



Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

Учебное пособие

Л.Г. Бебчук, С.В. Бодров, В.И. Заварзин

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Часть 2

Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана

Л.Г. Бебчук, С.В. Бодров, В.И. Заварзин

КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Часть 2

*Рекомендовано редсоветом МГТУ им. Н.Э. Баумана
в качестве учебного пособия по курсовому и дипломному
проектированию*

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2009

УДК 535.8
ББК 22.34
Б35

Рецензенты: *А.Ф. Ширанков, В.М. Кахновский*

Б35 Бебчук Л.Г., Бодров С.В., Заварзин В.И.
Компьютерный анализ и оптимизация оптических систем:
Учеб. пособие. – Ч. 2. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,
2009. – 36 с.

ISBN 978-5-7038-3263-9

Рассмотрена оптимизация с помощью программы ОПАЛ центрированных оптических систем (в области геометрических аберраций), содержащих сферические и асферические поверхности, а также киноформные элементы.

Для студентов старших курсов специальности «Оптико-электронные приборы и системы», выполняющих лабораторные работы, а также курсовые и дипломные проекты.

УДК 535.8
ББК 22.34

ВВЕДЕНИЕ

Процесс проектирования любой оптической системы (ОС) в настоящее время просто немыслим без применения компьютеров. Как и все другие области науки и техники, компьютерная оптика, ранее называемая вычислительной оптикой, непрерывно развивается, при этом заметное место отводится разработке новых и модернизации существующих программных продуктов, предназначенных для проектирования ОС.

Так как расчет ОС является отраслью инженерных расчетов, хорошо поддающейся автоматизации, все известные программные продукты имеют возможность производить оптимизацию (автоматизированную коррекцию) ОС. Под оптимизацией понимается нахождение с помощью компьютера численных значений конструктивных параметров выбранной разработчиком ОС, при которых основные характеристики (фокусное расстояние, относительное отверстие, увеличение, поле системы и т. п.) имеют заданные значения, а абберации либо минимальны, либо также принимают заданные значения. Данное учебное пособие является логическим продолжением работы [1], где был рассмотрен анализ ОС, и посвящено оптимизации центрированных ОС с помощью системы ОПАЛ.

Оптимизация может осуществляться двумя принципиально различными путями. Во-первых, могут использоваться универсальные методы, основанные на различных способах постепенных приближений и применимые к системам любого типа и любой степени сложности. Такие методы хорошо известны [2–5] и носят название *методов проб*. При использовании универсальных методов необходимо иметь некоторые численные значения конструктивных параметров ОС, принимаемой за исходную. Эти значения могут

быть определены, например, на основании предварительных расчетов области аббераций третьего порядка. Универсальные методы оптимизации применяются в настоящее время во всех отечественных и зарубежных программных продуктах, предназначенных для проектирования ОС [3, 5].

Во-вторых, могут использоваться методы, основанные на решении систем уравнений, связывающих конструктивные параметры системы с абберациями. Такие уравнения удается составить только для области аббераций третьих порядков и далеко не для всех типов ОС. Поэтому данные методы применимы только для сравнительно небольшого круга задач. По сравнению с методами, основанными на постепенных приближениях, они обладают явным преимуществом, поскольку дают все возможные решения, что исключено в первом случае. Программы, основанные на решении уравнений аббераций третьего порядка, составлены только для расчета двойного и тройного склеенных компонентов, а также для двухкомпонентных систем, образованных одиночными или склеенными тонкими линзами [6].

В системе ОПАЛ оптимизация осуществляется универсальными методами, причем конкретный метод оптимизации устанавливает разработчик ОС перед началом процесса автоматизированной коррекции. Те из параксиальных характеристик и аббераций, которые подлежат коррекции, называются *корректируемыми функциями*. Конструктивные параметры ОС, которые целесообразно изменять в процессе работы компьютера, называются *коррекционными параметрами*. Разработчик ОС решает, какие параметры будут использоваться в качестве коррекционных.

1. НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ НАЧАЛА ОПТИМИЗАЦИИ

Перед выполнением процедуры оптимизации необходимо создать исходную ОС, удовлетворяющую заданным техническим условиям как по энергетике (апертура), так и по габаритам (параксиальные характеристики). Оптимизацию можно осуществлять только в том случае, когда исходная ОС обеспечит прохождение всех габаритных (крайних) лучей для заданных длин волн. Поэтому перед процедурой оптимизации следует провести анализ габаритов ОС (режим «Задание габаритов») [1] и убедиться, что все крайние лучи для заданных апертур и всех заданных длин волн как для точки на оси, так и для точки края поля проходят через ОС. Если какие-либо лучи не проходят через ОС, то, изменяя конструктивные параметры, например толщины линз и воздушные промежутки, необходимо добиться прохождения всех указанных выше габаритных лучей. Только после этого можно выполнить операцию «Замена габаритов на вычисленные» [1] и занести исходную систему в архив. После выполнения всех этих операций полученную ОС можно использовать как исходную для последующей оптимизации.

Для выполнения процедуры оптимизации необходимо:

- 1) определить структуру критерия качества, по которому следует оценивать результат оптимизации;
- 2) указать, какие конструктивные параметры будут изменяться (коррекционные параметры);
- 3) задать, если необходимо, пределы изменения коррекционных параметров, параксиальных и габаритных характеристик.

2. КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА

По условиям технического задания и результатам анализа оптической системы определяются те параксиальные величины и остаточные aberrации, которые необходимо выдерживать и исправлять при оптимизации. Так как эти величины могут иметь разную размерность, для их сравнения необходимо каждую из рассматриваемых величин поделить на нормировочный коэффициент (масштабировать) и умножить на весовой коэффициент, который в дальнейшем определит весомость исправляемой характеристики (получим взвешенную величину).

Отмасштабированные и взвешенные разности будем называть *оптимизированными функциями* [1]. В системе ОПАЛ рассматриваются две формулы вычисления оптимизированных функций. Для параксиальных и габаритных характеристик применяется формула

$$O\Phi(i) = \frac{EQF(i) - EQF\#(i)}{EQFS(i)}, \quad (2.1)$$

где $O\Phi(i)$ — i -я оптимизированная функция;
 $EQF(i)$ — текущее значение i -й характеристики;
 $EQF\#(i)$ — требуемое значение i -й характеристики;
 $EQFS(i)$ — нормировочный коэффициент i -й характеристики.
Для геометрических aberrаций используется следующая формула:

$$O\Phi(i) = \frac{MF(i) - MF\#(i)}{MFS(i)} MFW(i), \quad (2.2)$$

где $MF(i)$ — текущее значение i -й aberrации;
 $MF\#(i)$ — заданная величина i -й aberrации;
 $MFS(i)$ — нормировочный коэффициент (допуск) i -й aberrации;
 $MFW(i)$ — весовой коэффициент.

