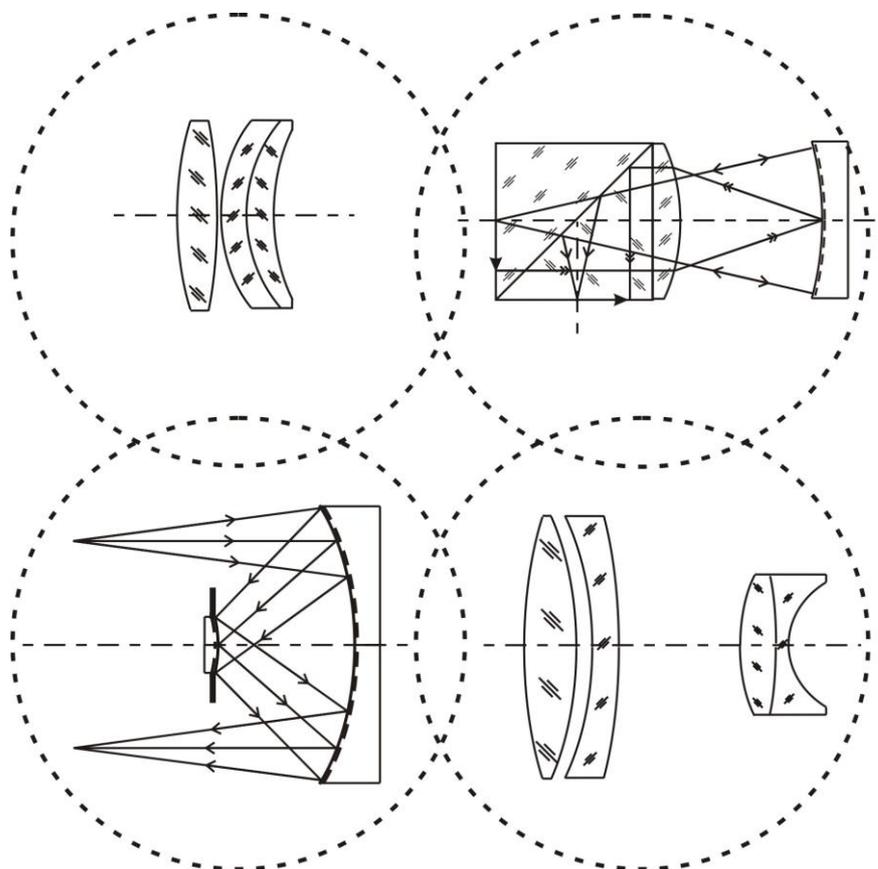


А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок

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



Санкт-Петербург
2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

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

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН, СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО по направлениям подготовки 12.04.02 «Оптотехника», 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения», 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных образовательных программ высшего образования специалитета и магистратуры.

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург
2019

А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 121 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Губанова Л.А., профессор факультета ФиОИ Университета ИТМО

В учебно-методическом пособии представлены краткие теоретические сведения, порядок выполнения лабораторных работ и варианты индивидуальных заданий, используемых в рамках дисциплин «Расчет и автоматизация проектирования оптических систем», «Расчет оптических систем» и «Фотоника». Представленный материал может быть также полезен при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Учебно-методическое пособие предназначено для специалистов и магистров, обучающихся по направлениям подготовки 12.04.02 «Оптехника», 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии» и 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения».

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии для реализации образовательных программ высшего образования специалитета и магистратуры по направлениям подготовки 12.04.02 «Оптехника», 12.05.01 «Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения», 12.04.05 «Лазерная техника и лазерные технологии». (Протокол № 1 от 22 марта 2019)



Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© А. П. Грамматин, Г. Э. Романова, Е. А. Цыганок, 2019

Содержание

	стр.
Обозначения, принятые в тексте	5
Введение	8
РАЗДЕЛ 1. Свойства aberrаций	9
Лабораторная работа №1.1 Изучение сферической aberrации третьего порядка	10
Лабораторная работа №1.2 Оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации при наличии третьих и пятых ее порядков	18
Лабораторная работа № 1.3 Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала	22
Лабораторная работа № 1.4 Среднеквадратическая волновая aberrация как критерий качества изображения для дифракционно ограниченных оптических систем.....	27
Лабораторная работа № 1.5 Использование формул Марешаля для оптимальной коррекции среднеквадратической волновой сферической aberrации	31
Лабораторная работа № 1.6 Изучение свойств комы третьего порядка.....	34
Лабораторная работа № 1.7 Исследование пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка	40
Лабораторная работа № 1.8 Связь между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма	44
Лабораторная работа № 1.9 Исследование кривизны поверхности изображения на примере объектива микроскопа из двух сферических зеркал.....	48
Лабораторная работа № 1.10 Исследование астигматизма на примере объектива «Авангард»	52
Лабораторная работа № 1.11 Исследование свойств хроматизма положения.....	58
Лабораторная работа № 1.12 Вторичный спектр и его свойства..	61
Лабораторная работа № 1.13 Исследование сферохроматической aberrации.....	65
Лабораторная работа № 1.14 Исследование хроматизма увеличения.....	68
 РАЗДЕЛ 2. Методы расчета оптических систем	 72
Лабораторная работа № 2.1 Расчет и исследование зеркального объектива Ричи-Кретьена.....	72
Лабораторная работа № 2.2 Расчет схем контроля асферических поверхностей второго порядка	77
Лабораторная работа № 2.3 Расчет объектива для считывания информации с кодового диска.....	81

Лабораторная работа № 2.4 Исследование предельных возможностей одиночной линзы в инфракрасной области спектра	85
Лабораторная работа № 2.5 Исследование сферической аберрации пятого порядка объективов, склеенных из двух линз ...	89
Лабораторная работа № 2.6 Расчет и исследование объектива из двух линз с воздушным промежутком	93
Лабораторная работа № 2.7 Расчет трубы Галилея как системы скачкообразной смены увеличения с использованием основных параметров Г.Г. Слюсарева	96
Лабораторная работа № 2.8 Синтез и расчет четырехлинзового безабберационного объектива	101
Лабораторная работа № 2.9 Синтез и расчет объектива Петцваля с линзой Смита	106
Лабораторная работа № 2.10 Модернизация оптической системы монокуляра бинокля 8 x 30	110
ЛИТЕРАТУРА	114
ПРИЛОЖЕНИЕ	115

Обозначения, принятые в тексте:

σ – апертурный угол в пространстве предметов;

σ' – апертурный угол в пространстве изображений;

$Y'(0)_i$ – поперечная сферическая aberrация для луча с номером i ;

$DS'(0)_i$ – продольная сферическая aberrация для луча с номером i ;

$C'(0)_i$ – угловая сферическая aberrация для луча с номером i ;

$W(0)_i$ – волновая сферическая aberrация для луча с номером i ;

D – диаметр входного зрачка;

H_{\max} – ордината точки пересечения крайнего апертурного луча с плоскостью зрачка;

H_i – ордината точки пересечения i -ого луча с плоскостью зрачка;

m – ордината точки пересечения луча с плоскостью зрачка;

i – номер апертурного луча в соответствии с нумерацией, принятой в программе SAPO, а именно:

$$i=1 \text{ соответствует } H_1 = D/2,$$

$$i=21 \text{ соответствует } H_{21} = D\sqrt{7/8}/2,$$

$$i=2 \text{ соответствует } H_2 = D\sqrt{3/4}/2,$$

$$i=22 \text{ соответствует } H_{22} = D\sqrt{5/8}/2,$$

$$i=3 \text{ соответствует } H_3 = D\sqrt{1/2}/2,$$

$$i=32 \text{ соответствует } H_{32} = D\sqrt{3/8}/2,$$

$$i=4 \text{ соответствует } H_4 = D\sqrt{1/4}/2,$$

$$i=42 \text{ соответствует } H_{42} = D\sqrt{1/8}/2,$$

$$i=5 \text{ соответствует } H_5 = -D\sqrt{1/4}/2,$$

$$i=6 \text{ соответствует } H_6 = -D\sqrt{1/2}/2,$$

$$i=7 \text{ соответствует } H_7 = -D\sqrt{3/4}/2,$$

$$i=8 \text{ соответствует } H_8 = -D/2,$$

$DS'Y$ – смещение плоскости установки относительно плоскости Гаусса. Когда изображение находится на бесконечности, например, в зрительных трубах, в программе SAPO следует указывать $DS'Y = 1E9$, в этом случае поперечные aberrации выдаются в угловой мере, продольные aberrации – в диоптрийной мере;

$R'Y$ – радиус поверхности изображения;

z_p – положение входного зрачка относительно первой поверхности;

z'_p – положение выходного зрачка относительно последней поверхности;

$\Delta z'_p$ – сферическая aberrация в выходном зрачке

$A0$ – угол первого параксиального луча с оптической осью в пространстве предметов;

HA – высота первого параксиального луча на первой поверхности системы;

в случае бесконечно-удаленного предмета и если система определяется углами первого параксиального луча $HA = f'$;

- в случае предмета на конечном расстоянии $HA = A_0 \cdot S$, S – расстояние от первой поверхности системы до предмета;
- B_0 – угол второго параксиального луча с оптической осью в пространстве предметов;
- H_B – высота второго параксиального луча на первой поверхности системы;
в случае бесконечно-удаленного входного зрачка H_B может иметь произвольное значение;
в случае входного зрачка, расположенного на конечном расстоянии $H_B = B_0 \cdot z_p$;
- $N(\lambda)$ – показатель преломления для длины волны λ :
 λ – порядковый номер длины волны в соответствующей таблице программы SAPO. Для видимой области спектра рекомендуется задавать $\lambda = 0$ – основная длина волны e , $\lambda = 1$ – длина волны C' , $\lambda = 2$ – длина волны F' . В таблице SAPO можно задавать длину волны либо буквами, либо цифрами: 0,000e или 0,0005461 (в миллиметрах);
- η – отступление от условия изопланатизма;
- $DY'_{j,i}$ – поперечная аберрация для луча, выходящего из точки предмета j и пересекающего входной зрачок на высоте H_i ;
- j – номер пучка в соответствии с нумерацией, принятой в программе SAPO, а именно:
- $j = 1$ соответствует краю поля $\sin \omega = MUMAX$, ω – угловое поле или $l_1 = YMAX$
 - $j = 11$ соответствует $\sin \omega \sqrt{7/8}$ или $l_1 \sqrt{7/8}$
 - $j = 2$ соответствует $\sin \omega \sqrt{3/4}$ или $l_1 \sqrt{3/4}$
 - $j = 12$ соответствует $\sin \omega \sqrt{5/8}$ или $l_1 \sqrt{5/8}$
 - $j = 3$ соответствует $\sin \omega \sqrt{1/2}$ или $l_1 \sqrt{1/2}$
 - $j = 12$ соответствует $\sin \omega \sqrt{3/8}$ или $l_1 \sqrt{3/8}$
 - $j = 4$ соответствует $\sin \omega \sqrt{1/4}$ или $l_1 \sqrt{1/4}$
 - $j = 14$ соответствует $\sin \omega \sqrt{1/8}$ или $-l_1 \sqrt{1/8}$
 - $j = 5$ соответствует $-\sin \omega \sqrt{1/4}$ или $-l_1 \sqrt{1/4}$
 - $j = 6$ соответствует $-\sin \omega \sqrt{1/2}$ или $-l_1 \sqrt{1/2}$
 - $j = 7$ соответствует $-\sin \omega \sqrt{3/4}$ или $-l_1 \sqrt{3/4}$
 - $j = 8$ соответствует краю поля $\sin \omega = -MUMAX$, или $l_1 = -YMAX$
- $\Delta s'_{III}$ – продольная сферическая аберрация третьего порядка, римские цифры в индексе обозначают порядок аберрации: III, V – третий и пятый порядки;
- y'_{III} – поперечная сферическая аберрация третьего порядка;
- w_{IV} – волновая аберрация, римские цифры в индексе обозначают порядок аберрации: IV, VI – четвертый и шестой порядки;
- P – основной параметр Г.Г.Слюсарева, связанный со сферической аберрацией третьего порядка при $s_1 = \infty$;

W – основной параметр Г.Г. Слюсарева, связанный с отступлением от условия изопланатизма третьего порядка (комы) при $s_1 = \infty$;

C – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий хроматизм положения при $s_1 = \infty$;

P – параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий сферическую aberrацию третьего порядка при $s_1 \neq \infty$;

W – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий отступление от условия изопланатизма третьего порядка (кому) при $s_1 \neq \infty$;

C – основной параметр Г.Г. Слюсарева, определяющий хроматизм положения при $s_1 \neq \infty$;

α_{i+1} – угол первого параксиального луча между поверхностями с номером i и $i+1$;

h_i – расстояние от оптической оси до точки преломления (отражения) первого параксиального луча – «высота» на поверхности с номером i ;

Z'_m – меридиональная составляющая астигматизма;

Z'_s – сагиттальная составляющая астигматизма;

Z'_p – кривизна поверхности изображения – стрелка Петцваля;

$S'(2-1)$ – хроматическая aberrация положения;

$Y'(2-1)$ – хроматическая aberrация увеличения;

V – линейное увеличение;

Γ – видимое увеличение.

Введение

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

Материалы лабораторных работ в пособии подготовлены для выполнения в программном комплексе SAPO, однако практические задания также можно успешно выполнять в других программах для расчета и проектирования оптики.

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, а также приемы анализа можно успешно применять в практике расчета и проектирования реальных оптических систем.

РАЗДЕЛ 1. Свойства aberrаций

В реальной практике проектирования оптических систем очень важно уметь определить присутствие определенных типов aberrаций и их влияние на качество изображения. Это дает возможность проектировщику принимать правильное решение о дальнейшем ходе расчета и прогнозировать достижимые характеристики оптической системы.

В данном разделе методических указаний демонстрируются отдельные aberrации на примерах оптических систем, в которых присутствует только одна, демонстрируемая, aberrация, а все остальные aberrации отсутствуют. Для этих систем показано, как, пользуясь только расчетами хода лучей в оптической системе, можно получить формулы для описания этих aberrаций. При этом проверяются теоретические положения, известные для конкретных типов aberrаций, а также исследуются взаимосвязи параметров оптической системы и 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.

На рисунке 1.1.1 показан ход двух лучей осевого пучка через преломляющую поверхность.

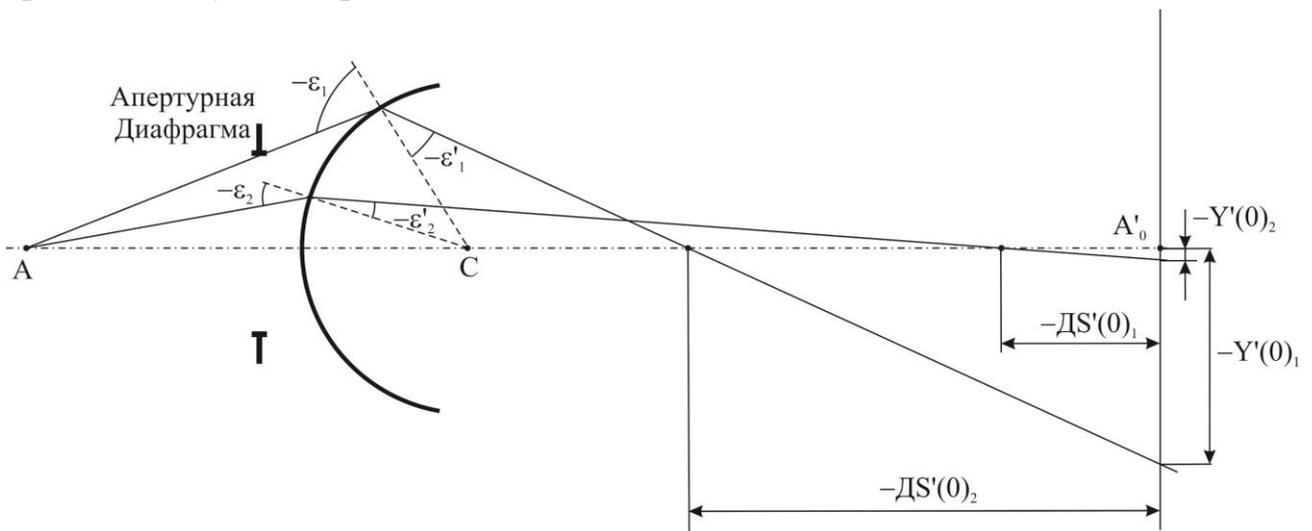


Рис. 1.1.1 Сферическая aberrация преломляющей поверхности

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 абберация $DS'(0)$. Измеряется вдоль оси OZ , то есть вдоль оптической оси. Используется, главным образом, при проектировании оптических систем по частям, например, телескопических.
3. Угловая абберация $C'(0)$. Является аналогом поперечной абберации. Используется в случае, когда изображение находится на бесконечности.
4. Волновая абберация $W(0)$. Используется при расчете так называемых дифракционно-ограниченных оптических систем, то есть систем, качество изображения которых определяется дифракцией.

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

По требованию 28 в системе САРО выводится 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 абберации третьего порядка используется репродукционный объектив «Микронар», модифицированный с целью ее введения.

