УДК 681.45

ВЫБОР ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОБЪЕКТИВОВ

© 2007 г. **И. Л. Лившиц***, канд. техн. наук; **А. В. Сальников***; **Unchung Cho****

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: irina@jupiter.spb.ru

** Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University, Kyonggi-Do, South Korea

E-mail: cho@kpu.ac.kr

В настоящей работе рассматривается один из подходов к процессу выбора исходной системы при расчете оптической системы, основанный на применении эвристических правил, являющихся формализацией и обобщением опыта разработчиков объективов. Приведены примеры расчета объективов.

Коды OCIS: 080.0080.

Поступила в редакцию 05.02.2007.

На сегодняшний день компьютерные технологии широко используются в различных областях науки и техники, в том числе и в оптическом приборостроении, которое уже невозможно представить без применения современного специализированного программного обеспечения (SARO, OPAL, SYNOSYS, CODE-V, Zemax и др.). Однако существующее программное обеспечение не предоставляет пользователю возможности автоматизированного выбора исходной системы для расчета. В настоящей статье рассматривается один из подходов к решению этой проблемы.

Общий процесс проектирования оптической системы (ОС) состоит из следующих этапов:

1) анализ технического задания,

2) выбор исходной системы (структурный синтез),

3) определение параметров системы (параметрический синтез),

4) оценка качества изображения и других параметров оптической системы,

5) создание оценочной функции,

6) оптимизация параметров оптической системы,

7) оценка степени удовлетворения требований технического задания полученной оптической системой (в случае негативного результата оценки необходимо вернуться к этапу 2),

8) расчет допусков,

9) оформление технической документации.

На сегодняшний день этапы 1, 2, 5 и 7 выполняются разработчиком. Остальные этапы уже в значительной степени автоматизированы. Поэтому даже частичная автоматизация оставшихся этапов существенно повысит эффективность процесса разработки.

Очень важно понять, что оптик-расчетчик вправе ожидать от современного персонального компьютера. Требования, предъявляемые к персональным компьютерам сферой разработки оптических систем, такие как низкая стоимость, удобство использования, широкие графические возможности, высокая точность и скорость расчетов сегодня поддерживаются большинством систем, доступных рядовому пользователю.

Время от времени многие задаются вопросом: возможно ли, что в будущем присутствие разработчика станет излишним? Впервые этот вопрос возник в то время, когда программы автоматизированного расчета оптических систем стали применяться на практике. Подобного рода программы были способны привести заданную оптическую систему к ближайшей оптимальной конфигурации с помощью минимизации определенной оценочной функции, которая обычно представлялась в виде суммы квадратов величин выбранных аберраций.

В n-мерном пространстве (где n – количество варьируемых конфигурационных параметров оптической системы) задача сводится к нахождению конфигурации системы с минимальным значением оценочной функции. Однако оказывается, что для системы любой степени сложности существует множество локальных минимумов и даже для простых систем возможно существование нескольких минимумов. Таким образом, удачный выбор исходной системы на ранних этапах разработки в значительной мере сокращает общее время проектирования. Предлагаемый подход к выбору исходной системы при расчете объективов включает в себя ряд основных этапов: классификацию объективов, формализацию процесса структурного синтеза, параметрический синтез.

Классификация объективов

Классификация объективов представлена в работах [1–3]. Формализация процесса структурного синтеза рассматривается в работах [2, 4]. Параметрический синтез выполняется с применением специализированного программного обеспечения [5, 6].

Наиболее общая классификация оптических систем (по относительному расположению предмета и изображения) включает четыре класса систем: телескопические, микрообъективы, оборачивающие и фотообъективы. В рамках данной работы рассматривается только класс фотообъективов. Предлагаемая классификация объективов, изображенная на рис. 1, включает в себя различие ОС по следующим характеристикам: относительному отверстию, угловому полю, фокусному расстоянию, назначению в части спектрального диапазона, качеству изображения, расположению диафрагмы, величине заднего фокального отрезка и положению входного зрачка.

Окончательно было выделено семь основных характеристик класса: J – светосила системы, W – угловое поле, F – фокусное расстояние, L – диапазон ахроматизации, Q – качество изображения (степень аберрационной коррекции), S – величина заднего фокального отрезка, D – положение входного зрачка. Все возможные значения каждой из характеристик разделены на три диапазона следующим образом.

