57$ $d_3 = -194.57$ $d_3 = -100$	1 БФ12 1 -1 -БФ12 -1
10	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.40$ $r_3 = -322.91$ $r_4 = -122.40$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 201.64$ $d_3 = -201.64$ $d_3 = -100$	1 Ф6 1 -1 -Ф6 -1
11	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.41$ $r_3 = -319.84$ $r_4 = -122.41$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 198.48$ $d_3 = -198.48$ $d_3 = -100$	1 Ф1 1 -1 -Ф1 -1
12	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.81$ $r_3 = -309.97$ $r_4 = -122.81$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 188.28$ $d_3 = -188.28$ $d_3 = -100$	1 ТФ1 1 -1 -ТФ1 -1

№ вар.	Исходные данные		
13	$r_1 = \infty$	$d_1 = 100$	1
	$r_2 = -123.55$	$d_2 = 170.83$	ТФ3
	$r_3 = -293.28$	$d_3 = -170.83$	1
	$r_4 = -122.55$	$d_3 = -100$	-1
	$r_5 = \infty$		-ТФ3 -1
14	$r_1 = \infty$	$d_1 = 100$	1
	$r_2 = -123.82$	$d_2 = 162.55$	ТФ5
	$r_3 = -285.32$	$d_3 = -162.55$	1
	$r_4 = -123.82$	$d_3 = -100$	-1
	$r_5 = \infty$		-ТФ5 -1
15	$r_1 = \infty$	$d_1 = 100$	1
	$r_2 = -122.16$	$d_2 = 211.25$	ЛФ5
	$r_3 = -332.24$	$d_3 = -211.25$	1
	$r_4 = -122.16$	$d_3 = -100$	-1
	$r_5 = \infty$		-ЛФ5 -1

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры оптической системы
2. Соотношения между значениями продольной, поперечной и волновой аберрациями для края и зоны зрачка.
3. Значения диаметров пятен рассеяния для трех точек поля
4. Оптимальное смещение плоскости установки и минимальный диаметр пятна рассеяния.
5. Графики продольной, поперечной и волновой аберраций.

Контрольные вопросы:

1. Случаи использования различных способов представления сферической аберрации.
2. Зависимость сферической аберрации третьего порядка от размеров поля.
3. Оптимальное смещение плоскости установки, при котором достигается минимальный размер пятна рассеяния.
4. Во сколько раз уменьшается размер пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки?

Лабораторная работа № 1.2

Оптимальная коррекция поперечной сферической аберрации при наличии третьих и пятых ее порядков

Цель работы: определить условия оптимальной коррекции поперечной сферической аберрации.

Задачи работы: на примере объектива склеенного из двух линз сформулировать алгоритм, обеспечивающий оптимальную коррекцию поперечной сферической аберрации.

Краткие теоретические сведения:

В зрительных трубах основным критерием поля является угловая сферическая аберрация. Ее величина определяется, как правило, поперечной сферической аберрацией пятого порядка объектива и линз оборачивающей системы. Классическим способом коррекции угловой сферической аберрации σ' зрительной трубы является устранение таковой для края выходного зрачка m' . При этом максимальное значение этой аберрации, как показано теоретически, имеет место при $m'_{\max} = \sqrt{0,6} \cdot m'$. Практически установлено, что допустимое значение $\sigma'_{\max} \leq 1'$.

Порядок выполнения:

1. Записать исходную оптическую систему – объектив, склеенный из двух линз, полагая:
 $\alpha_1=0$; $\alpha_2=0,5$; $\alpha_3=0,3$; $\alpha_4=1$
 $d_1=4$; $d_2=4$.
 Марки стекол – в соответствии с индивидуальным заданием.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО) сферической аберрации $Y'(0)=0 \pm 0,00001$ и комы $\eta=0 \pm 0,0001$ на краю отверстия, используя в качестве коррекционных параметров углы первого параксиального луча α_2 и α_3 (А2 и А3 САРО).
3. Выполнить расчет аберраций для осевой точки предмета (треб.1 САРО), обеспечив вывод на экран значений для 8 лучей. Для чего записать:

РАЗМЕР ПРЕДМЕТА

1

РАЗМЕР ЗРАЧКА

8

4. Убедиться, что максимальное значение поперечной сферической аберрации $Y'(0)$ имеет место для луча, находящегося в четвертой строке и соответствующего $H = \sqrt{5/8} H_{MAX}$ (луч 22 SAPO).
5. С помощью введения плоскости установки DS'Y получить $Y'(0)_1 = -Y'(0)_{22}$. Для этого выполнить автоматизированную коррекцию (треб.11 SAPO), в качестве коррекционных параметров использовать смещение плоскости установки DS'Y. Корректируемые функции, обеспечивающие выполнение условия $Y'(0)_1 + Y'(0)_{22} = 0$, должны быть:

НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ	
0	1	1	A
0	22	1	A

Вместо "А" могут использоваться любая буква или знак.

6. Вывести на экран значения аберраций (треб.1 SAPO) для восьми лучей и убедиться, что достигнута оптимальная коррекция.
7. Вывести на экран пятно рассеяния (треб.28 SAPO), оценить его размеры и сравнить с величиной $Y'(0)_1 - Y'(0)_{22}$.
8. Убрать плоскость установки и повторить п.7. А также сравнить диаметры пятен рассеяния с плоскостью установки и без нее.

При работе приборов происходит автоматический выбор плоскости наилучшей установки (ПНУ): либо за счет аккомодации глаза, либо за счет фокусировки окуляра.

9. Проверить, нельзя ли достигнуть лучшего исправления сферической аберрации, если выполнить одновременную коррекцию сферической аберрации и введение ПНУ. Для чего в последней системе с ПНУ ввести условия коррекции: $Y'(0)_1 = -Y'(0)_{22} = Y'(0)_{24}$. Это условие записывается:

НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ	
0	1	1	A
0	22	1	A
0	1	1	B
0	24	1	-B
0	1	1	A
0	1	2	

При этом осуществляется и коррекция величины комы η . Допуски – см. пункт 2. Коррекционными параметрами служат A_2 , A_3 и $DS'Y$.

10. Вывести на экран значения aberrаций (треб.1 САРО) для восьми лучей и убедиться, что для всех лучей, кроме отмеченных выше, aberrация $Y'(0)$ имеет меньшее по абсолютной величине значение. Сравнить диаметр пятна рассеяния с таковым, полученным в п.7.
11. Вернуться к начальной системе п.1. Сделать $DS'Y=0$ и выполнить автоматизированную коррекцию в соответствии с п.9. Убедиться, что результат совпадает с полученным в п.10.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета $S_1=\infty$ ($A_0=0$, $HA=100$);

Зрачок совпадает с первой поверхностью ($B_0=1$, $HB=0$);

Размер предмета $\sin\omega=MU_{MAX}=0,05$;

Размер зрачка $H_{MAX}=12,5$;

Длина волны: e .

Марки стекол в соответствии с индивидуальным заданием:

№ вар.	Марки стекол
1	Ф9-БК6
2	Ф1-ЛК7
3	ТФ2-К19
4	ТФ2-БК4
5	ТФ3-БФ7
6	ТФ4-БФ13
7	БФ7-ТФ5
8	БФ11-ТФ7
9	ЛК7-ТФ2
10	К8-Ф9
11	К14-ТФ3
12	ТК12-БФ24
13	ТК23-БФ12
14	ТК23-БФ28
15	БК10-Ф9

Содержание отчета:

1. Таблицы aberrаций и график поперечной сферической aberrации в плоскости Гаусса
2. График поперечной сферической aberrации в плоскости наилучшей установки
3. Во сколько раз уменьшается размер пятна рассеяния в плоскости наилучшей установки?

Контрольные вопросы

1. В каких оптических системах в качестве критерия качества изображения используются поперечные aberrации.
2. Каким образом в зрительных трубах достигается смещение плоскости установки.

Лабораторная работа № 1.3

Связи волновой сферической аберрации с коэффициентами деформации зеркала

Цель работы: Исследовать свойства сферической аберрации третьего и пятого порядка и их связь с коэффициентами деформации одиночного зеркала.

Задачи работы: проверка теоретических положений; определение значений поперечной сферической аберрации третьего и пятого порядков сферического зеркала с деформацией второго и третьего порядков; исследование возможностей исправления сферической аберрации с помощью деформации.

Краткие теоретические сведения

В данной лабораторной работе используется представление асферической поверхности в виде (первый тип САРО):

$$by^2 + cx^2 + a_1z + a_2z^2 + a_3z^3 = 0, \quad (1.3.1)$$

где в осесимметричных системах $b = c = 1$,

$a_1 = -2r_0$, где r_0 – радиус кривизны при вершине поверхности; для зеркала $a_1 = -4f'$;

a_2 – коэффициент деформации второго порядка;

a_3 – коэффициент деформации третьего порядка.

При $a_2 = 1$ – сферическая поверхность.

При $a_2 = 0$ – параболоид.

При $a_2 > 0$ – эллипсоид.

При $a_2 < 0$ – гиперболоид.

На основании исследований, проводимых в данной лабораторной работе, будет показано, что при работе с бесконечности сферическое зеркало обладает поперечной сферической аберрацией практически только третьего порядка (первичной). Наличие деформации второго порядка a_2 приводит к изменению только аберрации третьего порядка, а наличие деформации третьего порядка a_3 – к изменению только аберрации пятого порядка.

Порядок выполнения работы

1. Задать сферическое зеркало согласно индивидуальному заданию. С помощью требования 1 САРО найти поперечную сферическую aberrацию для первого $Y'(0)_1$ и третьего $Y'(0)_3$ лучей и вычислить поперечные aberrации пятого и третьего порядков по нижеследующим формулам:

$$y'_{V} = 2 Y'(0)_1 - 5,656 Y'(0)_3, \quad (1.3.2)$$

$$y'_{III} = Y'(0)_1 - y'_{V} \quad (1.3.3)$$

Сравнив полученные значения, убедиться, что сферическая aberrация пятого порядка практически отсутствует. Соответственно должны отсутствовать продольная aberrация второго порядка и волновая aberrация шестого порядка. Проверим это.

2. Найдем соотношение между продольной aberrацией для первого $DS'(0)_1$ и третьего лучей $DS'(0)_3$. Принимая во внимание, что координата на входном зрачке H для третьего луча составляет $\sqrt{0.5} H_{MAX}$, то продольная сферическая aberrация для первого луча, пропорциональная квадрату H , должна быть в два раза больше, чем для третьего луча. Учитывая количество значащих цифр, выдаваемых в таблице САРО, а именно три, это соотношение, как правило, приблизительное.

Анализ порядков продольной aberrации может быть выполнен и по формулам:

$$\Delta s'_{V} = 2DS'(0)_1 - 4DS'(0)_3; \quad (1.3.4)$$

$$\Delta s'_{III} = DS'(0)_1 - \Delta s'_{V} \quad (1.3.5)$$

3. Найдем соотношение между волновыми aberrациями для первого $W(0)_1$ и третьего $W(0)_3$ лучей. Учитывая написанное в предыдущем абзаце, это соотношение должно составлять примерно четыре.

Анализ порядков волновой aberrации может быть выполнен и по формулам:

$$w_{VI} = 2 W(0)_1 - 8 W(0)_3 \quad (1.3.6)$$

$$w_{IV} = 8 W(0)_3 - W(0)_1 \quad (1.3.7)$$

4. Записать сферическое зеркало в виде асферики, для чего в первом столбце задания САРО вместо радиуса кривизны записать A (признак асферики). Во втором столбце:

в первой строке записать 103, что означает – первый тип, третий порядок;

во второй и третьей строках записать единицы (коэффициенты b, c); в четвертой строке записать коэффициент a_1 , т. е. для зеркала $-4f'$; в пятой строке записать единицу, так как для сферической поверхности коэффициент деформации $a_2 = 1$; в шестой строке записать ноль (коэффициент деформации a_3 будет использоваться в дальнейшем).

5. Выполнить расчет aberrаций (требование 1 САРО) и убедиться, что ни фокусное расстояние, ни aberrации не изменились. В противном случае найти и исправить ошибки.
6. Задать в качестве корригируемой функции сферическую волновую aberrацию (функция 50) на краю отверстия (луч 1). В качестве коррекционного параметра использовать a_2 (ASF5). Выполнить автоматизированную коррекцию и рассчитать aberrации (требования 11 и 1 программы САРО). Убедиться, что волновая поперечная и продольная сферическая aberrация полностью устранены, а коэффициент a_2 практически равен нулю – поверхность параболоидальная. Таким образом, с помощью деформации второго порядка была устранена поперечная aberrация третьего порядка.
7. Убедиться, что волновая сферическая aberrация четвертого порядка, а также поперечная сферическая aberrация третьего порядка линейно зависит от коэффициента деформации a_2 . Для этого изменить коэффициент, например, в 2 раза и повторить расчет aberrаций.
8. Получить формулы для вычисления волновой сферической aberrации четвертого порядка и поперечной сферической aberrации третьего порядка в виде:

$$w_{IV} = A \frac{m^k}{f'^l \lambda} a_2, \text{ где } k, l - \text{показатели степени, } A - \text{некоторый}$$

коэффициент;

$$\Delta y'_{III} = B \frac{m^n}{f'^p} a_2, \text{ где } n, p - \text{показатели степени, } B - \text{некоторый}$$

коэффициент.

Для определения степеней зависимости k, n достаточно проанализировать, как изменяется сферическая aberrация по зрачку; для нахождения степеней l, p необходимо изменить фокусное

расстояние, например, в 2 раза, и рассмотреть, как при этом изменилась сферическая aberrация (волновая или поперечная соответственно). В заключении найти коэффициенты A, B

9. Добавить коэффициент деформации третьего порядка a_3 в соответствии с заданием. Выполнив расчет хода лучей по треб. 1 САРО и с помощью формул (2 – 7) установить, что изменились лишь aberrации высшего порядка, а первичные aberrации не изменились.
10. Принять коэффициент деформации третьего порядка, равным $2a_3$ и определить связь между величинами aberrаций и этим коэффициентом.
11. Рассмотреть асферическое зеркало при значении $a_2 = 0$ и введении асферической деформации третьего порядка. Получить формулы для вычисления волновой сферической aberrации шестого порядка и поперечной сферической aberrации пятого порядка в виде:

$w_{VI} = A_1 \frac{m^q}{f^r \lambda} a_3$, где q, r – показатели степени, A_1 – некоторый коэффициент;

$\Delta y'_{V'} = B_1 \frac{m^s}{f^t} a_3$, где s, t – показатели степени, B_1 – некоторый коэффициент.

Для определения степеней зависимости q, s достаточно проанализировать, как изменяется сферическая aberrация по зрачку; для нахождения степеней r, t необходимо изменить фокусное расстояние, например, в 2 раза, и рассмотреть, как при этом изменилась сферическая aberrация (волновая или поперечная соответственно). В заключении найти коэффициенты A_1, B_1

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $s_1 = \infty$: $A_0 = 0, H_A = 1$

Размер зрачка $H_{MAX} = m = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = 0,01$: $MU_{MAX} = 0,01$

Зрачок совпадает с поверхностью зеркала $H_B = 0, B_0 = 1$

Длина волны $\lambda = 0,0005$ мм.

№ варианта	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K	Коэффициент асферической деформации a_3
1	1000	5	0,1
2	1000	4	0,05
3	750	3	0,15
4	750	5	0,08
5	500	4	0,04
6	500	5	0,06
7	500	8,5	0,1
8	500	3,33	0,12
9	800	4	0,2
10	800	3,2	0,14
11	600	4	0,1
12	600	4,8	0,17

Содержание отчета:

1. Полученные выражения для волновой сферической аберрации четвертого и шестого порядков и для поперечной сферической аберрации третьего и пятого порядков
2. Таблицы и графики волновой и поперечной сферической аберрации

Контрольные вопросы:

1. Влияние коэффициента a_2 на волновую сферическую аберрацию шестого порядка
2. Влияние коэффициента a_2 на волновую сферическую аберрацию четвертого порядка
3. Влияние коэффициента a_3 на волновую сферическую аберрацию шестого порядка
4. Влияние коэффициента a_3 на волновую сферическую аберрацию четвертого порядка

Лабораторная работа № 1.4

Среднеквадратическая волновая aberrация как критерий качества изображения для дифракционно ограниченных оптических систем.

Цель работы: с помощью компьютерного моделирования доказать, что максимальное значение волновой сферической aberrации не является адекватным критерием качества изображения для дифракционно ограниченных оптических систем.

Задачи работы:

1. Установить связи между волновой сферической aberrацией четвертого и шестого порядков и среднеквадратическим отклонением $w_{ск}$.
2. Установить предельное значение волновой сферической aberrации шестого порядка, при которой после введения сферической aberrации четвертого порядка и плоскости наилучшей установки обеспечивается выполнение критерия Маршала.

Краткие теоретические сведения:

Наиболее адекватным критерием качества изображения дифракционно ограниченных оптических систем является число Штреля, представляющее собой отношение освещенности в центре дифракционного пятна, являющегося изображением точки реальной оптической системы, к освещенности в идеальной оптической системе. Этот критерий в современных компьютерах рассчитывается практически мгновенно, но он не может быть непосредственно измерен в реальной оптической системе.

Для таких систем критерием служит среднеквадратическое отклонение волнового фронта от идеальной сферы, вычисляемое в программном комплексе SAPO по формуле:

$$w_{ск} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=p} w_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{i=p} w_i\right)^2}{p}},$$

где w_i – волновые aberrации отдельных лучей. Лучи равномерно распределены по площади входного зрачка, их количество примерно равно

1000. Число Штреля S при $w_{ck} \leq 0,1$ достаточно точно связано с w_{ck} формулой:

$$S \cong e^{-(2\pi w_{ck})^2} \quad (1.4.1)$$

Критерий Штреля $S \geq 0,8$. При этом визуальное изображение дифракционной точки не отличается от идеального. Этому критерию соответствует критерий Марешаля, вытекающий из вышеприведенной формулы и составляющий $w_{ck} \leq 0,074$. В программном комплексе САРО число Штреля вычисляется самостоятельно непосредственно с использованием волновой аберрации w_i .

До появления высокоскоростных компьютеров в качестве критерия качества изображения объективов микроскопа использовалось непосредственно максимальное значение волновых аберраций, поскольку вычисления величин w_{ck} и S требовали недопустимо больших временных затрат.

В настоящей работе будет показано, что волновые аберрации не могут служить адекватным критерием качества изображения дифракционно-ограниченных оптических систем.

По [1] оптимальная коррекция сферической аберрации, соответствующая минимальному значению w_{ck} , достигается, когда $w_{IV} = -1,5w_{VI}$, что происходит, когда $DS'(0)_1 = 0$ с последующим смещением плоскости установки, вызывающим изменение волновой аберрации на краю отверстия, равное $3/5w_{VI}$. Эти положения подлежат проверке в данной лабораторной работе.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с вариантом задания выполнить коррекцию поперечной сферической аберрации на краю отверстия (луч 1), используя в качестве коррекционного параметра ASF5, то есть коэффициент второго порядка a_2 . В качестве допуска задать $0,1 \cdot 10^{-3}$. Используя формулы лабораторной работы № 1.3 «Связи волновой сферической аберрации с коэффициентами деформации зеркала», рассчитать волновые аберрации четвертого и шестого порядка. Убедиться, что $w_{IV}/w_{VI} = -1,5$.
2. Задать автоматизированную коррекцию значения волновой сферической аберрации для края отверстия. Заданное значение волновой аберрации рассчитать по формуле [1]:

$\tilde{w}_1 = 2,2W(0)_1 - 4,8W(0)_3$. В качестве коррекционного параметра использовать смещение плоскости установки ДС'У. Допуск на значение \tilde{w}_1 установить 0,001. Рассчитать по требованию 36.1 программы САРО $w_{ск}$ и число Штреля S . Число Штреля в % изображается в верхнем левом углу таблицы. Значение $w_{ск}$ отмечено словами «среднекв.отклон. = ». Проверить, является ли данное значение экстремальным. Для этого изменить \tilde{w}_1 (требуемое значение) на небольшую величину (например, $\pm 0,02$) и убедиться в правильности расчетов.

3. Определить значение w_{VI} , которое обеспечивает получение среднеквадратического отклонения $w_{ск} = 0,074$ и числа Штреля $S = 80\%$. Волновая aberrация шестого порядка пропорциональна шестой степени радиуса входного зрачка Н МАХ. Исходя из этого, найдем Н МАХ, соответствующее $w_{ск} = 0,074$:

$$Н\ МАХ = 100\sqrt[6]{0,074/w_{ск}}$$
, где $w_{ск}$ – среднеквадратическое отклонение, полученное в результате расчета. Повторить расчеты по пп.1–2 с использованием нового значения Н МАХ. Отметим, что $|w_{VI}| = 4$; при $ДС'(0)_1 = 0$ $|W(0)_1| = 2$. Следовательно, при $|w_{VI}| \leq 4$ обеспечивается выполнение критерия Маршала. Систему записать в архив.
4. Проверить корреляцию между максимальными значениями волновой aberrации и величинами $w_{ск}$, для чего в последнем варианте расчета на странице с начальными данными для расчета лучей в следующей строке после «РАЗМЕР ЗРАЧКА» под пробелом между словами запишем число 8, что обеспечит выдачу на экран по требованию 1 САРО 8 значений результатов. Меняя, как и прежде, требуемое значение для величины \tilde{w}_1 , найти положение плоскости установки, при котором волновая aberrация будет иметь оптимальное значение w_{min} . Значение w_{min} определяется как сумма максимального положительного значения волновой aberrации $W(0)$ и модуля максимального отрицательного значения $W(0)$. Проверить при найденном положении плоскости установки ДС'У величину среднеквадратического отклонения $w_{ск}$ и убедиться, что она существенно превышает полученное ранее значение $w_{ск} = 0,074$.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей:

Положение предмета $s_l = \infty$ ($A_0=0$, $HA=1$);

Апертурная диафрагма совпадает с поверхностью зеркала ($B_0=1$; $HB=0$).