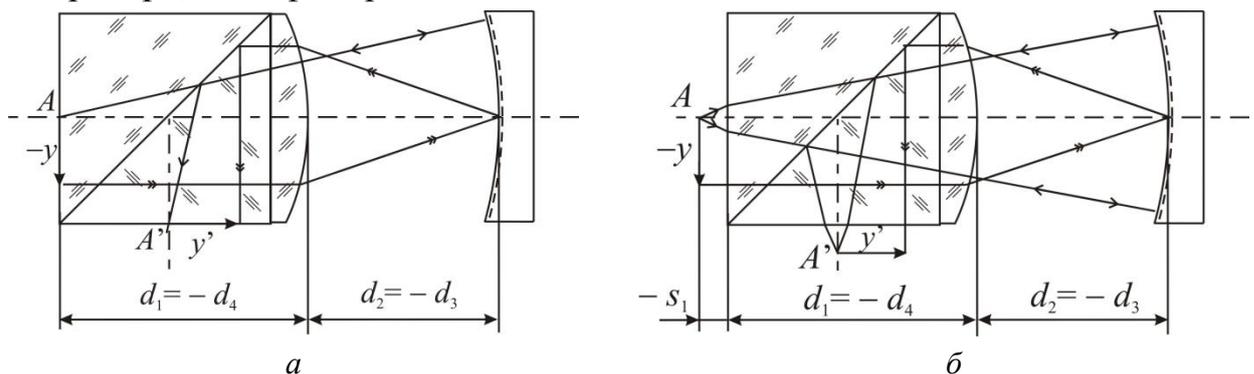


Рис. 1.1.2 Схема объектива «Микронар»: а – схема объектива «Микронар», б – схема объектива, модифицированного с целью введения сферической абберации

Объектив «Микронар» состоит из призмы-куб с полупрозрачной гипотенузной гранью (см. рис. 1.1.2). 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. 1.1.2), 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. 1.1.2б), благодаря чему возникает сферическая aberrация третьего порядка.

Порядок выполнения работы:

1. Задать оптическую систему в соответствии с индивидуальным заданием (см. таблицу). Определить параксиальные характеристики (требование 1 САРО). 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 (требованию 28 САРО). Убедиться, что пятно рассеяния по всему полю одинаково, что свидетельствует об отсутствии других aberrаций, кроме сферической aberrации.
2. Проанализировать численные данные о продольной сферической aberrации $DS'(0)$, поперечной сферической aberrации $Y'(0)$ и волновой сферической aberrации $W(0)$ (требование 1 САРО). 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:

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

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

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

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. Убедиться, что пятно рассеяния при этом имеет минимальный диаметр (требование 28 САРО). 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. Проанализировать графики сферической aberrации (требование 5 САРО). График, расположенный в левом верхнем углу экрана представляет зависимость поперечной сферической aberrации (отложена по оси OX) от тангенса апертурного угла в пространстве изображений $tg\sigma'$. На экране представлен также масштаб графика: цена одного деления шкалы в мм. По оси абсцисс штрихами отмечены значения $tg\sigma'$, 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. Проанализировать графики волновой aberrации (требование 51 САРО). Волновая aberrация в длинах волн представлена по оси ординат.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей:

Положение предмета $S_I = -10$ ($A_0 = 1$; $H_A = -10$);

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 $z_p = 1000$ ($B_0 = 1$; $H_B = 1000$);

Размер предмета $Y_{MAX} = -8$ мм;

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

Длина волны $0,000e$. 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
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 ТК14 1 -1 -ТК14 -1

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

№ вар.	Исходные данные		
15	$r_1 = \infty$ $r_2 = -122.16$ $r_3 = -332.24$ $r_4 = -122.16$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 211.25$ $d_3 = -211.25$ $d_3 = -100$	1 ЛФ5 1 -1 -ЛФ5 -1
16	$r_1 = \infty$ $r_2 = -114.89$ $r_3 = -349.86$ $r_4 = -114.89$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 234.97$ $d_3 = -234.97$ $d_3 = -100$	1 ЛК3 1 -1 -ЛК3 -1
17	$r_1 = \infty$ $r_2 = -116.95$ $r_3 = -285.28$ $r_4 = -116.95$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 168.34$ $d_3 = -168.34$ $d_3 = -100$	1 СТК12 1 -1 -СТК12 -1
18	$r_1 = \infty$ $r_2 = -115.27$ $r_3 = -334.07$ $r_4 = -115.27$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 218.80$ $d_3 = -218.80$ $d_3 = -100$	1 БФ1 1 -1 -БФ1 -1
19	$r_1 = \infty$ $r_2 = -116.28$ $r_3 = -301.43$ $r_4 = -116.28$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 185.15$ $d_3 = -185.15$ $d_3 = -100$	1 Ф4 1 -1 -Ф4 -1
20	$r_1 = \infty$ $r_2 = -117.47$ $r_3 = -274.67$ $r_4 = -117.47$ $r_5 = \infty$	$d_1 = 100$ $d_2 = 157.20$ $d_3 = -157.20$ $d_3 = -100$	1 СТК19 1 -1 -СТК19 -1

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры оптической системы.
3. Соотношения между значениями продольной, поперечной и волновой аберрациями для края и зоны зрачка.

4. Значения диаметров пятен рассеяния для трех точек поля.
5. Оптимальное смещение плоскости установки и минимальный диаметр пятна рассеяния.
6. Графики продольной, поперечной и волновой аберраций.
7. Выводы по проделанной работе.

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?
5. Особенности тестовой системы для изучения сферической аберрации третьего порядка.

Лабораторная работа № 1.2

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

Цель работы: изучить условия оптимальной коррекции поперечной сферической aberrации.

Задачи работы: на примере объектива, склеенного из двух линз, определить условие, обеспечивающее оптимальную коррекцию поперечной сферической aberrации.

Краткие теоретические сведения:

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

В склеенной из двух линз системе присутствуют aberrации как третьего, так и пятого порядка, поэтому оптимальная коррекция определяется их балансом, в том числе при введении плоскости наилучшей установки.

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

Порядок выполнения:

1. Задать оптическую систему – объектив, склеенный из двух линз, в соответствии с индивидуальным заданием.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО) сферической aberrации $Y'(0) = 0 \pm 0.00001$ и комы $\eta = 0 \pm 0.0001$ на краю отверстия, используя в качестве коррекционных параметров углы первого параксиального луча α_2 и α_3 (A2 и A3 САРО).
3. Выполнить расчет aberrаций для осевой точки предмета (требование 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). Определить размер пятна рассеяния.
5. С помощью введения плоскости установки DS'Y получить $Y'(0)_1 = -Y'(0)_{22}$. Для этого возможно использование автоматизированной коррекции (требование 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 (требование 1 SAPO) для восьми лучей и убедиться, что достигнута оптимальная коррекция.
7. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 28 SAPO), оценить его размеры и сравнить с величиной $Y'(0)_1 - Y'(0)_{22}$.
8. Сравнить диаметры пятен рассеяния с плоскостью установки и без нее.
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	
0	1	2	

При этом осуществляется и коррекция величины комы η . Допуски – см. пункт 2. Коррекционными параметрами служат A2, A3 и DS'Y.

10. Вывести на экран значения аберраций (требование 1 SAPO) для восьми лучей и убедиться, что для всех лучей, кроме отмеченных выше, аберрация

$Y'(0)$ 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 ($B_0=1$, $HV=0$);

Размер предмета $\sin\omega=MU \text{ MAX}=0.05$;

Размер зрачка $H \text{ MAX}=12.5$;

Длина волны: e .

Исходные данные:

$\alpha_1=0$; $\alpha_2=0.5$; $\alpha_3=0.3$; $\alpha_4=1$

$d_1=4$; $d_2=4$.

Марки стекол в соответствии с индивидуальным заданием:

№ 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

№ вар.	Марки стекол
11	К14-ТФ3
12	ТК12-БФ24
13	ТК23-БФ12
14	ТК23-БФ28
15	БК10-Ф9
16	БК13-ТФ1
17	К8-ТФ2
18	ТК2-ТФ8
19	ЛК6-ТФ2
20	БК10-ТФ3

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Таблицы и графики поперечной сферической аберрации в плоскости Гаусса и плоскости наилучшей установки.
3. График поперечной сферической аберрации в плоскости наилучшей установки
4. Размеры пятен рассеяния.
5. Выводы по проделанной работе.

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?
3. Во сколько раз уменьшается размер пятна рассеяния в плоскости наилучшей 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: 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 одиночного зеркала.

Краткие теоретические сведения

В данной лабораторной работе используется представление асферической поверхности в виде (первый тип уравнения 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. Определить поперечную сферическую аберрацию для первого $Y'(0)_1$ и третьего $Y'(0)_3$ лучей (требование 1 САРО) и вычислить поперечные аберрации пятого и третьего порядков по нижеследующим формулам:

$$y'_V = 2 Y'(0)_1 - 5.656 Y'(0)_3, \quad (1.3.2)$$

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

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 $\sqrt{0.5} H_{MAX}$, а продольная сферическая aberrация для первого луча, пропорциональная квадрату H , должна быть в два раза больше, чем для третьего луча. 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 асферической поверхности, для чего:

	R	ASF / A	
1	A	103	– первый тип, третий порядок асферики;
2		1	– коэффициент b ;
3		1	– коэффициент c ;
4		$-2 R$	– коэффициент a_1 ;
5		1	– коэффициент a_2 ;
6		0	– коэффициент a_3 ;

5. Выполнить расчет aberrаций (требование 1 CAPO) 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 (требования 11 САРО) и рассчитать aberrации (требование 1 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:

$$w_{IV} = A \frac{m^k}{f'^l \lambda} a_2,$$

где k, l – показатели степени, A – некоторый коэффициент;

$$\Delta y'_{III} = B \frac{m^n}{f'^p} a_2,$$

где n, p – показатели степени, B – 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 (требование 1 САРО) и с помощью формул (1.3.2 – 1.3.7) 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 абберация по зрачку; для нахождения степеней r, t необходимо изменить фокусное расстояние, например, в 2 раза, и рассмотреть, как при этом изменилась сферическая абберация (волновая или поперечная соответственно). В заключении найти коэффициенты A_1, B_1

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $S_1 = \infty$: $A_0 = 0$, $HA = 1$

Размер зрачка $HMAX = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = MU MAX = 0.01$

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

Длина волны $\lambda = 0.0005$ мм.

№ вар.	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

№ вар.	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K	Коэффициент асферической деформации a_3
13	700	4	0,09
14	700	4,5	0,13
15	550	4	0,07
16	550	3	0,16
17	650	4	0,05
18	650	3	0,1
19	900	5	0,06
20	900	4	0,11

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Полученные выражения для волновой сферической аберрации четвертого и шестого порядков и для поперечной сферической аберрации третьего и пятого порядков.
3. Таблицы и графики волновой и поперечной сферической аберрации.
4. Выводы по проделанной работе.

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: оценить применимость критериев качества изображения – максимального значения волновой сферической aberrации и среднеквадратической волновой aberrации 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:

Оптимальным 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 не может быть непосредственно измерен в реальной оптической системе.

Альтернативным критерием качества может служить среднеквадратическое отклонение волнового фронта от идеальной сферы, вычисляемое 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. При вычислении среднеквадратического отклонения в САО лучи равномерно распределены по площади входного зрачка, а их количество примерно равно 1000. Число Штреля St при $w_{ск} \leq 0,1$ достаточно точно связано с $w_{ск}$ формулой:

$$St \cong e^{-(2\pi w_{ск})^2} \quad (1.4.1)$$

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

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

Согласно источнику [1], оптимальная коррекция сферической aberrации, соответствующая минимальному значению $w_{ск}$, достигается, когда $w_{IV} = -1.5w_{VI}$, что происходит, когда $DS'(0)_1 = 0$ с последующим смещением плоскости установки, вызывающим изменение волновой aberrации на краю отверстия, равное $3/5w_{VI}$. Эти положения подлежат проверке в данной лабораторной работе.

Кроме того, в настоящей работе будет показано, что волновые aberrации не могут служить адекватным критерием качества изображения дифракционно ограниченных оптических систем.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с вариантом задания выполнить коррекцию поперечной сферической aberrации на краю отверстия (для луча 1) $Y'(0)_1 = 0 \pm 0.0001$, используя в качестве коррекционного параметра ASF5, то есть коэффициент второго порядка a_2 . Используя формулы лабораторной работы № 1.3 «Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала», рассчитать волновые aberrации четвертого и шестого порядка. Убедиться, что $w_{IV}/w_{VI} = -1.5$.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию значения волновой сферической aberrации для края отверстия. Заданное значение волновой aberrации рассчитать по формуле [1]:

$$\tilde{w}_1 = 2.2W(0)_1 - 4.8W(0)_3.$$

В качестве коррекционного параметра использовать смещение плоскости установки $DS'Y$. Допуск на значение \tilde{w}_1 установить 0.001. Рассчитать $w_{ск}$ и число Штреля St (требование 36.1 САРО). 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, ± 0.02) и убедиться в правильности расчетов.

3. Определить значение w_{VI} , которое обеспечивает получение среднеквадратического отклонения $w_{ск} = 0.074$ и числа Штреля $St = 80\%$. Волновая aberrация шестого порядка пропорциональна шестой степени радиуса входного зрачка H_{MAX} . Исходя из этого, найдем H_{MAX} , соответствующее $w_{ск} = 0.074$:

$$\tilde{H}_{MAX} = 100 \sqrt[6]{0.074 / w_{ск}},$$

где $w_{ск}$ – среднеквадратическое отклонение, полученное в результате расчета.

4. Повторить расчеты по пп.1–2 с использованием нового значения H_{MAX} . Отметим, что если $|w_{VI}| = 4$, то при значении продольной сферической aberrации на краю зрачка $DS'(0)_1 = 0$ волновая сферическая aberrация $|W(0)_1| = 2$. Следовательно, при $|w_{VI}| \leq 4$ обеспечивается выполнение критерия Маршала. Систему записать в архив.
5. Проверить корреляцию между максимальными значениями волновой aberrации и величинами $w_{ск}$, для чего в последнем варианте расчета на странице с начальными данными записать следующим образом:

РАЗМЕР ПРЕДМЕТА

1

РАЗМЕР ЗРАЧКА

8

Такая запись обеспечит вывод на экран результатов расчета aberrаций для 8 лучей (требование 1 САРО). 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 $W(0)_{max}$ и модуля максимального отрицательного значения $|W(0)_{min}|$. Проверить при найденном положении плоскости установки $DS'Y$ величину среднеквадратического отклонения $w_{ск}$ и убедиться, что она превышает полученное ранее значение $w_{ск} = 0.074$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей:

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

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

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 $a_2 = 0$.

№ вар.	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

№ вар.	Коэффициент асферики a_3
11	0,20
12	0,21
13	0,07
14	0,05
15	0,09
16	0,22
17	0,25
18	0,24
19	0,3
20	0,32

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Формула связи среднеквадратического отклонения волновой аберрации с числом Штреля.
3. Проверка числа Штреля для $w_{СК} = 0.074$.
4. Таблица и график волновой сферической аберрации при оптимальном значении $w_{СК}$.
5. Выводы по проделанной работе.

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: анализ формул Марешаля для оптимальной коррекции среднеквадратической волновой сферической аберрации.

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:

Согласно Марешалю [1] оптимальная коррекция среднеквадратической волновой сферической аберрации, а следовательно, и максимальное значение числа Штреля, в случае неустраняемой 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 $St = 0.8$, 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 аберрации на краю зрачка, равное

$w_I = 4$. 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.

4. 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.

5. Вычислить среднеквадратичное отклонение и число Штреля по (требование 36 SAPO). Убедиться, что критерии Марешаля и Штреля выполнены.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета – на бесконечности, $S_1 = \infty$: $A0 = 0$, $HA = f'$.

Размер зрачка $H \text{ MAX} = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = MU \text{ MAX} = 0.01$

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

№ варианта	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K
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
13	1200	8
14	500	6
15	300	3
16	300	4
17	450	4
18	750	4
19	800	5
20	1000	8

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Таблица и график волновой аберрации в плоскости наилучшей установки
3. Значения среднеквадратической волновой сферической аберрации и числа Штреля.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Допустимое значение волновой аберрации шестого порядка, гарантирующее получение $w_{ск} = 0,074$
2. Каким образом достигается оптимальный баланс $w_{ск}$ при наличии волновых аберраций четвертого и шестого порядков.
3. 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 выполнить 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 апертурной 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.

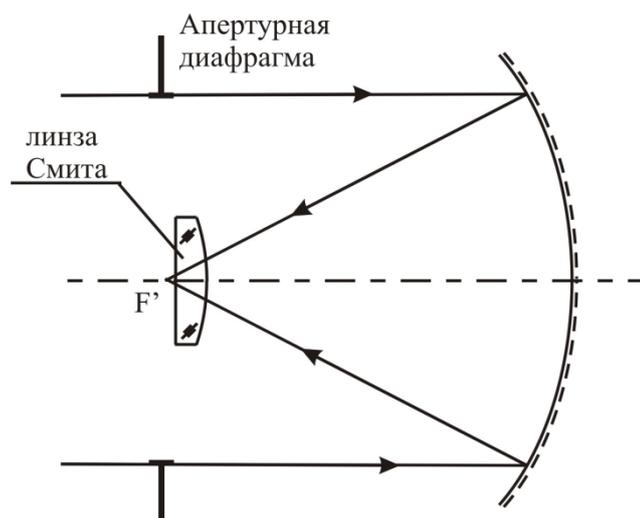


Рис. 1.6.1 Зеркальный параболоид с линзой Смита

Порядок выполнения:

1. Записать систему в соответствии с индивидуальным заданием. Обратит внимание, что r_2^* – радиус при вершине второй параболоидальной поверхности (коэффициент $a_2 = 0$ для параболоида).

