

А. П. СМЕРНОВ, А. С. РЕЗНИКОВ, Д. А. АБРАМОВ

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ПЕРЕСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ

Рассматривается программа избирательной весовой оптимизации критериев качества оптического изображения по интегральным абберационным критериям, разработанная с использованием метода случайной генерации исходных параметров оптического прибора, равномерно распределенных по факторному пространству. Приведены примеры расчетов.

Ключевые слова: конструирование, оптическая система, программирование, MathCad.

Для создания функционального оптического устройства, удовлетворяющего определенным техническим требованиям, необходимо подобрать аналог, проверить его характеристики и произвести при необходимости их перерасчет, используя тот или иной пакет программ. Если такой путь не приносит желаемого результата, то ставится задача по оптическому расчету требуемого устройства.

Эта задача может быть решена с помощью одной из программ расчета оптики. Среди отечественных разработок известны [1]: система автоматизированного расчета оптики (САРО), разработанная в Государственном оптическом институте им. С. И. Вавилова (Санкт-Петербург) А. Б. Дегеном, и система оптических алгоритмов (ОПАЛ), разработанная в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики. Среди зарубежных разработок наиболее востребована в настоящее время программа ZEMAX.

Аналог оптического устройства, как правило, оптимизированный по абберационным критериям, доведен до оптимального определенного уровня, и возможности его улучшения в рамках выбранного пакета программ расчета оптики невелики. С другой стороны, при использовании конкретного функционального устройства не все характеристики аналога в рав-

ной степени важны для конструктора, и возникает вопрос, возможно ли их перераспределение: т.е. можно ли какой-либо параметр улучшить за счет ухудшения другого, несущественного в данных условиях. В этом случае требуется разработать программу избирательной, весовой оптимизации критериев качества оптического изображения, протекающей параллельно анализу аналога. Для этого необходимо пересчитать оптическую схему по некоторому числу ее параметров, что позволит образовать факторное пространство, построить исходные схемы, провести оптимизацию и сравнить с аналогом. В настоящей статье приводится решение этой задачи, реализованное в среде программирования MathCad. Алгоритм решения включает следующие действия.

1. Генерация в рамках конструктивных ограничений большого количества исходных схем, равномерно распределенных по факторному пространству. Число схем и границы параметров задаются пользователем. Некоторые параметры схем могут быть заданы фиксированными значениями: например, параметры плоских или базовых [2] поверхностей, толщины, воздушные промежутки, показатели преломления, коэффициенты асферики.

2. Назначение обобщенного критерия качества изображения, учитывающего реальные aberrации при различных положениях точки предмета по полю зрения, а также поперечную aberrацию, кому, дисторсию, астигматизм, хроматизм.

3. Выбор начальной точки факторного пространства, обуславливающий оптимальное значение обобщенного критерия. При этом используется реальная оптическая схема с небольшим числом лучей в пучке. В качестве математической модели оптической системы используется модель, описанная в работе [3].

4. Составление матрицы планирования полного факторного эксперимента [4] с учетом конструктивных ограничений. Вычисление значения обобщенного критерия, выбор его оптимального значения и повтор процесса до достижения стационарной области.

5. Использование, как один из вариантов алгоритма, дополнительных факторов, например асферизации, не нарушающих конструктивных ограничений, обычно сформулированных в рамках параксиальной оптики. В этом случае алгоритм оптимизации аналогичен изложенному в п. 4.

6. Проверка найденного решения с использованием большого числа лучей и, возможно, незначительная корректировка конструктивных параметров для устранения ошибки дискретизации, поскольку оптимальное решение было найдено с помощью малого числа лучей.

7. Анализ полученного решения, например, с использованием аналога.

8. Анализ влияния зафиксированных ранее (см. п. 1) параметров и выработка окончательного решения.

Приведем примеры, демонстрирующие возможности предложенного алгоритма.

Конструктивные ограничения. Все оптические системы могут быть отнесены к трем классам:

А — предмет и его изображение находятся на конечном расстоянии от оптической системы;

Б — либо предмет, либо его изображение находятся на бесконечном расстоянии от оптической системы;

В — и предмет, и изображение находятся на бесконечности (телескопические системы).

Поскольку телескопические системы могут быть разбиты на две системы класса „Б“, то будем рассматривать только класс „А“, а из класса „Б“ — системы типа „объектив“. Класс „А“ будем характеризовать двумя параметрами: расстоянием от плоскости предмета до плоскости изображения (L) и линейным увеличением (V). Класс „Б“ можно охарактеризовать параметром L , под которым понимается или заднее фокальное расстояние (параксиальный параметр), или задний фокальный отрезок (реальный параметр).