Размер предмета задается синусом полевого угла:
 $\sin \omega = MU_{MAX} = 0,001$;

Размер зрачка задается высотой на зрачке $H_{MAX} = 100$.

Длина волны $0,0005$ мм.

Радиус при вершине асферического зеркала: $r = -2000$.

Поверхность зеркала представляет собой асферическую поверхность третьего порядка.

Коэффициент асферики второго порядка $a_2 = 0$.

№ варианта	Коэффициент асферики a_3
1	0,10
2	0,11
3	0,12
4	0,13
5	0,14
6	0,15
7	0,16
8	0,17
9	0,18
10	0,19
11	0,20
12	0,21

Содержание отчета:

1. Формула связи среднеквадратического отклонения волновой абберации с числом Штреля.
2. Проверка числа Штреля для $w_{ск} = 0,074$.
3. Таблица и график волновой сферической абберации при оптимальном значении $w_{ск}$.

Контрольные вопросы:

1. В каких оптических системах в качестве критерия качества изображения используется число Штреля
2. В каких оптических системах в качестве критерия качества изображения используется среднеквадратическое отклонение $w_{ск}$.
3. С помощью какой аппаратуры измеряется среднеквадратическое отклонение волновой аберрации.

Лабораторная работа № 1.5

Использование формул Марешаля для оптимальной коррекции среднеквадратической волновой сферической аберрации

Цель работы: проверка теоретических положений.

Задачи работы: расчет зеркала с асферической деформацией второго и третьего порядков с целью определения оптимального баланса волновой сферической аберрации четвертого и шестого порядков, а также положения плоскости наилучшей установки, обеспечивающих оптимальное значение среднеквадратической волновой аберрации и, следовательно, критериев Марешаля и Штреля.

Краткие теоретические сведения:

По Марешалю [1] оптимальная коррекция среднеквадратической волновой сферической аберрации, (а следовательно и максимальное значение числа Штреля), в случае неустранимой аберрации шестого порядка (поперечной аберрации пятого порядка) достигается при следующих условиях:

1. Когда поперечная сферическая аберрация для края отверстия равна нулю
2. При введении затем плоскости установки, при которой волновая сферическая аберрация на краю отверстия составляет

$$w_I' = 0,6w_{VI} + w_1, \quad (1.5.1)$$

где w_{VI} – волновая сферическая аберрация шестого порядка на краю отверстия, w_1 – волновая сферическая аберрация на краю отверстия при поперечной (продольной) аберрации, равной нулю.

Кроме того, там же [1] показано, что критерий Марешаля, обеспечивающий число Штреля $S = 0.8$, имеет место при $W_{VI} = 4$.

Порядок выполнения работы:

1. Задать параболоидальную зеркальную поверхность согласно индивидуальному варианту задания.
2. Добавить коэффициент асферики третьего порядка a_3 (ASF6) . Этот коэффициент выбрать произвольно в диапазоне $(-0.5) \dots (+0.5)$. С

помощью автоматизированной коррекции, используя в качестве коррекционного параметра коэффициент асферики третьего порядка a_3 (ASF6), получить значение волновой aberrации на краю зрачка, равное $w_l = 4$. Это значение – волновая сферическая aberrация шестого порядка $w_{VI} = 4$, так как коэффициент асферики третьего порядка влияет только на волновую сферическую aberrацию шестого порядка (см. лабораторную работу № 1.3 «Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала»)

3. Снова выполнить автоматизированную коррекцию: корригируемая функция – поперечная сферическая aberrация на краю зрачка, коррекционный параметр – коэффициент асферики второго порядка (ASF5). Поскольку в этом случае коэффициент асферики третьего порядка не изменяется, то волновая сферическая aberrация шестого порядка остается неизменной, а добавляется только aberrация четвертого порядка. Рассчитать требуемое значение волновой aberrации в плоскости наилучшей установки: $w_1' = 0,6w_{VI} + w_1$, где w_1' – волновая aberrация на краю зрачка в плоскости наилучшей установки, а $w_{VI} = 4$. Выполнить автоматизированную коррекцию: корригируемая функция – волновая aberrация на краю зрачка, требуемое значение w_1' . В качестве коррекционного параметра использовать смещение плоскости установки DS'Y.
4. Вычислить среднеквадратичное отклонение и число Штреля по требованию 36 САРО. Убедиться, что критерии Марешаля и Штреля выполнены.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $s_1 = \infty$: $A0 = 0$, $H0 = f'$.

Размер зрачка $H \text{ MAX} = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = 0,01$: $MU \text{ MAX} = 0,01$

Зрачок совпадает с поверхностью $HV = 0$, $V0 = 1$

Длина волны $\lambda = 0,0005$ мм.

№ варианта	Фокусное расстояние f	Диафрагменное число K
1	1000	5
2	1000	4
3	750	3
4	750	5
5	500	4
6	500	5
7	500	8,5
8	500	3,33
9	800	4
10	800	3,2
11	600	4
12	600	4,8

Содержание отчета

1. Допустимое значение волновой аберрации шестого порядка, гарантирующее получение $w_{\text{СК}} = 0,074$
2. Таблица и график волновой аберрации в плоскости наилучшей установки

Контрольные вопросы

1. Каким образом достигается оптимальный баланс $w_{\text{СК}}$ при наличии волновых аберраций четвертого и шестого порядков.
2. Взаимосвязь критериев Марешаля и Штреля

Лабораторная работа № 1.6

Изучение свойств комы третьего порядка

Цель работы: изучение свойств комы третьего порядка

Задачи работы: Изучение комы на примере тестовой системы, в которой присутствует только кома третьего порядка.

Краткие теоретические сведения:

Аберрация, называемая комой, проявляется в нарушении симметрии меридиональных внеосевых лучей относительно главного. При наличии комы верхний и нижний лучи меридионального пучка, симметричные относительно главного луча в пространстве предметов, пересекают плоскость Гаусса в одной точке, не совпадающей с точкой пересечения главного луча с этой плоскостью. Расстояние между этими точками представляет собой меридиональную кому k_m . Лучи сагиттального пучка, симметричные относительно главного, фокусируются в одной точке, расположенной в меридиональной плоскости на расстоянии k_s от точки пересечения главного луча с плоскостью Гаусса. Величина k_s называется сагиттальной комой. В области аберрации третьего порядка $k_m/k_s=3$. В программных комплексах расчета оптики (САРО и ОПАЛ) величина комы на экран не выдаётся. Для определения k_m в присутствии других аберраций необходимо произвести ее расчет по формуле

$$k_m = (ДУ'_{1,1} + ДУ'_{1,8})/2, \quad (1.6.1)$$

где $ДУ'_{1,1}$ – аберрация для луча, выходящего из крайней точки предмета и проходящий через верхний край зрачка (луч 1 первого пучка лучей в обозначении САРО); $ДУ'_{1,8}$ – аберрация для луча, выходящего из крайней точки предмета и проходящий через нижний край зрачка (луч 8 первого пучка лучей в обозначении САРО)

Тест – система (рис. 1.6.1) представляет собой параболоидальное зеркало с апертурой диафрагмой (входным зрачком), расположенной в его переднем фокусе, и линзой Смита, которая установлена вблизи плоскости изображения. Такая система свободна от сферической аберрации, астигматизма и кривизны изображения.

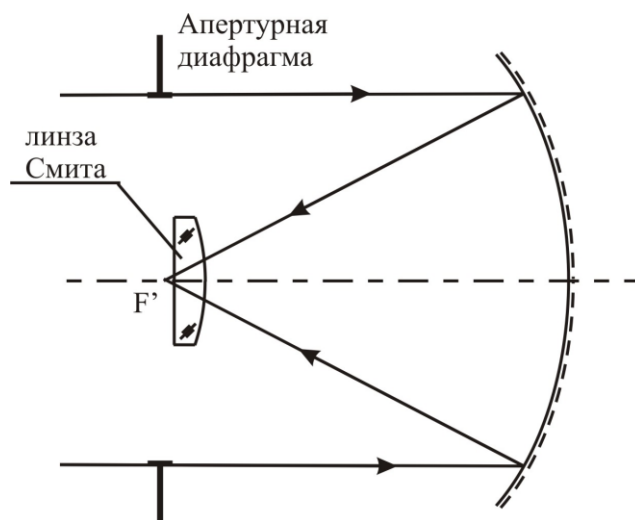


Рис. 1.6.1 Зеркальный параболоид с линзой Смита

Порядок выполнения:

1. Записать систему в соответствии с индивидуальным заданием. Обратить внимание, что r_2^* – радиус при вершине второй параболоидальной поверхности. Поэтому во второй строке первого столбца R следует записать A (признак асферической поверхности), во втором столбце (ASF/A) записать последовательно по строкам 102 (асферическая поверхность первого типа, второго порядка); 1 (коэффициент b); 1 (коэффициент c), асферика осесимметричная; $a_1 = -2r_2^*$; 0 (коэффициент $a_2 = 0$ для параболоида) (см. лабораторную работу №1.3, формула 1.3.1)
2. Выполнить расчет хода лучей и убедиться, что $f' \approx d_1$. В противном случае проверить правильность записи системы.
3. Рассчитать кому для края поля и края апертуры по формуле (1.6.1), а так же для края поля и «зоны» апертуры, для лучей 3 и 6 (обозначение САРО) меридионального пучка лучей

$$k_m = (ДУ'_{1,3} + ДУ'_{1,6})/2 \quad (1.6.2)$$
4. Найти соотношение между k_m и $k_{1,3}$ и убедиться, что $k_m/k_{1,3} \approx 2$. Поскольку координаты на зрачке для третьего и шестого лучей $H_3/H_{MAX} = \sqrt{0,5}$ и $H_6/H_{MAX} = \sqrt{0,5}$, то следовательно меридиональная кома пропорциональна квадрату апертур.
5. Рассмотреть aberrации третьего пучка лучей (зоны поля $MU = MU_{MAX} \sqrt{0,5}$) при $M = H_{MAX}$ и убедиться, что для этих четырех

лучей сагиттальные составляющие аберраций $DX \approx 0$, а меридиональная составляющая для первого в таблице луча $D_{9,1} \approx k_s \approx k_m/3$.

6. Нажать кнопку “2” на малой клавиатуре и выдать на экран нижнюю часть основной таблицы. Там содержится информация для зоны поля $MU = MU \text{ MAX} \sqrt{0,5}$
7. Рассчитать кому по формуле (1.6.1) для зоны поля $k_{m,3}$. Найти соотношение $k_{m,3}/k_m$ и убедиться, что оно равно примерно $\sqrt{0,5} \approx 0,707$. Следовательно, меридиональная кома третьего порядка пропорциональна полевому углу и величине изображения.
8. Сместить плоскость изображения $DS'Y$ на величину, составляющую несколько десятых миллиметра и убедиться, что величина k_m осталась неизменной.
9. Выдать на экран с помощью треб. 28 САРО пятно рассеяния без смещения плоскости установки и со смещением плоскости установки. Убедиться, что хотя величина комы при этом остается неизменной, пятно рассеяния существенно изменяется.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $s_1 = \infty$: $A_0 = 0$, $HA = f'$.

Размер зрачка $H \text{ MAX} = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = 0,05$: $MU \text{ MAX} = 0,05$

Первая поверхность – фиктивная; входной зрачок расположен на первой поверхности: $HV = 0$, $V_0 = 1$

Задать в столбце «ПОВ. ИЗОБРАЖЕНИЯ» $S'Y=0$

Во всех системах вторая поверхность имеет форму параболоида

Длина волны $\lambda = 0,0005$ мм.

№ варианта	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры															
1	75	<table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 33%;">$r_1 = \infty$</td> <td style="width: 33%;">$d_1 = 250$</td> <td style="width: 33%; text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>$r_2^* = -500$</td> <td>$d_2 = -249,4$</td> <td style="text-align: right;">1</td> </tr> <tr> <td>$r_3 = -94,359$</td> <td>$d_3 = -1$</td> <td style="text-align: right;">-1</td> </tr> <tr> <td>$r_4 = \infty$</td> <td></td> <td style="text-align: right;">-СТКЗ</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: right;">-1</td> </tr> </table>	$r_1 = \infty$	$d_1 = 250$	1	$r_2^* = -500$	$d_2 = -249,4$	1	$r_3 = -94,359$	$d_3 = -1$	-1	$r_4 = \infty$		-СТКЗ			-1
$r_1 = \infty$	$d_1 = 250$	1															
$r_2^* = -500$	$d_2 = -249,4$	1															
$r_3 = -94,359$	$d_3 = -1$	-1															
$r_4 = \infty$		-СТКЗ															
		-1															

№ варианта	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
2	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -199,795$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -499,4$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК3 -1
3	180	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -300,258$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -749,4$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК3 -1
4	300	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -400,2596$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -999,4$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК3 -1
5	60	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -101,793$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -249,427$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК19 -1
6	100	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -214,377$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -499,428$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК19 -1
7	140	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -322,678$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -749,428$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК19 -1
8	400	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -430,039$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -999,428$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -СТК19 -1
9	350	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -452,775$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -999,451$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -ТФ10 -1

№ варианта	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
10	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -339,811$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -749,451$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -ТФ10 -1
11	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -226,29$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -449,451$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -ТФ10 -1
12	80	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -107,512$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -249,449$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -ТФ10 -1
13	75	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -92,034$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -249,386$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -БФ12 -1
14	135	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -194,153$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -449,387$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -БФ12 -1
15	140	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -291,753$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -749,387$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -БФ12 -1
16	300	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -389,004$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -999,388$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -БФ12 -1

Содержание отчета

1. Соотношения между величиной комы на краю и зоне поля.
2. Соотношения между величиной комы на краю и зоне зрачка.
3. Таблицы и графики aberrаций

Контрольные вопросы

1. Зависимость комы от положения плоскости установки
2. Форма пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка
3. Соотношение между значениями комы в меридиональном и сагиттальном сечениях

Лабораторная работа № 1.7

Исследование пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка

Цель работы: изучение свойств комы третьего порядка, закрепление теоретического материала.

Задачи работы: на примере тестовой системы, в которой присутствует только кома третьего порядка, изучить структуру пятна рассеяния комы.

Краткие теоретические сведения.

Кома является aberrацией, вызывающей асимметрию внеосевого пучка лучей. При наличии комы и отсутствии других aberrаций верхний и нижний лучи меридионального пучка лучей пересекаются в одной точке плоскости Гаусса, не совпадающей с точкой пересечения с этой плоскостью главного луча.

Тест-система для изучения комы третьего порядка представляет собой параболоидальное зеркало с компенсатором кривизны изображения в виде линзы Смита. Устранение астигматизма параболоидального зеркала достигается расположением входного зрачка в фокальной плоскости параболоида (см. рис. 1.7.1).

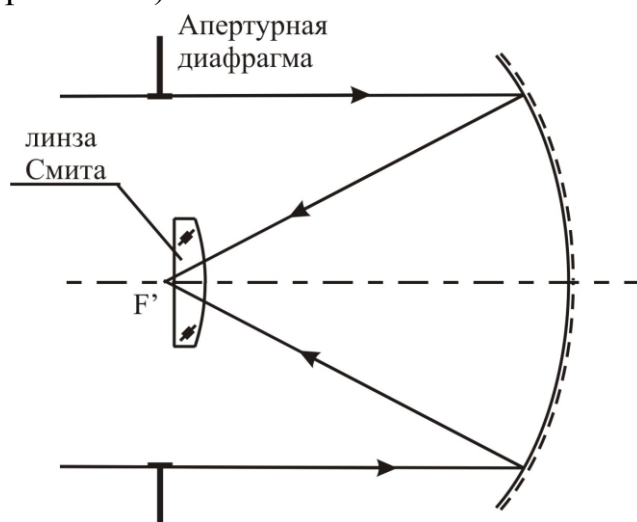


Рис. 1.7.1 Зеркальный параболоид с компенсатором кривизны поля (линзой Смита)

Порядок выполнения

1. Записать конструктивные параметры зеркального параболоида с линзой Смита для расчета хода луча согласно индивидуальному варианту задания (см. лабораторную работу №1.6 «Изучение свойств комы третьего порядка»).
2. Выполнить расчет хода луча, убедиться, что все aberrации, кроме комы отсутствуют. В этом случае поперечные aberrации для верхнего $\Delta y'_{i,+m}$ и нижнего $\Delta y'_{i,-m}$ края зрачка как в крайнем наклонном пучке при $\omega = \omega_{\max}$ (при $i = 1$), так и при $\omega = 0,707 \omega_{\max}$ (при $i = 3$) равны: $\Delta y'_{1,+m} = \Delta y'_{1,-m} = K_{m1}$, $\Delta y'_{3,+m} = \Delta y'_{3,-m}$.
3. Выполнить расчет по треб. 21.1 САРО и записать в отчет высоту пересечения главного луча (столбец YGL последняя строка) с плоскостью изображения (последней поверхностью). Это необходимо, поскольку в основной таблице, выдаваемой по треб.1 САРО эти значения выдаются с малым числом значащих цифр.

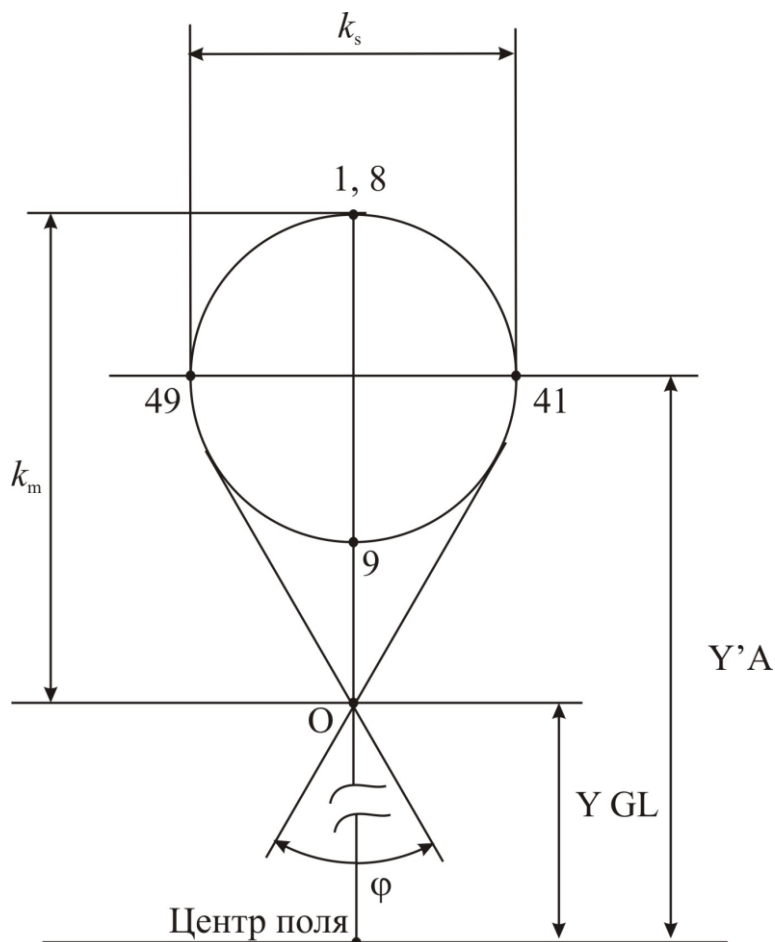


Рис. 1.7.2 К изучению структуры пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка

4. Выдать на экран пятно рассеяния (треб. 28 САРО) Записать величину $Y'A$ для крайнего пучка, которая соответствует энергетическому центру пятна рассеяния. Рассчитать световые высоты на поверхностях, определить координату точки пересечения главного луча с плоскостью изображения (последней поверхностью системы) YGL . Найти соотношение $\frac{Y'A - YGL}{K_{m1}}$, которое характеризует смещение энергетического центра пятна рассеяния от главного луча по отношению к коме третьего порядка. Обратит внимание, что при проектировании точных измерительных систем при определении дисторсии должно учитываться это смещение.
5. Для детального исследования структуры пятна рассеяния необходимо установить, как связаны координаты точек пересечения лучей с плоскостью изображения с координатами лучей на входном зрачке. В рассматриваемой тест – системе входным зрачком является первая поверхность, а плоскостью изображения последняя. Начертить расположение лучей, рассчитать световые диаметры (требование 21 программы САРО). Закрыть входной зрачок непрозрачным экраном на первой поверхности, для чего в первой строке столбца НПРЭ программы САРО записать число, меньшее чем световой диаметр на небольшую величину, например, 0.1 мм
6. Выдать по треб. 28 САРО вид пятен рассеяния. Убедиться, что они представляют собой круги, центры которых смещены относительно точки пересечения главного луча с плоскостью изображения. Причем для зоны поля и его края эти круги имеют различные значения диаметров и смещений.
7. Для получения точек пересечения лучей сагиттального сечения необходимо задать систему как «псевдодецентрированную». Для этого в столбце «СДВИГ ПОВЕРХНОСТЕЙ» записать в первой строке 4 (номер децентрируемой поверхности), во второй строке Y , в третьей 0. Это означает, что четвертая поверхность системы смещается на величину, равную нулю вдоль оси Y . В этом случае по требованию 1 программы САРО осуществляется расчет не только меридиональных и сагиттальных, но и косых лучей.
8. Построить пятно рассеяния для крайнего наклонного пучка. Убедиться, что пятно рассеяния представляет собой окружность с

центром в $Y'A$. Записать эту координату. Рассчитать aberrации (треб.1 SAPO), и используя результаты расчета лучей для крайнего пучка, ориентируясь на рисунок, найти соотношения между элементами фигуры рассеяния K_m, K_s, φ .