	R	ASF / A
1	0	102
2	A	1
3	r_3	1
4	r_4	$-2 r_2^*$
5		1
6		0

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

$$k_m = (dY'_{1,3} + dY'_{1,6})/2 \quad (1.6.2)$$
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 аббераций $DX' \approx 0$, а меридиональная составляющая для первого в таблице луча $DY'_{9,1} \approx k_s \approx k_m/3$.

6. Вывести на экран нижнюю часть основной таблицы (нажав кнопку “2” на малой клавиатуре). Там содержится информация для зоны поля $MU = MU_{MAX} \sqrt{0.5}$
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. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 28 САРО) 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, $S_1 = \infty$: $A0 = 0$, $HA = f'$.

Размер зрачка $H_{MAX} = D/2$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.05$

Первая поверхность – фиктивная; входной зрачок расположен на первой поверхности: $HB = 0$, $B0 = 1$

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

Во всех системах вторая поверхность имеет форму параболоида

Длина волны $\lambda = 0.0005$ мм.

№ вар.	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
1	75	$r_1 = \infty$	$d_1 = 250$	1
		$r_2^* = -500$	$d_2 = -247,449$	1
		$r_3 = -94,359$	$d_3 = -1$	-СТКЗ
		$r_4 = \infty$		-1

№ вар.	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
2	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -199,795$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -495,933$ $d_3 = -5$	1 1 -1 -СТК3 -1
3	180	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -300,258$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -744,721$ $d_3 = -7$	1 1 -1 -СТК3 -1
4	300	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -400,2596$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -992,892$ $d_3 = -10$	1 1 -1 -СТК3 -1
5	60	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -101,793$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -247,252$ $d_3 = -2,5$	1 1 -1 -СТК19 -1
6	100	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -214,377$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -496,086$ $d_3 = -5$	1 1 -1 -СТК19 -1
7	140	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -322,678$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -744,935$ $d_3 = -7$	1 1 -1 -СТК19 -1
8	400	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -430,039$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -993,197$ $d_3 = -10$	1 1 -1 -СТК19 -1
9	350	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -452,775$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -993,404$ $d_3 = -10$	1 1 -1 -ТФ10 -1

№ вар.	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
10	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -339,811$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -745,082$ $d_3 = -7$	1 1 -1 -ТФ10 -1
11	150	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -226,29$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -496,191$ $d_3 = -1$	1 1 -1 -ТФ10 -1
12	80	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -107,512$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -247,577$ $d_3 = -2,5$	1 1 -1 -ТФ10 -1
13	75	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -500$ $r_3 = -92,034$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 250$ $d_2 = -247,418$ $d_3 = -2,5$	1 1 -1 -БФ12 -1
14	135	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1000$ $r_3 = -194,153$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 500$ $d_2 = -495,871$ $d_3 = -5$	1 1 -1 -БФ12 -1
15	140	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -1500$ $r_3 = -291,753$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 750$ $d_2 = -744,634$ $d_3 = -7$	1 1 -1 -БФ12 -1
16	300	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -389,004$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -992,767$ $d_3 = -10$	1 1 -1 -БФ12 -1
17	350	$r_1 = \infty$ $r_2^* = -2000$ $r_3 = -409,925$ $r_4 = \infty$	$d_1 = 1000$ $d_2 = -993,018$ $d_3 = -10$	1 1 -1 -СТК12 -1

№ вар.	Диаметр зрачка, мм	Конструктивные параметры		
18	150			1
		$r_1 = \infty$	$d_1 = 750$	1
		$r_2^* = -1500$	$d_2 = -744,809$	-1
		$r_3 = -389,004$	$d_3 = -7$	- СТК12
		$r_4 = \infty$		-1
19	140			1
		$r_1 = \infty$	$d_1 = 500$	1
		$r_2^* = -1000$	$d_2 = -495,996$	-1
		$r_3 = -204,963$	$d_3 = -5$	- СТК12
		$r_4 = \infty$		-1
20	75			1
		$r_1 = \infty$	$d_1 = 250$	1
		$r_2^* = -500$	$d_2 = -247,483$	-1
		$r_3 = -102,481$	$d_3 = -2,5$	- СТК12
		$r_4 = \infty$		-1

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Таблицы и графики aberrаций.
3. Соотношения между величиной комы на краю и зоне поля.
4. Соотношения между величиной комы на краю и зоне зрачка.
5. Выводы по проделанной работе.

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 аберрацией, вызывающей асимметрию внеосевого пучка лучей. При наличии комы и отсутствии других аберраций 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. 1.6.1).

См. также лабораторную работу №1.6 «Изучение свойств комы третьего порядка».

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 аберрации, кроме комы отсутствуют. В этом случае поперечные аберрации 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. Записать в отчет высоту пересечения главного луча (столбец YGL последняя строка) с плоскостью изображения (последней поверхностью) (требование 21.1 САРО). Это необходимо, поскольку в основной таблице,

выдаваемой по треб.1 САРО эти значения выдаются с малым числом значащих цифр.

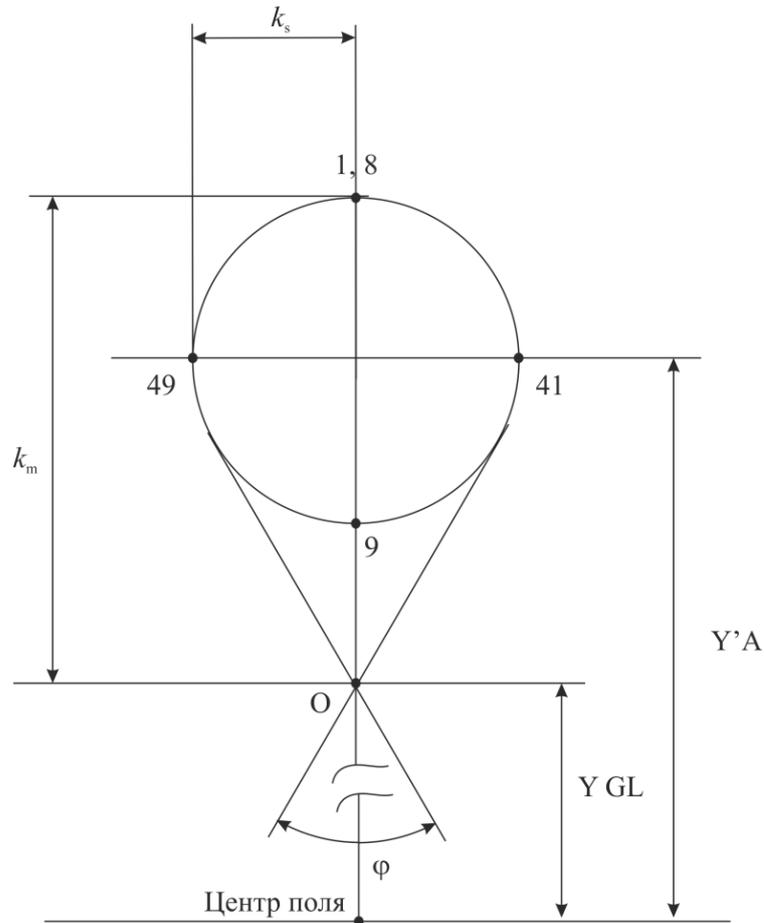


Рис. 1.7.1 К изучению структуры пятна рассеяния при наличии комы третьего порядка

4. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 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. Обратите 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 SAPO). Закрыть входной зрачок непрозрачным экраном с диаметром, меньше чем световой на небольшую величину, например, 0.1 мм.

$$1 \left| \begin{array}{c|c} \text{СВД} & \text{НПРЭ} \\ \hline & D - 0.1 \end{array} \right| - \text{подставить рассчитанное значение}$$

6. Убедиться, что пятна рассеяния представляют собой круги, центры которых смещены относительно точки пересечения главного луча с плоскостью изображения (требование 28 SAPO). 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».

	СДВИГИ / ПОВОРОТЫ	
	ПОВЕРХНОСТЕЙ (DFI)	ПРЕДМЕТА, ЗРАЧКА (DFI0)
1	*N	4
2	Y	
3	DY	0

Это означает, что четвертая поверхность системы смещается на величину, равную нулю вдоль оси Y . В этом случае осуществляется расчет не только меридиональных и сагиттальных, но и косых лучей (требование 1 SAPO).

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 (требование 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. Исходные данные оптической системы.
2. Нанести численные структуры пятна рассеяния на рис. 1.7.1.
3. Соотношение между комой в меридиональном и сагиттальном сечениях.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Структура пятна рассеяния в плоскости Гаусса при наличии комы третьего порядка.
2. Изменение структуры пятна рассеяния при смещении плоскости установки?
3. Особенности тестовой системы.

Лабораторная работа № 1.8

Связь между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма

Цель работы: определить 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 [2]:

$$\eta = \frac{\Delta\beta}{\beta_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0}, \quad (1.8.1)$$

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 $\Delta\beta = \beta - \beta_0$, β – линейное увеличение, определяемое для реальных лучей $\beta = \frac{n \sin \sigma}{n' \sin \sigma'}$.

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

$$\eta = \frac{\Delta f'}{f'_0} + \frac{\Delta s'}{z'_0 - s'_0}. \quad (1.8.2)$$

Величина $\Delta f' = f' - f'_0$, причем $f' = \frac{m}{\sin \sigma'}$, f'_0 – фокусное расстояние для параксиальных лучей.

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

Порядок выполнения:

1. Выполнить расчет хода лучей для сферического зеркала (требование 1 SAPO) в соответствии с индивидуальным заданием. Сохранить для отчета 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.
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. 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 $\eta = bK^x$ в процентах %.
5. Поместить входной зрачок в передний фокус зеркала, то есть записать $NB = f'$ вместо нуля. Убедиться, что $\eta = 0$ и соответственно кома отсутствует (требование 1 SAPO). Отсюда следует, что кома зависит от положения зрачка.
6. Заменить сферу параболоидом (см. лабораторную работу № 1.6 «Изучение свойств комы третьего порядка»), поместить входной зрачок на его вершину ($NB = 0$) и вновь рассчитать aberrации (требование 1 SAPO). 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.

7. 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, $S_1 = \infty$: $A_0 = 0$, $HA = 1$.

Размер зрачка $H_{MAX} = f' / 2K$

Размер предмета (угловое поле в пространстве предметов ω) задается синусом полевого угла $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.01$

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

Длина волны: e .

№ вар.	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
11	50	4
12	50	3
13	75	5
14	75	4
15	125	4
16	125	5
17	150	6
18	250	4
19	600	6
20	650	8

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Таблицы и графики aberrаций
3. Полученная формула связи между комой третьего порядка и отступлением от условия изопланатизма
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Условие изопланатизма для случая предмета на конечном и бесконечном расстоянии
2. Расчет комы по результатам расчета хода луча
3. Расчет 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: Исследование вида пятна рассеяния и формы поверхности изображения системы, в которой присутствует только кривизна изображения.

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

Краткие теоретические сведения.

Кривизной поверхности изображения (кривизной поля) называется аберрация, при которой поверхность изображения не является плоской. В большинстве оптических систем эта поверхность близка по форме к параболоиду или сфере. В области первичной аберрации (абerrации третьего порядка) кривизна поля пропорциональна сумме оптических сил отдельных поверхностей оптической системы [3].

Изучение аберрации осуществляется на примере объектива микроскопа, состоящего из двух concentрических зеркал [4]. В этом объективе практически устранены сферическая аберрация, кома и астигматизм, но присутствует значительная кривизна поля. Объектив такого типа использовался в сканирующем микроскопе с одноэлементным приемником. Сканирующее зеркало располагалось на расстоянии $R'Y$ от плоскости изображения.

Порядок выполнения работы:

1. Записать исходные данные системы 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 . Поэтому рекомендуется принять $\alpha_2 = 1,5$, а расстояние между зеркалами $d_1 = -15$ мм.

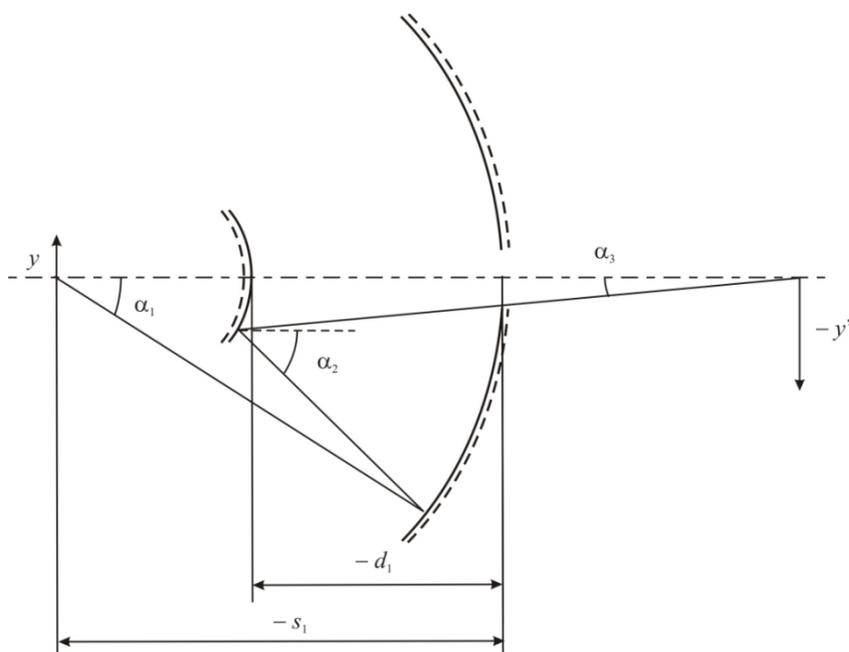


Рис. 1.9.1 Схема объектива из двух concentрических зеркал

2. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционных параметров расстояние между зеркалами d_1 и угол первого параксиального луча с осью α_2 , исправить поперечную сферическую aberrацию $Y'(0)=0\pm 0.001$ и отступление от условия изопланатизма $\eta=0\pm 0.00005$ на краю зрачка, а также астигматизм на краю поля $Z'_m - Z'_s = 0\pm 0.001$. Учитывая заданную величину $S_l = -30$, расстояние между зеркалами d_1 при коррекции следует ограничить диапазоном -20 (левая граница), -10 (правая граница):

ЛЕВАЯ ГРАНИЦА	ПРАВАЯ ГРАНИЦА	ИМЯ ПАРАМЕТРА
-20	-10	D1
		A2

3. Проверить, выполнив расчет хода лучей (требование 1 САРО), что исправлены сферическая aberrация, кома и астигматизм. Выполнить анализ точечных диаграмм (требование 28 САРО). Обратит внимание на то, что для пучков 3 и 1 пятна рассеяния представляют собой круги с равномерной освещенностью. Вывести на экран графики геометрических aberrаций (требование 5 САРО). Обратит внимание, что графики демонстрируют совпадение астигматических составляющих Z'_m и Z'_s в пределах поля изображения, а также форму поверхности изображения.
4. Ввести смещение плоскости установки, равное $DS'Y = Z'_m$ для края поля. Вновь вывести на экран пятно рассеяния, обратив внимание на его

изменения по сравнению с предыдущим вариантом. Для края поля (POINT 1 в SAPO) пятно существенно уменьшилось и приобрело сложную структуру, вызванную остаточными aberrациями высших порядков. Вывести на экран графики aberrаций (требование 5 SAPO). Обратит внимание на aberrации широких наклонных пучков в меридиональном и сагиттальном сечениях для края поля. Очевидно, что при перефокусировке на краю поля получено практически безaberrационное изображение. Таким приемом пользуются наблюдатели при работе с объективами микроскопа, обладающими неисправленной кривизной изображения.

5. Убрать смещение плоскости установки. Рассчитать фокусное расстояние объектива F'1–2 (требование 23.3 SAPO). 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 (требование 1 SAPO) и обратит внимание на существенное уменьшение величин Z'_m и Z'_s по абсолютным величинам.
6. 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 функции 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.
7. Проанализировать графики aberrаций (требование 5 SAPO). Очевидно, что поперечные aberrации в пределах всего поля изображения практически постоянны. Следовательно, поверхность изображения несущественно отличается от сферы.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета $S_1 = -30$: $A0 = 1$, $HA = S_1$.

Размер зрачка определяется передней числовой апертурой:

$$\sin \sigma_A = MU_{MAX} = 0.2$$

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

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

Длина волны $\lambda = 0.0005$ мм.

№ вар.	– V	–Y MAX
1	6	0.6
2	6	0.65
3	8	0.5
4	8	0.4
5	8	0.45
6	10	0.3
7	10	0.35
8	10	0.4
9	12	0.3
10	12	0.35

№ вар.	– V	–Y MAX
11	12	0.25
12	12.5	0.31
13	15	0.25
14	16	0.2
15	16	0.25
16	18	0.15
17	18	0.1
18	20	0.2
19	24	0.2
20	25	0.15

Содержание отчета

1. Исходные данные и оптическая схема тест-системы.
2. Таблицы и графики aberrаций.
3. Диаметры пятен рассеяния для трех точек поля.
4. Выводы по проделанной работе.

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.
4. Вид графиков поперечных aberrаций при наличии кривизны.

Лабораторная работа № 1.10

Исследование астигматизма на примере объектив «Авангард»

Цель работы: Изучение астигматизма на примере системы, свободной от всех остальных монохроматических аберраций.

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 аберрации, 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 аберраций выполняются расчеты двух бесконечно тонких пучков 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 [5]. 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 аберрации третьего порядка, а также все аберрации для сагиттальных пучков лучей. Модификация объектива с целью возникновения астигматизма при отсутствии других аберраций достигается путем асферизации поверхностей зеркал.