Для реализации конструктивных ограничений необходима программа расчета параксиальных характеристик оптической системы: $F(R, T, n)$, где R — вектор радиусов кривизны

поверхностей, T — вектор толщин и воздушных промежутков, n — вектор показателей преломления. Пусть T и n — фиксированные параметры, один из радиусов R' выбираем свободным параметром, тогда конструктивные ограничения для системы в воздухе будут определяться нулевым уровнем следующих функций:

$$\text{Класс „А“: } G(R') = d' - d + \sum t - L - \frac{(V-1)^2}{V} f' = 0;$$

$$\text{Класс „Б“: } 1) G(R') = f' - L = 0, \quad 2) G(R') = f' + d' - L = 0.$$

Остальные радиусы составляют факторное пространство и задаются по равномерному закону распределения в заданных границах, каждый набор параметров образует точку факторного пространства.

Обобщенный критерий качества изображения. Обобщенный критерий строится по пятну рассеяния, полученному с использованием модели реальной оптической системы с помощью трассировки пучка лучей, равномерно распределенных по входному зрачку. Для заданных точек поля (ближней и дальней) рассчитывается среднее квадратическое отклонение (СКО), характеризующее интегральную поперечную аберрацию. В пятне рассеяния асимметрия пучка характеризуется сдвигом центра тяжести пятна относительно главного луча, что, в свою очередь, характеризует кому. Сдвиг центра тяжести пятна относительно гауссового изображения характеризует дисторсию, разность СКО абсцисс и ординат дает представление об астигматизме, максимальная разность диаметров хроматических пятен с учетом их положения относительно точки на оси может быть мерой хроматизма положения, а относительно точки на краю поля — мерой хроматизма увеличения. Поскольку все перечисленные критерии имеют одну размерность, то обобщенный критерий может быть сформирован как взвешенная их сумма. Весовые коэффициенты задаются пользователем.

Оптимизация. Предварительная оптимизация проводится на стадии стохастического поиска. Уточнение схемы на этапе использования матрицы планирования характеризуется выбором начального шага изменения факторов, например, на первой стадии — 1 мм для радиусов, и на второй стадии — 0,0001 для конических постоянных поверхностей. Далее проводится вычисление критерия по методу градиентного спуска. На этом этапе осуществляется поиск локального экстремума, как и в традиционной методике планирования эксперимента. Смена области поиска экстремума в случае неудовлетворительного результата осуществляется путем повторения алгоритма.

Рассмотрим простой пример автоматизированного пересчета — расчет двухлинзового окуляра. В качестве эталона используем:

- окуляр Рамсдена из двух плосковыпуклых линз, разнесенных относительно друг друга и направленных навстречу друг другу;
- окуляр Фраунгофера, плосковыпуклые линзы в этом случае приближены друг к другу;
- окуляр Гюйгенса, здесь плосковыпуклые линзы обращены плоскостями к глазу наблюдателя [5].

Следует отметить конструктивную особенность окуляра Гюйгенса, которая заключается в том, что в обратном ходе лучей задний фокус является мнимым и расположен между линзами, где может быть помещена сетка. В случае же когда при расчетах фокусное расстояние окуляра Гюйгенса фиксировано, реализуется схема, в которой фокус находится внутри линзы и сетка не может быть использована.

В табл. 1 приведены конструктивные параметры трех типов окуляров, в скобках указаны два варианта рассчитанных параметров: в первом случае (данные в круглых скобках) фиксировался фокальный отрезок, во втором (данные в фигурных скобках) фиксировалось фокусное расстояние. Во всех случаях размер выходного зрачка 5 мм, его положение относительно последней поверхности — 7 мм.

В качестве критерия оптимизации было принято среднее значение СКО поперечной аберрации по полю. Аберрации эталонов и рассчитанных образцов представлены в табл. 2. Как видно из таблицы, сумма СКО для точки на оси (СКО₀) и на краю поля (СКО_w) для рассчитанных образцов меньше соответствующей величины для эталона.