1. Светосила системы J: диапазон 0 – относительное отверстие меньше чем 1:2,8, диапазон 1 – относительное отверстие находится в пределах от 1:2,8 до 1:1,5, диапазон 2 – относительное отверстие больше чем 1:1,5.

2. Угловое поле W: диапазон 0 – до 15°, диапазон 1 – от 15° до 60°, диапазон 2 – широкое, свыше 60°.

3. Фокусное расстояние F: диапазон 0 – менее 50 мм, диапазон 1 – от 50 до 100 мм, диапазон 2 – свыше 100 мм.

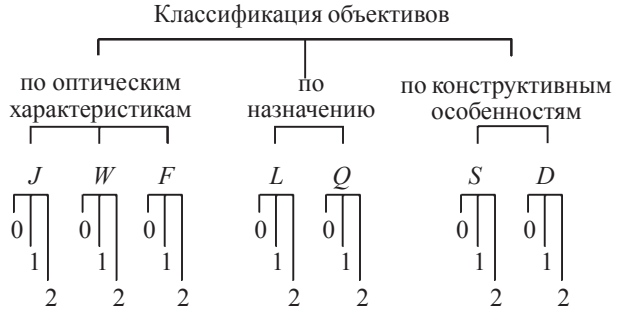


Рис. 1. Структура классификации объективов.

4. Диапазон ахроматизации L: диапазон 0 – монохроматический, диапазон 1 – с интервалом рабочих длин волн от 2,5 до 100 нм, диапазон 2 – с интервалом более 100 нм.

5. Качество изображения Q: диапазон 0 – “геометрически ограниченное”, диапазон 1 – “промежуточное” качество изображения, диапазон 2 – дифракционное качество изображения.

6. Величина заднего фокального отрезка S: диапазон 0 – менее половины величины фокусного расстояния объектива, диапазон 1 – от половины до величины фокусного расстояния объектива, диапазон 2 – превышает величину фокусного расстояния объектива.

7. Положение входного зрачка D: диапазон 0 – внутри объектива, диапазон 1 – после задней поверхности объектива, диапазон 2 – перед первой поверхностью объектива.

Таким образом, отдельный класс объектива определяется совокупностью индексов диапазонов в соответствии со значениями каждой из характеристик. Всего в принятой классификации объективов различается $3^7 = 2187$ классов. Сумма индексов класса определяет общую степень его сложности – чем она выше, тем сложнее найти решение поставленной задачи. Таким образом, возможные значения степени сложности находятся в пределах от 0 до 14, при этом ОС со степенью сложности от 6 до 11 можно считать сложными, а свыше 11 – особо сложными при проектировании.

В качестве примера нахождения класса объектива по предложенному методу рассмотрим типичные варианты технического задания на разработку схемы объектива. Важно отметить, что в соответствии с предложенной классификацией возможен непосредственный переход от численных показателей характеристик технического задания к конкретному классу объектива.

Пример первый – требуется спроектировать объектив, отвечающий следующим требованиям: $F = 4{,}5$ мм, $W = 84°$, $J = 1{:}1{,}8$, $S = 5{,}5$ мм, входной зрачок расположен внутри системы, рабочие длины волн 490, 546,1, 643,9 нм, геометрически ограниченное качество изображения. В рассматриваемом примере искомым будет являться класс со следующими индексами диапазонов характеристик: $J = 1$, $W = 2$, $F = 0$, $L = 2$, $Q = 0$, $S = 2$, $D = 0$. Степень сложности класса рассматриваемой ОС равна 7, что указывает на принадлежность системы к разряду сложных.

Пример второй – требуется спроектировать объектив, отвечающий следующим требованиям: $F = 8$ мм, $W = 45°$, $J = 1{:}1{,}27$, $S = 6$ мм, вынесенный вперед входной зрачок, рабочие длины волн 490, 546,1, 643,9 нм, геометрически ограниченное каче-

ство изображения. Следовательно, искомым будет являться класс со следующими индексами диапазонов характеристик: $J = 1$, $W = 1$, $F = 0$, $L = 2$, $Q = 0$, $S = 1$, $D = 2$. Степень сложности класса рассматриваемой ОС равна 7, что указывает на принадлежность системы к разряду сложных.

Формализация процесса структурного синтеза

Под формализацией процесса структурного синтеза понимается установление взаимосвязей между требованиями технического задания, классификацией объективов и элементной базой посредством применения набора эвристических правил.