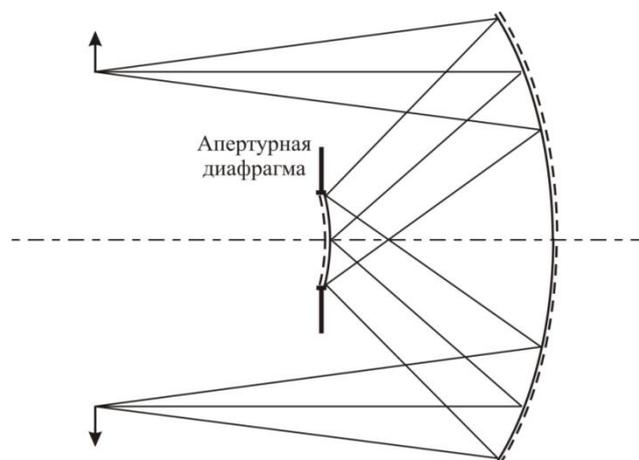


Рис. 1.10.1 Схема объектива «Авангард»

Порядок выполнения работы

1. Задать исходную оптическую систему в соответствии с индивидуальным вариантом (см. таблицу). Физически первая и третья поверхность представляют одно и то же зеркало. Обратите 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 (требование 1 САРО).
4. Осуществить автоматизированную коррекцию с целью введения астигматизма при отсутствии 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, которые связаны между собой коэффициентом связи, равным 1. Для устранения возникшей при этом сферической aberrации используется коррекционный параметр ASF10 (асферическая деформация второго зеркала). В качестве корригируемых функций следует использовать волновую сферическую aberrацию на краю отверстия и астигматизм на

- краю поля, значение которого приведено в таблице индивидуальных заданий
5. Вывести на экран пятно рассеяния (требование 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. Сравнить значения 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 аббераций 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 $DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2$. Вывести на экран пятно рассеяния и убедиться, что оно имеет форму круга и минимальные размеры по сравнению с другими положениями плоскости установки.
 9. Графически определить размеры фигур рассеяния, ориентируясь на масштабы графиков (требование 5 САРО) при $DS'Y = 0$, $DS'Y = Z'_m$, $DS'Y = Z'_s$ и $DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2$.
 10. Определить в системе без смещения плоскости установки число Штреля и среднеквадратическую волновую абберацию для крайней точки поля изображения (требование 36 САРО). Изменяя числовую апертуру MU_{MAX} , получить число Штреля, равным 80%, а среднеквадратическое отклонение равным 0.074.
 11. Выполнить расчет хода лучей (требование 1 САРО) и определить, какой волновой абберации 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 абберации.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода луча:

Положение предмета $A0 = 1$, $HA = S_1$.

Размер зрачка определяется числовой апертурой:

$$\sin \sigma = MU \text{ MAX} = 0.05$$

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

$$Y \text{ MAX} = -3$$

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
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

№	Радиусы	Толщины	Показатели преломления	Положение предмета относительно первой поверхности S_1 , мм	Требуемое значение астигматизма, $ast = Z'_m - Z'_s$
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
11	$r_1 = -101$ $r_2 = -50,5$ $r_3 = -101$	$d_1 = -50,5$ $d_2 = 50,5$	1 -1 1 -1	-101	0,55
12	$r_1 = -98$ $r_2 = -49$ $r_3 = -98$	$d_1 = -49$ $d_2 = 49$	1 -1 1 -1	-98	0,35
13	$r_1 = -107$ $r_2 = -53,5$ $r_3 = -107$	$d_1 = -53,5$ $d_2 = 53,5$	1 -1 1 -1	-107	0,5
14	$r_1 = -103$ $r_2 = -51,5$ $r_3 = -103$	$d_1 = -51,5$ $d_2 = 51,5$	1 -1 1 -1	-103	0,4
15	$r_1 = -97$ $r_2 = -48,5$ $r_3 = -97$	$d_1 = -48,5$ $d_2 = 48,5$	1 -1 1 -1	-97	0,45
16	$r_1 = -109$ $r_2 = -54,5$ $r_3 = -109$	$d_1 = -54,5$ $d_2 = 54,5$	1 -1 1 -1	-109	-0,5
17	$r_1 = -104$ $r_2 = -52$ $r_3 = -104$	$d_1 = -52$ $d_2 = 52$	1 -1 1 -1	-104	-0,8
18	$r_1 = -99$ $r_2 = -49,5$ $r_3 = -99$	$d_1 = -49,5$ $d_2 = 49,5$	1 -1 1 -1	-99	-0,55
19	$r_1 = -108$ $r_2 = -54$ $r_3 = -108$	$d_1 = -54$ $d_2 = 54$	1 -1 1 -1	-108	0,7

№	Радиусы	Толщины	Показатели преломления	Положение предмета относительно первой поверхности S_1 , мм	Требуемое значение астигматизма, $ast = Z'_m - Z'_s$
20	$r_1 = -96$ $r_2 = -48$ $r_3 = -96$	$d_1 = -48$ $d_2 = 48$	1 -1 1 -1	-96	-0,6

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Таблицы и графики aberrаций.
3. Соотношение между изменениями Z'_m и Z'_s при постоянной кривизне изображения Петцваля.
4. Величина астигматизма в волновой мере, соответствующая числу Штреля 80% и среднеквадратической волновой aberrации 0.074.
5. Выводы по проделанной работе.

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 при наличии астигматизма

Лабораторная работа № 1.11

Исследование свойств хроматизма положения

Цель работы: изучение свойств хроматизма положения на примере модифицированного объектива «Микронар».

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

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)

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

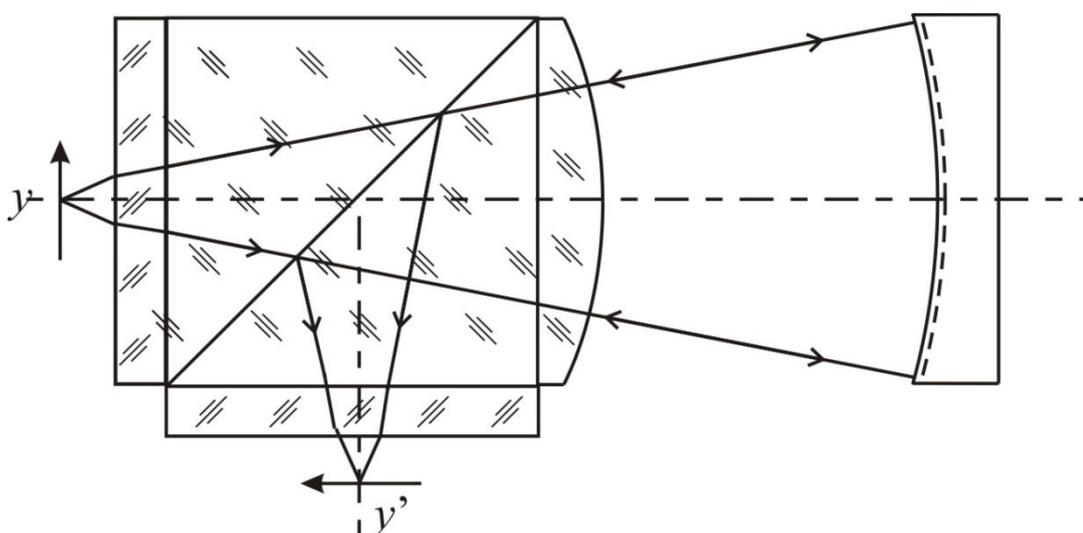


Рис. 1.11.1 Объектив «Микронар» с двумя приклеенными плоскопараллельными пластинами

Порядок выполнения:

1. Необходимо рассчитать показатели преломления (требование 27 САРО).
2. Система задается углами первого параксиального луча с осью α_i . Положим $\alpha_1=1$, тогда: $\alpha_2=1/n_2=\alpha_7$; $\alpha_3=1/n_3=\alpha_4=\alpha_5=\alpha_6$; $\alpha_8=1$. Рассчитать значения α_2 и α_3 , число значащих цифр после запятой не менее шести.
3. Записать полученные значения углов первого параксиального луча с осью, толщины и воздушные промежутки (см. таблицу), а также начальные данные для расчета хода лучей:
4. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 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.
5. Получить значения аберраций (требование 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 MU .
6. Вывести на экран пятна рассеяния (требование 28 САРО) и убедиться, что структура и размеры пятен идентичны по полю изображения. Оценить диаметр пятна рассеяния.
7. Ввести плоскость установки $DS'Y=[S'(1-0)+S'(2-0)]/2$ и убедиться, что при этом диаметр пятна рассеяния имеет минимальный диаметр.
8. Вывести на экран и проанализировать графики геометрических аберраций (требование 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 $z_p=1000$ ($B_0=1$, $NB=1000$);

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	ТБФ4 – ЛК6
7	ТБФ8 – ЛК1
8	ТБФ8 – ЛК6
9	ТБФ9 – К8
10	ТБФ9 – ЛК1
11	ТБФ10 – К8
12	ТБФ10 – ЛК6
13	ТБФ25 – К8
14	ТБФ25 – ЛК1
15	ТБФ25 – ЛК6
16	ТФ12 – К8
17	ТФ12 – ЛК1
18	ТФ2 – ЛК6
19	ТФ2 – К8
20	ТФ2 – ЛК1

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
3. Таблицы и графики aberrаций для осевого и одного внеосевого пучка.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Как проявляются хроматические aberrации при работе с монохроматическим приемником?
2. Как проявляются хроматические aberrации при работе с немонахроматическим (цветным) приемником?
3. Вид графиков осевого пучка при наличии хроматизма положения.

Лабораторная работа № 1.12

Вторичный спектр и его свойства

Цель работы: исследование вторичного спектра

Задачи работы: расчет системы, в которой исправлены все осевые аберрации кроме вторичного спектра и исследование его свойств.

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 , то есть величина $S'(2-0)$ при $S'(2-1)=0$ (при исправленном хроматизме положения).

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

$$S'_{\lambda_2} - S'_{\lambda_1} = -(p_1 - p_2) f' / (v_1 - v_2), \quad (1.12.1)$$

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:

$$S'_{F'} - S'_e = f' / 1700. \quad (1.12.2)$$

Тестовой системой может служить объектив из двух линз, разделенных воздушным промежутком конечной величины. В нем исправляются хроматизм положения, сферическая аберрация третьего и пятого порядков, сферохроматическая аберрация и отступление от условия изопланатизма [3].

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 [6] 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:

$\alpha_1 = 0$		$n_1 = 1$
$\alpha_2 = 0$	d_1	$n_2 = \Phi 13$
$\alpha_3 = -1$	d_2	$n_3 = 1$
$\alpha_4 = 0$	d_3	$n_4 = K18$
$\alpha_5 = 1$		$n_5 = 1$

При этом первая линза – плосковогнутая, а вторая – двояковыпуклая симметричная. Толщины линз подобрать конструктивно. Расстояние $d_2 = 5 \dots 10$ 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 абберации, величины неизопланатизма и хроматизма положения на краю зрачка, а также величину поперечной сферической абберации на зоне (для луча 3 САРО) и параксиального хроматизма положения.
3. Определить абберации (требование 1 САРО). Вычислить коэффициент вторичного спектра по формуле $C = (S'_F - S'_e)/f'$. Сравнить с теоретическим значением. Вывести на экран вид пятна рассеяния (требование 28 САРО). Вывести графики аббераций (требование 5 САРО).
4. Определить вторичный спектр для пар стекол, лежащих на «нормальной» прямой, и определить разброс величины C : $\Phi 13$ -К8; $\Phi 13$ -ЛК1; $\Phi 13$ -ЛК6; $\Phi 13$ -ФК11; $\Phi 13$ -ТФК11; $\Phi 13$ -ТК21; $\Phi 13$ -ТК23; $\Phi 13$ -СТК3; $\Phi 13$ -СТК19; $\Phi 2$ -К18; ТФ1-К18; ТФ10-К18; ТФ4-К18; СТФ2-К18; СТФ11-К18. Выделить стекла, наиболее удаленные от «нормальной» прямой.
5. Исследовать вторичный спектр для систем с флюоритом (код 3007 САРО), то есть из следующих материалов: $\Phi 13$ –флюорит; ТФ1–флюорит; ОФ6–флюорит; СТК15 – флюорит.
6. Исследовать вторичный спектр с использованием заменителя флюорита – стекла ОК4, то есть в сочетаниях $\Phi 13$ –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 $S_1 = \infty$: $A0 = 0$, $HA = f'$.

Размер предмета: $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.05$

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

Длины волн: e, C', F' .

№ вар.	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
16	210	6
17	50	5
18	280	7
19	130	6
20	230	6

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций обычных стекол.
3. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций стекол с использованием флюорита.

4. Значения вторичного спектра для рассмотренных комбинаций с использованием стекла ОК4.
5. Зависимость вторичного спектра от фокусного расстояния.
6. Вывод по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Зависимость вторичного спектра от фокусного расстояния.
2. Технологические и термооптические свойства флюорита.
3. «Нормальная прямая» оптических бесцветных стекол.

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.

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 (требование 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, то есть 0.1%) для того же луча и волновой сферической аберрации для луча 3 $W(0)_3 = 0 \pm 0.05$. В качестве коррекционных параметров использовать радиусы кривизны $R_2 - R_5$ и коэффициенты асферики ASF4 и ASF5.

3. Выполнить расчет aberrаций (требование 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 (требование 28 САРО). Убедиться, что они практически одинаковы в пределах поля изображения.
6. Вывести на экран графики хроматических aberrаций (требование 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 – $\sin \omega = MU_{MAX}=0.01$;

Размер зрачка определяется высотой осевого луча на зрачке: $H_{MAX}=12.5$;

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	ТФ2	СТК19	ТФ4
9	ТФ2	ТФ8	СТК7
10	ТФ3	СТК19	ТФ4
11	ТФ3	ТФ8	СТК7
12	ТФ3	СТК19	ТФ4
13	ТФ4	СТК19	ТФ4
14	ТФ4	ТФ4	СТК19
15	ТФ4	СТК12	ТФ4
16	ТФ4	ТФ4	СТК12
17	ТФ10	СТК19	ТФ4
18	ТФ10	ТФ8	СТК12
19	ТФ10	СТК19	ТФ8
20	ТФ10	ТФ4	СТК12

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанной системы.
3. Таблицы и графики aberrаций осевого пучка для трех длин волн.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение сферохроматической aberrации.
2. Вид графиков сферической aberrации для основной и двух дополнительных длин волн при наличии и при отсутствии сферохроматической aberrации.
3. Зависимость сферохроматической aberrации третьего порядка от величины изображения.

Лабораторная работа № 1.14

Исследование хроматизма увеличения

Цель работы: изучение свойств хроматизма увеличения на примере зеркально-линзового объектива, являющегося прототипом объектива «Микронар».

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.

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.

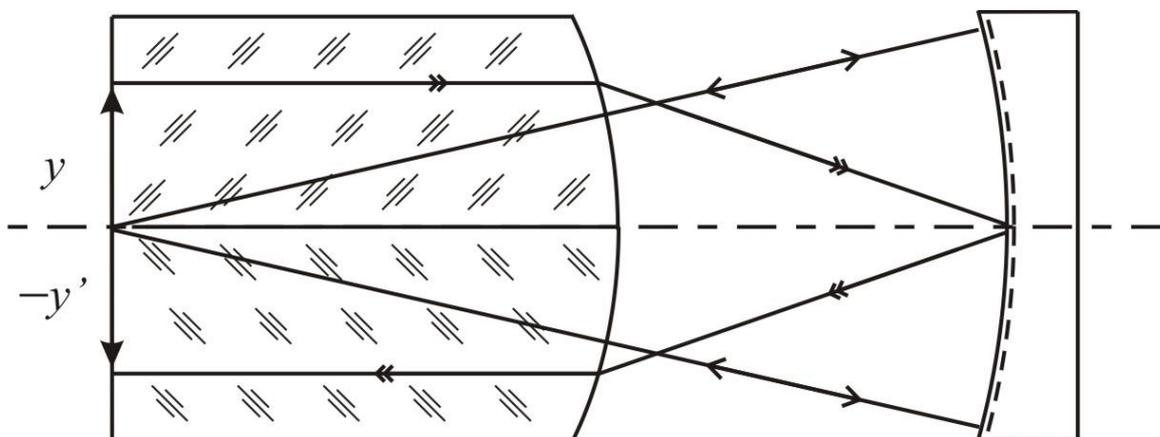


Рис. 1.14.1 Модифицированный объектив «Микронар»

Порядок выполнения:

1. Записать исходную систему в соответствии с индивидуальным заданием.
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 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 (требование 1 САРО) убедиться в отсутствии как монохроматических, так и хроматических aberrаций за исключением хроматизма увеличения. Вывести на экран и записать в отчет величины $y'_2 - y'_1 = Y'(2-1)$ – хроматизм увеличения для третьего и первого пучков лучей. Найти их соотношения и убедиться, что хроматизм увеличения линейно зависит от величины изображения Y' .
4. Вывести на экран графики геометрических aberrаций (требование 5 САРО). Нетрудно увидеть, что график хроматизма увеличения $Y'(2-1)$ также отображает линейную зависимость от величины изображения Y' . Обратить внимание на характерный вид графиков aberrаций для широких наклонных пучков дополнительных длин волн.
5. Вывести на экран пятна рассеяния (требование 28 САРО). Обратить 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 с соответственно пятна рассеяния для внеосевых точек имеют вид отрезков прямых линий с изменением цвета по их длине.
6. Выполнить расчет хода лучей (требование 1 САРО) и обратить внимание, что величина хроматизма увеличения практически не зависит от смещения плоскости установки $DS'Y$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета лучей:

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

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 параксиального луча следует задать $z_p=1000$ ($B_0=1$, $HB=1000$);

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 x и xx взять из таблицы в соответствии с индивидуальным заданием

№ вар.	x	xx
1	Ф1	ТК16
2	Ф1	ТК23
3	ТФ4	СТК19
4	ТФ4	СТК12
5	ТФ8	СТК7
6	ТФ8	СТК12
7	ТФ10	ТБФ9
8	ЛФ5	ТК23
9	ЛФ9	ТК23
10	ЛФ9	ФК24

№ вар.	x	xx
11	ТК16	Ф1
12	ТК23	ЛФ9
13	ТК23	Ф1
14	СТК7	ТФ8
15	СТК19	ТФ4
16	СТК12	ТФ8
17	СТК12	ТФ4
18	ТБФ9	ТФ10
19	ФК24	ЛФ9
20	ТК23	ЛФ5

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры системы.
3. Таблицы и графики aberrаций для внеосевых пучков: крайнего и «зоны» поля.
4. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

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

РАЗДЕЛ 2. Методы расчета оптических систем

В разделе рассмотрены различные методы расчета оптических систем, которые используются в современной практике проектирования оптики, включая методы Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова, а также приемы автоматизированной коррекции.