9. Убрать экран и проанализировать результаты расчета для зоны, то есть для пучка 0,707 от максимальной, для лучей 3, 6, 11, 43, 51 (см. инструкцию к программе SAPO).

Содержание отчета

1. Нанести численные значения на рис. 1.7.2.
2. Соотношение между комой в меридиональном и сагиттальном сечениях

Контрольные вопросы

1. Структура пятна рассеяния в плоскости Гаусса при наличии комы третьего порядка
2. Изменяется ли структура пятна рассеяния при смещении плоскости установки?

Лабораторная работа № 1.8

Связь между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма

Цель работы: показать связь между отступлением от условия изопланатизма и комой третьего порядка.

Задачи работы: исследование связи между отступлением от условия изопланатизма η и комой третьего порядка на примере сферического зеркала.

Краткие теоретические сведения:

В эпоху ручного расчета хода лучей в оптических системах (по принятой тогда терминологии – тригонометрического расчета) рядом ученых предпринимались попытки получения дополнительной информации об абберациях на основе выполнения минимального объема вычислений. Так Аббе сформулировал условие (закон синусов), когда при отсутствии сферической абберации устраняется кома в области, близкой к оптической оси. Для проверки выполнения этого условия достаточен расчет одного крайнего луча осевого пучка. В дальнейшем Штебле и независимо от него Лигоцкий вывели формулу так называемого отступления от условия изопланатизма (величина η), с помощью которой можно приблизительно оценить кому вблизи от оптической оси в присутствии сферической абберации:

$$\eta = \frac{\Delta\beta}{\beta_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0},$$

где s'_0 – параксиальное положение изображения, z'_0 – параксиальное положение выходного зрачка; $\Delta s'$ – продольная сферическая абберация; β_0 – параксиальное линейное увеличение; $\Delta\beta$ – отступление от условия синусов $\Delta\beta = \beta - \beta_0$.

В случае предмета, расположенного на бесконечно большом расстоянии, выражение принимает вид:

$$\eta = \frac{\Delta f'}{f'_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0}.$$

Величины, входящие в эту формулу, также определяются на основе данных, получаемых путем расчета одного луча осевого пучка.

Порядок выполнения:

1. Выполнить расчет хода лучей по треб. 1 САРО для сферического зеркала в соответствии с индивидуальным заданием. Записать в протокол значения отступления от условия изопланатизма ЭТА % (η) для первого η_1 и η_3 лучей соответственно. Вычислить значения комы по формуле (1.6.1) (см. лабораторную работу № 1.6 «Изучение свойств комы третьего порядка») для края поля (пучок 1) по лучам 1 и 8 – k_{11} (для края апертуры) и по лучам 3 и 6 того же пучка (для зоны апертуры) – k_{13} ; затем такие же вычисления выполнить для зоны поля $MU = \sqrt{0.5} MU MAX$, открыв экран путем нажатия цифры 2 на малой клавиатуре и получив нижнюю часть основной таблицы.
2. Найти соотношение между величинами η_{13} и η_{11} . Убедиться, что это соотношение равно 0,5. Поскольку $N_3/N_1 = \sqrt{0.5}$, то очевидно, что величина η , как и величина комы, пропорциональна квадрату апертуры. Кроме того, очевидно, что кома прямо-пропорциональна величине η .
3. Учитывая, что кома прямо-пропорциональна линейному полю изображения y' , найти коэффициент a в формуле $k = a y' \eta$, сперва для края поля и края апертуры, а затем для зоны поля и края апертуры.
4. Убедиться, что $a=3$, где η – величина отступления от условия изопланатизма в относительной мере (не в процентах!).
5. Используя результаты расчета крайнего $N=N MAX$ и зонального $N=N MAX \sqrt{0.5}$ лучей, вывести формулу отступления от условия изопланатизма для сферического зеркала в виде $\eta = bK^x\%$.
6. Поместить входной зрачок в передний фокус зеркала, то есть записать $NB = f'$ вместо нуля. Выполнить расчет по треб. 1 САРО. Убедиться, что $\eta = 0$ и соответственно кома отсутствует. Отсюда следует, что кома зависит от положения зрачка.
7. Заменить сферу параболоидом (см. лабораторную работу № 1.6 «Изучение свойств комы третьего порядка»), поместить входной зрачок на его вершину ($NB = 0$) и вновь выполнить треб. 1 САРО. Убедиться, что величина η осталась такой же, как и у сферического зеркала. Изменить коэффициент асферической

поверхности $a_2 = 0$ произвольным образом в пределах ± 0.5 и убедиться, что величина η не изменяется. Отсюда следует важный вывод, что асферизация зеркальной поверхности, совмещенной с апертурной диафрагмой, не влияет на отступление от условия изопланатизма, а следовательно и на кому.

8. Вернуться к параболоиду и поместить входной зрачок в передний фокус. Убедиться, что величина η при переносе зрачка в этом случае не изменилась, что служит подтверждением условия независимости комы от положения зрачка при исправленной сферической аберрации.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $s_1 = \infty$: $A_0 = 0$, $H_A = 1$.

Размер зрачка $H_{MAX} = f'/2K$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = 0,01$: $MU_{MAX} = 0,01$

Зрачок совпадает с первой поверхностью $H_B = 0$, $B_0 = 1$

Длина волны: e

№ варианта	Фокусное расстояние f' , мм	Диафрагменное число K
1	100	4
2	150	3
3	200	5
4	250	5
5	300	6
6	350	7
7	400	8
8	450	9
9	200	4
10	500	5

Содержание отчета:

1. Формула связи между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма
2. Таблицы и графики aberrаций

Контрольные вопросы:

1. Формула для расчета комы по результатам расчета хода луча
2. Формула для расчета комы по результатам расчета отступления от изопланатизма

Лабораторная работа № 1.9

Исследование кривизны поверхности изображения на примере объектива микроскопа из двух сферических зеркал.

Цель работы: создание системы, в которой присутствует только кривизна поверхности изображения; исследование вида пятна рассеяния и формы поверхности изображения.

Задачи работы: расчет объектива, состоящего из двух concentрических зеркал с исправленными aberrациями (за исключением кривизны поверхности изображения), исследование кривизны поверхности изображения.

Краткие теоретические сведения.

Кривизной поверхности изображения (кривизной поля) называется aberrация, при которой поверхность изображения не является плоской. В большинстве оптических систем эта поверхность близка по форме к параболоиду или сфере. В области первичной aberrации (aberrации третьего порядка) кривизна поля пропорциональна сумме оптических сил отдельных поверхностей оптической системы.

Изучение aberrации осуществляется на примере объектива микроскопа, состоящего из двух concentрических зеркал [2]. В этом объективе практически устранены сферическая aberrация, кома и астигматизм, но присутствует значительная кривизна поля.

Порядок выполнения работы:

1. Записать объектив согласно индивидуальному варианту задания. Исходная система задается углами первого параксиального луча с осью. Принять угол первого параксиального луча с осью в пространстве предметов $\alpha_1 = 1$. Тогда в пространстве изображений угол $\alpha_3 = 1/V$, где V – линейное увеличение объектива. Из рис. 1.9.1 следует, что угол α_2 должен во избежание экранирования пучка лучей малым зеркалом превышать α_1 , а первый отрезок по абсолютному значению – превышать расстояние между вершинами зеркал d_1 . Принять $\alpha_2 = 1,5$. Расстояние между зеркалами – 15 мм.

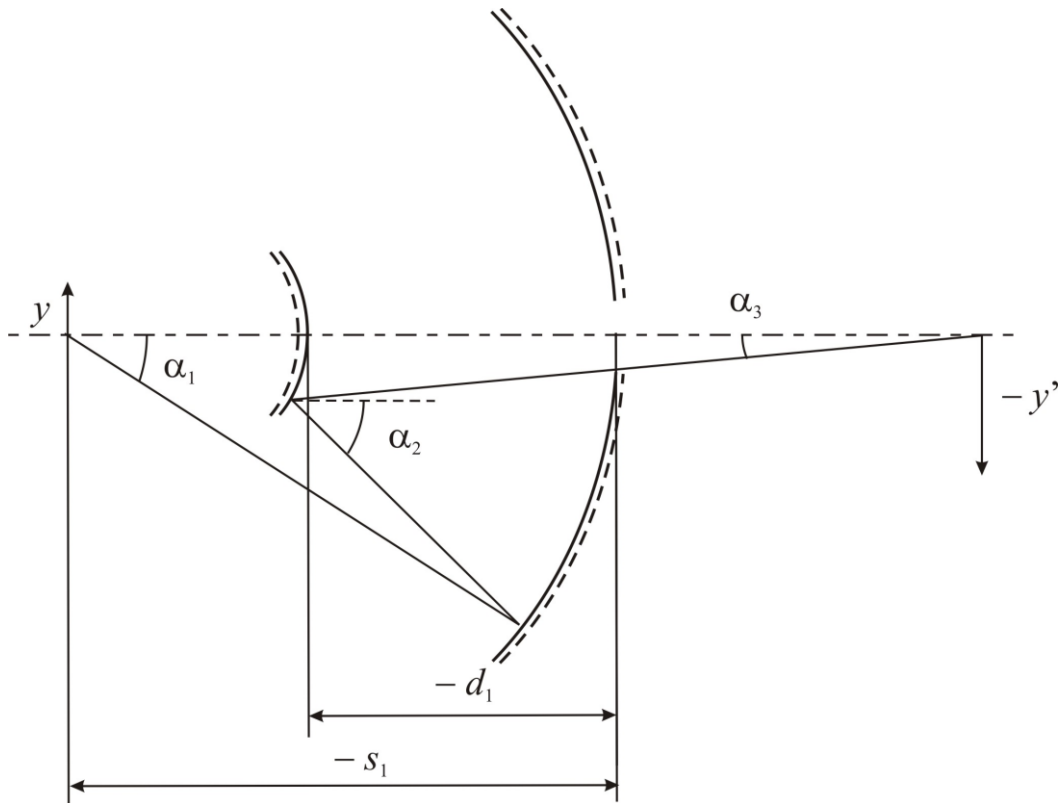


Рис. 1.9.1 Схема объектива из двух concentрических зеркал

2. Используя в качестве коррекционных параметров расстояние между зеркалами d_1 и угол первого парааксиального луча с осью α_2 , исправить поперечную сферическую aberrацию и отступление от условия изопланатизма на краю зрачка, а также астигматизм на краю поля. Выполнить автоматизированную коррекцию (по треб. 11 САРО) – см. допуски для коррекции. Убедиться, выполнив расчет хода лучей (треб. 1 САРО), что исправлены сферическая aberrация, кома и астигматизм. Выдать точечные диаграммы (треб. 28 САРО). Обратить внимание на то, что для пучков 3 и 1 пятна рассеяния представляют собой круги с равномерной освещенностью. Выдать на экран графики геометрических aberrаций (треб. 5 САРО). Второй график в нижнем ряду наглядно демонстрирует совпадение астигматических составляющих Z'_m и Z'_s в пределах поля изображения, а также форму поверхности изображения.
3. Ввести смещение плоскости установки, равное $DS'Y = Z'_m$ для края поля. Вновь выдать пятно рассеяния, обратив внимание на его изменения по сравнению с предыдущим вариантом. Для точки поля POINT 1 пятно существенно уменьшилось и приобрело сложную структуру, вызванную остаточными aberrациями высших порядков.

Выдать графики aberrаций по требованию 5 САРО. Обратить внимание на aberrации широких наклонных пучков в меридиональном и сагиттальном сечениях для края поля (третий график в первом ряду в программе САРО). Очевидно, что при перефокусировке на краю поля получено практически безaberrационное изображение. Таким приемом пользуются наблюдатели при работе с объективами микроскопа, обладающими неисправленной кривизной изображения.

4. Убрать смещение плоскости установки. Рассчитать по треб. 23.3 САРО фокусное расстояние объектива F'_{1-2} . Ввести величину кривизны поверхности изображения (радиус кривизны поверхности изображения) $R'Y = -f'$, что на основании теории aberrаций третьего порядка имеет место в исследуемом объективе. Выполнить расчет хода лучей по треб. 1 и обратить внимание на существенное уменьшение величин Z'_m и Z'_s по абсолютным величинам.
5. Используя в качестве коррекционного параметра радиус кривизны поверхности изображения $R'Y$, исправить сагиттальную составляющую Z'_s для крайней точки поля (пучок 1, луч 0, код aberrации 6). Убедиться, что на краю поля (пучок 1) $Z'_m = Z'_s = 0$. Для пучка 3 («зона» поля) эти aberrации невелики, но не равны нулю. Следовательно, поверхность изображения не представляет собой точно сферу.
6. Выдать графики aberrаций по треб. 5 САРО. Очевидно, что поперечные aberrации в пределах всего поля изображения практически постоянны. Следовательно, поверхность изображения несущественно отличается от сферы.
Объектив такого типа использовался в сканирующем микроскопе с одноэлементным приемником. Сканирующее зеркало располагалось на расстоянии $R'Y$ от плоскости изображения.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета $s_1 = -30$: $A_0 = 1$, $HA = s_1$.

Размер зрачка определяется передней числовой апертурой:

$$MU_{MAX} = \sin \sigma_A = 0,2$$

Размер предмета (линейный размер предмета) : Y_{MAX}

Зрачок совпадает с первой поверхностью объектива $B_0 = 1$, $HB = 0$

Длина волны $\lambda = 0,0005$ мм.

Допуски для коррекции:

поперечной сферической аберрации $0,1 \cdot 10^{-2}$:

отступления от условия изопланатизма $0,5 \cdot 10^{-4}$

астигматизма $0,1 \cdot 10^{-2}$

Расстояние между зеркалами d_1 , учитывая что $s_1 = -30$ следует ограничить диапазоном -20 (левая граница), -10 (правая граница).

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$-V$	6	6	8	8	10	10	12,5	15	20	25
$-Y_{MAX}$	0,6	0,65	0,5	0,4	0,35	0,4	0,31	0,25	0,2	0,1

Содержание отчета

1. Оптическая схема тест-системы
2. Таблицы и графики аберраций
3. Диаметры пятен рассеяния для трех точек поля

Контрольные вопросы

1. Зависимость кривизны изображения от смещения плоскости установки
2. Форма поверхности изображения при наличии ее кривизны
3. Распределение освещенности в пятне рассеяния при наличии кривизны изображения

Лабораторная работа № 1.10

Исследование астигматизма на примере объектив «Авангард»

Цель работы: создание системы, свободной от всех монохроматических aberrаций, кроме астигматизма

Задачи работы: расчет тестовой системы, в которой присутствует только астигматизм; исследование пятна рассеяния; определение допустимой величины астигматизма при дифракционном качестве изображения.

Краткие теоретические сведения

При наличии aberrации, называемой астигматизмом, наклонный пучок лучей фокусируется в пространстве изображений в два взаимно-перпендикулярных отрезка прямых линий, расположенных в плоскостях, расстояние между которыми является численной мерой астигматизма. Для выделения астигматизма среди других aberrаций по специальным формулам выполняются расчеты двух бесконечно тонких пучка лучей, осью которых служит главный луч. Один из пучков располагается в меридиональной плоскости, а другой – в сагиттальной. Расстояние от плоскости Гаусса до точки фокусировки меридионального пучка лучей обозначается через Z'_m , а сагиттального – через Z'_s .

В качестве тест-системы для демонстрации астигматизма используется модифицированный двухзеркальный объектив «Авангард» (рис. 1.10.1). Сферические зеркальные поверхности объектива «Авангард» имеют общий центр, лежащий в совмещенных плоскостях предмета и изображения [3]. Апертурная диафрагма расположена на малом зеркале, вершина которого совмещена с фокусом большого зеркала, в результате чего в пространствах предмета и изображения имеет место телецентрический ход лучей. В этом объективе отсутствуют aberrации третьего порядка, а также все aberrации для сагиттальных пучков лучей. Модификация объектива с целью возникновения астигматизма при отсутствии других aberrаций достигается путем асферизации поверхностей зеркал.

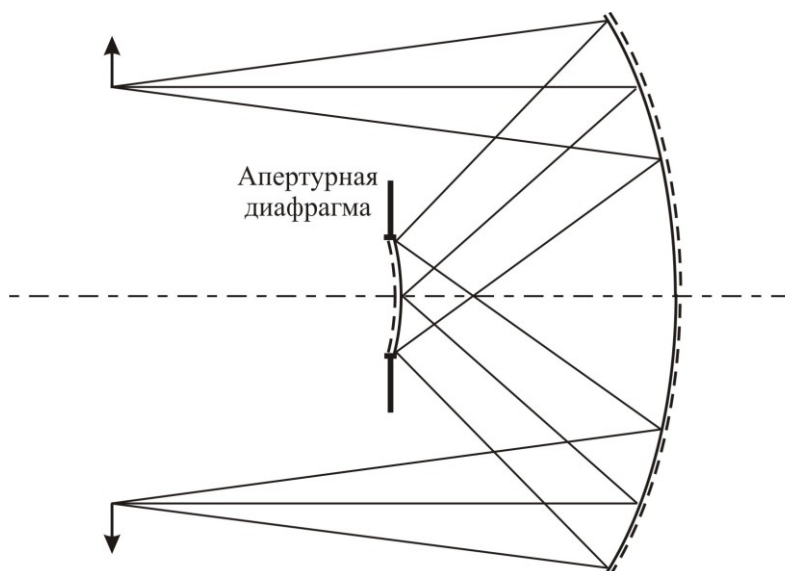


Рис. 1.10.1 Схема объектива «Авангард»

Порядок выполнения работы

1. Заполнить задание в соответствии с индивидуальным вариантом (см. таблицу). Физически первая и третья поверхность представляют одно и то же зеркало. Обратит внимание, что апертурная диафрагма расположена на втором зеркале.
2. Определить параксиальные характеристики. Убедиться, что линейное увеличение системы $V = -1$. Проверить, что система имеет телецентрический ход лучей в пространстве предметов и изображений. Убедиться, что сферическая aberrация, кома, астигматизм и кривизна изображения практически отсутствуют.
3. Записать начальные данные для расчета хода лучей, заменив радиусы оптических поверхностей асфериками первого типа второго порядка (см. лабораторную работу № 1.3 «Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала»). Проверить правильность замены, выполнив расчет хода лучей по треб. 1 САРО.
4. Осуществить автоматизированную коррекцию с целью введения астигматизма при сохранении отсутствия остальных aberrаций. Устранение комы достигается равенством коэффициентов деформации для первой и третьей поверхностей и симметрией хода главного луча до и после диафрагмы. Для этого в качестве коррекционных параметров используются коэффициенты асферик ASF5 и ASF15, изменения которых связаны коэффициентом связи,

- равным 1. Для устранения возникшей при этом сферической аберрации используется коррекционный параметр ASF10 (асферическая деформация второго зеркала). В качестве корригируемых функций следует использовать волновую сферическую аберрацию на краю отверстия и астигматизм на краю поля, значение которого приведено в таблице индивидуальных заданий
5. После коррекции получена тест-система, предназначенная для изучения астигматизма. Выдать на экран пятно рассеяния по треб. 28 САРО. Сместить плоскость установки последовательно на величину $DS'Y = Z'_m$, а затем на величину $DS'Y = Z'_s$ (для края поля изображения) и убедиться в том, что наклонный пучок действительно фокусируется в два взаимно перпендикулярных отрезка. Определить примерные размеры отрезков, используя оцифровку на координатных осях.
 6. Убрать смещение плоскости установки. Выполнить расчет лучей по треб. 1 САРО. Путем сравнения значений астигматических составляющих Z'_m , Z'_s и астигматизма $Z'_m - Z'_s$ для первого пучка лучей и пучка лучей на зоне установить зависимость этих величин от величины изображения $Y'(0)$.
 7. Найти отношение Z'_m/Z'_s для края и зоны поля изображения. Поскольку исходные значения этих величин были равны нулю, то отсюда вытекает, что в области аберраций третьего порядка при изменении $\Delta Z'_m$ изменение $\Delta Z'_s = \Delta Z'_m/3$. Кроме того, путем простых преобразований легко получить формулу для величины кривизны изображения (кривизны Петцваля): $Z'_p = (3Z'_s - Z'_m)/2$.
 8. Сместить плоскость установки на величину $DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2$. Выдать на экран пятно рассеяния и убедиться, что оно имеет форму круга и минимальные размеры по сравнению с другими положениями плоскости установки.
 9. Повторить изложенное в пунктах 5 и 6, выдавая по требованию 5 графики аберраций. Определить размеры фигур рассеяния, ориентируясь на масштабы графиков.
 10. Определить с помощью требования 36 САРО в системе без смещения плоскости установки число Штреля и среднеквадратическую волновую аберрацию для крайней точки

поля изображения. Изменяя числовую апертуру MU MAX, получить число Штреля, равным 80%, а среднеквадратическое отклонение, равным 0,074. После этого выполнить расчет хода лучей по треб. 1 САРО и определить, какой волновой аберрации соответствуют эти величины. Для чего записать в отчет величины $W(0)$ для края поля и верхнего наклонного меридионального луча и крайнего сагиттального луча. Разность этих величин составит астигматизм в волновой мере, соответствующий вышеуказанным числу Штреля и среднеквадратической волновой аберрации.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета $A_0 = 1$, $HA = s_1$.