Сумма квадратов оптимизируемых функций рассматривается как критерий качества. Процесс оптимизации сводится к минимизации критерия качества. Чем меньше значение критерия качества при заданном числе оценочных функций с одинаковым значением нормировочных и весовых коэффициентов на каждую характеристику, тем лучше полученная система соответствует предъявляемым требованиям.

3. ОПТИМИЗАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Для выполнения оптимизации необходимо составить оптимизационную модель. Она должна содержать три вида информации:

- 1) коррекционные параметры, которые могут изменяться в процессе оптимизации (описаны в идентификаторе *PAR*);
- 2) параксиальные и габаритные характеристики, которые должны выдерживаться в процессе оптимизации (описаны в идентификаторе *EQF*);
- 3) исправляемые геометрические aberrации (описаны в идентификаторе *MF*).

3.1. Коррекционные параметры

Коррекционные параметры — это нормированные значения конструктивных параметров, которые могут изменяться в процессе оптимизации. Перечень коррекционных параметров приведен в табл. 1.

Информация записывается с помощью идентификаторов, в левой части которых обозначен вид информации и в скобках — число марок (параметров), находящихся в правой части выражения. После знака равенства, разделяющего левую и правую часть идентификатора, записываются марки. Каждая марка состоит из двух частей — имени и указателя, отделяемых друг от друга знаком деления («/»). Марки могут быть индивидуальными или групповыми. Одна марка от другой отделяется запятой. На пробелы между марками компьютер не реагирует. Запись любого идентификатора завершается в обязательном порядке установкой знака точка с запятой (« ; »).

Пример 1:

$$PAR(1 - 6) = C, -C/6, D/1 - 7, SD, ES/3, CA/3;$$

В данном примере задано шесть марок (с номерами от 1 до 6). Параметрами являются все кривизны оптических поверхностей, кроме шестой поверхности, расстояния между поверхностями с первой по седьмую (групповая марка), положение апертурной диафрагмы относительно предыдущей поверхности, квадрат эксцентриситета третьей поверхности и коэффициенты асферики высшего порядка тоже для третьей поверхности. Последовательность

Таблица 1

Коррекционные параметры

Название параметра	Обозначение
<i>Конструктивные параметры</i>	
Кривизны оптических поверхностей	<i>C</i>
Расстояния между оптическими поверхностями	<i>D</i>
Квадрат эксцентриситета асферических поверхностей	<i>ES</i>
Коэффициенты асферических поверхностей высшего порядка	<i>CA</i>
Положение предметной поверхности	<i>SO</i>
Положение поверхности изображения	<i>SI</i>
Положение апертурной диафрагмы	<i>SD</i>
<i>Параметры голографических оптических элементов (киноформа)</i>	
Кривизна записи киноформа слева (первая поверхность)	<i>CHL</i>
Кривизна записи киноформа справа (вторая поверхность)	<i>CHR</i>
Длина волны записи киноформа	<i>WLH</i>
Коэффициенты деформации киноформа	<i>CH</i>

записи марок в правой части выражения произвольная. В скобках вместо цифр можно ставить знак «*» (звезда). В этом случае программа восстанавливает цифровую информацию в скобках по числу знаков (запятых и точек с запятой) и записывает в память марки в порядке, предусмотренном программой. Общие для ОС марки (*SO*, *SI*, *SD*) используются без указателя. Можно также не использовать указатель, если данный тип коррекционных параметров относится ко всей системе (в примере 1 параметр «*C*»).

3.2. Связи между параметрами

В системе ОПАЛ предусмотрена возможность оптимизации ОС, в которых используются связи между следующими параме-

трами: радиус — радиус, радиус — толщина, толщина — положение апертурной диафрагмы, передний отрезок — задний отрезок, передний отрезок — радиус кривизны первой поверхности, задний отрезок — радиус кривизны последней поверхности.

Для задания связей между параметрами необходимо указать три дополнительных идентификатора:

$PARF$ — свободные параметры;

$PARC$ — параметры, связанные со свободными;

CC — коэффициенты связи между свободными и связанными параметрами (т. е. $PARF = PARC \times CC$).

Параметры, указанные в идентификаторе $PARF$, обязательно должны присутствовать в идентификаторе PAR . Напротив, параметры, перечисленные в идентификаторе $PARC$, должны отсутствовать в идентификаторе PAR .

Пример 2. Для получения симметричной оборачивающей системы с линейным увеличением $\beta = -1$, состоящей из двух симметричных двухлинзовых склеенных объективов с параллельным ходом лучей между компонентами, необходимо выдержать связь между конструктивными параметрами первого и второго склеенных компонентов:

$$PAR(1 - 6) = C/1, C/2, C/3, D/1, D/2, D/3;$$

$$PARF(1 - 5) = C/1, C/2, C/3, D/1, D/2;$$

$$PARC(1 - 5) = C/6, C/5, C/4, D/5, D/4;$$

$$CC(1 - 5) = -1, -1, -1, 1, 1;$$

Информацию в правых частях выражений следует располагать колонками, имея в виду, что на ввод дополнительных пробелов компьютер не реагирует. Эту же задачу можно решить с помощью групповых марок:

$$PAR(*) = C/1 - 3, D/1 - 3;$$

$$PARF(*) = C/1 - 3, D/1 - 2;$$

$$PARC(*) = C/6 - 4, D/5 - 4;$$

$$CC(*) = -1, 1;$$

3.3. Ограничения на величину параметров

С помощью ограничений можно описать интервал изменения коррекционных параметров. Минимальное значение (ограничение слева) коррекционного параметра обозначается знаком «<», а максимальное (ограничение справа) — знаком «>». Идентификатор состоит из указателя, вида марки коррекционного параметра, его ограничения, номера параметров (в скобках), после знака равенства указываются предельные значения для каждого параметра, указанного в скобках.

Пример 3:

$$D < (1 - 3) = 2, 3, 4;$$

$$D > (1 - 3) = 10, 5, 7;$$

Данная запись означает, что первая толщина (расстояние от вершины первой до вершины второй поверхности вдоль оптической оси) изменяется от 2 до 10 мм, вторая толщина изменяется от 3 до 5 мм и т. д.

Необходимо помнить следующее:

а) в исходной системе значение конструктивных параметров, на которые наложены ограничения, должны находиться внутри указанного диапазона;

б) кривизна поверхности — величина, обратная радиусу кривизны;

в) осевые расстояния контролируются по абсолютной величине, т. е. $D \times (N/|N|)$, где N — показатель преломления оптической среды.

Таким образом, осевые расстояния контролируются в положительном диапазоне. Определение границ диапазона (максимум и минимум) ведется по алгебраическому значению, т. е. -100 меньше -1 , а -1 больше -10 .

3.4. Методы контроля ограничений на величину коррекционных параметров

При контроле ограничений на изменение коррекционных параметров можно воспользоваться одним из двух методов.

1. *Метод исключения.* Он используется только в ОС с независимыми параметрами (без связей). Когда в процессе оптимизации

какой-либо коррекционный параметр выходит за пределы заданного интервала, то он исключается из числа варьируемых параметров. При использовании этого способа необходимо, чтобы в исходной для оптимизации ОС значения коррекционных параметров находились внутри заданного интервала. В противном случае ОС оптимизироваться не будет.