Лабораторная работа № 2.1

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 абберация и соблюдено условие изопланатизма. Однако из-за наличия значительного астигматизма безабберационное поле изображения весьма невелико.

На рис. 2.1.1 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 экранирующей поверхности.

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:

$$\tilde{d}_2 = a - \varepsilon,$$

где $\varepsilon = D_3/D$ – экранирование, являющееся недостатком большинства зеркальных и зеркально-линзовых систем, вызывающее снижение качества изображения, аналогично aberrациям.

Радиусы кривизны при вершине можно определить по формуле:

$$n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i = \frac{(n_{i+1} - n_i)}{r_i} h_i$$

Соответственно для первого и второго зеркал (при принятой в данном случае нумерации поверхностей) радиусы кривизны в масштабе фокусного расстояния:

$$r_2 = \frac{2}{\alpha_3}, \quad r_3 = \frac{2\varepsilon}{1 + \alpha_3}$$

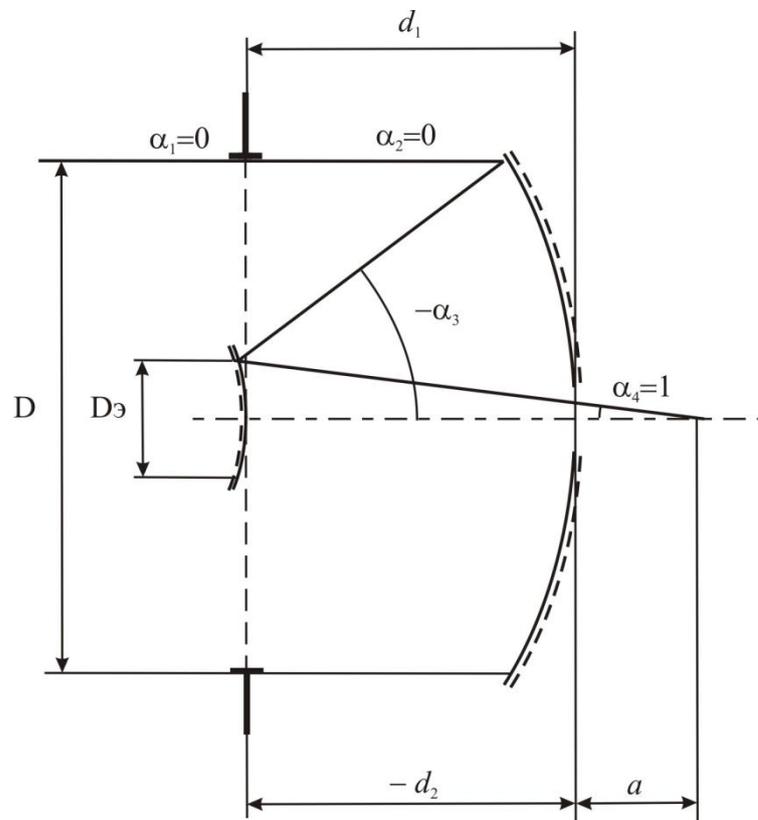


Рис. 2.1.1 Схема двухзеркального объектива

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 $d_2 = f \cdot \tilde{d}_2$, используя значения $\alpha_1 = 0$, $\alpha_4 = 1$ и найденное ранее значение α_3 . При записи

системы первая поверхность – фиктивная, разделяющая среды $n_1 = n_2 = 1$. Убедиться, что $s' = f' \cdot (a - \tilde{d}_2)$ (требование 1 САРО).

2. Перейти от углов первого параксиального луча к радиусам (требование 23 САРО). Записать сферические поверхности как асферики второго порядка, полагая для каждой поверхности $a_1 = -2r$, $a_2 = 1$ (см. лабораторную работу 1.3). Убедиться, что замена сферических поверхностей на асферические не привела к изменению характеристик системы (требование 1 САРО).
3. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), 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 для осевой точки предмета (требование 36.1 САРО). Если среднеквадратическое отклонение $w_{\text{СК}} > 0.01$, то подбирая высоту на зрачке Н МАХ, добиться $w_{\text{СК}} \approx 0.01$.
5. Исследовать распределение освещенности в дифракционном пятне, ознакомившись с таблицей, полученной с помощью требования 36.1 программы САРО: 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. Рассчитать световые диаметры поверхностей СВД (требование 21.2 САРО) и записать в столбце НПРЭ (диаметр непрозрачного экрана) для первой (фиктивной) поверхности СВД третьей поверхности. Повторить расчет распределения освещенности в дифракционном пятне (требование 36.1 САРО) и сравнить данные таблицы с таковыми без экранирования. Обратит внимание, что радиус R1 незначительно уменьшился, а энергия из диска Эри перешла в первое дифракционное кольцо.
7. Проверить влияние экранирования на ЧКХ, для чего определить ЧКХ два раза: с экранированием и без него. Для расчета ЧКХ (требование 20.1 программы САРО) необходимо заполнить таблицу:
Начальная частота 0,
Конечная частота $N = 1/K\lambda = 2H \text{ МАХ}/f'\lambda$,
шаг $N/10$.

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 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 $X = 7$.

Вывести на экран таблицу распределения энергии (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. Найти среднеквадратическое отклонение $w_{ск}$ для края поля (требование 36.1.2 САРО). Рассчитав aberrации, убедиться, что на краю поля качество изображения лимитируется астигматизмом (требование 1 САРО).
10. Ввести смещение плоскости установки $DS'Y = (Z'_m + Z'_s)/2$, где Z'_m, Z'_s – для края поля изображения. Убедиться, что на краю поля $w_{ск}$ улучшается (требование 36.1 и 2). В центре поля можно допустить предельное значение $w_{ск} = 0.074$, которое достигается при расфокусировке $DS'Y \approx -2K^2\lambda$. Определить размер поля изображения при такой дефокусировке путем подбора величины поля $MU MAX$, когда $w_{ск} = 0.074$.

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 $\sin\omega = MU MAX = 0.003$

Длина волны 0.0005

№ вар.	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
13	1500	4,5	0,05	0,3
14	800	5	0,1	0,3
15	1000	5	0,1	0,35
16	750	4	0,05	0,33
17	1200	5	0,05	0,33
18	1000	4	0,15	0,35
19	600	5	0,05	0,3
20	600	4	0,1	0,35

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры и схема рассчитанного объектива
3. Таблицы и графики aberrаций для осевой и одной внеосевой точек поля
4. Коэффициент концентрации энергии для заданного размера стороны пикселя с экранированием и без него
5. Найденный размер поля изображения при $w_{\text{ск}} \leq 0.074$
6. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Особенности схемы Ричи-Кретьена.
2. Как влияет центральное экранирование на размер диска Эри?
3. Влияние экранирования на распределение энергии в дифракционном пятне.
4. Влияние экранирования на концентрацию энергии на площадке заданного размера.
5. Влияние экранирования на частотно-контрастную характеристику.

Лабораторная работа № 2.2

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

Уравнение асферической поверхности второго порядка имеет вид:

$$x^2 + y^2 - 2r_0z + a_2z^2 = 0, \quad (2.2.1)$$

где r_0 – радиус при вершине поверхности, a_2 – коэффициент деформации второго порядка.

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. 2.2.1). 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.

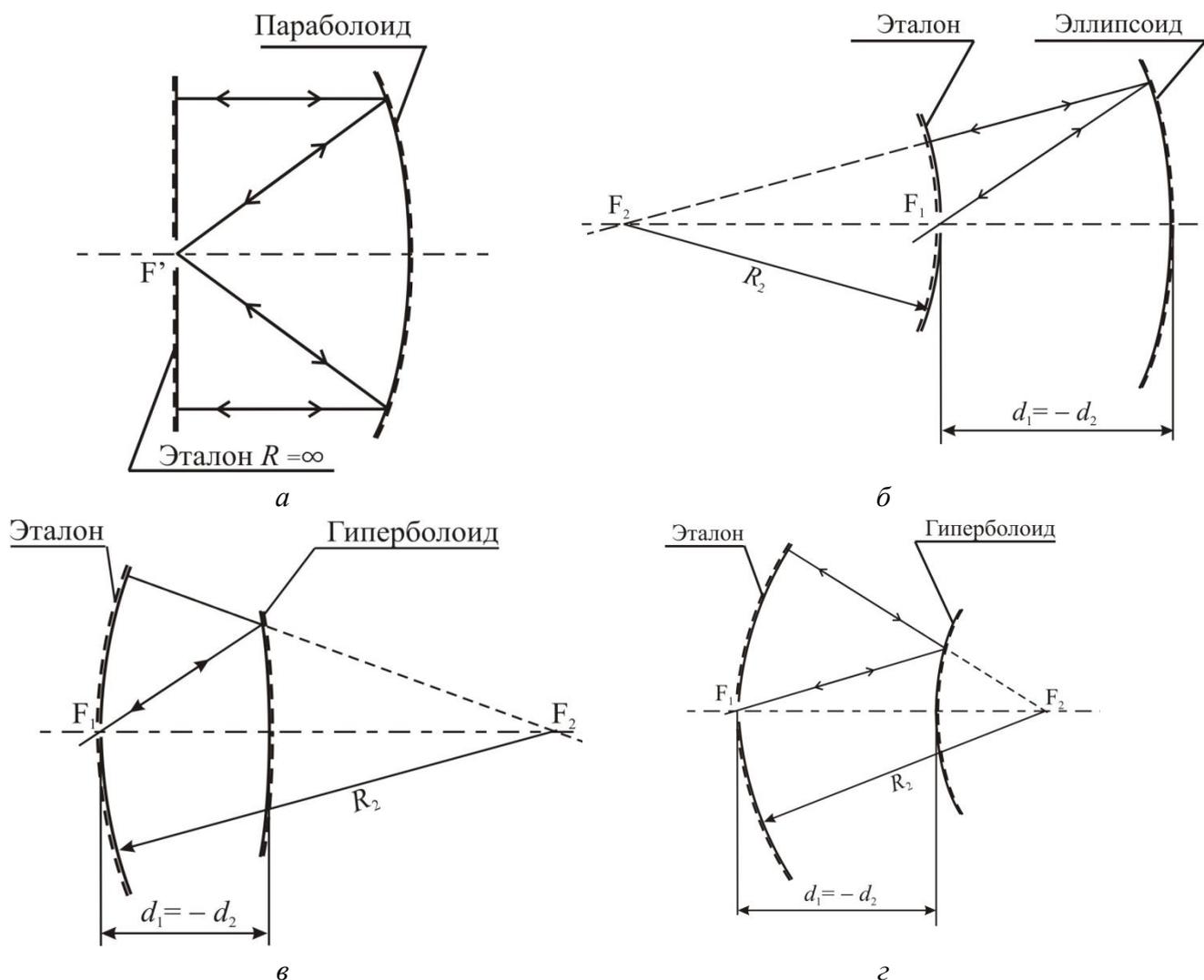


Рис. 2.2.1 Схемы контроля асферических зеркальных поверхностей второго порядка:

а – вогнутый параболоид, б – вогнутый эллипсоид,
в – вогнутый гиперболоид, г – выпуклый гиперболоид

Порядок выполнения работы:

1. Собрать контрольную схему для параболического зеркала (см. рис. 2.1.1а). Для этого записать параболическую зеркальную поверхность согласно индивидуальному варианту задания. Для параболоида геометрический фокус совпадает с оптическим. Убедиться, что аберрация точки на оси полностью отсутствуют. Добавить плоское эталонное зеркало; расстояние до зеркальной поверхности выбрать равным фокусному расстоянию зеркала. Обратит 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 aberrации точки на оси полностью отсутствовать.

2. 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 $HA = S_1 = -2r_0$, где S_1 – положение предмета относительно первой поверхности системы. В качестве коррекционного параметра использовать положение предмета HA относительно первой поверхности, корригируемая функция – волновая aberrация для крайнего луча. Убедиться, что для найденного положения предмета aberrации 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 $V = -1$, aberrации осевой точки отсутствуют.
5. Повторить расчеты контрольной схемы еще для двух случаев асферической поверхности второго порядка согласно индивидуальному варианту задания.

Варианты заданий

Числовая апертура в пространстве предметов для всех вариантов – $\sin \sigma = \text{MU MAX} = 0.25$.

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	$R_0 = -1500, a_2 = 0$	$R_0 = -700, a_2 = 0,7$	$R_0 = -700, a_2 = -1,2$	$R_0 = 700, a_2 = -1,2$

№ вар	Контролируемые поверхности			
	1. Параболоид	2. Эллипсоид	3. Вогнутый гиперболоид	4. Выпуклый гиперболоид
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	$R_0 = -550, a_2 = 0$	$R_0 = -800, a_2 = 0,6$	$R_0 = -750, a_2 = -2,1$	$R_0 = 750, a_2 = -2,1$
14	$R_0 = -1300, a_2 = 0$	$R_0 = -1300, a_2 = 0,4$	$R_0 = -500, a_2 = -0,7$	$R_0 = 500, a_2 = -0,7$
15	$R_0 = -1500, a_2 = 0$	$R_0 = -1700, a_2 = 0,5$	$R_0 = -500, a_2 = -1,4$	$R_0 = 500, a_2 = -1,4$
16	$R_0 = -650, a_2 = 0$	$R_0 = -600, a_2 = 0,4$	$R_0 = -1500, a_2 = -1,3$	$R_0 = 1500, a_2 = -1,3$
17	$R_0 = -750, a_2 = 0$	$R_0 = -1400, a_2 = 0,5$	$R_0 = -1000, a_2 = -0,6$	$R_0 = 1000, a_2 = -0,6$
18	$R_0 = -1600, a_2 = 0$	$R_0 = -2000, a_2 = 0,3$	$R_0 = -1000, a_2 = -1,2$	$R_0 = 1000, a_2 = -1,2$
19	$R_0 = -950, a_2 = 0$	$R_0 = -900, a_2 = 0,7$	$R_0 = -800, a_2 = -0,4$	$R_0 = 800, a_2 = -0,4$
20	$R_0 = -1700, a_2 = 0$	$R_0 = -550, a_2 = 0,5$	$R_0 = -800, a_2 = -1,4$	$R_0 = 800, a_2 = -1,4$

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры контрольных схем.
3. Таблицы волновых аберраций контрольных схем.
4. Ход лучей в контрольных схемах.
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Почему невозможно контролировать асферические поверхности высшего порядка с помощью метода безабберационных точек?
2. Вид интерференционной картины при наличии отступления асферической поверхности от расчетной формы.
3. Контроль асферических поверхностей второго порядка интерференционными методами.

Лабораторная работа № 2.3

Расчет объектива для считывания информации с кодового диска

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

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

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.

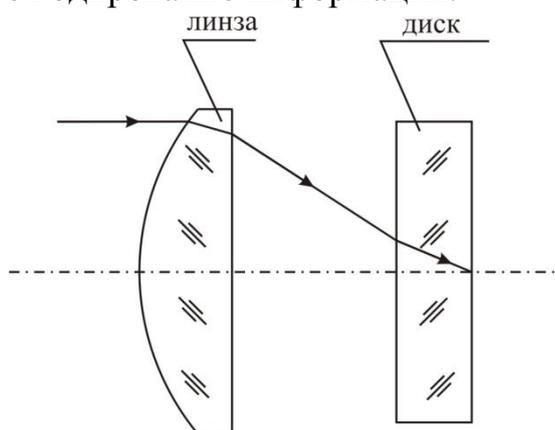


Рис. 2.3.1 Объектив для считывания информации

Порядок выполнения работы

1. Исходной оптической системой служит плосковыпуклая линза. Задать в программе линзу через углы первого параксиального луча $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$, $\alpha_3 = 1$. На этом этапе расчета в случае возникновения полного внутреннего отражения не обращать на это внимание. Перейти от углов α

к радиусам (требование 23.1 САРО). Обернуть линзу (пункт 3 меню), то есть выполнить инверсию. Толщину линзы подобрать таким образом, чтобы толщина по краю была бы минимальной без засечек, для чего посмотреть чертеж линзы (требование 450 САРО).