Размер зрачка определяется числовой апертурой $\sin \sigma = MU MAX = 0.05$

Размер предмета y (линейное поле в пространстве предметов $2y$):

$Y MAX = -3$

Апертурная диафрагма совпадает со второй зеркальной поверхностью $ND = 2$, $DD = 0$.

Длина волны $\lambda = 0,0005$ мм.

№	Радиусы	Толщины	Показатели преломления	Положение предмета относительно первой поверхности s_1 , мм	Требуемое значение астигматизма, $ast = Z'_m - Z'_s$
1	$r_1 = -100,0284$ $r_2 = -50,02$ $r_3 = -100,0284$	$d_1 = -49,48$ $d_2 = 49,48$	1 -1 1 -1	-100	0,8
2	$r_1 = -95,027$ $r_2 = -47,519$ $r_3 = -95,027$	$d_1 = -47,006$ $d_2 = 47,006$	1 -1 1 -1	-95	0,6
3	$r_1 = -110,031$ $r_2 = -55,022$ $r_3 = -110,031$	$d_1 = -54,428$ $d_2 = 54,428$	1 -1 1 -1	-110	-0,4
4	$r_1 = -105,030$ $r_2 = -52,521$ $r_3 = -105,030$	$d_1 = -51,954$ $d_2 = 51,954$	1 -1 1 -1	-105	-0,5

№	Радиусы	Толщины	Показатели преломления	Положение предмета относительно первой поверхности s_1 , мм	Требуемое значение астигматизма, $ast = Z'_m - Z'_s$
5	$r_1 = -93,026$ $r_2 = -46,519$ $r_3 = -93,026$	$d_1 = -46,016$ $d_2 = 46,016$	1 -1 1 -1	-93	0,6
6	$r_1 = -92,026$ $r_2 = -46,018$ $r_3 = -92,026$	$d_1 = -45,522$ $d_2 = 45,522$	1 -1 1 -1	-92	-0,3
7	$r_1 = -102,029$ $r_2 = -51,0204$ $r_3 = -102,029$	$d_1 = -50,470$ $d_2 = 50,470$	1 -1 1 -1	-102	0,4
8	$r_1 = -91,026$ $r_2 = -45,518$ $r_3 = -91,026$	$d_1 = -45,027$ $d_2 = 45,027$	1 -1 1 -1	-91	-0,45
9	$r_1 = -94,027$ $r_2 = -47,019$ $r_3 = -94,027$	$d_1 = -46,511$ $d_2 = 46,511$	1 -1 1 -1	-94	0,3
10	$r_1 = -90,026$ $r_2 = -45,018$ $r_3 = -90,026$	$d_1 = -44,532$ $d_2 = 44,532$	1 -1 1 -1	-90	-0,35

Содержание отчета

1. Таблицы и графики aberrаций
2. Соотношение между изменениями Z'_m и Z'_s при постоянной кривизне изображения Петцваля
3. Величина астигматизма в волновой мере, соответствующая числу Штреля 80% и среднеквадратической волновой aberrации 0,074

Контрольные вопросы

1. Средняя кривизна изображения
2. Как вычислить кривизну Петцваля при наличии астигматизма, то есть при $Z'_m \neq Z'_s$?
3. Изменение фигуры рассеяния при смещении плоскости установки

Лабораторная работа № 1.11

Исследование свойств хроматизма положения

Цель работы: изучение свойств хроматизма положения на примере модифицированного объектива «Микронар»; закрепление теоретического материала.

Задачи работы: расчет тест-системы, обладающей хроматизмом положения и свободной от остальных монохроматических aberrаций.

Краткие теоретические сведения:

Хроматизм положения проявляется в том, что параксиальные изображения (плоскости Гаусса) для дополнительных длин волн света не совпадают между собой и не совпадают с плоскостью Гаусса для основной длины волны. Это приводит при использовании спектрочувствительных приемников к образованию цветной каймы вокруг изображения точки, а в случае применения черно-белых приемников – к размытию изображения точки.

Для исследования хроматизма положения используется объектив «Микронар», у которого к призме – куб приклеены две одинаковые плоскопараллельные пластины, одно из которых расположена в пространстве предметов, а другая – в пространстве изображений (рис. 1.11.1)

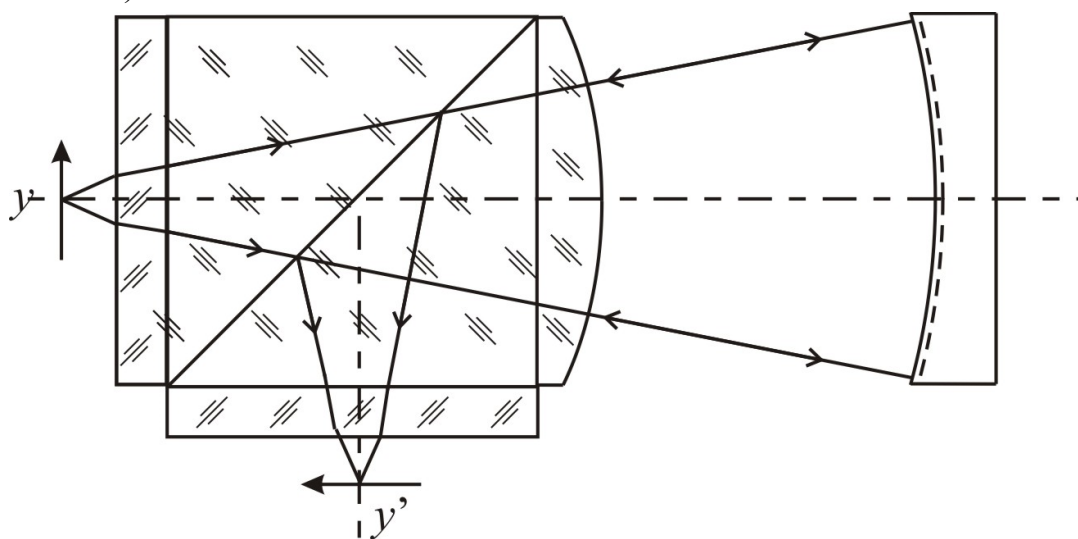


Рис. 1.11.1 Объектив «Микронар» с двумя приклеенными плоскопараллельными пластинами

Показатели преломления и числа Аббе пластин не совпадают с показателем преломления и числом Аббе призмы.

Порядок выполнения:

1. Система задается углами первого параксиального луча с осью α_i . Положим $\alpha_1=1$, тогда: $\alpha_2=1/n_2=\alpha_7$; $\alpha_3=1/n_3=\alpha_4=\alpha_5=\alpha_6$; $\alpha_8=1$.
2. Записать марки стекол в соответствии с индивидуальным заданием (см. таблицу). По требованию 2.27 САРО получить показатели преломления
3. Рассчитать значения α_2 и α_3 , число значащих цифр после запятой не менее шести.
4. Записать полученные значения углов первого параксиального луча с осью, толщины и воздушные промежутки (см. таблицу), а так же начальные данные для расчета хода лучей
5. Выполнить автоматизированную коррекцию по требованию 2.11 САРО, используя в качестве коррекционных параметров толщины пластин $d_1=-d_6$ и воздушный промежуток между линзой и зеркалом $d_3=-d_4$, с целью устранения волновой сферической аберрации для края апертуры и меридиональной составляющей астигматизма Z'_m для края поля изображения.
6. Получить значения аберраций с помощью требования 2.1 САРО и убедиться, что все монохроматические аберрации отсутствуют. Имеет место хроматизм положения $S'(2-1)\neq 0$, который вызывает хроматизм положения в поперечном измерении $Y'(2-1)$. Сравнив последний для луча 1 и для луча 4 осевого пучка, определить вид зависимости этой аберрации от апертуры МУ.
7. Вывести на экран пятна рассеяния (требование 2.28 САРО) и убедиться, что структура и размеры пятен идентичны по полю изображения. Оценить диаметр пятна рассеяния.
8. Ввести плоскость установки $DS'Y=[S'(0(1-0)+ S'(0(2-0))]/2$ и убедиться, что при этом диаметр пятна рассеяния имеет минимальный диаметр.
9. Вывести на экран графики геометрических аберраций (треб.2.5 САРО)

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей:

Положение предмета $S_1 = -1,5$ ($A_0=1$, $HA = -1,5$);

Положение входного зрачка определяется положением апертурной диафрагмы на четвертой поверхности: $ND=4$, $DD=0$. Так как изображение апертурной диафрагмы окажется близким к бесконечности, то для второго параксиального луча следует задать $S_p=1000$ ($B_0=1$, $HB=1000$);

Размер предмета $Y_{MAX} = -5$ мм;

Размер зрачка задается синусом апертурного угла в пространстве предметов $MU_{MAX} = 0,1$;

Длины волн: e , C' , F' ;

Толщины и воздушные промежутки: $d_1 = -d_6 = 10$, $d_3 = -d_4 = 190$.

№ варианта	Марки стекол
1	ТФ10 – К8
2	ТФ10 – ЛК1
3	ТФ10 – ЛК6
4	ТБФ3 – К8
5	ТБФ4 – К8
6	ТБФ8 – ЛК1
7	ТБФ9 – К8
8	ТБФ9 – ЛК1
9	ТБФ10 – К8
10	ТБФ10 – ЛК6
11	ТБФ25 – ЛК1
12	ТБФ25 – ЛК6
13	ТФ12 – К8
14	ТФ12 – ЛК1

Содержание отчета

1. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
2. Таблицы aberrаций для осевого и одного внеосевого пучка.
3. Графики aberrаций для осевого и одного внеосевого пучка.

Контрольные вопросы

1. Как проявляются хроматические aberrации при работе с монохроматическим приемником?
2. Как проявляются хроматические aberrации при работе с немонахроматическим (цветным) приемником?
3. Зависимость вторичного спектра от фокусного расстояния.

Лабораторная работа № 1.12

Вторичный спектр и его свойства

Цель работы: исследование вторичного спектра

Задачи работы: расчет системы, в которой исправлены все осевые aberrации кроме вторичного спектра; исследование свойств вторичного спектра

Краткие теоретические сведения

Вторичным спектром называется несовпадение совмещенных плоскостей Гаусса для двух дополнительных длин волн λ_1, λ_2 с плоскостью Гаусса для основной длины волны λ_0 , т.е. величина $S'_0(2-0)$ при $S'_0(2-1)=0$ (при исправленном хроматизме положения).

Вторичный спектр для системы из двух тонких соприкасающихся линз определяется по формуле:

$$s'_{\lambda_2} - s'_{\lambda_1} = -(p_1 - p_2)f'/(v_1 - v_2),$$

где p – относительная частная дисперсия, v – коэффициент дисперсии. Для большинства марок оптического стекла зависимость относительных частных дисперсий p от коэффициентов дисперсий v близка к линейной и имеет вид $10^3 p = 543 - 0,57v$. Соответствующие прямые называют «нормальными». Для спектральных линий e, C', F' вторичный спектр $s'_{F'} - s'_e = f'/1700$.

Тестовой системой может служить объектив из двух линз, разделенных воздушным промежутком конечной величины. В нем исправляются хроматизм положения, сферическая aberrация третьего и пятого порядков, сферохроматическая aberrация и отступление от условия изопланатизма.

Исходная оптическая система образована плосковогнутой отрицательной и двояковыпуклой симметричной линзами, заданными углами первого параксиального луча с осью α . Комбинация стекол Ф13/К18 принята в каталоге [4] как образующая «нормальную» прямую.

Порядок выполнения:

1. Задать оптическую систему из двух тонких линз, разделенных воздушным промежутком. Описание оптической системы с помощью углов первого параксиального луча с осью выглядит следующим образом:

$$\begin{array}{lll}
 \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\
 \alpha_2 = 0 & d_1 & n_2 = \Phi 13 \\
 \alpha_3 = -1 & d_2 & n_3 = 1 \\
 \alpha_4 = 0 & d_3 & n_4 = K18 \\
 \alpha_5 = 1 & & n_5 = 1
 \end{array}$$

При этом первая линза – плосковогнутая, а вторая – двояковыпуклая симметричная. Толщины линз подобрать конструктивно. Расстояние $d_2 = 6 \dots 15$ мм. Фокусное расстояние системы и относительное отверстие системы задать согласно индивидуальному варианту задания.

2. Используя в качестве коррекционных параметров углы первого параксиального луча с осью $\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$, смещение плоскости установки $DS'Y$ и расстояние между линзами d_2 , выполнить автоматизированную коррекцию поперечной сферической aberrации, величины неизопланатизма и хроматизма положения на краю зрачка, а также величину поперечной сферической aberrации на зоне (то есть на высоте зрачка 0,707 от максимальной) и параксиального хроматизма положения. Последний задается как функция b для пучка 0, луча 0.
3. Определить aberrации с помощью треб. 1 САРО. Вычислить коэффициент вторичного спектра по формуле $C^* = (s'_F - s'_e)/f'$. Сравнить с теоретическим значением. Выдать на экран вид пятна рассеяния по треб. 28 САРО. Выдать графики aberrаций по треб. 5 САРО.
4. Определить вторичный спектр для пар стекол, лежащих на «нормальной» прямой, и определить разброс величины C^* : $\Phi 13-K8$; $\Phi 13-LK1$; $\Phi 13-LK6$; $\Phi 13-ФК11$; $\Phi 13-ТФК11$; $\Phi 13-ТК21$; $\Phi 13-ТК23$; $\Phi 13-СТК3$; $\Phi 13-СТК19$; $\Phi 2-K18$; $ТФ1-K18$; $ТФ10-K18$; $ТФ4-K18$; $СТФ2-K18$; $СТФ11-K18$. Выделить стекла, наиболее удаленные от «нормальной» прямой.
5. Исследовать вторичный спектр для систем с флюоритом, то есть из следующих материалов: $\Phi 13$ –флюорит; $ТФ1$ –флюорит;

ОФ6–флюорит; СТК15 – флюорит. В программе САРО флюорит обозначается кодом 3007.

6. Исследовать вторичный спектр с использованием заменителя флюорита – стекла ОК4, то есть в сочетаниях Ф13–ОК4; ТФ1–ОК4; ОФ6–ОК4; СТК15–ОК4.
7. Вернуться к первоначальным маркам стекол. Перейти от углов первого параксиального луча к радиусам, обернуть исходную оптическую систему (инверсия по терминологии САРО) и вновь вернуться к углам. Повторить исследования вторичного спектра. Коррекцию проводить, используя углы первого параксиального луча с осью. Исследование повторить для 3 пар стекол. Сравнить вторичный спектр для этих пар стекол в обоих случаях расположения линз в системе.
8. Повторить пп. 1-5 для спектрального диапазона $\lambda_1 = 900$ нм и $\lambda_2 = 400$ нм. Основная длина волны $\lambda_0 = \lambda_e = 0,54607$ мкм.

Варианты заданий

Положение предмета на бесконечности $s_1 = \infty$: $A_0 = 0$, $HA = f'$.

Размер предмета: $\sin \omega = MU_{MAX} = 0,05$

Зрачок совпадает с первой поверхностью $HV = 0$, $V_0 = 1$

Длины волн: e , C' , F' .

№ варианта	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K
1	100	5
2	150	6
3	70	5
4	80	5
5	120	5
6	200	6
7	300	7
8	150	5
9	100	4,5
10	180	6
11	250	7
12	250	6
13	100	4
14	140	5
15	320	7

Содержание отчета:

1. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций обычных стекол.
2. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций стекол с использованием флюорита.
3. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций с использованием стекла ОК4.

Контрольные вопросы:

1. Зависимость вторичного спектра от фокусного расстояния.
2. Технологические и термооптические свойства флюорита.

Лабораторная работа № 1.13

Исследование сферохроматической аберрации.

Цель работы: изучение свойств сферохроматической аберрации на примере одиночной линзы с асферической поверхностью и склейки из двух линз; закрепление теоретического материала.

Задачи работы: расчет тест–системы, обладающей сферохроматической аберрацией и свободной от остальных монохроматических и хроматических аберраций.

Краткие теоретические сведения:

Сферохроматическая аберрация проявляется в том, что в плоскости Гаусса для осевой точки изображения основной длины волны при отсутствии сферической аберрации и хроматизма положения возникают поперечные аберрации для дополнительных длин волн. Этот факт объясняется зависимостью сферической аберрации для каждой из дополнительных длин волн от показателей преломления оптических материалов. Сферохроматическая аберрация имеет место даже у простейших систем, какими являются объективы зрительных труб, склеенных из двух линз, и, как правило, определяют качество исправления хроматизма в центральной точке поля. Сферохроматическая аберрация третьего порядка постоянна в пределах поля изображения.

Тест – система:

Для изучения сферохроматической аберрации используется одиночная линза с асферической поверхностью и склейка из двух линз, материалы которых специально подобраны для получения больших значений сферохроматической аберрации.

Порядок выполнения:

1. Записать исходную систему в соответствии с индивидуальным заданием.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (треб.11 САРО) фокусного расстояния $f'=100\pm 0,01$ мм, хроматизма положения $S'(2-1)= 0\pm 0,001$ мм, волновой сферической аберрации для луча 1 $W(0)_1=0\pm 0,05$ и отступления от условия изопланатизма $\eta=0\pm 0,001$ (в относительной

мере, т.е. 0,1%) для того же луча и волновой сферической aberrации для луча 3 $W(0)_3=0\pm 0,05$. В качестве коррекционных параметров использовать радиусы кривизны R2 – R5 и коэффициенты асферики ASF4 и ASF5

3. Выполнить расчет aberrаций (треб.1 САРО). Обратить внимание на то, что при исправленном хроматизме положения $S'(2-1)\approx 0$ для осевой точки предмета $Y'(2-1)\neq 0$. Это по определению является проявлением сферохроматической aberrации.
4. Найти соотношение между $Y'(2-1)$ для луча 1 с координатой $H=12.5$ и луча 4 с координатой $H=6.25$. Если соотношение равно 8, то сферохроматическая aberrация имеет третий порядок ($2^3=8$). Если это соотношение несколько отличается от 8, это свидетельствует о присутствии aberrаций более высокого порядка.
5. Вывести на экран пятна рассеяния (треб.28 САРО). Убедиться, что они практически одинаковы в пределах поля изображения.
6. Вывести на экран графики хроматических aberrаций (треб.5 САРО). Убедиться, что они практически одинаковы в пределах поля изображения.
7. Найти положение плоскости наилучшей установки ($DS'Y$), при котором диаметр пятна рассеяния для осевой точки будет минимальным. Убедиться, что при этом $DS'Y = [DS'(1) + DS'(2)]/2$, где $DS'(1)$ и $DS'(2)$ – продольные aberrации для луча 1, соответствующего $H_{MAX}=12.5$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета $s_1=\infty$ ($A_0=0$, $H_A=1$);

Зрачок совпадает с первой поверхностью ($B_0=1$, $H_B=0$);

Размер предмета определяется синусом полевого угла - $\sin\omega=0,01$ ($MU_{MAX}=0,01$);

Размер зрачка определяется высотой осевого луча на зрачке $m=12,5$ мм ($H_{MAX}=12,5$);

Длина волны: e , C' , F' .

Конструктивные параметры:

R	ASF/A	D	N(0)
A	102	5	1
-428	1	1,5	x
-54	1	5	1
-27	-171	5	xx
-57	1		xxx
			1

Марки стекол в соответствии с индивидуальным заданием:

№ вар.	x	xx	xxx
1	ТФ1	СТК19	ТФ4
2	ТФ1	ТК16	Ф1
3	ТФ1	ТФ8	СТК12
4	ТФ1	ТФ8	СТК7
5	ТФ1	ЛФ9	ФК24
6	ТФ2	ТФ8	СТК7
7	ТФ2	ТБФ9	ТФ10
8	ТФ3	СТК19	ТФ4
9	ТФ4	СТК19	ТФ4
10	ТФ4	ТФ4	СТК19
11	ТФ10	СТК19	ТФ4
12	ТФ10	ТФ8	СТК12

Содержание отчета

1. Конструктивные параметры рассчитанной системы
2. Графики aberrаций осевого пучка для трех длин волн.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение сферохроматической aberrации.
2. Вид графиков сферической aberrации для основной и двух дополнительных длин волн при наличии сферохроматической aberrации.
3. Вид графиков сферической aberrации для основной и двух дополнительных длин волн при отсутствии сферохроматической aberrации.

Лабораторная работа № 1.14

Исследование хроматизма увеличения

Цель работы: изучение свойств хроматизма увеличения на примере зеркально-линзового объектива, являющегося прототипом объектива “Микронар”; закрепление теоретического материала.

Задачи работы: расчет тест–системы, обладающей хроматизмом увеличения и свободной от остальных монохроматических и хроматических aberrаций.