В качестве элементной базы выбираются оптические элементы с известными свойствами, и было предложено образовывать оптические элементы из поверхностей, не вносящих определенные аберрации. Соответствующая теория была разработана Русиновым М.М. [7] и Шефер Д. [8]. В соответствии с этой теорией развитие оптической схемы начинается с одного элемента, называемого базовым. Дальнейшее развитие схемы осуществляется путем введения необходимых коррекционных элементов. Данная теория получила свое развитие в работах Анитроповой И.Л. [2, 6, 9], где было предложено дополнительно выделять два типа оптических элементов: “широкоугольные” и “светосильные”, для развития углового поля объектива и его относительного отверстия соответственно. Было предложено обозначать поверхности с известными оптическими свойствами буквами латинского алфавита, а именно: *O* – плоская поверхность, *P* – концентричная центру входного зрачка, *A* – апланатическая поверхность, *F* – концентричная точке фокуса, *I* – близфокальная поверхность [2]. Также было предложено обозначать относительное расположение поверхности в оптической схеме следующими символами: (– в пространстве от предмета до апертурной диафрагмы,) – вблизи апертурной диафрагмы, / – в близфокальной зоне. На настоящий момент список оптических элементов с известными свойствами включает в себя 41 элемент, в их числе 6 базовых, 8 широкоугольных, 15 светосильных и 12 коррекционных элементов.

Обычно в процессе разработки схемы оптической системы при принятии решений о том, какие оптические элементы необходимо ввести в оптическую схему и на каком месте их расположить, оптик-проектировщик руководствуется собственным опытом. В работах Анитроповой И.Л. был составлен набор правил для определения степени пригодности оптических элементов в различных областях общей классификации объективов и определены места их расположения. Данные эвристические правила формализуют процесс установления соответствия оптических элементов требованиям технического задания. Позже указанные правила были сформулированы в виде логических выражений и особым образом записаны в реляционной базе данных. Общий процесс структурного синтеза был формализован в виде алгоритма, использующего приведенную классификацию и базу эвристических правил. На основе данного алгоритма был реализован тестовый программный продукт, позволяющий пользователю задавать требования к искомому классу объектива, в результате чего пользователю выдаются рекомендации по выбору исходной системы в виде структурных формул оптических схем. Разумеется, количество и качество выдаваемых решений напрямую зависят от полноты базы эвристических правил. Следует отметить, что структурная формула не несет информации о свойствах материала оптических элементов, для этого экспертами было предложено эмпирическое правило: для элементов с положительной оптической силой рекомендуется применять материалы типа крон, а для отрицательных – типа флинт.

Продолжим рассмотрение первого примера. В результате ввода полученного класса искомого объектива ($J = 1$, $W = 2$, $F = 0$, $L = 2$, $Q = 0$, $S = 2$, $D = 0$) в тестовый программный продукт была получена следующая структурная формула: $S(AP(+ K(PP(+ B)AP) + + C)AP) + K)PP)$, которая несет в себе следующую информацию о структуре оптической системы:

Элемент 1 – широкоугольный: первая поверхность апланатическая, вторая концентрична центру входного зрачка, обе поверхности расположены до апертурной диафрагмы;

элемент 2 – коррекционный: обе поверхности концентричны центру входного зрачка и расположены до апертурной диафрагмы;

элемент 3 – базовый: первая поверхность апланатическая, вторая концентрична центру входного зрачка, обе поверхности расположены вблизи апертурной диафрагмы;

элемент 4 – светосильный: первая поверхность апланатическая, вторая концентрична центру входного зрачка, обе поверхности расположены вблизи апертурной диафрагмы;

элемент 5 – коррекционный: обе поверхности концентричны центру входного зрачка и расположены вблизи апертурной диафрагмы.

Продолжим рассмотрение второго примера. В результате ввода полученного класса искомого объектива ($J = 1$, $W = 1$, $F = 0$, $L = 2$, $Q = 0$, $S = 1$, $D = 2$) в тестовый программный продукт была получена следующая структурная формула: $B)AP) + + K)PP) + C)AP)$, которая несет в себе следующую информацию о структуре оптической системы:

элемент 1 – базовый: первая поверхность апланатическая, вторая концентрична центру входного зрачка, обе поверхности расположены вблизи апертурной диафрагмы;

элемент 2 – коррекционный: обе поверхности концентричны центру входного зрачка и расположены вблизи апертурной диафрагмы;

элемент 3 – светосильный: первая поверхность апланатическая, вторая концентрична центру входного зрачка, обе поверхности расположены вблизи апертурной диафрагмы.