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 (требование 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.
3. Для устранения сферической aberrации необходимо асферизовать первую поверхность. Для этого записать уравнение сферической поверхности как асфе́рику второго порядка (см. лабораторную работу 1.3)

$$\left| \begin{array}{l} R \\ A \\ 0 \\ 0 \end{array} \right| \left| \begin{array}{l} ASF/A \\ 102 \\ 1 \\ 1 \\ -2r_1 \\ 1 \end{array} \right|$$

4. Выполнить коррекцию волновой сферической aberrации на краю зрачка $W(0)_1 = 0 \pm 0.03$. В качестве коррекционного параметра используем коэффициент деформации второго порядка. В рассматриваемом случае это ASF5.
5. После выполнения автоматизированной коррекции (требование 11 САРО) убедиться, что из-за наличия волновой сферической aberrации высших порядков качество изображения осевой точки неудовлетворительное (требование 36.1 САРО). Для устранения этих aberrаций введем деформацию третьего порядка. 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.
6. 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 переходим от марки стекла к показателю преломления (требование 27 САРО). 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 радиус поверхности при вершине, то есть коэффициент ASF4. За счет его изменения будет поддерживаться требуемое фокусное расстояние при изменении показателя преломления.

7. Определить радиус дифракционного пятна (радиус первого темного кольца) (требование 36 1 САРО). Зафиксировать эту величину в отчете.
8. 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 $A0 = 0$, $HA = f' = 4.5$ мм

Апертурная диафрагма на первой поверхности $B0 = 1$, $HB = 0$

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 полимерного материала с показателем преломления, близким к 1.5)

Толщина диска 1.5 мм.

№ вар.	Марка стекла
1	К8
2	БК10
3	ТК16
4	БФ16
5	ТК2
6	ТК14
7	ТК21
8	СТК3
9	СТК9
10	СТК12

№ вар.	Марка стекла
11	СТК19
12	БФ12
13	Ф6
14	ТФ1
15	ТФ5
16	Ф1
17	БК6
18	СТК12
19	К14
20	СТФ3

Содержание отчета

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры и схемы рассчитанных объективов
3. Таблицы и графики aberrаций рассчитанных объективов
4. Радиусы первых дифракционных колец для рассчитанных объективов
5. Выводы по проделанной работе.

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?
4. Чем может быть оправдано введение в систему асферической поверхности высшего порядка?

Лабораторная работа № 2.4

Исследование предельных возможностей одиночной линзы в инфракрасной области спектра

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

Задачи работы: расчет линзы; оценка aberrационных 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 [3]. 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:

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

Сохранить файл как исходную систему.

2. С помощью автоматизированной коррекции (требование 11 SAPO) исправить отступление от условия изопланатизма на краю зрачка η (функция 2). Коррекционный параметр – угол первого параксиального луча с осью A2. Выполнить расчет aberrаций (требование 1 SAPO) и убедиться, что величина ЭТА для всех четырех лучей достаточно мала, что свидетельствует об отсутствии высших порядков η .
3. Оптимальная коррекция волновой сферической aberrации 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 A_2 на $DS'Y$, а корригируемую функцию на w_l (функция 50) Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО) повторно. Получена оптимальная коррекция волновой aberrации.

4. Рассчитать число Штреля и среднеквадратическую волновую aberrацию (требование 36.1 САРО).

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

$$w_{ск} = a \cdot f'^x \cdot K^y \cdot \lambda^z \quad (2.4.1)$$

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

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 асферизуем вторую поверхность. Для чего перейдем от углов α к радиусам оптических поверхностей (требование 23.1 САРО), а затем запишем вторую поверхность как асферическую второго порядка первого типа (см. лабораторную работу № 1.3 «Связи волновой сферической aberrации с коэффициентами деформации зеркала»).

8. Убедиться, что параксиальные характеристики и aberrации не изменились (требование 1 САРО).

9. Убрать смещение плоскости установки $DS'Y$. Осуществить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционного параметра коэффициент деформации ASF_5 , а в качестве корригируемой функции волновую сферическую aberrацию на краю отверстия.

10. Вывести 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.

11. Заменяем вторую поверхность сферой, а первую поверхность запишем как асферику (см. лабораторную работу № 1.3 «Связи волновой сферической абберации с коэффициентами деформации зеркала»).
12. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве корригируемых функций волновую абберацию 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. Вывести на экран результаты расчета хода лучей, а затем получить $w_{ск}$ (требование 28 САРО). Зафиксировать результаты в отчете.
13. Изменяя H MAX, подобрать его значение, при котором $w_{ск} = 0.074$.
14. Повторить пункт 5 и получить формулу для одиночной линзы с эллипсоидальной поверхностью
- $$w_{ск} = b f'^l K^m \lambda^p. \quad (2.4.2)$$
15. Проверить формулу (2.4.2) для $f' = 200$, $K = 1$, $\lambda = 0.01$. Результат $w_{ск} = 0.0021$.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета $S_l = \infty$, ($A_0 = 0$, $HA = f'$);

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

Размер зрачка задается высотой луча на зрачке: $H \text{ MAX} = D/2$;

Размер предмета определяется $\sin \omega = MU \text{ MAX} = 0.02$;

Длины волн $\lambda_0 = 0.0106$ мм, $\lambda_1 = 0.014$ мм, $\lambda_2 = 0.008$ мм;

Материал линзы – германий.

№ вар.	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

№ вар.	Фокусное расстояние f'	Диафрагменное число K
11	450	3
12	350	5
13	500	5
14	450	4,5
15	600	5
16	150	3
17	150	4
18	250	3
19	250	4
20	350	4

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанных линз.
3. Полученные формулы для $w_{ск}$.
4. Таблицы и графики волновых aberrаций для точки на оси
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Отличия оптических постоянных германия в области 8 – 14 мкм от оптических бесцветных стекол (ГОСТ 3514-94) для видимой области спектра.
2. Оптические материалы для ИК-области спектра.
3. Оптические свойства германия для видимой области спектра.

Лабораторная работа № 2.5

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 [7] 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 [8] 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 требование 7 САРО, полагая $P=W=0$. Эти величины записываются в соответствующие ячейки:

Авоз	ДЛЯ ТРЕБ 7	
Р	0	
W	0	
С1		
С2		

2. В качестве конструктивных параметров системы следует записать D (в данном случае это толщина по краю линзы). Для положительной линзы

$D1=2$, для отрицательной линзы $D2=0,2 \cdot H \text{ MAX}$. Записать марки стекол из первой части таблицы 2.5.1.

1	R	ASF / A	D	N(0) / КОДЫ
2			D1	1
3			D2	МАРКА1
4				МАРКА2
				1

Записать световые диаметры, одинаковые для всех трех поверхностей: $СВД=2(H \text{ MAX})+2$. Задать начальные данные для расчета лучей, исходя из индивидуального задания.

3. Выполнить расчет склеенного объектива (требование 7 САРО). 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 .
4. Осуществить оптимальную коррекцию поперечной сферической aberrации, для чего выполнить одновременную коррекцию сферической aberrации и введение ПНУ:

НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ	ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
0	1	1 A		0.00001
0	22	1 A		0.00001
0	1	1 B		0.00001
0	24	1 -B		0.0001
0	1	1		
0	1	2		

Коррекционными параметрами служат $A2$, $A3$ и $DS'Y$.

5. Зафиксировать максимальную величину $Y'(0)$ из восьми лучей осевого пучка.
6. Рассчитать угловую максимальную сферическую aberrацию в пространстве предметов по формуле в радианах: $\sigma_1 = Y'(0)/f'$; в угловых секундах $\sigma_1 = 200000 \cdot Y'(0)/f'$. При использовании компонента в качестве объектива зрительной трубы, умножив полученную величину на видимое увеличение, легко получить значение угловой сферической aberrации 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 2.5.1. 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 $S_1 = \infty$ ($A_0 = 1$, $H_A = f'$);

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

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

Размер предмета определяется синусом полевого угла $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.01$;

Длины волн: e , C' , F' .

№ 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

№ вар	f'	К
11	120	3
12	150	3
13	100	5
14	160	4
15	130	3,5
16	140	4
17	170	4
18	160	5
19	100	3
20	180	5

Таблица 2.5.1 Комбинации стекол для объектива, склеенного из двух линз

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

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанных вариантов объектива.
3. Таблицы aberrаций осевого пучка.
4. Полученная формула.
5. Выводы по проделанной работе.

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?
3. Коррекционные возможности объектива, склеенного из двух линз.

Лабораторная работа № 2.6

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 абберрационных 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 абберрацию пятого порядка. Для расчета, в частности, объектива такого типа в программном комплексе САРО предусмотрено требование 7.

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

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.

Порядок выполнения работы:

1. В соответствии с индивидуальным заданием выполнить расчет исходной системы (требование 7 САРО). При получении двух решений выбрать вариант с меньшими значениями сферической абберрации. Выбрать вариант «система определяется АЛЬФА».
2. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционных параметров A_2 , A_3 , A_4 и D_2 . В качестве корригируемых функций использовать поперечную сферическую абберрацию для двух лучей $Y'(0)_1=0\pm 0.0001$ и $Y'(0)_3=0\pm 0.0001$, величину комы $\eta=0\pm 0,001$ и хроматическую разность на краю отверстия

$S'(2-1) = 0 \pm 0,0001$. Обеспечить вывод на экран aberrаций для 8 лучей осевого пучка (требование 1 САРО):

РАЗМЕР ПРЕДМЕТА

1

РАЗМЕР ЗРАЧКА

8

- Убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 21.
3. Добавить в качестве корригируемой функции поперечную сферическую aberrацию для луча 21, а в качестве коррекционного параметра смещение плоскости установки DS'Y. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО).
 4. Убедиться, что максимальное значение поперечной сферической aberrации имеет место для луча 24 (требование 1 САРО).
 5. Добавить в качестве корригируемой функции поперечную сферическую aberrацию для этого луча. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 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 комбинации марок стекол К8 – Ф2. Сравнить результаты. Обратит внимание на то, что угловая сферическая aberrация для данной комбинации значительно больше. Это обусловлено отличием показателей преломления стекол. Сравнить показатели преломления для комбинации марок стекол К8–Ф2 и основного варианта. Провести замену марок стекол показателями (требование 27 САРО).
 8. Выполнить сравнение угловых критериев с таковым, полученным для оптимальной коррекции объектива, склеенного из двух линз, выполненных из комбинации материалов БФ7 – ТФ5. Для чего выполнить пункты 1 – 7 лабораторной работы № 2.4 «Исследование сферической aberrаций пятого порядка объективов, склеенных из двух линз»).

9. Сравнить с полученные результаты. 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 – $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.05$

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

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

№ вар.	Марки стекол
11	ТФ10 ТК17
12	СТК3 ТФ10
13	СТК12 ТФ10
14	СТК12 ТФ5
15	ТК21 ТФ10
16	ТФ10 ТК17
17	ТФ10 ТБФ9
18	ТФ10 ТК21
19	ТФ3 СТК12
20	ТФ3 СТК15

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанных объективов.
3. Таблицы и графики аберраций для точки на оси рассчитанных объективов
5. Соотношение между остаточной сферической аберрацией для объектива, склеенного из двух линз, и объектива с воздушным промежутком.
6. Выводы по проделанной работе.

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 аберрации?
3. Параметры P , W и C объектива из двух линз с воздушным промежутком.

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:

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.

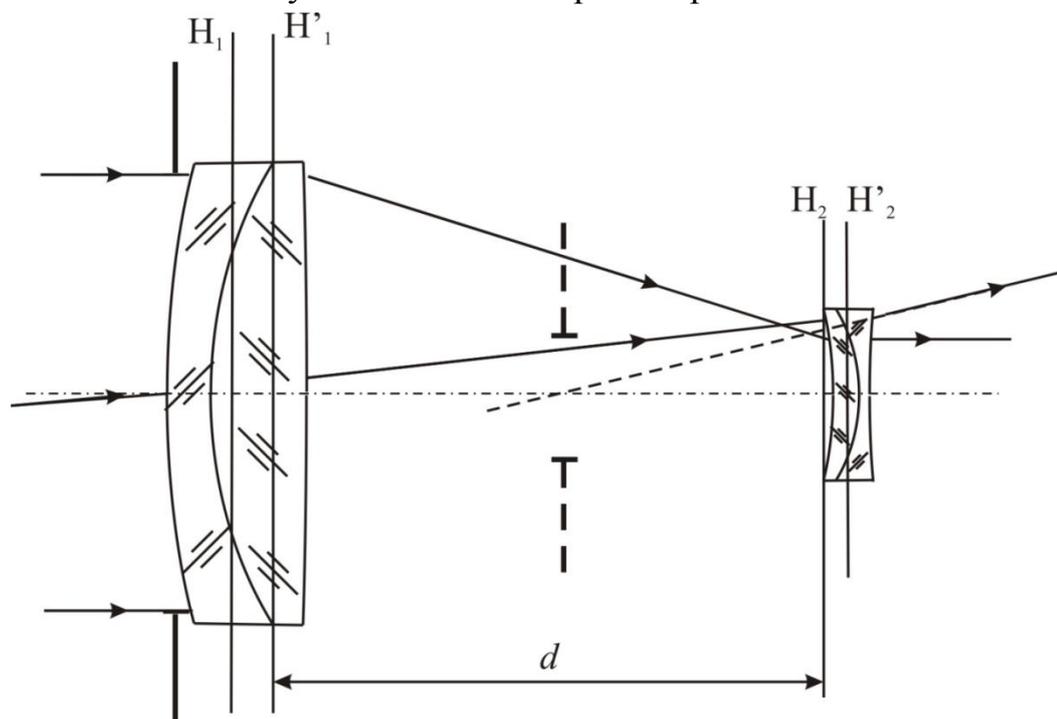


Рис. 2.7.1 Зрительная труба Галилея

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:

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

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 [7] 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 стекол 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 [8] 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	

Порядок выполнения работы

1. Выполнить габаритный расчет, определить фокусные расстояния компонентов f'_1 и f'_2 .
2. Рассчитать конструктивные параметры объектива, используя первую комбинацию стекол из табл.2.7.1 для $P_1 = 0$, $W_1 = 0.5$ (требование 7 САРО). Затем выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), 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 $\eta = 0.5(m/f')^2 \cdot W_1 = 0.25(m/f')^2$. При этом, выполняя расчет aberrаций (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).
3. Повторить эти действия для всей первой группы стекол и найти комбинацию с наименьшим значением поперечной сферической aberrации для 22 луча. Перейти от параксиальных углов к радиусам и записать систему в архив. Записать в отчет величину заднего отрезка объектива $S'A$.
4. Повторить расчет для окуляра трубки, используя вторую группу стекол. Расчет окуляра выполняется в обратном ходе лучей с $NA = f'_2$ и $N_{MAX} = D/2\Gamma$. При этом принять во внимание, что в таблице 2.7.1 указано расположение стекол в прямом ходе.
5. 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.

6. Присоединить окуляр к объективу (пункты 3 «трансформировать оптическую систему» и пункт 5 «добавление к системе из архива»). Воздушный промежуток, между объективом и окуляром принять равным сумме $(S'_F)_I + (S'_F)_{II}$. Изображение находится на бесконечности, и aberrации выдаются в угловой и диоптрийной мерах (для чего указать $S'Y = 1E9$). Получить aberrации трубки целиком (по требованию 1 SAPO, 8 лучей в осевом пучке и два внеосевых пучка).
7. Убедиться в 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 ($B_0=1$, $H_B=0$);

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

Размер предмета определяется синусом полевого угла

Длины волн: e , C' , F' .

№ вар.	Видимое увеличение Γ	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
11	1,5	18	0,03
12	1,5	16	0,03

№ вар.	Видимое увеличение Г	Диаметр входного зрачка D	Синус полевого угла MU MAX
13	1,7	18	0,025
14	1,7	20	0,02
15	1,8	20	0,022
16	1,8	22	0,03
17	2,2	20	0,03
18	2,2	22	0,025
19	2,5	20	0,03
20	2,8	25	0,025

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Характеристики объектива и окуляра из выбранных материалов.
3. Конструктивные параметры рассчитанной трубки.
4. Таблицы и графики аберраций рассчитанной системы.
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Практическое использование телескопической системы Галилея.
2. Аберрации трубки Галилея.
3. Положение зрачков в оптической системе трубки Галилея

Лабораторная работа № 2.8

Синтез и расчет четырехлинзового безабберационного объектива

Цель работы: расчет оптической системы четырехлинзового безабберационного объектива, 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 свойство: если сумма оптических сил компонентов $\sum \varphi_i \approx 0$, а сферическая абберация и отступление от изопланазии 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.

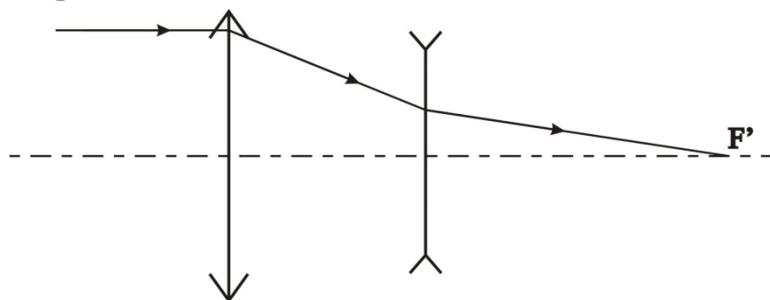


Рис. 2.8.1 Схема объектива

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) [3] и апланатической поверхностями. Первый компонент состоит из двух линз с

малым воздушным промежутком. Оптическая схема объектива представлена на рис. 2.8.2.