Краткие теоретические сведения:

Хроматизм увеличения проявляется в том, что в плоскости Гаусса для основной длины волны изображения внеосевых точек поля для дополнительных длин волн не совпадают как между собой, так и с изображением точки для основной длины волны, а образуют линейный спектр. Эта aberrация существенно снижает частотно-контрастную характеристику внеосевых точек поля изображения.

Тест – система:

Для изучения хроматизма увеличения используется прототип объектива «Микронар» (рис. 1.14.1), состоящий из двух линз, значительной толщины и сферического зеркала. Поверхности линз и зеркала – конфокальные и концентричны друг к другу. Предмет располагается на первой плоской поверхности линзы, а изображение – соответственно на последней. Апертурная диафрагма на поверхности зеркала. Для устранения меридиональной кривизны изображения Z'_m зеркало располагается в фокусе линзы, в результате чего в пространстве изображений имеет место телецентрический ход главных лучей.

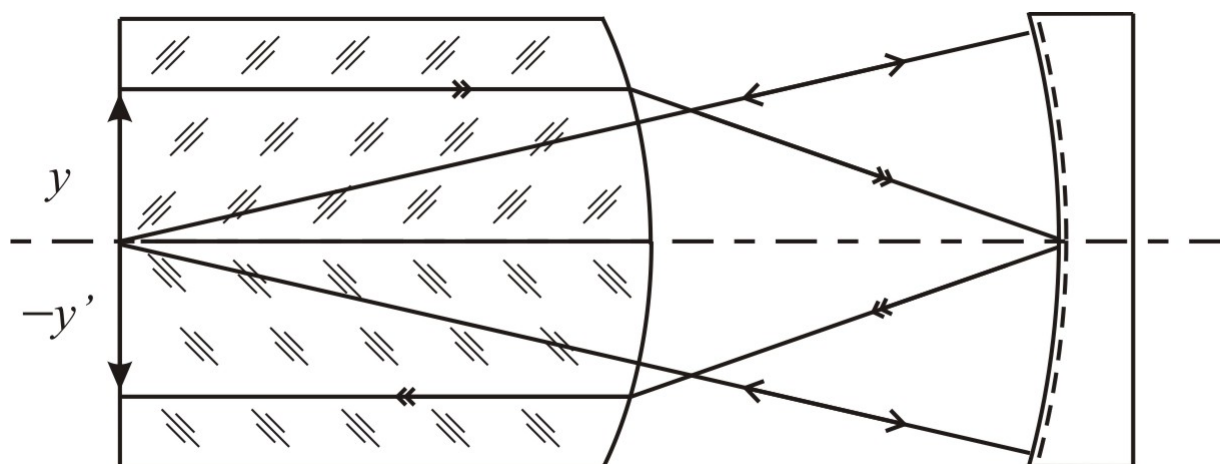


Рис. 1.14.1 Прототип объектива «Микронар»

Порядок выполнения:

1. Записать исходную систему в соответствии с индивидуальным заданием.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (треб. 11 САРО), используя в качестве коррекционных параметров радиус кривизны зеркала R_3 и воздушный промежуток между линзой и зеркалом $D_2 = -D_3$. В качестве корригируемых функций использовать последний отрезок $S'_0 = 0$ и меридиональную составляющую кривизны изображения Z'_m для края поля.
3. По результатам расчета хода луча (треб.1 САРО) убедиться в отсутствии как монохроматических, так и хроматических aberrаций за исключением хроматизма увеличения. Для вывода на экран его значения следует после вывода основного экрана с aberrациями нажать 9 на малой клавиатуре и записать в отчет величины $y'_2 - y'_1 = Y'(2-1)$ – хроматизм увеличения для третьего и первого пучков лучей. Найти их соотношения.
4. Убедиться, что хроматизм увеличения линейно зависит от величины изображения Y' .
5. Вывести на экран графики геометрических aberrаций (треб.5 САРО). Нетрудно увидеть, что график хроматизма увеличения $Y'(2-1)$ также выражает линейную зависимость от величины изображения Y' . Обратит внимание на характерный вид графиков aberrаций для широких наклонных пучков дополнительных длин волн.

6. Вывести на экран пятна рассеяния (треб. 28 САРО). Обратит внимание на то, что для внеосевых точек пятна не видны. Это объясняется автоматическим выбором масштаба графиков. Для более наглядной выдачи следует сместить плоскость установки, например, на $DS'Y=0,01$ мм. В этом случае видны три отдельных цветных пятна, что тоже не соответствует реальности, поскольку в комплексе САРО предусмотрено построение пятен рассеяния не более, чем для четырех фиксированных длин волн. В действительности же имеет место сплошной спектр и соответственно пятна рассеяния для внеосевых точек имеют вид отрезков прямых линий с изменением цвета по их длине.
7. Выполнить расчет хода лучей (треб.1 САРО) и обратит внимание, что величина хроматизма увеличения практически не зависит от смещения плоскости установки $DS'Y$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета $S_1=0$ ($A_0=1$, $H_A=0$);

Положение входного зрачка определяется положением апертурной диафрагмы на третьей поверхности ($ND=3$, $DD=0$);

Так как положение входного зрачка окажется близким к бесконечности, то для второго параосевого луча следует задать $S_p=1000$ ($B_0=1$, $H_B=1000$);

Размер предмета $Y_{MAX} = -10$ мм;

Размер зрачка задается синусом апертурного угла в пространстве предметов $MU_{MAX}=0,2$;

Длины волн: e , C' , F' .

Конструктивные параметры исходной системы:

R, мм	D, мм	N(0)
0	100	1
-100	100	x
-200	-100	1
-100	-100	-1
0		xx
		-1

Марки стекол х и хх взять из таблицы в соответствии с индивидуальным заданием

№ вар.	Х	хх
1	Ф1	ТК16
2	ТФ4	СТК19
3	ТФ8	СТК7
4	ТФ8	СТК12
5	ТФ10	ТБФ9
6	ЛФ9	ТК23
7	ЛФ9	ФК24
8	ТК16	Ф1
9	ТК23	ЛФ9
10	СТК7	ТФ8
11	СТК19	ТФ4
12	СТК12	ТФ8
13	ТБФ9	ТФ10
14	ФК24	ЛФ9

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры системы
2. Таблицы aberrаций для внеосевых пучков: крайнего и «зоны» поля.

Контрольные вопросы:

1. Как выглядит изображение звезды на краю поля изображения при наличии хроматизма увеличения?
2. Как зависит хроматизм увеличения от смещения плоскости установки?

РАЗДЕЛ 2. Методы расчета оптических систем

Лабораторная работа № 2.1

Расчет схем контроля асферических поверхностей второго порядка

Цель работы: расчет схем контроля для несферических поверхностей второго порядка.

Задачи работы: найти безабберационные точки несферических поверхностей второго порядка, рассчитать схемы контроля, основанные на свойстве безабберационных точек, с использованием дополнительных эталонных поверхностей.

Краткие теоретические сведения

Контроль асферических поверхностей второго порядка с коэффициентами деформации $a_2 < 1$, где $a_2 = 1 - e^2$ (то есть эллипсоидов, гиперболоидов и параболоидов) целесообразно осуществлять на интерферометре с использованием эталонных сферических и плоских поверхностей (см. рис. 2.1.1). Этот способ основан на свойстве таких поверхностей безабберационно изображать точку, находящуюся в одном геометрическом фокусе $F1$ в другой геометрический фокус $F2$. Для параболоидальных поверхностей один из фокусов расположен на бесконечности, для эллипсоидальных поверхностей оба фокуса либо действительные, либо мнимые, для гиперболоидальных – один из фокусов действительный, другой – мнимый.

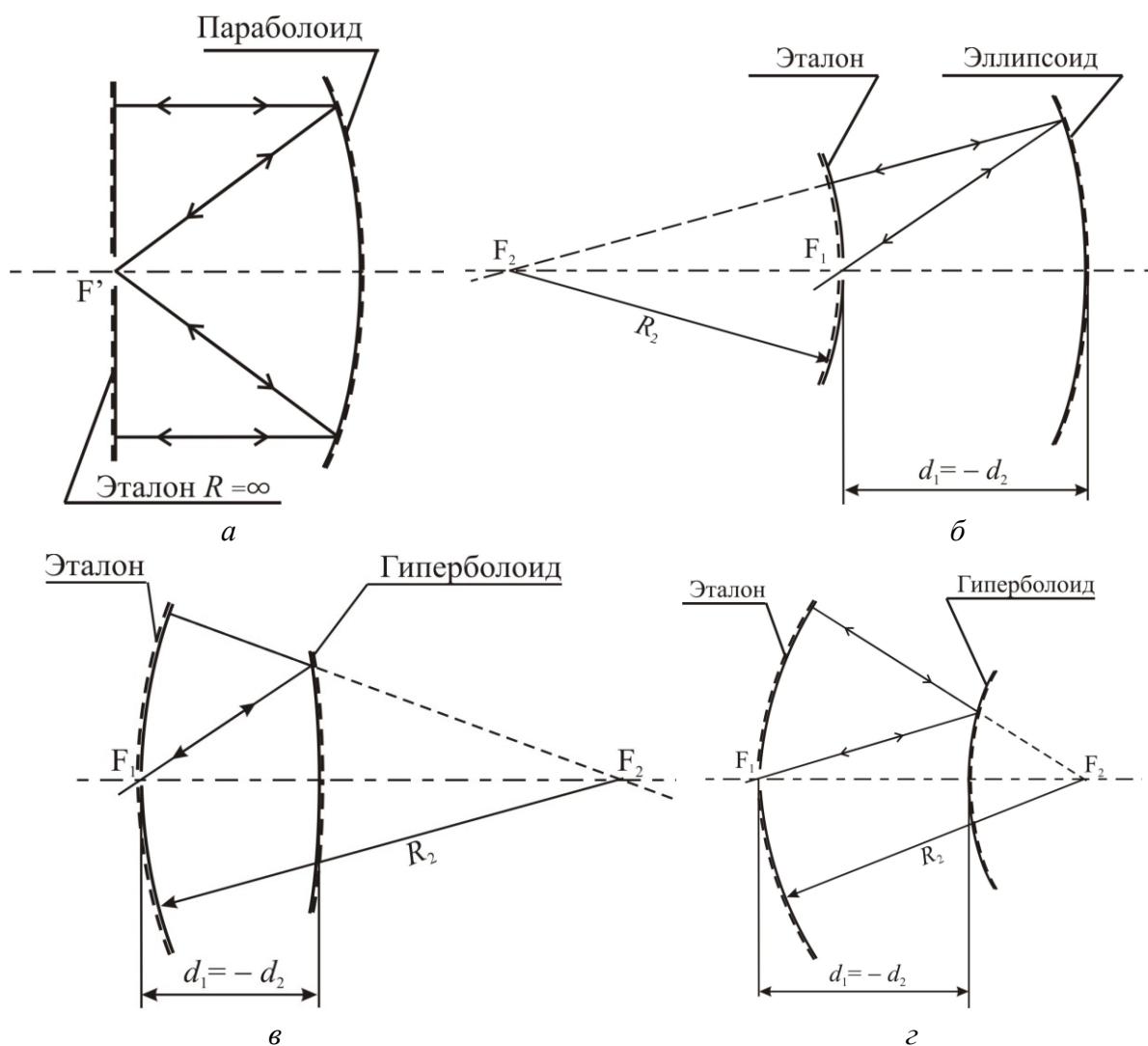


Рис. 2.1.1 Схемы контроля асферических зеркальных поверхностей второго порядка: а – вогнутый параболоид, б – вогнутый эллипсоид, в – вогнутый гиперboloид, г – выпуклый гиперboloид

Порядок выполнения работы:

1. Собрать контрольную схему для параболоидального зеркала (см. рис. 2.1.1а). Для этого записать параболоидальную зеркальную поверхность согласно индивидуальному варианту задания. Для параболоида геометрический фокус совпадает с оптическим. Убедиться, что абберация точки на оси полностью отсутствуют. Добавить плоское эталонное зеркало; расстояние до зеркальной поверхности выбрать равным фокусному расстоянию зеркала. Обратить внимание на то, что в контрольной схеме контролируемое зеркало должно быть записано дважды, так как лучи встречают это зеркало до отражения от плоского зеркала и после. Проверить

правильность сборки схемы: увеличение контрольной схемы должно быть равным $V = -1$, а аберрации точки на оси полностью отсутствовать.

2. По заданному уравнению асферической поверхности
- $$x^2 + y^2 - 2r_0z + a_2z^2 = 0,$$

где r_0 – радиус при вершине поверхности, a_2 – коэффициент деформации второго порядка. Найти положение геометрических фокусов с помощью автоматизированной коррекции. Плоскость предмета расположить так, чтобы она проходила через центр поверхности, при этом угол первого параксиального луча с осью в пространстве предметов $\alpha_1 = 1$, а высота первого параксиального луча на первой поверхности $НА = s_1 = -2r_0$, где s_1 – положение предмета относительно первой поверхности системы. В качестве коррекционного параметра использовать положение предмета $НА$ относительно первой поверхности, корригируемая функция – волновая аберрация для крайнего луча. Убедиться, что для найденного положения предмета аберрации осевой точки отсутствуют.

3. Рассчитать радиус сферической эталонной поверхности. Центр кривизны сферической поверхности должен совпадать со вторым геометрическим фокусом контролируемой поверхности (см. рис. 2.1.1) Расстояние между поверхностями выбрать так, чтобы вершина эталонной поверхности совпадала с первым геометрическим фокусом.
4. Добавить сферическую эталонную поверхность в контрольную схему, обратить внимание, что контролируемая поверхность должна быть записана дважды. Увеличение контрольной схемы $V = -1$, аберрации осевой точки отсутствуют.
5. Повторить расчеты контрольной схемы еще для двух случаев асферической поверхности второго порядка согласно индивидуальному варианту задания.

Варианты заданий

Уравнение поверхности : $x^2 + y^2 - 2r_0z + a_2z^2 = 0$, где r_0 – радиус при вершине поверхности, a_2 – эксцентриситет. Числовая апертура в пространстве предметов для всех вариантов $MU \text{ MAX} = -\sin \sigma = 0,25$.

Длина волны $\lambda = 0,0006328$ мм.

№ вар	Контролируемые поверхности			
	1. Параболоид	2. Эллипсоид	3. Вогнутый гиперболоид	4. Выпуклый гиперболоид
1	$R_0 = -1000, a_2 = 0$	$R_0 = -1300, a_2 = 0,6$	$R_0 = -700, a_2 = -0,4$	$R_0 = 700, a_2 = -0,4$
2	$R_0 = -2000, a_2 = 0$	$R_0 = -1000, a_2 = 0,7$	$R_0 = -1300, a_2 = -0,5$	$R_0 = 1300, a_2 = -0,5$
3	$R_0 = -800, a_2 = 0$	$R_0 = -1200, a_2 = 0,3$	$R_0 = -600, a_2 = -1,1$	$R_0 = 600, a_2 = -1,1$
4	$R_0 = -850, a_2 = 0$	$R_0 = -800, a_2 = 0,5$	$R_0 = -1000, a_2 = -1,4$	$R_0 = 1000, a_2 = -1,4$
5	$R_0 = -1500, a_2 = 0$	$R_0 = -700, a_2 = 0,7$	$R_0 = -700, a_2 = -1,2$	$R_0 = 700, a_2 = -1,2$
6	$R_0 = -700, a_2 = 0$	$R_0 = -900, a_2 = 0,5$	$R_0 = -700, a_2 = -1,5$	$R_0 = 700, a_2 = -1,5$
7	$R_0 = -600, a_2 = 0$	$R_0 = -1200, a_2 = 0,4$	$R_0 = -800, a_2 = -0,8$	$R_0 = 800, a_2 = -0,8$
8	$R_0 = -500, a_2 = 0$	$R_0 = -1500, a_2 = 0,65$	$R_0 = -600, a_2 = -0,9$	$R_0 = 600, a_2 = -0,9$
9	$R_0 = -750, a_2 = 0$	$R_0 = -1000, a_2 = 0,6$	$R_0 = -600, a_2 = -1,6$	$R_0 = 600, a_2 = -1,6$
10	$R_0 = -900, a_2 = 0$	$R_0 = -2000, a_2 = 0,5$	$R_0 = -500, a_2 = -1,5$	$R_0 = 500, a_2 = -1,5$
11	$R_0 = -1200, a_2 = 0$	$R_0 = -600, a_2 = 0,5$	$R_0 = -1500, a_2 = -1,1$	$R_0 = 1500, a_2 = -1,1$
12	$R_0 = -1100, a_2 = 0$	$R_0 = -700, a_2 = 0,55$	$R_0 = -750, a_2 = -1,7$	$R_0 = 750, a_2 = -1,7$
13	$R_0 = -1400, a_2 = 0$	$R_0 = -800, a_2 = 0,6$	$R_0 = -750, a_2 = -2,1$	$R_0 = 750, a_2 = -2,1$

Содержание отчета

1. Конструктивные параметры контрольных схем.
2. Таблицы волновых aberrаций контрольных схем.
3. Ход лучей в контрольных схемах

Контрольные вопросы

1. Возможно ли контролировать асферические поверхности высшего порядка с помощью метода безабберационных точек?
2. Вид интерференционной картины при наличии отступления асферической поверхности от расчетной формы

Лабораторная работа № 2.2

Расчет объектива для считывания информации с кодового диска

Цель работы: освоить навыки расчета однолинзового объектива с дифракционно ограниченным качеством изображения и асферической поверхностью.

Задачи работы: рассчитать одиночную линзу с асферической поверхностью, отвечающую требованиям, предъявляемым к устройствам считывания информации с современных компакт дисков

Краткие теоретические сведения:

Современные устройства для считывания информации с CD, DVD и Blu Ray дисков представляют собой одиночную линзу с асферической поверхностью, работающую в монохроматическом свете полупроводникового лазера при длинах волн 780, 650 и 405 нм соответственно. Объектив фокусирует параллельный пучок света в дифракционное пятно диаметром порядка 1 мкм на задней поверхности диска. Если свет попадает на участок диска, покрытый металлическим слоем, то происходит регулярное отражение света, который попадает через объектив на приемник. Если свет попадает на выжженное углубление на диске, то он рассеивается. Таким образом моделируется двоичное кодирование информации.

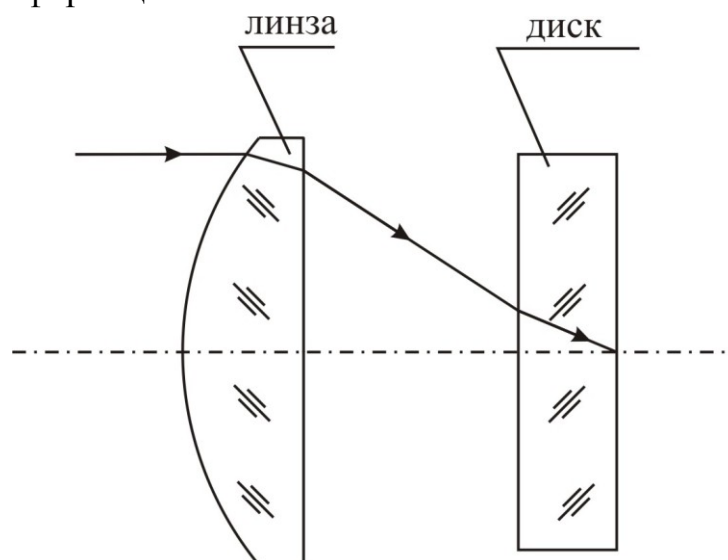


Рис. 2.2.1 Объектив для считывания информации

Порядок выполнения работы

1. Исходной оптической системой служит плосковыпуклая линза. Для уменьшения ручных вычислений задаем ее через углы первого параксиального луча $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = 1$. В некоторых вариантах возникает полное внутреннее отражение, не обращать на это внимание. Перейти от углов α к радиусам с помощью требования 23.1 (САРО). Обернуть линзу с помощью пункта 3 меню, то есть выполнить инверсию. Посмотреть чертеж линзы с помощью треб. 450. Толщину линзы подобрать таким образом, чтобы толщина по краю была бы минимальной без засечек.
2. Добавить две плоские поверхности – диск с толщиной 1,5 мм из стекла К8. Расстояние между линзой и диском можно выбрать произвольно, например, 1 мм. Рассчитать ход лучей по требованию 1 (САРО) и убедиться в правильности фокусного расстояния, величины изображения ($y' = 0.1$ мм), тангенса апертурного угла $TGC' \approx 0.5$, а также в том, что волновая сферическая aberrация чрезвычайно велика. Для ее устранения необходимо асферизовать первую поверхность. Для этого запишем уравнение сферической поверхности как асферику второго порядка. В первой строке столбца ASF/A следует записать 102 (первый тип уравнения, второй порядок). Во второй и третьей строках записываются единицы (поверхность осесимметрична), в четвертой строке записывается коэффициент, равный $-2r_1$. В пятой строке – коэффициент деформации второго порядка, который для сферы равен единице. Вместо значения первого радиуса в первой строке первого столбца записывается латинская буква A. Это означает, что первая поверхность асферическая. В качестве коррекционного параметра используем коэффициент деформации второго порядка. В рассматриваемом случае это ASF5. В качестве корригируемой функции примем волновую aberrацию для первого луча осевого пучка с допуском 0.03.
3. После выполнения автоматизированной коррекции убедиться, что из-за наличия волновой сферической aberrации высших порядков качество изображения осевой точки неудовлетворительное (треб. 11 и 36 1 САРО). Для устранения этих aberrаций введем деформацию третьего порядка. То есть, вместо 102 в первой строке второго

столбца запишем 103 и дополним столбец шестой строкой, в которую запишем ноль. Кроме того, введем еще одну корригируемую функцию, а именно, волновую aberrацию для третьего луча осевого пучка. После выполнения автоматизированной коррекции (требование 11 САРО) получаем хорошую коррекцию для осевого пучка лучей (требование 36 1), но из-за наличия весьма значительной комы, связанной с отступлением от условия изопланатизма (величина η), даже при столь малом поле aberrации внеосевых точек недопустимы.