2. *Метод штрафных функций.* Он может использоваться для контроля как независимых, так и связанных коррекционных параметров, а также для контроля допустимых минимальных толщин линз по световому диаметру (толщина по «острому краю»), задаваемых маркой $DE<$. В этом случае условие нахождения исходных значений коррекционных параметров внутри заданного интервала необязательно. Если какой-либо параметр находится за пределами заданного ограничения, то к критерию качества добавляется некоторая положительная величина, называемая «штраф». Признаком использования второго способа является наличие в оптимизационной модели оператора INF . Подробнее об этом операторе рассказано в подразд. 3.7.

Фрагменты оптимизационных моделей с использованием оператора INF приведены в примерах 4 и 5.

Пример 4:

$$\begin{aligned} PAR(*) &= D/1 - 3; \\ D < (1 - 3) &= 2, 4, 3; \\ D > (1 - 3) &= 10, 7, 9; \\ INF(1) &= D/1 - 3; \end{aligned}$$

Пример 5:

$$\begin{aligned} PAR(*) &= D/1 - 3; \\ INF(1 - 3) &= D/1, D/2, D/3; \\ INF < (1 - 3) &= 2, 4, 3; \\ INF > (1 - 3) &= 10, 7, 9; \end{aligned}$$

3.5. Марки параксиальных и габаритных характеристик

Параксиальные и габаритные характеристики могут относиться как к системе в целом, так и к ее части — блоку. Общий вид марки имеет следующий вид:

$$\text{Имя}/N1 - N2/\text{ПИ},$$

где Имя — идентификатор параксиальной или габаритной характеристики;

$N1$, $N2$ — номера первой и последней поверхности оптического блока, для которого рассчитывается характеристика;

Π — тип предмета для оптического блока, причем за предмет принимается параксиальное изображение, полученное предыдущей частью оптической системы;

И — тип изображения, полученного после оптического блока.

Предмет и изображение удаленного типа обозначаются буквой F , а предмет и изображение близкого типа — буквой N . Например, марка вида $VG\emptyset/7 - 12/NN$ означает, что вычисляется обобщенное увеличение блока с седьмой по двенадцатую поверхность для которого предметная плоскость и плоскость изображения расположены на конечном расстоянии ($OB = 1$, $IM = 1$), т. е. вычисляется линейное увеличение (β) блока. Здесь и далее символом \emptyset обозначена цифра нуль. Если характеристика относится ко всей оптической системе, то указатели для марок можно опустить. В табл. 2 приведены параксиальные и габаритные характеристики, используемые в системе ОПАЛ.

Параксиальные характеристики определяются для основной длины волны L_0 спектрального интервала. Толщины линз «по краю» (DE) и световые высоты (AS) могут контролироваться только как *ограничения-неравенства*, причем для AS устанавливается только верхняя граница, а для DE — только нижняя ($DE <$).

При оптимизации ОС одни параксиальные и габаритные характеристики должны иметь определенные значения, ограниченные достаточно узким допуском. Эти характеристики следует контролировать с помощью *ограничений-равенств*. Для другой группы значения характеристик могут находиться в границах широкого интервала. Эти характеристики следует контролировать с помощью *ограничений-неравенств*. Когда требуемые значения характеристик сильно отличаются от исходных, перед началом собственно оптимизации они «подгоняются» под заданные значения с помощью специальной процедуры — «восстановление». Вполне вероятно, что в этом случае будут нарушены условия прохождения действительных лучей. Поэтому, как было указано выше, при использовании равенств для заданных характеристик необходимо на этапе габаритного расчета в ОС получить требуемые значения этих характеристик. Если «подгонка» характеристик предварительно не осуществлена, то следует использовать *ограничения-неравенства*.

Таблица 2

Параксиальные и габаритные характеристики

Имя	Характеристика	Блок	Обозначение
$V G \emptyset$	Обобщенное увеличение в плоскости параксиального изображения	$N1 - N2 / FN$	Переднее фотограмметрическое фокусное расстояние
		$N1 - N2 / FF$	Угловое (видимое) увеличение
		$N1 - N2 / NN$	Линейное (поперечное) увеличение
		$N1 - N2 / NF$	Обратная величина фокусного расстояния
SG'	Положение параксиальной плоскости изображения	$N2 / N$	Расстояние в миллиметрах от поверхности $N2$ до плоскости изображения
		$N2 / F$	Расстояние в диоптриях от выходного зрачка до плоскости изображения
DSG'	Смещение плоскости изображения относительно параксиальной плоскости изображения	—	—

Продолжение табл. 2

Имя	Характеристика	Блок	Обозначение
$SP\emptyset$	Положение входного зрачка в параксиальной области	$N1/F$	Расстояние в миллиметрах от поверхности с номером $N1$ до входного зрачка
		$N1/N$	Расстояние от предметной плоскости до входного зрачка в диоптрийной мере
$SP\emptyset'$	Положение выходного зрачка в параксиальной области	$N2/F$	Расстояние в миллиметрах от поверхности с номером $N2$ до выходного зрачка
		$N2/N$	Расстояние от плоскости изображения до выходного зрачка в диоптрийной мере
L	Длина ОС от первой до последней поверхности в миллиметрах	$N1 - N2$	Сумма толщин от поверхности с номером $N1$ до поверхности $N2$ в миллиметрах

Продолжение табл. 2

Имя	Характеристика	Блок	Обозначение
LS'	Расстояние от первой поверхности до выходного зрачка, если $IM = 0$	$N1 - N2/F$	Расстояние в миллиметрах от поверхности с номером $N1$ до выходного зрачка, расположенного после поверхности с номером $N2 (L + SP \emptyset')$
	Расстояние от первой поверхности до плоскости изображения, если $IM = 1$	$N1 - N2/N$	Расстояние в миллиметрах от поверхности с номером $N1$ до плоскости изображения, расположенной после поверхности с номером $N2 (L + SG')$
LS	Расстояние от входного зрачка до последней поверхности ($OB = \emptyset$)	$N1 - N2/F$	Расстояние в миллиметрах от входного зрачка, расположенного относительно поверхности с номером $N1$, до поверхности с номером $N2 (L - SP \emptyset)$
	Расстояние от предметной плоскости до последней поверхности системы ($OB = 1$)	$N1 - N2/N$	Расстояние в миллиметрах от предметной плоскости, расположенной относительно поверхности с номером $N1$ до поверхности с номером $N2 (L - SG)$