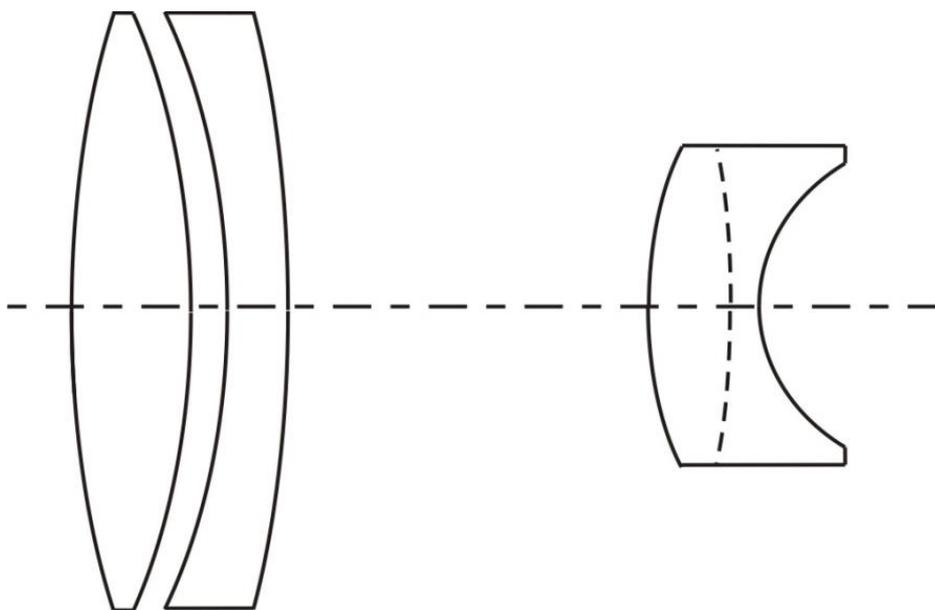


Рис. 2.8.2 Двухкомпонентный объектив с апланатическим компонентом

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. Найти показатель преломления n_6 (требование 27 САРО). Вернуться к заданию марок стекол.
2. В соответствии с индивидуальным заданием рассчитать первый компонент – двухлинзовая система с малым воздушным промежутком (требование 7 САРО): $d_1 = 2$ мм, $d_2 = 0.1$ мм, $d_3 = 2.5$ мм; $P = W = C = 0$, СВД = 22 (для 4 поверхностей). Полученная система задается через α_i .
3. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционных параметров А2, А3, А4. 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	

4. Задать один пучок и восемь лучей в пучке (см. лабораторную работу № 1.2 «Оптимальная коррекция поперечной сферической аберрации при наличии третьих и пятых ее порядков»). Убедиться, что максимальное значение поперечной сферической аберрации $Y'(0)_{22}$ имеет место для луча 22 (требование 1 САРО). Это означает наличие аберраций третьего и пятого порядков.
5. Сравнить этот результат с результатами, полученными в других вариантах, и выбрать оптимальный. По указанию преподавателя дальнейший расчет выполняется для оптимальной комбинации стекол.
6. Дополнить первый компонент апланатической линзой, то есть добавив $\alpha_5 = 1$, $\alpha_6 = 1$, $\alpha_7 = 1/n_6$. Марка стекла $N(0)_6$ (из таблицы).
7. Выполнить автоматизированную коррекцию астигматизма (требование 11 САРО), используя в качестве коррекционного параметра d_4 .
8. Убедиться, что $Z'_m = Z'_s \approx 0$, а сферическая аберрация и отступление от условия изопланатизма отсутствуют (требование 1 САРО). 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 (требование 1 САРО), 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 автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО).

11. Выполнить расчет дифракционной частотно-контрастной характеристики (ДЧКХ) (требование 20.1 САРО), для чего задать:

Начальная частота 0

Конечная частота 50

Шаг 10

Для дополнительных длин волн коэффициенты передачи контраста малы. Следует осуществить оптимальную коррекцию хроматических aberrаций.

12. Добавить к волновой сферической aberrации волновые хроматические aberrации, отступление от условия изопланатизма, хроматизм увеличения и меридиональную составляющую астигматизма:

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

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

13. Выполнить оценку качества изображения, используя ДЧКХ для чего повторить п.11.
14. Для повышения точность расчета полихроматической ДЧКХ, выполнить ее расчет (требование 40 САРО), 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.
15. Сравнить результаты для различных вариантов.

Варианты заданий:

Начальные данные для расчета хода лучей объектива:

Положение предмета на бесконечности $S_l = \infty$, ($A0=0$, $HA=f' = 100$);

Апертурная диафрагма на первой поверхности ($B0 = 1$, $HB = 0$);

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

Размер предмета определяется $\sin \omega = MU_{MAX} = 0.075$;

Длины волн e, C', F'

Начальные данные для расчета хода лучей *первого компонента* объектива:

Положение предмета на бесконечности ($A_0=0$, $H_A=f'_1 = f'/n_6 = 100/n_6$)

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

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

Размер предмета определяется $MU_{MAX} = \sin \omega = 0.075$

№ вар.	n_2	n_4	n_6	n_7
1	K8	TФ1	СТК19	TФ4
2	K8	TФ10	TK16	Ф2
3	K8	TФ3	СТК12	TФ8
4	СТК19	TФ10	СТК7	TФ8
5	TK14	TФ10	TБФ9	TФ10
6	TK14	TФ1	TK23	ЛФ9
7	БФ11	TФ10	ФК14	ЛФ9
8	ОФ1	TФ10	ОК1	K19
9	K8	TФ1	TK16	Ф2
10	K8	TФ10	СТК12	TФ8
11	K8	TФ3	СТК19	TФ4
12	СТК19	TФ10	TK16	Ф2
13	TK14	TФ10	СТК12	TФ8
14	TK14	TФ1	СТК7	TФ8
15	БФ11	TФ10	TБФ9	TФ10
16	ОФ1	TФ10	TK23	ЛФ9
17	K8	TФ1	ФК14	ЛФ9
18	K8	TФ3	ОК1	K19
19	TK14	TФ1	TБФ9	TФ10
20	СТК19	TФ10	TK23	ЛФ9

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
3. Чертеж рассчитанного объектива
4. Таблицы и графики aberrаций рассчитанного объектива
5. Графики ЧКХ рассчитанного объектива
6. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. В каких системах может найти применение объектив такого типа?
2. Апланатические поверхности и их свойства.
3. Хроматический радиус.
4. Условие коррекции кривизны изображения.

Лабораторная работа № 2.9

Синтез и расчет объектива Петцваля с линзой Смита

Цель работы: Расчет светосильного объектива

Задачи работы: с помощью методов Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова, а также средств компьютерного моделирования синтезировать светосильный объектив на основе объектива Петцваля с линзой Смита и исследовать его возможности.

Краткие теоретические сведения:

Классический объектив Петцваля состоит из двух двухлинзовых тонких компонентов, разделенных воздушным промежутком, соизмеримым с фокусным расстоянием объектива.

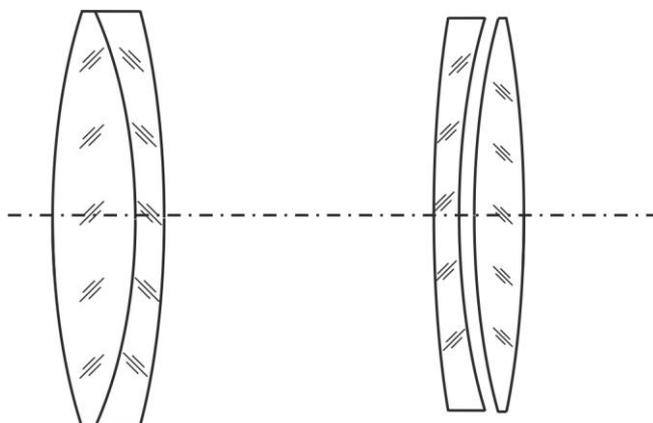


Рис. 2.9.1 Объектив Петцваля

Это первый объектив, полученный путем вычислений (1840 г.), а не с помощью опытных проб в оптической мастерской [7]. В объективе при $K=3-1.9$ исправлены сферическая aberrация, кома, астигматизм, хроматические aberrации. Недостатком, ограничивающим поле изображения, является кривизна поверхности изображения. В настоящей лабораторной работе устранение последней достигается с помощью линзы Смита, устанавливаемой вблизи плоскости изображения [9].

Первый компонент объектива в данной лабораторной работе выполняется из двух линз с малым воздушным промежутком, поскольку такая система имеет лучшую коррекцию сферической aberrации 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 аберрации, выполнив пункты 1 – 2 лабораторной работы № 2.6 «Расчет и исследование объектива из двух линз с воздушным промежутком».
2. Для исправления астигматизма дополнить первый компонент конфокальной поверхностью (поверхностью, concentричной осевым лучам) [10]. Расположить эту поверхность на некотором расстоянии, соизмеримым с фокусным расстоянием компонента. Для этого записать $\alpha_5=1$, $\alpha_6=1$, $d_4 \approx 50$, марка стекла в соответствии с индивидуальным заданием.
3. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО), в качестве коррекционного параметра принять D4, а качестве корригируемой функции $Z'_m - Z'_s$, т.е. функцию 7 для главного луча (пучок 1, луч 0 САРО).
4. Проверить результаты (требование 1 САРО). Сферическая аберрация и отступление от условия изопланатизма должны быть по-прежнему устранены.
5. Перейти от α к радиусам (требование 23 САРО). Обратить внимание на фокусное расстояние системы. Дополнить систему шестой поверхностью – плоскостью, разделяющей стекло и воздух $r_6 = \infty$. Принять $d_5=8$. Шестая поверхность должна быть изопланатической, т.е. concentричной главному лучу. При этом отступление от изопланатизма η и астигматизм $Z'_m - Z'_s$ объектива остаются практически 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 аберрации 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). Обратить внимание на фокусное расстояние системы. Дополнить объектив Петцваля линзой Смита [9], 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 . Обратить внимание на фокусное расстояние системы. 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
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				5	.1

13. Оценить качество изображения по дифракционной ЧКХ (требование 20 САРО): начальная частота 0; конечная частота 70; шаг 10.

Варианты заданий

Начальные данные для расчета хода лучей

Положение предмета – на бесконечности $A_0 = 0$, $HA = f' = 100$

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

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 стекла
1	ТК16 – Ф1
2	СТК19 – ТФ4
3	СТК12 – ТФ8
4	СТК7 – ТФ8
5	ТБФ9 – ТФ10
6	ТК23–ЛФ9
7	ФК14 – ЛФ9
8	ОК1 – К19
9	Ф1–ТК16
10	ТК23 – БФ19

№ вар.	Марки стекла
11	ТФ10 – ТБФ9
12	ТК13 – Ф6
13	ТК14 – Ф6
14	Ф1 – ТК16
15	СТК12– ТФ4
16	ТК17 – БФ12
17	ТФ8 –СТК7
18	ЛФ9 –ТК23
19	К19– ОК1
20	БФ19– ТК23

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанного объектива
3. Таблицы и графики aberrаций
4. Графики ЧКХ
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Схема объектива Петцваля и ее aberrационная коррекция
2. Линза Смита и ее назначение
3. 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 аберрации.

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 № 2.5 «Исследование сферических 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 призмной системы и окуляра.

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

Порядок выполнения:

1. Задать монокуляр бинокля (довоенный 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

Положение предмета определяется: $A_0 = 0$, $H_A = 1$, положение входного зрачка: $B_0 = 1$, $H_B = 0$. 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 выводить в угловой и диоптрийной мерах, для чего необходимо записать $DS'Y = 1E9$.

2. Рассчитать aberrации полученной системы (требование 1 CAPO). Изменяя воздушный промежуток $D5$, то есть перефокусируя окуляр, добиться исправления сферической aberrации на краю отверстия $C'(0)_1 \approx 0$.
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. Получить осевые aberrации объектива (требование 1 CAPO).

4. Вычислить основные параметры объектива:

хроматический параметр:

$$C = S'_{0(2-1)}/f', \quad (2.10.1)$$

где $S'_{0(2-1)}$ – параксиальный хроматизм положения;

параметр P :

$$P = -2\Delta s'_{III} \frac{f'}{m^2}, \quad (2.10.2)$$

где m – высота на зрачке ($m = H \text{ MAX}$), $\Delta s'_{III}$ – продольная сферическая aberrация третьего порядка:

$$\Delta s'_{III} = 4\Delta s'_3 - \Delta s'_1, \quad (2.10.3)$$

где $\Delta s'_3$, $\Delta s'_1$ – продольная сферическая aberrация на зоне зрачка и на краю зрачка соответственно;

параметр W :

$$W = -2\eta_{III} \left(\frac{f'}{m} \right)^2, \quad (2.10.4)$$

где η_{III} – неизопланатизм третьего порядка:

$$\eta_{III} = 4\eta_3 - \eta_1, \quad (2.10.5)$$

где η_I , η_{III} – значение неизопланатизма в относительной мере на зоне и на краю зрачка соответственно;

параметр P_0 вычисляется по формуле:

$$P_0 = P - 0,85(W - 0,14)^2. \quad (2.10.6)$$

5. Используя рассчитанные значения параметров P_0 и C , по таблицам [8] подобрать возможные комбинации стекол. Рассчитать варианты объектива с требуемыми параметрами P и W (требование 7 САРО). Найти пару стекол, обладающую наименьшим значением сферической aberrации пятого порядка.
6. В исходной системе монокуляра удалить объектив и вставить рассчитанный объектив. Выполнить автоматизированную коррекцию (требование 11 САРО) используя в качестве коррекционного параметра расстояние D5, получить диоптрийность параксиального луча равной нулю (функция 10, пучок 0, луч 0). Рассчитать aberrации скорректированной системы (требование 1 САРО).
7. Осуществить оптимальную коррекцию сферической aberrации и неизопланатизма используя в качестве коррекционных параметров радиусы объектива и D5. Набор функций:

НПУЧ	НЛУЧ	НОМЕРА ФУНКЦИЙ		ТРЕБ.ЗНАЧ.	ДОПУСКИ
0	1	1	A		0.000005
0	22	1	A		0.000005
0	1	1	B		0.000005
0	24	1	-B		0.0001
0	1	1			0.1
0	1	2		-8	0.01
0	0	10			
0	0	11			

Обратить внимание, что допуски на сферическую aberrацию в телескопической системе задаются в радианной мере (не в секундах).

8. Вывести на экран таблицы aberrаций (требование 1 САРО), задав один пучок и восемь лучей в пучке. Сравнить максимальное значение сферической aberrации с таковым в исходной системе.

Содержание отчета:

1. Исходные данные оптической системы.
2. Конструктивные параметры рассчитанной системы.
3. Оптическая схема рассчитанной системы.
4. Таблицы и графики aberrаций рассчитанной системы.
5. Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы:

1. Геометрические aberrации телескопических систем.
2. Какова допустимая величина поперечной (угловой) сферической aberrации за окуляром?
3. Какова допустимая величина хроматических aberrаций для осевой точки предмета?

Литература

1. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М., Мир, 1964. 295 с.
2. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И., Теория оптических систем. – СПб., Лань, Изд. 4-е, стер., 448 стр.
3. Грамматин А.П. Методы синтеза оптических систем. Учебное пособие. СПб., СПб ГИТМО (ТУ), 2002.
4. Грамматин А.П., Рыбаков И.Р. Объектив для инфракрасного микроскопа из двух концентрических зеркал //ОМП, №10, 1969, с.77
5. Грамматин А.П., Лустберг Э.А. Зеркальный репродукционный объектив «Авангард» // ОМП, №6, 1975, с. 35.
6. Бесцветное оптическое стекло. Каталог. М., 1990
7. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1937.
8. Трубка С.В. Расчет двухлинзовых склеенных объективов. Л., Машиностроение, 1984
9. Вычислительная оптика. Справочник под общ.ред. М.М. Русинова. Изд.3-е. М., Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009
10. 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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Работа с программным комплексом САРО (Системой Автоматизированного Расчета Оптики)

Начало работы с программой

При запуске программы необходимо ввести «ВАШ ЛИЧНЫЙ АРХИВ»

Основное меню программы содержит 8 пунктов

ЧТО ВАМ УГОДНО :
1. ИЗМЕНИТЬ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ
2. ВЫПОЛНИТЬ ТРЕБОВАНИЕ
3. ТРАНСФОРМИРОВАТЬ ОПТ. СИСТЕМУ
4. ЗАПОМНИТЬ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ
5. ПРОЧИТАТЬ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ
6. ПЕРЕЙТИ К Н О В О М У А Р Х И В У
7. ----- STOP -----
8. ОЗНАКОМИТЬСЯ С ИНСТРУКЦИЕЙ
?:

При входе в программу загружается новая оптическая система, для создания новой оптической системы после работы с архивом набрать 5.0 (создать новую систему).