4. Из теории aberrаций известно, что при зрачке, совпадающем с деформируемой поверхностью, коэффициенты деформации не влияют на отступление от условия изопланатизма. Поэтому попытаемся использовать в качестве дополнительного коррекционного параметра показатель преломления линзы $N(0)2$. Для этого с помощью требования 27 САРО переходим от марки стекла к показателю преломления. При изменении показателя преломления будет изменяться фокусное расстояние линзы, поэтому для сохранения фокусного расстояния необходимо задать его в качестве одной из корригируемых функций (функция 11 для нулевого луча осевого пучка) $f' = 4.5 \pm 0.01$. Дополним также корригируемые функции величиной η (функция 2 для первого луча осевого пучка), что обеспечит устранение комы для области, близкой к оптической оси, а также волновыми aberrациями для верхнего (1) и нижнего (8) наклонного лучей первого меридионального пучка, которые в полученной системе составляли единицы длин волн. В качестве еще одного коррекционного параметра необходимо использовать коэффициент ASF4, то есть радиус поверхности при вершине. За счет его изменения будет поддерживаться требуемое фокусное расстояние при изменении показателя преломления.
5. По требованию 36 1 определить радиус дифракционного пятна (радиус первого темного кольца). Зафиксировать эту величину в отчете.
6. Повторить расчет, начиная с пункта 1, для оставшихся двух длин волн. Сравнить радиусы дифракционных колец. Убедиться, что они прямо пропорциональны длинам волн.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета – на бесконечности $A_0 = 0$, $H_A = f' = 4.5$ мм

Апертурная диафрагма на первой поверхности $B_0 = 1$, $H_B = 0$

Размер предмета задается синусом полевого угла

$-\sin \omega = MU_{MAX} = 0.02$

Размер зрачка $H_{MAX} = 2.03$ мм

Длины волн 0.000780 мм, 0.000650 мм, 0.000405 мм

Материал диска стекло К8 (фактически диск изготавливается из пластмассы с показателем преломления, близким к 1.5)

Толщина диска 1.5 мм.

№ варианта	Марка стекла
1	К8
2	БК10
3	ТК16
4	БФ16
5	ТК2
6	ТК14
7	ТК21
8	СТК3
9	СТК9
10	СТК12
11	СТК19
12	БФ12
13	Ф6
14	ТФ1
15	ТФ5

Содержание отчета

1. Конструктивные параметры рассчитанных объективов
2. Волновые аберрации рассчитанных объективов
3. Радиусы первых дифракционных колец для рассчитанных объективов

Контрольные вопросы

1. Формула для радиуса диска Эри.
2. Почему коды наносятся на вторую поверхность диска?
3. Каким способом возможно получение большей плотности информации на диске по сравнению с Blue Ray?

Лабораторная работа № 2.3

Исследование предельных возможностей одиночной линзы в инфракрасной области спектра

Цель работы: расчет линзы с минимальной сферической абберацией в инфракрасном диапазоне.

Задачи работы: расчет линзы; оценка абберационных свойств и исследование предельных возможностей при дифракционном качестве изображения линзы, работающей при длине волны 10 мкм.

Краткие теоретические сведения

Для работы в дальней ИК области спектра 8 – 14 мкм, которая используется в частности в тепловизионных приборах, набор оптических материалов, прозрачных в этой области, крайне ограничен. [5]. Наиболее часто из них используется германий, обладающий непривычно большим показателем преломления и малой дисперсией. По этой причине в качестве объективов могут использоваться одиночные линзы, что и будет показано при выполнении настоящей лабораторной работы.

Порядок выполнения работы

1. Задать плосковыпуклую линзу с помощью углов первого параксиального луча. Фокусное расстояние и относительное отверстие согласно индивидуальному варианту задания. Описание линзы с помощью углов первого параксиального угла выглядит следующим образом:

$$\begin{array}{lll}
 \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\
 \alpha_2 = 0 & d = 5 & n_2 = 3020 \text{ (Код германия в SAPO)} \\
 \alpha_3 = 1 & & n_3 = 1
 \end{array}$$

Записать исходную систему в личный архив.

2. С помощью автоматизированной коррекции исправить отступление от условия изопланатизма на краю зрачка η (функция 2). Коррекционный параметр – угол первого параксиального луча с осью А2. После выполнения требования 11 выполнить треб.1 и убедиться, что величина ЭТА для всех четырех лучей достаточно мала, что свидетельствует об отсутствии высших порядков η .

3. Оптимальная коррекция волновой сферической аберрации может быть достигнута с помощью введения плоскости установки DS'Y. При этом отступление от условия изопланатизма η не изменяется, поскольку она не зависит от положения плоскости установки. Заменить коррекционный параметр A2 на DS'Y, а корригируемую функцию на w_l (функция 50) Выполнить требование 11 повторно. Получена оптимальная коррекция волновой аберрации

4. С помощью треб. 36 1 получить число Штреля и среднеквадратическую волновую аберрацию.

5. Изменяя поочередно фокусное расстояние, диафрагменное число и длину волны, найти степени x , y , z , а также коэффициент a в эмпирической формуле

$$w_{ск} = a \cdot f'^x K^y \lambda^z \quad (2.3.1)$$

При этом исследовании каждый раз следует начинать с чтения исходной системы из архива.

6. Проверить полученную формулу для $f' = 150$, $K = 3$, $\lambda = 0.01$. Результат $w_{ск} = 0.031$.

7. Исследовать возможности линзы с одной асферической поверхностью. Так как более технологичными с позиций контроля при изготовлении являются вогнутые поверхности, то асферизируем вторую поверхность. Для чего с помощью треб. 23 1 САРО перейдем от углов α к радиусам оптических поверхностей, а затем запишем вторую поверхность как асферическую второго порядка первого типа, приняв $a_1 = -2r_2$, $a_2 = 1$. Вместо R2 записать признак асферики A. Выполнить расчет по требованию 1 и убедиться, что параксиальные характеристики и аберрации не изменились.

8. Убрать смещение плоскости установки DS'Y. Осуществить коррекцию, используя в качестве коррекционного параметра коэффициент деформации ASF5, а в качестве корригируемой функции волновую сферическую аберрацию на краю отверстия. После выполнения треб. 11 выдать на экран конструктивные параметры системы и убедиться, что $a_2 > 1$. Это означает, что вторая поверхность представляет собой, так называемый, сплюснутый сфероид, для контроля которого при изготовлении нельзя пользоваться простейшим методом безабберационных точек. По этой причине перенесем деформацию на первую поверхность.

9. Заменяем вторую поверхность сферой, а первую поверхность запишем как асферику (см. пункт 7). Выполним треб. 11, используя в качестве корригируемых функций волновую aberrацию w_1 и величину η на краю зрачка, а также фокусное расстояние f' .

В качестве коррекционных параметров используем R2, ASF4 и FSF5. Проверить значение коэффициента деформации a_2 и убедиться $0 < a_2 < 1$, что соответствует эллипсоиду. Контроль эллипсоида второго порядка не вызывает трудностей. Выдать на экран результаты расчета хода лучей, а затем по треб. 36 получить $w_{ск}$. Зафиксировать результаты в отчете.

10. Изменяя N MAX, подобрать его значение, при котором $w_{ск} = 0.074$.

11. Повторить пункт 5 и получить формулу для одиночной линзы с эллипсоидальной поверхностью

$$w_{ск} = b f'^l K^m \lambda^p. \quad (2.3.2)$$

12. Проверить формулу (2.3.2) для $f' = 200$, $K = 1$, $\lambda = 0.01$. Результат $w_{ск} = 0.0021$.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета $s_l = \infty$, ($A_0=0$, $H_A=f'$);

Апертурная диафрагма на первой поверхности ($B_0=1$, $H_B=0$)

Размер зрачка задается высотой луча на зрачке: $H_{MAX} = D/2$

Размер предмета определяется $MU_{MAX} = \sin \omega = 0,02$ (для всех вариантов)

Длины волн $\lambda_0 = 0,0106$ мм, $\lambda_1 = 0,014$ мм, $\lambda_2 = 0,008$ мм.

Материал линзы – германий.

№ варианта	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K
1	100	4
2	100	3
3	200	3
4	200	4
5	500	4
6	500	3
7	400	4
8	400	3
9	300	4
10	300	3
11	450	3
12	350	5
13	500	5
14	450	4,5
15	600	5

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанных линз
2. Полученные формулы для $w_{ск}$.
3. Таблицы волновых aberrаций для точки на оси.

Контрольные вопросы:

1. Отличия оптических постоянных германия в области 8 – 14 мкм от оптических бесцветных стекол (ГОСТ 3514-94) для видимой области спектра.
2. Можно ли использовать германий для видимой области спектра?

Лабораторная работа № 2.4

Исследование сферической аберрации пятого порядка объективов, склеенных из двух линз.

Цель работы: установить зависимость поперечной сферической аберрации от комбинации стекол. Получить эмпирическую формулу для ее вычисления.

Задачи работы: с помощью компьютерного моделирования установить, что устранение сферической аберрации пятого порядка в объективе, склеенном из двух линз, с помощью подбора радиусов кривизны невозможно.

Краткие теоретические сведения:

Поперечная сферическая аберрация пятого порядка ограничивает возможности применения объектива, склеенного из двух линз, как элемента зрительных труб. В рекомендациях Г.Г.Слюсарева [6] по расчету такого объектива имеется единственное указание с целью уменьшения аберраций пятого порядка: при $W > 0$ следует применять комбинацию “флинт впереди” (точнее “отрицательная линза впереди”). В данной работе будет выполнено исследование зависимости остаточной поперечной сферической аберрации от выбора комбинаций стекол и их расположения. Исследования проводятся для варианта $P=W=C=0$. При этом $P_0 = P - 0,85(W - 0,14)^2 = -0,017$. В табл.2.4.1 приведены пары стекол, взятые из [7] с близкими к данному P_0 значениями. В первой части таблицы расположены пары стекол с первой положительной линзой, а во второй – с первой отрицательной линзой.

Порядок выполнения:

1. Выполнить расчет объектива, склеенного из двух линз, используя треб.7 САРО, полагая $P=W=0$. Эти величины записываются в соответствующие ячейки после перехода от основного меню путем нажатия кнопок 1, 9 и четырехкратного – 2 на малой клавиатуре.
2. На основном экране, с конструктивными параметрами системы, следует записать D (в данном случае это толщина по краю линзы). Для положительной линзы $D=2$, для отрицательной линзы

$D=0,2 \cdot N \text{ MAX}$. Записать марки стекол из первой части таблицы 1. Учитывая, что система находится в воздухе, значение первого и последнего показателя преломления 1.

3. Записать световые диаметры, одинаковые для всех трех поверхностей: $СВД=2(N \text{ MAX})+2$. Задать начальные данные для расчета лучей, исходя из индивидуального задания.
4. Выполнить требование 7. В результате на экран будут выведены данные объектива, обладающего заданными основными параметрами $P=W=0$ и $C \approx 0$. Выбрать предлагаемое решение и способ задания системы с помощью углов α_i .
5. Осуществить оптимальную коррекцию поперечной сферической аберрации, для чего повторить пункт 9 (см. лабораторную работу № 1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической аберрации при наличии третьих и пятых ее порядков»). Зафиксировать максимальную величину $ДУ'(0)$ из восьми лучей осевого пучка.
6. Рассчитать угловую сферическую аберрацию в пространстве предметов по формуле в радианах: $\sigma_1 = ДУ'(0)/f'$; в угловых секундах $\sigma_1 = 200000 ДУ'(0)/f'$. При использовании компонента в качестве объектива зрительной трубы, умножив полученную величину на видимое увеличение, легко получить значение угловой сферической аберрации за окуляром σ' .
7. Вывести эмпирическую формулу для величины $\sigma_1 = aK^x$, в которой сначала найти показатель степени x из выражения:

$$x = \frac{\lg(\sigma_{1(1)} / \sigma_{1(2)})}{\lg(K_{(1)} / K_{(2)})},$$

где $\sigma_{1(1)}$, $\sigma_{1(2)}$ – значения угловой сферической аберрации в пространстве предметов при некоторых значениях диафрагменного числа $K_{(1)}$ и $K_{(2)}$ соответственно, а затем найти коэффициент a .

8. Повторить п.1-7 для комбинаций стекол из второй части таблицы 1. Полученные эмпирические формулы должны отличаться только коэффициентом a .
9. Сравнить различные варианты задания и по величине поперечной сферической аберрации определить, сочетания каких групп стекол дают минимальное ее значение.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета $S_1 = \infty$ ($A_0 = 1$, $HA = f'$);

Зрачок совпадает с первой поверхностью ($B_0 = 1$, $HV = 0$);

Размер зрачка определяется высотой осевого луча на зрачке $H_{MAX} = D/2$;

Размер предмета определяется синусом полевого угла $\sin \omega = 0,01$ ($MU_{MAX} = 0,01$);

Длины волн: e , C' , F' .

Таблица 2.4.1

Марки стекол	P_0
ЛК7 – ТФ2	– 0,018
ТК23 – Ф28	– 0,005
К8 – Ф9	– 0,004
БФ7 – ТФ5	+0,019
БК10 – Ф9	– 0,027
БФ13 – ТФ10	+0,052
ТК23 – БФ12	– 0,030
ТФ1 – ЛК7	– 0,007
ТФ3 – БФ7	– 0,020
ТФ2 – БК4	– 0,025
Ф1 – ЛК3	– 0,005
Ф9 – БК6	– 0,004
ТФ2 – К19	+0,027
Ф1 – БК8	+0,035

Таблица 2.4.2

№ вар	f'	К
1	100	4
2	150	5
3	120	4
4	150	4
5	180	3
6	200	4
7	180	4
8	120	5
9	140	3,5
10	200	5
11	120	3
12	150	3

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанных вариантов объектива
2. Таблицы aberrаций осевого пучка
3. Полученная формула

Контрольные вопросы:

1. Комбинации каких групп стекол обеспечивают минимальное значение остаточной сферической aberrации?
2. Какое расположение положительной и отрицательной линз в объективе с $P = W = C = 0$ обеспечивает лучшую коррекцию остаточной сферической aberrации?

Лабораторная работа № 2.5

Расчет и исследование объектива из двух линз с воздушным промежутком

Цель работы: освоение методики расчета и исследование свойств объектива из двух линз с воздушным промежутком.

Задачи работы: расчет объектива из двух линз, разделенных воздушным промежутком, с применением методики Г.Г. Слюсарева, базирующейся на использовании параметров P , W , C и исследование его абберационных свойств.

Краткие теоретические сведения

Объектив, состоящий из двух линз, разделенных воздушным промежутком, обладает по сравнению с объективом из склеенных линз двумя дополнительными коррекционными параметрами, что позволяет, во-первых, при любой комбинации неодинаковых стекол получить любые заданные значения основных параметров Г. Г. Слюсарева P , W , C , а, во-вторых, устранить сферическую абберацию пятого порядка. Для расчета, в частности, объектива такого типа в программном комплексе САРО предусмотрено требование 7 (см. 8. «Ознакомиться с инструкцией», затем 13 «Инструкция для требования 7 (P , W , C)).

Однако, по сравнению с объективом из двух склеенных линз он менее технологичен по причине более жестких допусков, а также из-за необходимости центрировки и соблюдения заданной величины воздушного промежутка при сборке.

Поскольку данный тип объектива используется преимущественно в зрительных трубах, то исследованию подлежит поперечная сферическая абберация.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с индивидуальным заданием выполнить расчет исходной системы по треб.7 САРО. При получении двух решений выбрать вариант с меньшими значениями сферической абберации. Выбрать вариант «система определяется АЛЬФА».

2. По треб. 11 САРО выполнить автоматизированную коррекцию, используя в качестве коррекционных параметров A_2 , A_3 , A_4 и D_2 . В качестве корригируемых функций использовать поперечную сферическую aberrацию на краю (луч 1) и зоне (луч 3) отверстия (допуски 0.0001), величину η (допуск 0.001) и хроматическую разность на краю отверстия (луч 1, допуск 0.0001). Задать число пучков 1, число лучей 8. Выполнить треб. 1 САРО и убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 21 (луч во второй строке в результатах расчета).
3. Добавить в качестве корригируемой функции поперечную сферическую aberrацию для этого луча, а в качестве коррекционного параметра смещение плоскости установки $DS'Y$. Выполнить треб. 11.
4. Выполнить треб. 1 САРО и убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 24 (луч в последней строке в результатах расчета).
5. Добавить в качестве корригируемой функции поперечную сферическую aberrацию для этого луча. Выполнить треб. 11 САРО и убедиться, что получена оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации, поскольку $Y'(0)_{21} \approx -Y'(0)_{23} = y'_{max}$.
Переведя поперечную aberrацию в угловую меру $\sigma = y'_{max}/f$, получаем удобный для телескопических систем критерий исправления сферической aberrации. Перевести для удобства пользования величину σ из радиан в угловые секунды $\sigma'' = 2 \cdot 10^5 \sigma$. Зафиксировать полученную величину в отчете.
6. Сравнить между собой различные варианты задания и определить, сочетания каких групп стекол обеспечивают минимальное значение остаточной поперечной сферической aberrации.
7. Выполнить пункты 1 – 5 для варианта 12 таблицы. Сравнить результаты. Обратит внимание на то, что для последнего варианта угловая сферическая aberrация значительно больше, чем для основного варианта. Варианты отличаются показателями преломления стекол, для чего по треб 27 САРО заменить марки стекол показателями.
8. Выполнить сравнение угловых критериев с таковым, полученным для оптимальной коррекции объектива, склеенного из двух линз. Минимальной сферической aberrацией пятого порядка (лабораторная

работа № 2.4 «Исследование сферической aberrаций высшего порядка объективов, склеенных из двух линз») обладают сочетания стекол БФ с ТФ. Выполнить оптимальную коррекцию объектива, склеенного из двух линз, используя сочетание БФ7 / ТФ5. Начальные данные – из настоящей лабораторной. Исходная система рассчитывается по треб.7: $P = W = 0$.

9. Выполнить автоматизированную коррекцию с параметрами A_2 , A_3 для поперечной сферической aberrации и величины η для края отверстия (луч 1) (см. лабораторную работу №1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации при наличии третьих и пятых ее порядков», п. 9). Задать число пучков 1, а лучей 8 (см. п. 3 лабораторной работы № 1.2). Выполнить треб. 1 и убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 22.
10. Найти наибольшее по абсолютной величине значение поперечной сферической aberrации i , разделив его на фокусное расстояние, перевести в угловые секунды. Сравнить с полученным выше результатом (см. п.5). Величины должны быть примерно на порядок хуже.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета- на бесконечности $A_0 = 0$, $H_A = f' = 100$

Апертурная диафрагма – на первой поверхности $B_0 = 1$, $H_B = 0$

Размер предмета задается синусом полевого угла $-\sin \omega = \mu_{\text{MAX}} = 0.05$

Размер зрачка задается высотой на зрачке $H_{\text{MAX}} = 16$

Длины волн e , C' , F'

№ вар.	Марки стекол
1	ТК17 ТФ10
2	СТК19 ТФ10
3	СТК19 ТФ5
4	СТК3 ТФ5
5	ТК21 ТФ10
6	ТФ10 ТК21
7	ТФ1 К14
8	ТФ10 СТК19
9	ТБФ9 ТФ10
10	ТФ3 СТК19
11	ТФ10 ТК17
12	К8 Ф2

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанных объективов.
2. Таблицы aberrаций для точки на оси рассчитанных объективов
3. Соотношение между остаточной сферической aberrацией для объектива, склеенного из двух линз, и объектива с воздушным промежутком.

Контрольные вопросы:

1. Сравнение объектива, склеенного из двух линз, и объектива с воздушным промежутком с точки зрения технологичности изготовления.
2. Сочетания каких групп стекол обеспечивают минимальное значение остаточной поперечной сферической aberrации?

Лабораторная работа № 2.6

Расчет и исследование зеркального объектива Ричи-Кретьена

Цель работы: расчет зеркального объектива Ричи-Кретьена и исследование его характеристик

Задачи работы:

1. На примере зеркального объектива Ричи-Кретьена исследовать влияние экранирования на критерии качества изображения:
 - 1.1. структуру дифракционной фигуры рассеяния;
 - 1.2. частотно-контрастную характеристику;
 - 1.3. концентрацию энергии на пикселе;
2. Оценить размеры безабберационного поля для этого объектива

Краткие теоретические сведения:

Зеркальные и зеркально-линзовые объективы находят широкое применение как в аэрокосмической отрасли, так и в качестве астрономических телескопов. Одним из классических зеркальных объективов является объектив Ричи – Кретьена, состоящий из двух гиперболоидальных зеркал, в котором исправлена сферическая аберрация и соблюдено условие изопланатизма. Однако из-за наличия значительного астигматизма безабберационное поле изображения весьма невелико.