Таблица 1

Окуляр Рамсдена (2w=36°)			Окуляр Фраунгофера (2w=40°)			Окуляр Гюйгенса (2w=31°)		
R	t	n _D	R	t	n _D	R	t	n _D
∞	3,5	1,5163	∞	5,0	1,5163	21,4 (-42,395) {-30,202}	3	1,6199
-17,2 (-11,625) {-17,68}	21,7	1,0	-25,815 (-40,757) {-42,43}	0,1	1,0	∞	25,9	1
17,2 (18,403) {16,767}	2,3	1,5163	25,815 (18,913) {17,541}	5,0	1,5163	10,2 (8,234) {13,344}	2,5	1,5163
∞		1,0	∞		1,0	∞		1,0
f' = 24,702; s' _F = 6,303 (f' = 22,012; s' _F = 6,303) {f' = 24,702; s' _F = 5,887}			f' = 25,025; s' _F = 21,677 (f' = 25,043; s' _F = 21,677) {f' = 25,025; s' _F = 20,657}			f' = 24,871; s' _F = -10,066 (f' = 13,6; s' _F = -10,066) {f' = 24,871; s' _F = -1,835}		

Таблица 2

Оптическая система		СКО ₀	СКО _w	Кома	Дисторсия, %	Хроматизм в центре	Хроматизм на краю
		Эталон	0,021	0,033	0,012	-2,6	0,024
Окуляр Рамсдена	Расчет	0,016	0,035	-0,002	-7,4	0,022	0,103
		0,022	0,031	0,011	-2,25	0,024	0,087
Окуляр Фраунгофера	Эталон	0,013	0,101	0,028	-5,9	0,031	0,009
	Расчет	0,020	0,063	0,022	-4,7	0,029	0,010
		0,022	0,059	0,018	-4,7	0,029	0,009
Окуляр Гюйгенса	Эталон	0,088	0,143	-0,043	-3,9	0,044	0,078
	Расчет	0,075	0,130	0,016	-10,7	0,016	0,044
		0,039	0,031	-0,012	-7,1	0,027	0,081

Анализ табл. 2 показывает, что для простых двухлинзовых окуляров существуют некоторые возможности оптимизации поперечной аберрации по полю в двух случаях за счет увеличения дисторсии.

Рассмотрим другой пример — окуляр типа Гюйгенса, составленный из склейки (из двух линз) и двояковыпуклой линзы [5]. Угловое поле таких окуляров достигает 45°. Окуляр имеет пять поверхностей. Для уменьшения размерности факторного пространства первая и последняя поверхности задавались плоскими. Конструктивные параметры таких окуляров приведены в табл. 3.

Таблица 3

Окуляр-аналог (2w=70°)			Окуляр № 1 (2w=80°)			Окуляр № 2 (2w=100°)		
R	t	n _D	R	t	n _D	R	t	n _D
66,2	6,0	1,5163	∞	6,0	1,5163	∞	6,0	1,5163
-31,1	18,0	1	-30,943	18,0	1	-50,781	18,0	1
18,1	5,5	1,5399	17,686	5,5	1,5399	17,104	5,5	1,5399
-13,5	1,5	1,6199	141,111	1,5	1,6199	109,565	1,5	1,6199
-95,5			∞			∞		
f' = 25,02; s' _F = 7,5			f' = 26,066; s' _F = 7,5			f' = 27,429; s' _F = 7,5		

Если по конструктивным соображениям дисторсия может быть компенсирована системой обработки изображения, то угловое поле окуляра Гюйгенса может быть раздвинуто до 70°, а для его конструктивных аналогов с плоскими крайними поверхностями — до 80°

и 100° . Интегральные абберрационные характеристики широкоугольных окуляров типа Гюйгенса приведены в табл. 4.

Таблица 4

Окуляр Гюйгенса	СКО ₀	СКО _w	Кома	Дисторсия, %	Астигматизм	Хроматизм в центре	Хроматизм на краю
Аналог:							
45°	0,014	0,054	0,02	-4,96	0,012	0,005	0,04
70°	0,014	0,422	0,159	-10,13	0,326	0,005	0,048
№ 1:							
45°	0,023	0,044	-0,007	-5,4	0,062	0,029	0,062
80°	0,023	0,121	-0,037	-13,9	0,146	0,029	0,186
№ 2:							
45°	0,026	0,061	-0,011	-5,3	0,036	0,032	0,035
100°	0,026	0,315	-0,074	-26,7	0,053	0,032	0,251

Аналогично проводится пересчет-анализ любой другой оптической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Практикум по автоматизации проектирования оптико-механических приборов / Ред. В. В. Малинин. М.: Машиностроение, 1989. 272 с.
2. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. Смирнов А. П. Модель оптической системы в среде MathCad // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 4. С. 56—62.
4. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
5. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред. М. М. Русинова. Л.: Машиностроение, 1984. С. 321—324.

Сведения об авторах

- Александр Павлович Смирнов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: apsmirnov@bk.ru
- Анатолий Сергеевич Резников** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Дмитрий Александрович Абрамов** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
26.04.11 г.