Пункт 2 – Выполнить требования: возможные варианты

ТРЕБОВАНИЯ
1. РАСЧЕТ ГЕОМЕТР. И ВОЛН. АБЕРРАЦИЙ
11. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ КОРРЕКЦИЯ
111. ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ И ДЕЦЕНТРИРОВКА
71. ВОЗВРАТ К ИСХОДНОЙ СИСТЕМЕ
21. РАСЧЕТ ВЫСОТ, СТРЕЛОК И СВД
22. КОЭФ. ВИНЬЕТИРОВАНИЯ (ЭКРАНИРОВАНИЯ)
23. R-->A; A-->R; АБЕР. 3 ПОР; F, F', SF'; ВЫПУСК
27. ВЫЧИСЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
33. ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АСФЕРИК/КИНОФОРМОВ
24. РАСЧЕТ МАССЫ ЛИНЗ
36. РАСПРЕД. ОСВЕЩЕННОСТИ/КОНЦЕНТР. ЭНЕРГИИ
20. РАСЧЕТ ИЛИ ГРАФИКИ ЧКХ
28. ПЯТНО РАССЕЯНИЯ
5. ГРАФИКИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ АБЕРРАЦИЙ
51. ГРАФИКИ ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ
450. ЧЕРТЕЖ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
454. ТРЕБОВАНИЕ 450 + ТРАССИРОВКА ЛУЧЕЙ
457. ЧЕРТЕЖ БЛИКОВ I ИЛИ II ПОРЯДКА
7. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ОПТ. СИСТЕМЫ ПО P, W, C
14. ИЗМЕНЕНИЯ ОПТ. СИСТЕМЫ ОТ T°С И P АТМ.
16. АППРОКСИМАЦИЯ ДАННЫХ АСФЕРИКОЙ II ТИПА
4. ПЕРЕХОД К РАДИУСАМ ГОСТа.
?: _

Кроме того, есть требования, не отображенные в меню в явном виде:

Требование 40 – расчет полихроматической дифракционной частотно-контрастной характеристики (для большого числа длин волн диапазона – до 50), расчет вторичного спектра, фокусировочных кривых.

Для расчета характеристик необходимо в таблице описания длин волн задать:

- 0 – основная длина волны
- 1 – начальная длина волны
- 2 – конечная длина волны
- 3 – начальная длина волны + шаг для расчета

Редактирование данных системы

Перемещение по таблице редактирования данных системы осуществляется нажатием соответствующих цифр на малой цифровой клавиатуре.

Вид окна редактирования конструктивных параметров:

	R	ASF / A	D	N(0) / КОДЫ	N(1)	N(2)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

При выборе пункта 1 основного меню «Изменить оптическую систему» это вид стартового экрана. Для перемещения в эту часть таблицы после работы с остальными частями необходимо нажать 7 на малой клавиатуре.

Для редактирования данных о положении предмета, размере предмета, величине апертуры, положении зрачка (положении апертурной диафрагмы), длинах волн, положении плоскости установки относительно плоскости Гаусса, необходимо нажать 9 на малой клавиатуре.

Для требования 7 (расчет простых линзовых компонентов по основным параметрам **P**, **W**, **C**) необходимо заполнить правый нижний угол таблицы, для чего нажать $\boxed{9}$ и 4 раза $\boxed{2}$ на малой клавиатуре:

	СВД	НПРЭ						
80								
81								
82								
83								
84								
85								
86								
87								
88								
89								
90								
91								
92								
93								
94								
95								
96								
97								

Для расчетов частотно-контрастной характеристики (требование 20) и расчета функции концентрации энергии (требование 36) необходимо заполнить соответствующие разделы в таблице:

	СВД	НПРЭ						
22			0					
23			14					
24			4					
25			13					
26			3					
27			12					
28			2					
29			11					
30			1					
31			— ДЛЯ 20 ТРЕБОВАНИЯ			— ДЛЯ 36 ТРЕБОВАНИЯ		
32			НАЧ. ЧАСТОТА =			НОМЕР ПУЧКА = ;		
33			КОН. ЧАСТОТА =			УГЛ' = ; ХУГЛ' =		
34			ШАГ =			ПОЛУРАЗМЕР Y = ;		
35						ПОЛУРАЗМЕР X = ;		
36						ЧИСЛО УЗЛОВ СЕТКИ ПО Y = ;		
37						ЧИСЛО УЗЛОВ СЕТКИ ПО X = ;		
38								
39			СДВИГИ / ПОВОРОТЫ			ГРАНИЦЫ		
40			ПОВЕРХНОСТЕЙ			ПРЕДМЕТА, ЗНАЧКА		
41			(DF1)			(DF10)		
42								
43								
44								

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЗАДАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

АВ- УГОЛ ПЕРВОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО ЛУЧА С ОСЬЮ В ПРОСТРАНСТВЕ ПРЕДМЕТОВ.

ВВ- ТО ЖЕ ДЛЯ ВТОРОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО ЛУЧА.

НА- ВЫСОТА ПЕРВОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО ЛУЧА НА ПЕРВОЙ ПОВЕРХ-ТИ

НВ- ТО ЖЕ ДЛЯ ВТОРОГО ПАРАКСИАЛЬНОГО ЛУЧА.

ВЕЛИЧИНЫ АВ,НА ОПРЕДЕЛЯЮТ ПОЛОЖЕНИЕ ПРЕДМЕТА : $S_0 = NA/AB$.

ЕСЛИ ПРЕДМЕТ РАСПОЛОЖЕН НА БЕСКОНЕЧНОСТИ : $AB=0$, НА- ПРОИЗВОЛЬНО, НО НЕ 0.

ВЕЛИЧИНЫ ВВ,НВ ОПРЕДЕЛЯЮТ ПОЛОЖЕНИЕ ВХОДНОГО ЗРАЧКА:

$Z_0 = NB/BB$. ЕСЛИ ВХОДНОЙ ЗРАЧОК РАСПОЛОЖЕН НА БЕСКОНЕЧНОСТИ

$BB=0$,НВ- ПРОИЗВОЛЬНО, НО НЕ 0.

----- РАЗМЕР ПРЕДМЕТА : -----

Y MAX(MU MAX)- ВЕЛИЧИНА ПРЕДМЕТА(СИНОС ПОЛЕВОГО УГЛА В ПРОСТРАНСТВЕ ПРЕДМЕТОВ).

----- РАЗМЕР ВХОДНОГО ЗРАЧКА : -----

H MAX(MU MAX)- РАДИУС ВХОДНОГО ЗРАЧКА(СИНОС АПЕРТУРНОГО УГЛА В ПРОСТРАНСТВЕ ПРЕДМЕТОВ).

ВМЕСТО ЗНАЧЕНИЯ СИНОСА МОЖНО ЗАДАТЬ ЕГО ОБОЗНАЧЕНИЕ И

УГОЛ В ГРАДУСНОЙ МЕРЕ. НАПРИМЕР, SIN 15 30 ОБОЗНАЧАЕТ $SIN(15'30'')$, SIN 30 0 0 ОБОЗНАЧАЕТ $SIN(30 \text{ ГРАДУСОВ})$.

ND- ЧИСЛО ПОВЕРХНОСТЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПЕРЕД АПЕРТУРНОЙ ДИАФРАГМОЙ.

DD- РАССТОЯНИЕ АПЕРТУРНОЙ ДИАФРАГМЫ ОТ ПРЕДЫДУЩЕЙ ПОВ-ТИ.

MD- ВЫСОТА НА ДИАФРАГМЕ (ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ТОЛЬКО В ТРЕБ. 22).

DS'Y-СМЕЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ УСТАНОВКИ ОТНОСИТЕЛЬНО ПЛ. ГАУССА

S'Y- РАССТОЯНИЕ ПЛОСКОСТИ УСТАНОВКИ ОТ ПОСЛЕДНЕЙ ПОВ-ТИ.

ЕСЛИ ПАРАКСИАЛЬНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ НАХОДИТСЯ НА БЕСКОНЕЧНОСТИ, СЛЕДУЕТ ЗАПИСАТЬ $S'Y=1E9$ ИЛИ $DS'Y=1E9$.

R'Y-РАДИУС КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ЕСЛИ ПОСЛЕДНЕЕ РАСПОЛАГАЕТСЯ НА СФЕРЕ.

RY- РАДИУС КРИВИЗНЫ ПОВЕРХНОСТИ ПРЕДМЕТА,ЕСЛИ ОН НЕПЛОСКИЙ

--- Д Л И Н Ы В О Л Н М О Г У Т Б Ы Т Ъ З А Д А Н Ы :

ЧИСЛЕННО ДЛЯ ЛЮБЫХ ДЛИН ВОЛН,

СИМВОЛЬНО (ПОСЛЕ 0.000) ДЛЯ ВОЛН i,h,g,F',F,e,d,D,C',C,r.

КОЭФ. ПРОПУСК.- КОЭФФИЦИЕНТЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ. ЗАПОЛНЯЮТСЯ ТОЛЬКО ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПОЛИХРОМАТИЧЕСКОЙ ЧКХ.

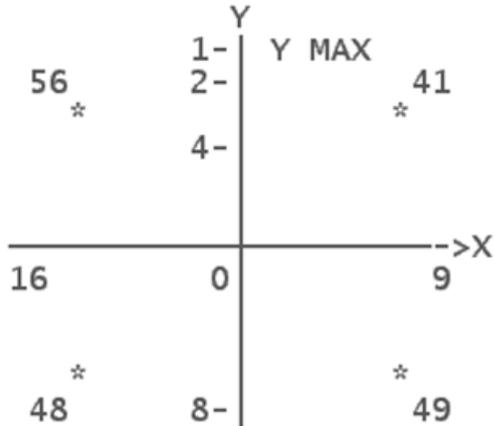
Условные номера пучков и лучей:

УСЛОВНЫЕ НОМЕРА ПУЧКОВ И ЛУЧЕЙ.

В РАСЧЕТАХ ИСПОЛЬЗУЕТСЯ
СТАНДАРТНОЕ РАЗБИЕНИЕ КРУГЛОГО ПРЕДМЕТА (ЗРАЧКА).

НА СХЕМЕ ПОКАЗАНА НУМЕРАЦИЯ ПУЧКОВ (ЛУЧЕЙ).

ТАК, НОМЕР 1 СООТВЕТСТВУЕТ Y_{MAX} ,
2 --> $Y_{MAX} \cdot \sqrt{3/4}$
3 --> $Y_{MAX} \cdot \sqrt{2/4}$
4 --> $Y_{MAX} \cdot \sqrt{1/4}$
5 --> $-Y_{MAX} \cdot \sqrt{1/4}$, ...
8 --> $-Y_{MAX}$



АНАЛОГИЧНО РАЗБИТА ЧЕРЕЗ
КОРЕНЬ КВАДРАТНЫЙ ИЗ 1/4
ОСЬ X (НОМЕРА 9 - 16)

И
ДЛЯ НЕЦЕНТРИРОВАННЫХ СИСТЕМ
ДИАГОНАЛИ :

(41 - 48) и (49 - 56)
ДОПУСКАЕТСЯ РАЗБИЕНИЕ ПРЕДМЕТА
(ЗРАЧКА) ЧЕРЕЗ $\sqrt{1/8}$. ДЛЯ ПОЛУ-
ЧЕНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ НУМЕРАЦИИ
К БОЛЬШЕМУ ИЗ БЛИЖАЙШИХ СТАН-
ДАРТНЫХ УСЛОВНЫХ НОМЕРОВ ДОБАВ-
ЛЯЕТСЯ 10 (ДЛЯ ПУЧКОВ) И 20 (ДЛЯ
ЛУЧЕЙ).

ТАК, НАПРИМЕР, УСЛОВНЫЙ НОМЕР ДЛЯ $\sqrt{5/8}$ БУДЕТ 12 (ДЛЯ ПУЧКОВ)
И 22 (ДЛЯ ЛУЧЕЙ).

Условные номера корригируемых функций:

ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ КОРРЕКЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО
ТРЕБОВАНИЮ 11 НЕОБХОДИМО ЗАДАТЬ КОНКРЕТНЫЕ ЛУЧИ КОНКРЕТНЫХ
ПУЧКОВ И НА КАЖДОМ ИЗ НИХ ОПРЕДЕЛИТЬ ФУНКЦИИ, КОТОРЫЕ
ТРЕБУЕТСЯ КОРРИГИРОВАТЬ НА ДАННОМ ЛУЧЕ.

ПРИ ЗАПИСИ ТРЕБУЕМЫХ КОРРИГИРУЕМЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ КРАТКОСТИ
ИСПОЛЬЗУЕТСЯ ИХ УСЛОВНАЯ НУМЕРАЦИЯ.

1. ДЛЯ ПАРАКСИАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ:

АБЕРРАЦИИ III-ГО ПОРЯДКА И ПАРАКСИАЛЬНЫЕ ФУНКЦИИ					
1	-->	$Y'(0)$	2	-->	КОМА
3	-->	$Z'M-Z'S$	4	-->	$Z'P$
5	-->	DIS	6	-->	$S'0(2-1)$
7	-->	$S'(3-2)$	8	-->	$Y'(2-1)$
9	-->	$Z'-Z'0$	10	-->	$S'0$
11	-->	F'	12	-->	$V0$
13	-->	$Z'0$	14	-->	$1/Z'0$

2. ДЛ Я РЕАЛЬНЫХ ЛУЧЕЙ:

 МОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ
 1 --> ДЛ Я ОСЕВ ОГО ЛУЧА - $Y'(0)$ --> ДЛ Я ГЛАВ. ЛУЧА - $DU'G$
 2 --> " " " - ЭТА --> " " - $(Z'G-Z'0)$
 3 --> ДЛ Я ВНЕОСЕВЫХ ЛУЧЕЙ - DX'
 4 --> " " " - DY'
 5 --> ДЛ Я ГЛАВНОГО ЛУЧА - $Z'M$
 6 --> " " " - $Z'S$
 7 --> " " " - $Z'M-Z'S$
 И ДЛ Я НЕЦЕНТРИРОВАННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
 34 --> $\sqrt{(DX')^2+(DY')^2}$

ДЛ Я ВОЛНОВЫХ АБЕРРАЦИЙ:
 50 --> $w(0)$ 51 --> $w(1)$
 52 --> $w(2)$ 53 --> $w(3)$
 61 --> $w(1-0)$
 62 --> $w(2-0)$
 63 --> $w(3-0)$

ХРОМАТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ:
 10 --> $Y'(1-0)$ (ДЛ Я САГ. ЛУЧА - $X'(1-0)$)
 20 --> $Y'(2-0)$ (" " " - " - $X'(2-0)$)
 30 --> $Y'(3-0)$ (" " " - " - $X'(3-0)$)
 21 --> $Y'(2-1)$ (" " " - " - $X'(2-1)$)
 31 --> $Y'(3-1)$ (" " " - " - $X'(3-1)$)
 32 --> $Y'(3-2)$ (" " " - " - $X'(3-2)$)
 41 --> $DY'(1)$ (" " " - " - $DX'(1)$)
 42 --> $DY'(2)$ (" " " - " - $DX'(2)$)
 43 --> $DY'(3)$ (" " " - " - $DX'(3)$)

**Александр Пантелеймонович
ГРАММАТИН (06.01.1931 – 27.08.2014)**



Профессор **Александр Пантелеймонович Грамматин** – один из лучших оптотехников России, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров СССР, доктор технических наук.

А.П. Грамматин родился в Ленинграде в семье инженера строителя. После окончания седьмого класса в 1945 году поступил в Военно-механический техникум (ныне Физико-механический инженерный колледж), который окончил с отличием в 1949 году.

Трудовую деятельность он начал, ещё будучи студентом, в 1948 году в качестве проектировщика оптических систем микроскопов и прицелов на заводе "Прогресс", где прошёл путь от рядового

конструктора до ведущего конструктора завода. В 1955 году с отличием окончил вечерний факультет ЛИТМО и поступил в заочную аспирантуру ГОИ им. С.И. Вавилова. В 1961 году защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую автоматизации проектирования оптических систем. Именно он впервые в СССР разработал теорию и программное обеспечение оптимизации параметров оптических систем по критериям качества изображения. В 1983 году за разработку комплекса программ для автоматизированного проектирования оптики получил звание лауреата премии Совета Министров СССР. В 1974 году успешно защитил диссертацию на соискание учёной степени доктора технических наук, посвящённую разработке оптических систем для микроэлектронного производства. За разработку комплекса оптико-механического оборудования для производства микроэлектроники в 1977 году был удостоен звания лауреата Государственной премии СССР. С 1962 года Александр Пантелеймонович работал в ГОИ им. С.И. Вавилова, занимая последовательно должности начальника лаборатории, начальника отдела и начальника отделения оптических систем. С 1976 года работу в ГОИ успешно совмещал с преподавательской работой в ЛИТМО в должности профессора. В 1982 году получил звание профессора по кафедре теории оптических приборов. В 1998 году перешёл на постоянную работу в СПбГУ ИТМО, оставаясь в ВНИЦ "ГОИ им. С.И. Вавилова" в качестве главного научного сотрудника. Используя богатый профессиональный опыт, Александр Пантелеймонович свой талант преподавателя посвятил разработке и применению метода компьютерного моделирования в учебном процессе. С 2000 года работу в Университете он совмещал с работой в концерне ЦНИИ "Электроприбор", занимаясь разработкой оптических систем телевизионных и тепловизионных приборов и перископных комплексов.

Александр Пантелеймонович является автором свыше двухсот научных трудов и изобретений. Под его научным руководством выполнили и успешно защитили диссертации более десяти кандидатов наук. На протяжении многих лет он

являлся членом редколлегии "Оптического журнала" и журнала "Оптика и спектроскопия", принимал активное участие в подготовке и проведении конференций по оптике в качестве члена программного комитета. Заслуги А.П. Грамматина перед государством отмечены орденом "Знак почёта" и медалями.

Александр Пантелеймонович являлся одним из любимых преподавателей факультета ОИСТ СПбГУ ИТМО благодаря исключительной доброжелательности по отношению к студентам и сотрудникам, глубокой эрудиции и интеллигентности.

<http://newspaper.ifmo.ru/article.php?pid=108&id=712>

<https://museum.ifmo.ru/person/356/>

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО Н. Ф. Гусарова
Подписано к печати
Заказ №
Отпечатано на ризографе

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., 49