На рис. 2.6.1 представлена схема этого объектива с указанием величин, на основании которых выполняется габаритный расчет. Пунктиром показана фиктивная поверхность, разделяющая среды $n_1 = n_2 = 1$ и предназначенная в последующем для записи экрана.

При нормировке: $h_1 = 1$, $\alpha_4 = 1$ угол α_3 вычисляется по формуле:

$$\alpha_3 = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon - a}.$$

Расстояние между вершинами зеркал при той же нормировке: $d_2 = a - \varepsilon$, где $\varepsilon = D_3/D$ – экранирование, являющееся дефектом большинства зеркальных и зеркально-линзовых систем, вызывающее снижение качества изображения, аналогично аберрациям.

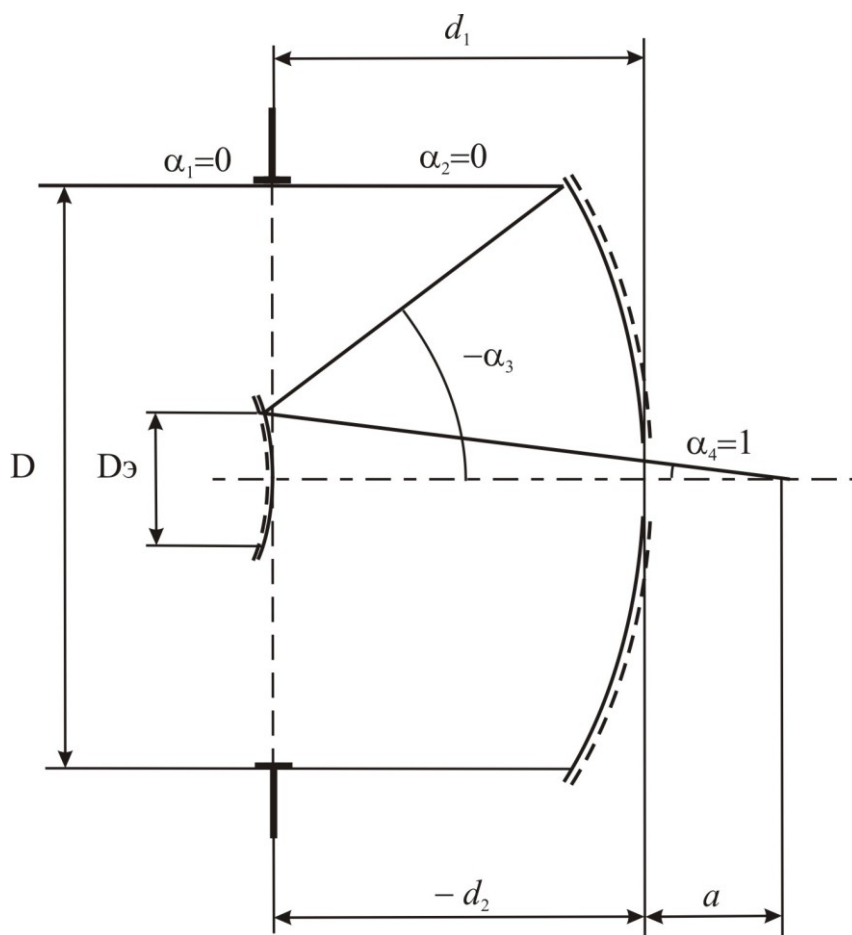


Рис. 2.6.1 Схема двухзеркального объектива

Порядок выполнения работы

1. В соответствии с индивидуальным вариантом задания выполнить габаритный расчет, определив угол первого параксиального луча α_3 и расстояние между зеркалами $d_1 = -d_2$. Записать оптическую систему, приняв реальное расстояние между зеркалами $D_2 = f' \cdot d_2$, используя значения $\alpha_1 = 0$, $\alpha_4 = 1$ и найденное ранее значение α_3 . При записи системы первая поверхность – фиктивная, разделяющая среды $n_1 = n_2 = 1$. Выполнить требование 1 программы САРО и убедиться, что $s' = f' \cdot (a - d_2)$.
2. Выполнить требование 23 программы САРО и перейти от углов первого параксиального луча к радиусам. Записать сферические поверхности как асферики второго порядка, полагая для каждой поверхности $a_1 = -2r$, $a_2 = 1$. Выполнить требование 1 программы САРО и убедиться, что замена сфер на асферики не привела к изменению характеристик системы.

3. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 программы SAPO), используя в качестве коррекционных параметров коэффициенты ASF5 и ASF10, а в качестве корригируемых функций – волновую сферическую aberrацию и отступление от условия изопланатизма для крайнего луча осевого пучка.
4. Вычислить среднеквадратическую волновую aberrацию с помощью требования 36.1 программы SAPO для осевой точки предмета. Если среднеквадратическое отклонение $w_{ск} > 0,01$, то подбирая высоту на зрачке H MAX, добиться $w_{ск} \approx 0,01$.
5. Исследовать распределение освещенности в дифракционном пятне, ознакомившись с таблицей, полученной с помощью требования 36.1 программы SAPO, где R1 – радиус первого темного дифракционного кольца, C%1 – концентрация энергии в диске Эри, C%2 – концентрация энергии в первом светлом кольце. Записать данные в отчет.
6. С помощью требования 21.2 рассчитать световые диаметры поверхностей СВД и записать в столбце НПРЭ (диаметр непрозрачного экрана) для первой (фиктивной) поверхности СВД третьей поверхности. Повторить требование 36.1 и сравнить данные таблицы с таковыми без экранирования. Обратить внимание, что радиус R1 незначительно уменьшился, а энергия из диска Эри перешла в первое дифракционное кольцо.
7. Проверить влияние экранирования на ЧКХ, для этого нажав на малой клавиатуре последовательно 9 и 2, заполнить таблицу для требования 20. Начальная частота 0, конечная частота $N = 1/K\lambda = 2HMAX/f'\lambda$, шаг $N/10$. Выполнить требование 20.1 программы SAPO два раза: с экранированием и без него. Обратить внимание, на каких частотах произошло падение контраста. Занести результаты в отчет.
8. Исследовать влияние экранирования на концентрацию энергии на квадратной площадке (пикселе), для чего заполнить на экране, нажав последовательно 9 и 2, таблицу «для 36 требования»: номер пучка 0, Y'0 = X'0 = 0 (центр поля); полуразмер Y = 0,005, полуразмер X = 0,005; число узлов сетки по Y = 7, по X = 7. Выполнить требование 36.4.2. В середине таблицы получаем

коэффициент концентрации энергии для заданного размера стороны пикселя. Сравнить результаты расчета с экранированием и без такового. Записать данные в отчет.

9. Для системы с экранированием определить безабберационное поле изображения объектива Ричи – Кретьена. С помощью требования 36.1.2 найти среднеквадратическое отклонение $w_{\text{СК}}$ для края поля. Выполнить требование 1 и убедиться, что на краю поля качество изображения лимитируется астигматизмом. Ввести смещение плоскости установки $DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2$, где Z'_m, Z'_s – для края поля изображения. Выполнить требование 36.1 и 2. Убедиться, что на краю поля $w_{\text{СК}}$ улучшается. В центре поля можно допустить предельное значение $w_{\text{СК}} = 0,074$, которое достигается при расфокусировке $DS'Y \approx -2K^2\lambda$. Определить размер поля изображения при такой дефокусировке путем подбора величины поля $MU \text{ MAX}$, когда $w_{\text{СК}} = 0,074$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета $s_1 = \infty$ ($A0 = 0$, $HA = f'$)

Зрачок совпадает с первой поверхностью $B0 = 1$, $HB = 0$

Размер предмета $\sin\omega = MU \text{ MAX} = 0,003$

Длина волны $0,0005$

№ варианта	f'	K	a	ε
1	1000	4	0,1	0,33
2	1000	4	0,1	0,4
3	750	3	0,05	0,35
4	750	3	0,05	0,33
5	1000	3,33	0,05	0,35
6	800	4	0,1	0,4
7	800	4	0,05	0,33
8	500	3	0,1	0,4
9	500	4	0,05	0,35
10	500	4	0,05	0,4
11	800	4,5	0,05	0,35
12	750	4	0,1	0,33

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
2. Таблицы аберраций для осевой и одной внеосевой точек поля
3. Коэффициент концентрации энергии для заданного размера стороны пикселя с экранированием и без него
4. Размер поля изображения при $w_{\text{ск}} \leq 0,074$

Контрольные вопросы:

1. Как влияет центральное экранирование на размер диска Эри?
2. Влияние экранирования на распределение энергии в дифракционном пятне.
3. Влияние экранирования на концентрацию энергии на площадке заданного размера.

Лабораторная работа № 2.7

Расчет трубы Галилея как системы скачкообразной смены увеличения с использованием основных параметров Г.Г. Слюсарева

Цель работы: Освоение теории и приемов расчета оптических систем, состоящих из тонких компонентов.

Задачи работы: рассчитать телескопическую систему Галилея, используя метод основных параметров Слюсарева и приемы автоматизированного расчета оптических систем.

Краткие теоретические сведения:

При коррекции монохроматических aberrаций трубки Галилея, состоящей из двух компонентов, каждый из которых представляет собой склейку из двух линз, имеются четыре свободных параметра P_I , W_I , P_{II} , W_{II} , а количество корригируемых функций (aberrаций) составляет три: сферическая aberrация, кома и астигматизм. Кривизна изображения не поддается коррекции и зависит только от суммы оптических сил объектива и окуляра. Дисторсия практически отсутствует из-за малости полевого угла. Таким образом, имеется один свободный параметр, который целесообразно использовать, выполняя условие $P_I = P_{II} = 0$, что облегчает контроль качества изготовления. Тогда из формул, приведенных в [6] вытекает условие: коррекция комы и астигматизма достигается при $W_I = W_{II} = 0.5$ независимо от видимого увеличения трубки.

Поскольку для обоих компонентов параметр Г.Г. Слюсарева $P_0 = -0.85(W-0.14)^2 = -0.11$, а для устранения хроматических aberrаций следует принять $C_I = C_{II} = 0$, то оба компонента могут быть выполнены из одинаковых комбинаций стекол. Однако для уменьшения сферической aberrации пятого порядка и, имея в виду, что эта aberrация у объектива и окуляра имеет противоположные по знаку величины и соотносятся как Γ , целесообразно подобрать соответствующие комбинации стекол, позволяющие частично или полностью компенсировать сферическую aberrацию пятого порядка. В лабораторной работе № 2.4 «Исследование сферической aberrаций высшего порядка объективов, склеенных из двух линз» было установлено, что пятые порядки сферической aberrации могут различаться до трех раз, то соответствующим подбором комбинации

стекло можно компенсировать сферическую aberrацию пятого порядка для $\Gamma \leq 3$. Поскольку $W_I > 0$, то объектив следует выполнить из комбинации «флинт впереди» (отрицательная линза впереди). Из таблиц [7] следует, что при $C = 0$ и $P_0 \approx -0.1$ для объектива можно использовать следующие комбинации стекол, приведенные в таблице.

Таблица 2.7.1 Комбинации стекол для объектива и окуляра

№ п/п	Объектив	Окуляр
1	ЛК6-ТФ1;	БК13-Ф1
2	ТФ4-БФ1,	БК13-Ф4
3	Ф6-ТК2,	БК13 – Ф13
4	ТФ7-БФ1	ЛК6 – ТФ2
5	Ф9-К19	К19 – ТФ8
6	ТФ1-ЛК1	БК10 – ТФ3
7	Ф9-БФ4,	
8	ТФ5-БФ13	

Телескопическая система (трубка Галилея) состоит из двух компонентов, первый из которых обладает положительной оптической силой и называется объективом, а второй – отрицательной и называется окуляром. Эта система используется как театральные бинокль, когда к качеству изображения предъявляются невысокие требования и как элемент для скачкообразной смены увеличения при установке ее перед телескопической системой Кеплера попеременно в прямом и обратном ходе лучей. При этом к коррекции aberrаций осевой точки предъявляются жесткие требования (дифракционное качество изображения). В частности системы Галилея с различными видимыми увеличениями Γ используются также в стереомикроскопе Аббе.

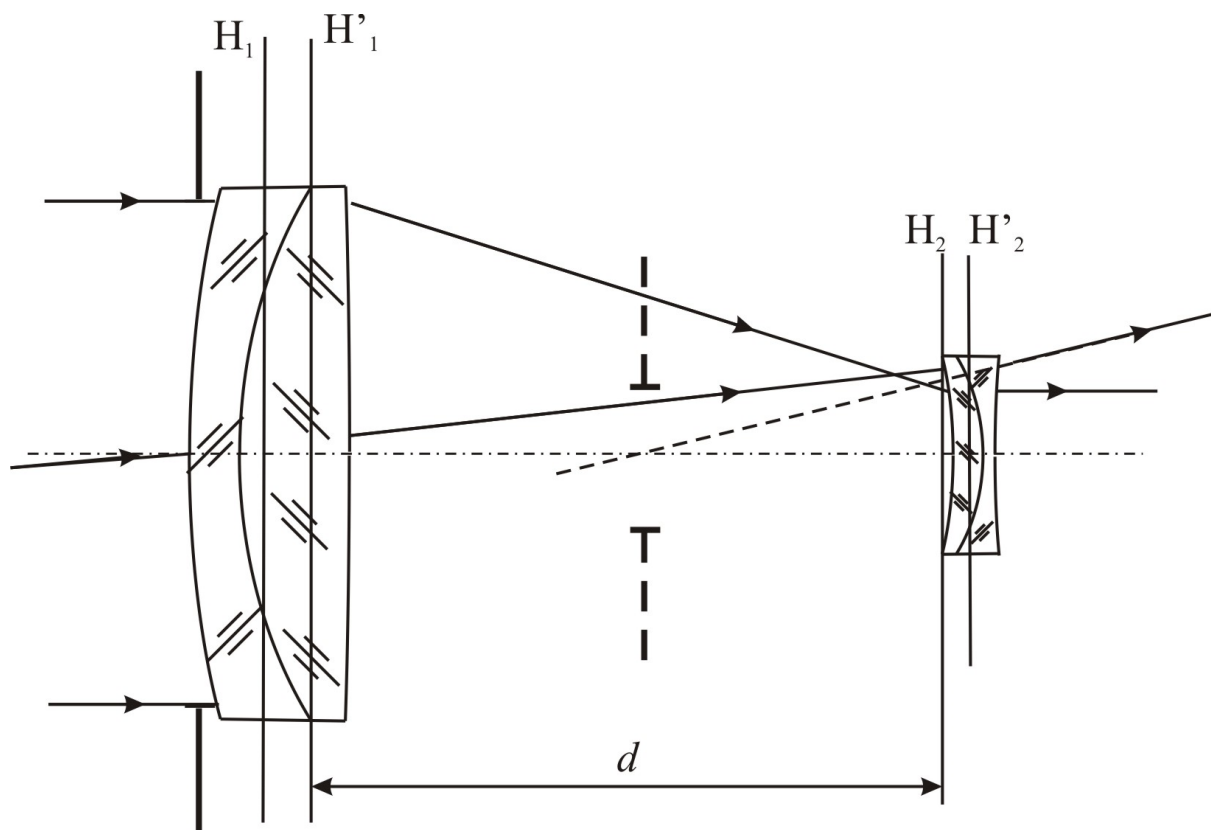


Рис. 2.7.1 Зрительная труба Галилея

Оптическая схема трубки Галилея представлена на рис. 2.7.1. Фокусные расстояния объектива (f'_1) и окуляра (f'_2) и расстояние между компонентами d при заданном видимом увеличении Γ , диаметре зрачка D и относительном отверстии 1:4 (для всех вариантов заданий) вычисляются по формулам:

$$f'_1 = 4D, \quad f'_2 = -\frac{f'_1}{\Gamma}, \quad d = f'_1 + f'_2$$

Порядок выполнения работы

1. Выполнить габаритный расчет, определить фокусные расстояния компонентов f'_1 и f'_2 .
2. По требованию 7 САРО рассчитать конструктивные параметры и aberrации объектива, используя первую комбинацию стекол из табл.2.7.1 для $P_1 = 0$, $W_1 = 0.5$. При этом $H \text{ MAX} = D/2$. Затем выполнить автоматизированную коррекцию по требованию 11, используя в качестве коррекционных параметров углы первого параксиального луча α_2 и α_3 , а в качестве корригируемых функций поперечную сферическую aberrацию $Y'(0)$ и отступление от условия

изопланатизма $\eta = 0.5(m/f')^2 \cdot W_1 = 0.25(m/f')^2$. Повторить эти действия для всей первой группы стекол и найти комбинацию с наименьшим значением поперечной сферической aberrации для 22 луча. При этом, выполняя требование 1 САРО с заданием один пучок, восемь лучей, ограничиться выдачей одного осевого пучка лучей и восемью лучами этого пучка. Нетрудно видеть, что экстремальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для четвертого по порядку сверху луча (луч 22 в условной нумерации САРО). Перейти от параксиальных углов к радиусам и записать систему в архив. Записать в отчет величину заднего отрезка объектива $S'A$.

3. Повторить расчет для окуляра трубки, используя вторую группу стекол. Расчет окуляра выполняется в обратном ходе лучей с $NA = f'_2$ и $H_{MAX} = D/2\Gamma$. При этом принять во внимание, что в таблице 2.7.1 указано расположение стекол в прямом ходе.
4. Выделить из них комбинацию, у которой $(y'_{22})_{II} \approx (y'_{22})_I$, где $(y'_{22})_I$ – поперечная сферическая aberrация объектива для двадцать второго луча у объектива; $(y'_{22})_{II}$ – то же у окуляра.
Перейти от углов первого параксиального луча α к радиусам r . Записать величину заднего отрезка окуляра $(S'_F)_2$. Выполнить инверсию (обернуть окуляр) и записать систему в архив.
5. Присоединить окуляр к объективу (пункты «трансформировать оптическую систему» и «добавление к системе из архива»). Воздушный промежуток, помеченный строкой вопросительных знаков, принять равным сумме $(S'_F)_I + (S'_F)_{II}$. Записать $S'Y = 1E9$ (изображение находится на бесконечности и aberrации выдаются в угловой и диоптрийной мерах) и по требованию 1 САРО (8 лучей в осевом пучке и два внеосевых пучка) получить aberrации трубки целиком. Контроль правильности выполненного: угловая сферическая aberrация и отступление от условия изопланатизма для луча 1 осевого пучка (идущего на край зрачка) должны быть практически равны нулю.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

Положение предмета на бесконечности

Зрачок совпадает с первой поверхностью ($B_0=1$, $H_0=0$);

Размер зрачка определяется высотой осевого луча на зрачке $H_{MAX}=D/2$;

Размер предмета определяется синусом полевого угла

Длины волн: e , C' , F' .

№ варианта	Видимое увеличение Г	Диаметр входного зрачка D	Синус полевого угла MU MAX
1	1,6	18	0,03
2	1,6	22	0,025
3	1,6	25	0,022
4	2,0	18	0,03
5	2,0	22	0,025
6	2,0	25	0,022
7	2,5	18	0,03
8	2,5	22	0,025
9	3,0	25	0,022
10	3,0	18	0,03

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанной трубки.
2. Таблицы aberrаций рассчитанной системы.

Контрольные вопросы:

1. Практическое использование телескопической системы Галилея.
2. В каких мерах выдаются aberrации трубки Галилея?

Лабораторная работа № 2.8

Синтез и расчет четырехлинзового безабберационного объектива

Цель работы: освоить синтез оптической системы, основывающийся на применении методов Г.Г.Слюсарева и М.М.Русинова;

Задачи работы: синтезировать и исследовать абберационные свойства объектива, состоящего из двухлинзового компонента с малым воздушным промежутком и апланатического элемента из двух линз, разделенных хроматическим радиусом;

Краткие теоретические сведения

В рамках действия теории аббераций третьего порядка систем, состоящих из бесконечно тонких (терминология Г.Г.Слюсарева) компонентов, имеет место сравнительно недавно обнаруженное свойство: если сумма оптических сил компонентов $\sum \varphi_i \approx 0$, а сферическая абберация и отступление от изопланы в каждом компоненте отсутствуют, то астигматизм устраняется автоматически. Использование этого свойства позволяет при синтезе объективов обходиться без составления и решения уравнений, связывающих основные параметры компонентов P_i , W_i с коэффициентами аббераций.

Кроме упрощения расчетов вышеуказанный принцип синтеза обеспечивает низкую чувствительность оптической системы к погрешностям изготовления и сборки.

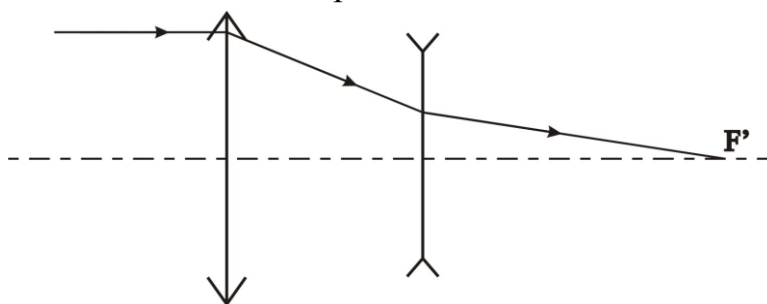


Рис. 2.8.1 Схема объектива

На рис. 2.8.1 представлена принципиальная схема двухкомпонентного объектива. Второй компонент на первой стадии синтеза представляет собой одиночную линзу, образованную конфокальной (концентричной осевому лучу) [5] и апланатической

поверхностями. Первый компонент состоит из двух линз с малым воздушным промежутком. Оптическая схема объектива представлена на рис. 2.8.2.