Продолжение табл. 2

Имя	Характеристика	Блок	Обозначение
LSS'	Расстояние от входного до выходного зрачков ($OB = \emptyset$; $IM = \emptyset$)	$N1 - N2/FF$	Расстояние в миллиметрах от входного зрачка, расположенного относительно поверхности с номером $N1$, до выходного зрачка, расположенного после поверхности с номером $N2$ ($L - SP\emptyset + SP\emptyset'$)
	Расстояние от предметной плоскости до плоскости изображения ($OB = 1$; $IM = 1$)	$N1 - N2/NN$	Расстояние в миллиметрах от предметной плоскости до плоскости изображения для блока, состоящего из поверхностей с номерами от $N1$ до $N2(L - SG + SG')$
	Расстояние в миллиметрах от входного зрачка системы до плоскости изображения ($OB = \emptyset$; $IM = 1$)	$N1 - N2/FN$	Расстояние в миллиметрах от плоскости входного зрачка до плоскости изображения для блока, состоящего из поверхностей с номерами от $N1$ до $N2$ ($L - SP\emptyset + SG'$)
	Расстояние в миллиметрах от плоскости предметов до выходного зрачка ($OB = 1$; $IM = \emptyset$)	$N1 - N2/NF$	Расстояние в миллиметрах от плоскости предметов до выходного зрачка для блока, состоящего из поверхностей с номерами от $N1$ до $N2$ ($L - SG + SP\emptyset'$)

Окончание табл. 2

Имя	Характеристика	Блок	Обозначение
<i>OP</i>	Оптическая сила в диоптриях	<i>N1 – N2</i>	Обратная величина заднего фокусного расстояния блока, состоящего из поверхностей с номерами от <i>N1</i> до <i>N2</i> , выраженная в диоптрийной мере
<i>DE</i>	Толщина линзы (или воздушного промежутка) по краю в миллиметрах	–	–
<i>AS</i>	Световая высота на поверхности	–	–

Если задана «подгонка» нескольких параксиальных и габаритных величин, отличающихся от заданных, то компьютер может не решить задачу. В этом случае рекомендуется марки части этих характеристик ввести в идентификатор геометрических aberrаций (оператор MF) или использовать *ограничения-неравенства* (оператор INF).

3.6. Равенства

Задание параксиальных и габаритных характеристик, имеющих определенное значение, осуществляется с помощью равенства. Если в ОС необходимо сохранять параксиальные и габаритные характеристики исходной системы, то оптимизационная модель для описания этих величин должна содержать один идентификатор.

Пример 6. Пусть в телескопической системе величины видимого увеличения, положения параксиальной плоскости изображения и переднего фокусного расстояния двухлинзового склеенного объектива будут сохранять значения, заданные в исходной системе (см. табл. 2):

$$EQF(*) = VG\emptyset, SG', VG\emptyset/1 - 3/FN;$$

или

$$EQF(1 - 3) = VG\emptyset, SG', VG\emptyset/1 - 3/FN;$$

или

$$EQF(1, 2, 3) = VG\emptyset, SG', VG\emptyset/1 - 3/FN;$$

Если какая-либо характеристика или все характеристики уточняются, то необходимо эти значения описать в дополнительном идентификаторе:

$$EQF\#(*) = -5, 0, -120;$$

или

$$EQF\#(1 - 3) = -5, 0, -120;$$

или

$$EQF(1, 2, 3) = -5, 0, -120;$$

Данные идентификаторы показывают, что в телескопической системе видимое увеличение должно быть равно -5 , плоскость

изображения расположена в бесконечности (афокальная система) и переднее фокусное расстояние двухлинзового объектива $f = -120$ мм.

В системе ОПАЛ по умолчанию на каждую характеристику заложен определенный допуск (норма). Например, допуск на обобщенное увеличение равен 2% от номинала. Если в процессе оптимизации какую-либо характеристику следует приблизить к заданному в операторе $EQF\#$ значению с большей точностью, то на эту характеристику нужно задать более жесткий допуск (уменьшить норму). Это осуществляется с помощью идентификатора $EQFS$. Например, необходимо видимое увеличение выдержать с допуском 0,5%, тогда $EQFS(1) = 0,005$.

В общем случае значения равенств описывают с помощью трех идентификаторов: EQF , $EQF\#$ и $EQFS$. Следует помнить, что общее число марок параксиальных и габаритных характеристик в операторе EQF не должно превышать 20.

3.7. Функции-неравенства

Функции-неравенства используются в том случае, когда на величины изменения коррекционных параметров, параксиальных и габаритных характеристик наложены ограничения, т. е. заданы верхняя, нижняя или обе границы изменения параметров одновременно. Для формирования ограничений-неравенств необходимо задать:

- величины, на которые накладываются ограничения (оператор INF);
- верхнюю ($INF >$) и нижнюю ($INF <$) границы изменений;
- величину допуска (нормы) с помощью оператора $INFT$.

Пример 7:

$$INF(1 - 5) = D/1, D/2, D/3, DE, LSS';$$

$$INF > (1 - 3) = 10, 5, 7; INF > (5) = 165;$$

$$INF < (1 - 5) = 2, 3, 4, 0.5, 155;$$

$$INFT(1 - 4) = 0.1; INFT(5) = 1;$$

В приведенном примере проекционная ОС имеет ограничения на изменение первых трех осевых расстояний (от 10 до 2 мм,

от 5 до 3 мм и от 7 до 4 мм), на толщину всех линз по «острому» краю (не менее 0,5 мм, ограничиваются только слева) и на расстояние от предметной плоскости до плоскости изображения (изменяется от 165 до 155 мм). Допуск (норма) на первые четыре величины составляет 0,1 мм, а на марку LSS' — 1 мм. Если на коррекционные параметры уже наложены ограничения (см. пример 4), то в выражения ограничений $INF >$ и $INF <$ их можно не включать. В этом случае достаточно записать $INF > (5) = 165$; и $INF < (4,5) = 0,5, 155$.

Задание величин допусков ($INF T$) необязательно, так как в системе ОПАЛ по умолчанию заложены определенные численные значения на все характеристики и параметры.

Если какой-либо из контролируемых параметров или характеристик выходит за заданные границы ($INF >$ и $INF <$), то формируется функция-неравенство

$$\begin{aligned} \text{ОФН}(i) &\leq \frac{T3(i) - INF < (i)}{INF T(i)}; \\ \text{ОФН}(i) &> \frac{INF > (i) - T3(i)}{INF T(i)}; \end{aligned}$$

где $\text{ОФН}(i)$ — оценочная функция i -го неравенства слева и справа; $T3(i)$ — текущее значение контролируемой величины.

Из этих функций-неравенств формируется величина штрафа, которая зависит как от величины выхода за заданные границы (сдвиг), так и от весового коэффициента, который увеличивается на каждом последующем цикле. Поэтому при наличии неравенств, когда параметры и характеристики ОС не входят в заданный диапазон даже при ужесточении (уменьшении) величины допуска, процесс оптимизации следует строить из малого числа шагов, увеличивая число циклов.

Если в исходной ОС коррекционные параметры или параксиальные характеристики, описанные с помощью неравенства, не укладываются в заданный диапазон, то система будет оптимизирована с наложенным исходным штрафом. Поэтому «сырые» ОС рекомендуется оптимизировать с помощью ограничений-неравенств, чтобы не подгонять параметры и характеристики в исходной системе.

4. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ АБЕРРАЦИИ

В общем случае для исправления aberrаций необходимо задать следующие идентификаторы:

- MF — описывает исправляемые aberrации;
- $MF\#$ — определяет необходимые численные значения каждой aberrации;
- MFS — задает величины допусков (норм) на каждую aberrацию;
- MFW — описывает весовые коэффициенты, определяющие весомость каждой aberrации в критерии качества.

Чем меньше норма или больше весовой коэффициент, тем более точно оптимизируется (исправляется) данная aberrация. Информация во всех четырех выражениях должна вводиться в строгой последовательности, т. е. первая позиция (число) в идентификаторах $MF\#$, MFS и MFW относится к первой позиции (марке) в идентификаторе MF . На начальном этапе оптимизации ОС идентификаторы $MF\#$, MFS и MFW обычно не задают, так как по умолчанию значения aberrаций ($MF\#$) принимаются равными нулю, весовые коэффициенты (MFW) — равными единице, а допуски (MFS) для каждого вида aberrаций принимают по умолчанию различные значения. С этими значениями для каждой заданной aberrации можно ознакомиться при просмотре результатов оптимизации. В дальнейшем для улучшения качества ОС осуществляют перераспределение весомости aberrаций, вводя нужные значения норм или весовых коэффициентов.

Если рассматриваемая ОС является составной частью оптической схемы всего прибора, то необходимо задавать такие требуемые значения aberrаций в идентификаторе $MF\#$, чтобы они компенсировали aberrации остаточной части ОС прибора.

Задание оптимизируемых геометрических aberrаций осуществляют с помощью марок. Марки могут быть индивидуальными или групповыми. При трансляции групповая марка преобразуется в индивидуальные с одинаковыми значениями весовых и нормировочных коэффициентов. Следует помнить, что порядок расположения информации в выражениях MF , $MF\#$, MFS и MFW должен строго соблюдаться.

Общий вид марки выглядит следующим образом: *Имя/LJIS*. Марка для задания геометрических aberrаций отдельных лучей

состоит из имени (вид aberrации) и указателя, разделенных знаком деления «/». Имя марки определяет вид aberrации, а каждая позиция указателя конкретизирует эту aberrацию. Число позиций в указателе для различных aberrаций разное, но их порядок необходимо строго соблюдать. Первая позиция (L) определяет вид хроматизма оптимизируемой aberrации и может принимать следующие значения:

1) $L = 0, 1, 2, 3, 4$ — определяет длину волны, для которой вычисляется aberrация, причем это число не должно превышать количество заданных длин волн в исходной системе;

2) $L = *$ (звезда) — групповая марка, при наличии которой aberrация вычисляется для всех заданных в исходной ОС длин волн;

3) $L = '$ (апостроф) — хроматическая разность aberrаций для крайних дополнительных длин волн (первичный хроматизм). Например, если в исходной системе заданы три длины волны — основная $L(0)$ и две дополнительные $L(1)$ и $L(2)$, то находится разность aberrаций, вычисленных для $L(1) - L(2)$;

4) $L = ''$ (кавычки) — хроматическая aberrация вторичного спектра, вычисляемая в соответствии с табл. 3.

Символ («'») можно использовать, когда число заданных длин волн более двух, а символ («'»), когда число заданных длин волн более одной.

Таблица 3

Формулы для вычисления хроматической aberrации вторичного спектра

Заданное число длин волн	Аберрация вторичного спектра
3	$(L(1) + L(2))/2 - L(0)$
4	$(L(1) + L(3))/2 - L(0)$
5	$(L(1) + L(4))/2 - L(0)$

Вторая позиция (символ J) определяет номер внеосевого пучка и может принимать следующие численные значения: $J = 0, 1, 2, 3, 4, 5$. Указанное число не должно превышать числа точек поля, заданных в исходной ОС. Символ («*») означает, что данная

абберация будет контролироваться для всех заданных точек предмета. Нумерация точек поля идет от края к оптической оси, т.е. $J = 1$ соответствует точке на краю поля, а $J = 0$ означает, что рассматривается абберация для точки на оси.

Третья позиция (символ I) определяет номер луча в половине диаметра заданного пучка и может принимать целые численные значения $I = 0, 1, 2, 3, 4$. Например, запись $I = 1$ означает, что данный луч проходит через край входного зрачка. По умолчанию относительные координаты лучей в половине сечения зрачка распределяются по квадратичному закону. Значения этих относительных координат приведены в табл. 4.

Число лучей в каждом сечении задается с помощью идентификаторов:

$RAYA = N$ – число лучей в половине осевого пучка;

$RAYM = N$ – число лучей в верхней и нижней части меридионального сечения внеосевого пучка;

$RAYS = N$ – число лучей в половине сагиттального сечения;

$RAYT = N$ – число лучей в верхней и нижней половине «косого» пучка.

Таблица 4

Относительные координаты лучей в половине сечения зрачка

Число заданных лучей (N)	Номер заданного луча (I)			
	1	2	3	4
1	$\sqrt{\frac{1}{1}} = 1$			
2	$\sqrt{\frac{2}{2}} = 1$	$\sqrt{\frac{1}{2}} = 0,707$		
3	$\sqrt{\frac{3}{3}} = 1$	$\sqrt{\frac{2}{3}} = 0,816$	$\sqrt{\frac{1}{3}} = 0,577$	
4	$\sqrt{\frac{4}{4}} = 1$	$\sqrt{\frac{3}{4}} = 0,866$	$\sqrt{\frac{2}{4}} = 0,707$	$\sqrt{\frac{1}{4}} = 0,5$

Распределение лучей в зрачке может быть задано произвольно с помощью следующих идентификаторов:

$PCA(*) = \dots$ — относительное распределение лучей в осевом пучке;

$PCM(*) = \dots$ — относительное распределение лучей в меридиональном сечении;

$PCS(*) = \dots$ — относительное распределение лучей в сагитальном сечении;

$PCT(*) = \dots$ — относительное распределение лучей в «косом» сечении.

В правой части выражений через запятую указывают необходимые относительные координаты лучей по зрачку, например:

$$RAYA = 4; PCA(*) = 1, 0.8, 0.5, 0.3;$$

Четвертая позиция S может принимать следующие значения:

U — лучи проходят через верхнюю часть зрачка;

D — лучи проходят через нижнюю часть зрачка;

$*$ — ход лучей вычисляют как сверху, так и снизу относительно главного луча.