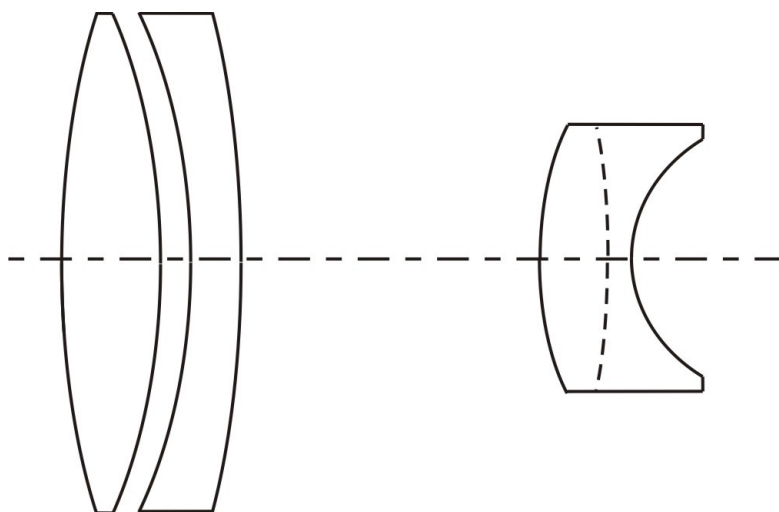


Рис. 2.8.2 Двухкомпонентный объектив с апланатическим компонентом

На второй стадии расчета выполняется коррекция хроматических aberrаций, для чего во втором компоненте вводится хроматический радиус склейки (на рис. 2.8.2 показан пунктиром). Первый компонент выполнен несклеенным, благодаря чему имеется возможность использовать для получения $P = W = C = 0$ произвольную комбинацию стекол (при условиях $n_2 \neq n_3$, $v_2 \neq v_3$). Подбор комбинации стекол позволяет получить минимальную сферическую aberrацию пятого порядка, определяющую эту aberrацию у системы в целом, поскольку второй компонент безaberrационен.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с индивидуальным заданием рассчитать первый компонент – двухлинзовая система с малым воздушным промежутком, используя требование 7 САРО и приняв $HA = f' = 60$ мм, $A0 = 0$, $B0 = 1$, $HВ = 0$; $HMAX = 10$, $MU MAX = 0,075$; $d_1 = 2$ мм, $d_2 = 0,1$ мм, $d_3 = 2,5$ мм; $\lambda_0 = 0,000e$, $\lambda_1 = 0,000C'$, $\lambda_2 = 0,000F'$; $P = W = C = 0$, СВД = 22 (4 раза). Полученная система задается через α_i .
2. Выполнить автоматизированную коррекцию по треб.11 САРО, используя в качестве коррекционных параметров $A2$, $A3$, $A4$. Корректируемые функции – поперечная сферическая aberrация и отступление от условия изопланатизма на краю отверстия (луч 1), а

также поперечный хроматизм положения на зоне отверстия (луч 3). Допуски для всех функций 0,001.

НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ		
0	1	1	2	
0	3	21		

3. Задать один пучок и восемь лучей в пучке (см. лабораторную работу № 1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации при наличии третьих и пятых ее порядков»). Выполнить треб. 1 САРО и убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации $Y'(0)_{22}$ имеет место для луча 22 (луч в третьей строке сверху). Это означает наличие aberrаций третьего и пятого порядков.
4. Сравнить этот результат с результатами, полученными в других вариантах, и выбрать оптимальный. Дальнейший расчет выполняется всеми студентами для оптимальной комбинации стекол.
5. Перейти к первому компоненту в соответствии с индивидуальным заданием, изменив $NA = f'/n_6 = 100/n_6$. Найти n_6 , используя треб. 27. Вернуться к заданию марок стекол.
6. Дополнить первый компонент апланатической линзой, т.е. дописав $\alpha_5 = 1, \alpha_6 = 1, \alpha_7 = 1/n_6$. Марка стекла $N(0)_6$ (из таблицы).
7. Выполнить автоматизированную коррекцию астигматизма (треб. 11), используя в качестве коррекционного параметра d_4 .
8. Выполнить треб.1 САРО и убедиться, что $Z'_m = Z'_s \approx 0$, а сферическая aberrация и отступление от условия изопланатизма отсутствуют. Неравенство кривизны изображения нулю объясняется, главным образом, наличием конечных толщин линз.
9. Исправить хроматизм положения, введя во второй компонент хроматический радиус, для чего следует перейти от углов первого параксиального луча α_i к радиусам r_i (требование 23.2). Записать $r_6 = \infty, r_7$ – прежнее значение, $d_5 = 3, d_6 = 2$. Марки стекол $N(0)_6, N(0)_7$ в соответствии с индивидуальным заданием. Коррекционный параметр R_6 , корригируемая функция – поперечный хроматизм (номер функции 21) для третьего луча.
10. Рассчитать ход лучей по треб.1, убрав предварительно количество пучков (1) и количество лучей (8). Нетрудно видеть, что целесообразно выполнить, в первую очередь, коррекцию волновой

сферической аберрации. Поскольку поперечная сферическая аберрация на краю отверстия практически отсутствует, то в соответствии с лабораторной № 1.4 «Среднеквадратическая волновая аберрация как критерий качества изображения для дифракционно ограниченных оптических систем» следует ввести плоскость установки DS'Y так, чтобы волновая сферическая аберрация на краю отверстия составляла $\tilde{w}_1 = 2,2W(0)_1 - 4,8W(0)_3$. Следует задать в качестве коррекционного параметра DS'Y, а в качестве корригируемой функции w_1 (номер функции 50 для луча 1). Требуемое значение \tilde{w}_1 с допуском 0,01. Выполнить треб.11 САРО.

11. Выполнить расчет по треб.20 (ДЧКХ), задав начальную частоту 0, конечную частоту 50 и шаг 10. Для дополнительных длин волн коэффициенты передачи контраста малы. Следует осуществить оптимальную коррекцию хроматических аберраций.
12. Добавить к волновой сферической аберрации волновые хроматические аберрации, отступление от условия изопланатизма, хроматизм увеличения и меридиональную составляющую астигматизма:

НЛУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ				ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
0	1	50	51	A52	-A	0.01	0.01
1	0	21	5			0.001	0.01
0	1	2				0.01	0.001

Коррекционные параметры $\alpha_2 - \alpha_4, \alpha_7, DS'Y$.

13. Выполнить оценку качества изображения, используя ДЧКХ (треб. 20.1), для чего задать:
Начальная частота 0
Конечная частота 50
Шаг 10
14. Выполнить оценку ДЧКХ, используя треб. 40, для чего записать длины волн в следующем порядке: $\lambda_0 = 546,07$ нм, $\lambda_1 = 480$ нм, $\lambda_2 = 643,8$ нм, $\lambda_3 = 500$ нм. В этом случае повышается точность расчета полихроматической ЧКХ.
15. Сравнить результаты для различных вариантов.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета на бесконечности $s_l = \infty$, ($A_0=0$, $HA=f' =100$);

Апертурная диафрагма на первой поверхности ($B_0 =1$, $HB= 0$)

Размер зрачка задается высотой луча на зрачке: $H_{MAX} = 10$

Размер предмета определяется $MU_{MAX} = \sin \omega = 0,075$

Длины волн e, C', F'

№ вар.	n_2	n_4	n_6	n_7
1	K8	ТФ1	СТК19	ТФ4
2	K8	ТФ10	ТК16	Ф2
3	K8	ТФ3	СТК12	ТФ8
4	СТК19	ТФ10	СТК7	ТФ8
5	ТК14	ТФ10	ТБФ9	ТФ10
6	ТК14	ТФ1	ТК23	ЛФ9
7	БФ11	ТФ10	ФК14	ЛФ9
8	ОФ1	ТФ10	ОК1	К19

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
2. Чертеж рассчитанного объектива
3. Таблицы aberrаций рассчитанного объектива
4. Графики ЧКХ рассчитанного объектива

Контрольные вопросы:

1. Укажите коэффициент передачи контраста при частоте 30 мм^{-1} .
2. Какова дисторсия на краю поля в %?
3. В каких системах может найти применение объектив такого типа?

Лабораторная работа № 2.9

Синтез и расчет объектива Петцваля с линзой Смита

Цель работы: с помощью методов Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова, а также компьютерного моделирования синтезировать светосильный объектив и исследовать его возможности.

Задачи работы: ознакомиться с приемами синтеза оптических систем.

Краткие теоретические сведения:

Классический объектив Петцваля состоит из двух двухлинзовых тонких компонентов, разделенных воздушным промежутком, соизмеримым с фокусным расстоянием объектива. Это первый объектив, полученный путем вычислений (1840 г.), а не с помощью опытных проб в оптической мастерской [6]. В объективе при $K=3-1,9$ исправлены сферическая абберрация, кома, астигматизм, хроматические абберрации. Недостатком, ограничивающем поле изображения, является кривизна поверхности изображения. В настоящей лабораторной работе устранение последней достигается с помощью линзы Смита, устанавливаемой вблизи плоскости изображения [8].

Первый компонент объектива выполнен из двух линз с малым воздушным промежутком, поскольку такая система имеет лучшую коррекцию сферической абберрации высших порядков по сравнению с компонентом, склеенным из двух линз.

Порядок выполнения работы:

1. Рассчитать первый компонент объектива, используя комбинацию стекол ТК17, ТФ10, оптимальную в отношении исправления сферической абберрации, выполнив пункты 1 – 2 лабораторной работы № 2.5 «Расчет и исследование объектива из двух линз с воздушным промежутком».
2. Для исправления астигматизма дополнить первый компонент конфокальной поверхностью (поверхностью, concentричной осевым лучам) [9]. Расположить эту поверхность на некотором расстоянии, соизмеримым с фокусным расстоянием компонента. Для этого

записать $\alpha_4=1$, $\alpha_5=1$, $d_4 \approx 50$, марка стекла в соответствии с индивидуальным заданием.

3. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), в качестве коррекционного параметра принять D_4 , а качестве корригируемой функции $Z'_m - Z'_s$, т.е. функцию 7 для главного луча (луч 1).
4. Проверить результаты (требование 1 САРО). Сферическая aberrация и отступление от условия изопланатизма должны быть по-прежнему устранены.
5. Перейти от α к радиусам (требование 23 САРО). Дополнить систему шестой поверхностью – плоскостью, разделяющей стекло и воздух $r_6 = \infty$. Принять $d_5 = 8$. Шестая поверхность должна быть изопланатической, т.е. концентричной главному лучу. При этом отступление от изопланатизма η и астигматизм $Z'_m - Z'_s$, объектива остаются без изменений, т.е. исправленными.
6. Для определения r_6 выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя его в качестве коррекционного параметра, а в качестве корригируемой функции η . Проверить, что астигматизм по-прежнему исправлен (требование 1 САРО).
7. Для исправления хроматической aberrации ввести “хроматический” радиус во втором компоненте, т.е. выполнить его в виде склейки из двух линз в соответствии с индивидуальным заданием. Принять $d_5 = 6$, $d_6 = 2$, $r_6 = \infty$, сохранить значения r_5 , r_7 . Перейти от r_i к α_i (требование 23 САРО).
8. Выполнить автоматизированную коррекцию, в качестве коррекционного параметра используя α_7 , а качестве корригируемой функции – хроматизм на краю отверстия, т.е. функцию 21 для луча 1 САРО. Объектив Петцваля (исходная система) синтезирован.
9. Перейти от α_i к r_i (требование 23 САРО). Дополнить объектив Петцваля линзой Смита [8], которая должна компенсировать кривизну поверхности изображения объектива Петцваля. Установить вблизи плоскости изображения объектива плоскопараллельную пластину из стекла СТК19 толщиной $d_8 = 1$ мм.
10. Осуществить коррекцию величины Z'_m (луч 1 функция 5), используя в качестве параметра r_8 . Поскольку последний компонент является

коллективом, он не вносит aberrаций кроме кривизны поверхности изображения. Поэтому одновременно происходит исправление Z'_s .

11. Осуществить сдвиг линзы Смита так, чтобы последний отрезок приблизительно равнялся 5 мм. Подбором, изменяя d_7 , добиться $S'A \approx 5$.
12. Перейти от r_i к α_i . Осуществить окончательную коррекцию объектива, используя в качестве коррекционных параметров $\alpha_2 \div \alpha_9$, d_2 . Корректируемые функции волновые aberrации (приведены в таблице):

НЛ	НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ				ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
			50	2	51	A52 - A		
1	0	1	50	2	51	A52 - A	.05	
2							.5-3	
3							.05	
4	0	3	50				.05	
5	1	0	21				.1-3	
6	1	1	50	51	C52 - C		.05	
7							.05	
8	1	8	50	51	V52 - V		.05	
9							.05	
10	1	3	50				.05	
11	1	6	50				.05	
12	1	9	50				.05	
13	0	0	10				.1	

13. Оценить качество изображения по дифракционной ЧКХ. Для этого выполнить требование 20 САРО, расчет ДЧКХ. Записать: начальная частота 0; конечная частота 70; шаг 10.
14. Сравнить результаты различных вариантов.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета- на бесконечности $A_0 = 0$, $H_A = f' = 100$

Апертурная диафрагма – на первой поверхности $B_0 = 1$, $H_B = 0$

Размер предмета задается синусом полевого угла $-\sin\omega = MU_{MAX} = 0.075$

Размер зрачка задается высотой на зрачке $H_{MAX} = 16$

Длины волн e, C', F'

№ вар.	Марки стекол
1	ТК16 – Ф1
2	СТК19 – ТФ4
3	СТК12 – ТФ8
4	СТК7 – ТФ8
5	ТБФ9 – ТФ10
6	ТК23 – ЛФ9
7	ФК14 – ЛФ9
8	ОК1 – К19

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
2. Таблицы aberrаций
3. Графики ЧКХ

Контрольные вопросы:

1. Линза Смита и ее назначение
2. Почему объектив Петцваля без линзы Смита не используется в настоящее время в фотооптике?

Лабораторная работа № 2.10

Модернизация оптической системы монокуляра бинокля 8 x 30

Цель работы: рассчитать оптическую систему монокуляра бинокля с улучшенной коррекцией сферической аберраций.

Задачи работы: Исследовать качество изображения монокуляра бинокля 8x30. Улучшить качество изображения путем подбора стекол в объективе и баланса третьих и пятых порядков сферической аберрации.

Краткие теоретические сведения

В лабораторной работе № 2.4 «Исследование сферической аберраций высшего порядка объективов, склеенных из двух линз» было установлено, что пятые порядки поперечной сферической аберрации у объектива, склеенного из двух линз, существенно зависят от комбинации стекол. При параметрах Г.Г.Слюсарева $P = W = C \approx 0$ оптимальными являются сочетания баритовых флинтгов с тяжелыми флинтами. Кроме того, в лабораторной работе № 1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической аберрации при наличии третьих и пятых ее порядков» показано, что оптимальное сочетание аберраций третьего и пятого порядков, а также смещения плоскости установки позволяет уменьшить поперечную сферическую аберрацию по сравнению с классическим исправлением, когда эта аберрация равна нулю на краю отверстия. В данной работе сферическая аберрация зрительной трубы бинокля будет существенно уменьшена путем замены объектива при сохранении призменной системы и окуляра.

Порядок выполнения:

1. Задать монокуляр бинокля (двоенный расчет ГОИ по методике Слюсарева Г.Г.) со следующими параметрами:

№	Радиусы	Толщины	Марки стекол
1	72,94	6,6	1
2	-49,2	2,8	БК4
3	-230,69	39,7	Ф2
4	∞	83	1
5	∞	30,51	БК10
6	-38,04	1,5	1
7	22,01	8,5	Ф2
8	-22,01	0,5	К8
9	37,44	5,5	1
10	-37,44	0,55	К8
11	19,31	7,5	1
12	-22,01	1,5	К8
13	-104,81		Ф2
14			1

Апертуру задать высотой луча на зрачке $H_{MAX} = 15$, угловое поле определяется синусом полевого угла: $\sin \omega = MU_{MAX} = 0,0610$.

Длины волн e, C', F'

Поскольку система телескопическая, то aberrации следует выдать в угловой и диоптрийной мерах, для чего необходимо записать $DS'Y = 1E9$.

2. Выполнить требование 1 программы SAPO. Изменяя воздушный промежуток $D5$, то есть перефокусируя окуляр, добиться исправления сферической aberrации на краю отверстия $C'(0)$.
Определить максимальную угловую сферическую aberrацию для основной длины волны и aberrации для двух дополнительных длин волн. Записать их в отчет.
3. Определить aberrации объектива, сделав так называемую концевку, то есть опустив $D3$ с помощью клавиши “/” на малой клавиатуре. Выполнить треб.1 SAPO и получить осевые aberrации объектива.
4. Вычислить основные параметры объектива:

хроматический параметр $C = S'0(2-1)/f'$, где $S'0(2-1)$ – параксиальный хроматизм положения;

продольную сферическую aberrацию третьего порядка $\Delta s'_{III} = 4\Delta s'_3 - \Delta s'_1$, где $\Delta s'_3$, $\Delta s'_1$ – продольная сферическая aberrация на зоне зрачка и на краю зрачка соответственно;

параметр P : $P = -2\Delta s'_{III} \frac{f'}{m^2}$, где m – высота на зрачке ($m = H \text{ MAX}$);

неизопланатизм третьего порядка $\eta_{III} = 4\eta_3 - \eta_1$, где η_3 , η_1 – значение неизопланатизма на зоне и на краю зрачка соответственно;

параметр W : $W = -2\eta_{III} \left(\frac{f'}{m}\right)^2$;

параметр P_0 : $P_0 = P - 0,85(W - 0,14)^2$

5. Используя рассчитанные значения параметров P_0 и C , по таблицам [7] подобрать возможные комбинации стекол. По требованию 7 рассчитать варианты объектива с требуемыми параметрами P и W . Найти пару стекол, обладающую наименьшим значением сферической aberrации пятого порядка.
6. В исходной системе монокуляра удалить объектив и вставить рассчитанный объектив. Сохранить исходные толщины. Используя в качестве коррекционного параметра расстояние $D5$, с помощью треб. 11 САРО получить диоптрийность параксиального луча равной нулю (функция 10, пучок 0, луч 0, треб. 10). Выполнить требование 1 для скорректированной системы.
7. Осуществить оптимальную коррекцию сферической aberrации и неизопланатизма (см. лаб. № 1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации при наличии третьих и пятых ее порядков»), используя в качестве коррекционных параметров радиусы объектива и $D5$. Набор функций – из лабораторной работы №1.2 с добавлением видимого увеличения как в исходной системе $\Gamma = -8,3$ с допуском 0.01. Допуски на сферическую aberrацию в телескопической системе задаются в радианной мере (не в секундах). Поэтому следует задать для сферической aberrации 0.5-5 (одна угловая секунда). Допуск на величину η 0.1-3.

8. Выполнить треб. 1 САРО, задав один пучок и восемь лучей в пучке. Сравнить максимальное значение сферической аберрации с таковой в исходной системе.

Таким образом, показано на реальном примере, что без усложнения системы можно добиться существенного уменьшения сферической аберрации, когда она имеет неустранимую составляющую пятого порядка.

Содержание отчета:

1. Конструктивные параметры рассчитанной системы
2. Оптическая схема рассчитанной системы
3. Таблицы и графики аберраций рассчитанной системы

Контрольные вопросы:

1. В каких мерах выдаются геометрические аберрации телескопических систем?
2. Какова допустимая величина поперечной (угловой) сферической аберрации за окуляром?
3. Какова допустимая величина хроматических аберраций для осевой точки предмета?

Литература

1. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М., Мир, 1964. 295 с.
2. Грамматин А.П., Рыбаков И.Р. Объектив для инфракрасного микроскопа из двух concentрических зеркал //ОМП, №10, 1969, с.77
3. Грамматин А.П., Лустберг Э.А. Зеркальный репродукционный объектив «Авангард» // ОМП, №6, 1975, с. 35.
4. Бесцветное оптическое стекло. Каталог. М., 1990
5. Грамматин А.П. Методы синтеза оптических систем. Учебное пособие. СПб., СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
6. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1937.
7. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых склеенных объективов. Л., Машиностроение, 1984
8. Вычислительная оптика. Справочник под общ.ред. М.М. Русинова. Изд.3-е. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009
9. Грамматин А.П. Синтез оптических систем, состоящих из линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов //Труды ГОИ т.49, вып.183, 1981 с.23



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики является одной из крупнейших кафедр российских ВУЗов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. На кафедре обучают специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом – от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами другими

приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкции.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П.Королева, Ю.А.Гагарина, премиями Минвуза.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра Прикладной и Компьютерной Оптике факультета Оптико-Информационных Систем и Технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте:
aco.ifmo.ru

Грамматин Александр Пантелеймонович
Романова Галина Эдуардовна
Цыганок Елена Анатольевна

**Компьютерное моделирование при изучении
дисциплин, связанных с расчетом оптических
систем**

Методические указания к лабораторным работам

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО
Зав. РИО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики
и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