4.1. Марки аберраций осевого пучка

Для точки предмета, расположенной на оптической оси, можно минимизировать аберрации, приведенные в табл. 5

Таблица 5

Марки аберрации осевого пучка

Имя марки	Указатель марки	Аберрация луча
DSA	LI	Продольная аберрация
DYA	LI	Поперечная аберрация
DPA	I	Неизопланатизм для основной длины волны
ZA	I	Меридиональный астигматический отрезок луча основной длины волны

Для продольных аберраций количество лучей I изменяется от 0 до 4, а поперечных — от 1 до 4. При $I = 0$ вычисляются продольные аберрации в параксиальной области. Ниже приведены наиболее часто используемые марки:

$DSA/'0$ – хроматическая aberrация положения;

$DSA/01$ или $DYA/01$ – продольная или поперечная сферическая aberrация луча идущего через край входного зрачка для основной длины волны;

$DSA/'0$ – вторичный хроматизм в парааксиальной области (вторичный спектр);

$DSA/'I$ или $DYA/'I$ – продольная или поперечная сферохроматическая aberrация лучей, идущих на зоне I входного зрачка (разность сферических aberrаций лучей для крайних длин волн).

Если на месте указателя стоят две звезды, то aberrация, указанная в имени, вычисляется для всех заданных длин волн и для всех лучей, указанных в операторе $RAYA = N$; . Например, если задано три длины волны и $RAYA = 2$; , то групповая марка $DYA/**$ транслируется как: $DYA/01$, $DYA/02$, $DYA/11$, $DYA/12$, $DYA/21$ и $DYA/22$. Если задана марка $DSA/**$, то к перечисленным выше маркам выше реальных лучей добавляются aberrации в парааксиальной области $DSA/10$ и $DSA/20$.

Если в ОС не используется оператор $RAYA = N$, то по умолчанию в осевом пучке будет вычислена только aberrация луча, идущего через край входного зрачка. То есть при наличии марок с указателем во второй позиции больше единицы, например $DYA/02$ или $DSA/13$, aberrации для этих лучей вычислены не будут и при распечатке их значения будут равны нулю.

Если в ОС величина поля задана равной нулю, то в осевом пучке будут вычислены aberrации только для лучей, идущих через край зрачка, даже при задании $RAYA = N$, где $N > 1$.

4.2. Марки aberrаций главного луча внеосевого пучка

В табл. 6 приведены марки aberrаций главного луча для рассматриваемых точек поля, где через L обозначены признаки хроматизма, а через J – номер пучка.

В указателе величина L не должна превышать числа заданных в системе длин волн, а величина J – числа заданных точек поля. Пучки нумеруют от края поля к оси. Для вычисления хроматизма увеличения используют марки $DVL/'J$ или $DVL\%/'J$. Для марки $DVL\%$ номер пучка J может принимать значение нуль, что соответствует хроматизму увеличения нулевого луча. В марках DVL и $DVL\%$ нельзя задавать $L = 0$.

Таблица 6

Марки aberrации главного пучка

Имя марки	Указатель	Аберрация
<i>DIS</i>	<i>J</i>	Абсолютная дисторсия
<i>DIS</i> %	<i>J</i>	Относительная дисторсия, %
<i>DVL</i>	<i>LJ</i>	Хроматизм абсолютный
<i>DVL</i> %	<i>LJ</i>	Хроматизм относительный, %
<i>ZM</i>	<i>J</i>	Меридиональный астигматический отрезок
<i>ZS</i>	<i>J</i>	Сагиттальный астигматический отрезок
<i>AST</i>	<i>J</i>	Астигматизм $ZM - ZS$
<i>FCM</i>	<i>J</i>	Кривизна изображения $(ZM + ZS)/2$
<i>DSP</i>	<i>J</i>	Аберрация положения входного зрачка
<i>DSP'</i>	<i>J</i>	Аберрация положения выходного зрачка

4.3. Марки aberrаций меридионального сечения внеосевого пучка

В системе ОПАЛ предусмотрено вычисление только поперечных aberrаций луча. Марка aberrации имеет вид $DYM/LJIS$, где $L = 0, 1, 2, 3, 4, ' (апостроф), '' (кавычки), * (звезда) — вид хроматизма, причем число, находящееся в первой позиции указателя, не должно превышать заданного числа дополнительных длин волн;$

J — номер пучка, причем данное число не должно превышать число заданных внеосевых точек предмета. Если на месте индекса J стоит * (звезда), то данная aberrация рассчитывается для всех заданных точек предмета;

I — номер луча, проходящего через половину входного зрачка. Нумерация лучей идет от края зрачка к оптической оси. По умолчанию рассчитывается только луч, проходящий через край входного зрачка. Для расчета других лучей используют идентификатор $RAYM = N$, где N — число лучей, причем это число не должно превышать четырех. Если идентификатор $RAYM = N$ не

задан, то лучи с $I > 1$ рассчитаны не будут. Если разбиение входного зрачка по квадратичному закону не устраивает пользователя, то используется идентификатор $RCM = \dots, \dots$; , число позиций в правой части которого должно соответствовать числу заданных точек на входном зрачке ($RAYM = N$);

S — указатель части сечения пучка. Он может принимать следующие значения: U — луч проходит через верхнюю часть зрачка, D — луч проходит через нижнюю часть зрачка, $*$ — лучи проходят через верхнюю и нижнюю части зрачка.

Например, марка $DYM/021^*$ означает, что будут рассчитаны поперечные aberrации для основной длины волны и заданной в исходной системе зоны поля, для крайних лучей, проходящих через верхнюю и нижнюю части входного зрачка.

4.4. Марки aberrаций сагиттального сечения внеосевого пучка

Для вычисления поперечной aberrации луча в сагиттальном сечении используются марки:

DYS/LJI — поперечная составляющая aberrации луча в меридиональной плоскости;

DXS/LJI — поперечная составляющая aberrации луча в сагиттальной плоскости.

Значения позиций L , J и I были описаны выше. Позиция S не используется, так как рассматриваются только ОС с круговой симметрией. По умолчанию через систему рассчитывается только один луч, идущий через правый край входного зрачка. Другое число лучей задается идентификатором $RAYS = N$; , где N может принимать значения от 1 до 4. Задание разбиения зрачка через произвольные относительные величины осуществляется с помощью идентификатора $PCS(*) = 1, \dots$;

4.5. Марки aberrаций косоугольного сечения внеосевого пучка

Марки aberrаций в косоугольном сечении имеют вид:

$DYT/LJIS$ — поперечная составляющая aberrации луча в меридиональной плоскости;

$DXT/LJIS$ — поперечная составляющая aberrации луча в сагиттальной плоскости.

По умолчанию лучи в косом сечении не вычисляются. Для того чтобы произвести их вычисление, необходимо задать идентификатор $RAYT = N$; где $1 \leq N \leq 4$.

Наклон косого сечения относительно меридиональной плоскости задается выражением $SECT = \varphi$, где $0^\circ < \varphi < 90^\circ$. По умолчанию $\varphi = 45^\circ$.

Для задания произвольного относительного разбиения входного зрачка используется идентификатор $PCT(*) = 1, \dots, \dots$;

5. ОПТИМИЗАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ ПРОСТЕЙШИХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

5.1. Оптимизационная модель двухлинзового склеенного объектива ($OB = 0$; $IM = 1$;))

В двухлинзовом склеенном объективе при заданной паре стекол можно использовать три коррекционных параметра (кривизны оптических поверхностей). Как показала практика, толщины линз мало влияют на исправляемые aberrации. Так как в системе необходимо при оптимизации держать постоянным обобщенное увеличение ($VG\emptyset$ — переднее фокусное расстояние), остается только два коррекционных параметра. Следовательно, можно предположить, что в такой системе можно исправить две aberrации. Обычно в системах с малой величиной поля исправляются aberrации для осевой предметной точки (точка на оси). Например, корригируются хроматическая aberrация положения и поперечная сферическая aberrация основной длины волны луча, идущего через край входного зрачка:

$$PAR(1 - 3) = C/1, C/2, C/3; \quad EQF(1) = VG\emptyset;$$

$$MF(1 - 2) = DSA/0, DYA/01;$$

В этом случае путем изменения трех кривизн выдерживают обобщенное увеличение ($VG\emptyset$), заданное в исходной системе, и минимизируют две aberrации. Если значение обобщенного увеличения требуется уточнить, то необходимо добавить идентификатор $EQF\#$. Следует помнить, что под обобщенным увеличением в такой системе ($OB = 0$; $IM = 1$;) понимают значение переднего

фокусного расстояния. Если объектив должен иметь заднее фокусное расстояние 100 мм, то $EQF\#(1) = -100$;

Для исправления сферохроматической аберрации на зоне входного зрачка ($0,707h_{кр}$, где $h_{кр}$ — половина диаметра входного зрачка) и сферической аберрации на краю зрачка для основной длины волны оптимизационная модель будет иметь вид

$$PAR(*) = C; EQF(*) = VG\emptyset; EQF\#(*) = -100;$$

$$MF(*) = DSA/'2, DYA/01; RAYA = 2;$$

Если подобный двухлинзовый склеенный объектив используется в качестве объектива телескопической системы, то он должен компенсировать остаточные аберрации окуляра. В этом случае оптимизационная модель имеет вид

$$PAR(1) = C; EQF(1) = VG\emptyset; MF(1-2) = DSA/'0, DYA/01;$$

$$MF\#(1-2) = A, B;$$

где А и В — значения хроматической аберрации положения и сферической аберрации окуляра, вычисленные в обратном ходе лучей и взятые с обратным знаком.

Для получения минимального пятна рассеяния осевой предметной точки для заданной пары стекол можно воспользоваться следующей оптимизационной моделью:

$$PAR(1) = C; EQF(1) = VG\emptyset;$$

$$MF(1-3) = DYA/0I, DYA/1I, DYA/2I;$$

$$MFW(1-3) = 1, 1, 1; RAYA = 4;$$

Изменяя указатель I в каждой марке на номер луча (1, 2, 3) и весовые коэффициенты для марок различных длин волн, можно добиться минимальной величины пятна рассеяния.

5.2. Оптимизационная модель телескопической (афокальной) системы

В телескопической системе необходимо держать постоянным угловое (видимое) увеличение $VG\emptyset$ и афокальность системы $SG' = \emptyset$ или $OP = \emptyset$. Условие соблюдения афокальности осуществляется в том случае, когда задний фокус первого компонента

совпадает с передним фокусом второго компонента. Для выполнения этого условия необходимо использовать в качестве коррекционного параметра воздушный промежуток между первым и вторым компонентами.

5.2.1. Афокальная система для преобразования лазерного излучения

Рассмотрим оптимизационную модель афокальной системы для преобразования лазерного излучения, исходящего из газового или твердотельного лазера через плоский резонатор. В качестве такой системы обычно используется телескопическая система типа Галилея. Она короче системы типа Кеплера и не создает действительного промежуточного изображения.

Если относительное отверстие компонентов не превышает 1:10, то в качестве оптических элементов можно использовать одиночные линзы. Такая ОС должна уменьшать расходимость лазерного пучка, поэтому систему типа Галилея следует использовать в обратном ходе лучей. Угловое увеличение γ определяем исходя из требуемой расходимости лазерного пучка. Первая линза имеет отрицательную оптическую силу и малое фокусное расстояние (f'_1), а вторая — положительную оптическую силу и большее фокусное расстояние $f'_2 = -f'_1/\gamma$, где γ — угловое увеличение афокальной системы. Выбрав относительное отверстие компонентов 1:10, определяем фокусное расстояние первой линзы $f'_1 = -10D$, где D — диаметр лазерного пучка.

Так как расходимость лазерного пучка незначительна, в такой системе в первую очередь исправляют aberrации осевого пучка (точка на оси). Излучение лазера монохроматическое, поэтому следует исправлять только сферическую aberrацию для основной длины волны. В данной системе сферическая aberrация первой линзы должна быть компенсирована aberrацией второй линзы. Известно, что величина сферической aberrации зависит от формы линзы и пропорциональна фокусному расстоянию [6]. Вторая линза имеет большее фокусное расстояние по сравнению с первой, поэтому ее расчет следует проводить в обратном ходе лучей на минимум сферической aberrации. Присоединительные характеристики такой линзы следующие: предмет дальний, изображение

ближнее, угловое поле равно нулю. Входной зрачок совпадает с первой поверхностью. Задняя апертура $n' \cdot \sin \sigma' \approx n' \operatorname{tg} \sigma' = 0,05$ (относительное отверстие линзы 1:10).

Рекомендуется следующий порядок синтеза подобной системы.

Задаем длину волны излучения лазера. Настраиваем программу для представления конструктивных параметров через углы первого вспомогательного луча. Для этого в главном меню входим в работу «Настроить», из которой переходим в подменю «Поверхность», где выбираем способ задания поверхностей «Углы нулевого луча», и задаем начальные значения первого вспомогательного луча $\alpha_0 = 0$ (предмет в бесконечности), $h_1 = f'_2$. Затем в работе главного меню «Конструктивные параметры» вводим значения остальных углов $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_2 = 1$. Толщину линзы выбираем исходя из конструктивных соображений. Следует иметь в виду, что чем больше толщина линзы, тем меньше сферическая aberrация. При выборе марки материала следует помнить, что чем больше показатель преломления среды, тем меньше остаточная сферическая aberrация положительной линзы. С помощью работы «Настроить» в подменю «Поверхность» выбираем способ задания поверхностей через радиусы кривизны поверхностей «Радиусы». Конструктивные параметры полученной линзы сохраняем в памяти компьютера и далее оптимизируем на минимум сферической aberrации с помощью следующей оптимизационной модели:

$$PAR(1 - 2) = C/1, C/2; \quad EQF = VG\emptyset; \quad MF(1) = DSA/01;$$

Полученную линзу оборачиваем и сохраняем в памяти компьютера. Затем синтезируем первую линзу системы, для которой задаем тип предмета — дальний, изображение — ближнее. Угловое поле равно угловой расходимости лазера, положение апертурной диафрагмы определяется местоположением плоского резонатора относительно первой поверхности линзы. Передняя апертура равна половине диаметра пучка лазера на резонаторе. Задаваемая длина волны излучения должна соответствовать длине излучения лазера. Исходные конструктивные параметры линзы: $r_1 = 0$ (плоская поверхность), r_2 — произвольное число. Толщину линзы из конструктивных соображений задаем равной $1/8 \dots 1/10$ от светового диаметра пучка лазера. Материал второй линзы выбираем таким,

чтобы его показатель преломления был меньше показателя преломления второй линзы. С помощью подменю «Подгонка характеристик», находящегося в меню «Система», получаем требуемое значение фокусного расстояния отрицательной линзы, изменяя радиус кривизны ее второй поверхности.

К полученной линзе присоединяем вторую линзу, рассчитанную в обратном ходе лучей (работа «Присоединение» в главном меню «Файл»). Тип изображения изменяем на дальний. Устанавливаем активное окно на вторую толщину d_2 (воздушный промежуток между линзами) и задаем произвольную величину, например 100. Обращаемся снова к подменю «Подгонка характеристик» и осуществляем подгонку SG' (положение плоскости Гаусса) с помощью осевого расстояния d_2 . После двукратного нажатия клавиши Enter программа определяет расстояние между линзами, обеспечивающее афокальность двухлинзовой ОС. Полученную систему сохраняем в памяти компьютера и оптимизируем с помощью следующей оптимизационной модели:

$$PAR(*) = C/1 - 2, D/2; \quad EQF(1 - 2) = VG\emptyset, SG';$$

$$MF(1) = DYA/\emptyset*; \quad RAYA = 2;$$

Если полученная ОС не удовлетворяет техническому заданию по угловой расходимости пучка, то расходимость можно попытаться уменьшить изменением воздушного промежутка. Для этого в присоединительных характеристиках измерение аберраций нужно производить не в плоскости Гаусса, а в плоскости выходного зрачка.

5.2.2. Простейшая телескопическая система

Обычно простейшая телескопическая система состоит из двухлинзового склеенного объектива и окуляра, который выбирается из каталога по величине углового поля в пространстве изображения. Сборка такой системы описана в [1]. Если в данной ОС изменяются конструктивные параметры одного объектива, то оптимизационная модель имеет следующий вид:

$$PAR(1 - 2) = C/1 - 3, D/3; \quad EQF(1 - 2) = VG\emptyset, SG';$$

$$MF(1 - 2) = DSA/'\emptyset, DYA/\emptyset 1;$$

Если объектив предварительно был рассчитан в области аберраций третьего порядка из условия компенсации остаточных аберраций (хроматической аберрации положения, сферической аберрации по краю входного зрачка), то можно исправить и третью аберрацию (меридиональную кому для края поля и края зрачка). Запись корригируемых функций может быть следующей:

$$MF(1 - 3) = DSA/\vartheta, DYA/\vartheta_1, DYM/\vartheta_{11}^*;$$

Если в процессе оптимизации изменяются кривизны как объектива, так и окуляра, то необходимо следить за длиной оптической системы. Это можно осуществить одним из следующих способов:

- 1) $EQF(*) = VG\vartheta, SG', VG\vartheta/1 - 3/FN$;

В этом случае фокусное расстояние объектива сохраняется неизменным и длина всей системы изменяется незначительно;

- 2) $EQF(*) = VG\vartheta, SG', OP/4 - 9$; или $VG\vartheta/4 - 9/FN$;

Здесь выдерживается оптическая сила окуляра и длина системы также не будет сильно изменяться;

- 3) ограничить длину системы «справа» с помощью марок $L >$ или $LS' >$.

5.2.3. Телескопическая система с призмной оборачивающей системой

В телескопических системах типа системы Кеплера для получения прямого изображения используется призма с крышей. Для подобной ОС можно рекомендовать следующую оптимизационную модель:

$$PAR(*) = C, -C/3, -C/4, D/3;$$

$$EQF(*) = VG\vartheta, SG', VG\vartheta/1 - 3/FN;$$

$$EQF\#(*) = -5, \vartheta; -125,$$

$$MF(*) = DSA/\vartheta, DYA/\vartheta_1, DYM/\vartheta_{11}U, DYM/\vartheta_{11}D;$$

Данный пример приведен для телескопической системы с видимым увеличением $\Gamma = 5$ и фокусным расстоянием объектива $f'_{об} = 125$ мм. Если указанные аберрации после оптимизации не будут превышать заданных значений, то можно добавить в оптимизационную модель исправление других аберраций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бибчук Л.Г., Бодров С.В.* Компьютерный анализ и оптимизация оптических систем: Учеб. пособие. Ч. 1. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 32 с.
2. *Родионов С.А.* Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.
3. *Верхотуров О.П.* Введение в вычислительную оптику: Учеб. пособие / Сиб. гос. геодез. акад. Новосибирск, 1998. 273 с.
4. Вычислительная оптика: Справ./ М.М. Русинов, А.П. Грамматин, П.Д. Иванов и др.; Под общ. ред. М.М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. 423 с.
5. Проектирование оптических систем: Пер. с англ. / Под ред. Р. Шеннона, Дж. Вайанта. М.: Мир, 1983. 432 с.
6. *Слюсарев Г.Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 670 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
1. Необходимые условия начала оптимизации	5
2. Критерий качества	6
3. Оптимизационная модель	7
3.1. Коррекционные параметры	7
3.2. Связи между параметрами	8
3.3. Ограничения на величину параметров	10
3.4. Методы контроля ограничений на величину коррекционных параметров	10
3.5. Марки параксиальных и габаритных характеристик	11
3.6. Равенства	18
3.7. Функции неравенства	19
4. Геометрические aberrации	21
4.1. Марки aberrаций осевого пучка	24
4.2. Марки aberrаций главного луча внеосевого пучка	25
4.3. Марки aberrаций меридионального сечения внеосевого пучка	26
4.4. Марки aberrаций сагиттального сечения внеосевого пучка	27
4.5. Марки aberrаций косоугольного сечения внеосевого пучка	27
5. Оптимизационные модели простейших оптических систем	28
5.1. Оптимизационная модель двухлинзового склеенного объектива ($OB = 0$; $IM = 1$;)	28
5.2. Оптимизационная модель телескопической (афокальной) системы	29
5.2.1. Афокальная система для преобразования лазерного излучения	30
5.2.2. Простейшая телескопическая система	32
5.2.3. Телескопическая система с призмной оборачивающей системой	33
Список литературы	34

Учебное издание

**Бибчук Леонид Геннадьевич
Бодров Сергей Васильевич
Заварзин Валерий Иванович**

**КОМПЬЮТЕРНЫЙ АНАЛИЗ
И ОПТИМИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Часть 2

Редактор *С.Ю. Шевченко*
Корректор *М.А. Василевская*
Компьютерная верстка *В.И. Товстоног*

Подписано в печать 10.12.2008. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,95. Тираж 100 экз. Изд. № 76.

Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., 5