Из вышеописанного следует, что структурная формула несет в себе информацию о количестве, взаимном расположении и типах поверхностей оптических элементов. Таким образом, структурная формула является исходной системой, необходимой разработчику оптической системы для перехода от технического задания к параметрическому синтезу – определению конкретных параметров системы с возможностью ее дальнейшего расчета и ее оптимизации.

Параметрический синтез

На этапе параметрического синтеза, исходя из свойств поверхностей, определяются радиусы поверхностей и расстояния между ними, а также оптические материалы. Для этого удобно воспользоваться программным обеспечением для расчета оптических систем, например программой “SYNOPSYS” [5] (демоверсия программы доступна бесплатно в сети Интернет на сайте разработчика).

Необходимо отметить, что выбор указанного программного продукта из общего числа программных продуктов по расчету оптических систем основывался на том, что он позволяет автоматически вычислять радиусы поверхностей, указав их свойства, выбирать конкретные марки стекол из общепризнанных каталогов (к примеру, таких ведущих в этой области компаний, как Schott, Ohara, Corning Glass и пр.), проводить автоматическую коррекцию заданных параметров под требуемое техническое задание посредством варьирования указанных свободных параметров.

В приведенных ранее примерах свободными параметрами являются толщины оптических элементов, расстояния между ними и конкретные оптические материалы. Радиусы поверхностей элементов диктуются их свойствами и рассчитываются автоматически. Пользуясь “SYNOPSYS”, в соответствии с выбранной структурной схемой для описанного примера были заданы указанные типы поверхностей. Затем, принимая во внимание требуемые величины диафрагмы и фокусного расстояния, были определены расстояния между элементами. Далее были выбраны материалы: для отрицательных элементов было выбрано стекло марки Ф1, для положительных – марки К8. После того как основные параметры и свойства элементов были заданы, была получена конкретная оптическая система, основанная на структурной схеме, предложенной тестовым программным продуктом.

В результате параметрического синтеза на основе рекомендаций, указанных в рассмотренных ранее примерах, были получены системы, отвечающие всем требованиям технического задания. В табл. 1 и 2 приведены значения коэффициентов третьего порядка по поверхностям, на рис. 2 и 3 приведены оптические схемы полученных объективов.

Таблица 1. Значения коэффициентов третьего порядка по поверхностям в первом примере

№	SPH ABERR	COMA	TAN ASTIG	SAG ASTIG	PETZVAL	DISTORTION
1	–2,779E – 36	–5,958E – 24	–4,258E – 12	–1,419E – 12	0,00000	–0,25031
2	0,00027	0,00000	0,02935	0,02935	0,02935	0,00000
3	–0,00583	–2,087E – 17	–0,08008	–0,08008	–0,08008	–2,359E – 17
4	0,02162	8,093E – 17	0,12387	0,12387	0,12387	3,814E – 17
6	0,00000	0,00000	0,05996	0,05996	0,05996	–0,07393
7	–0,09191	–3,847E – 16	–0,11375	–0,11375	–0,11375	–3,918E – 17
8	4,252E – 19	9,406E – 18	–0,03507	–0,03507	–0,03507	–0,06382
9	–0,03685	–1,658E – 16	–0,04151	–0,04151	–0,04151	–1,536E – 17
10	0,00055	0,01823	0,11990	–0,01342	–0,08008	–0,03635
11	–0,03482	–1,723E – 16	–2,842E – 31	–9,474E – 32	0,00000	0,00000
SUM	–0,14696	0,01823	0,06268	–0,07064	–0,13730	–0,42441

Таблица 2. Значения коэффициентов третьего порядка по поверхностям во втором примере

№	SPH ABERR	COMA	TAN ASTIG	SAG ASTIG	PETZVAL	DISTORTION
1	–7,001E – 36	–5,972E – 24	–1,698E – 12	–5,661E – 13	0,00000	–0,04857
2	0,00212	0,00000	0,01007	0,01007	0,01007	0,00000
3	–0,00982	0,00000	–0,03705	–0,03705	–0,03705	0,00000
4	0,00000	0,00000	–0,04724	–0,04724	–0,04724	–0,08743
5	–0,01215	–9,760E – 18	0,00012	0,00012	0,00012	9,408E – 21
SUM	–0,01985	–9,760E – 18	–0,07410	–0,07410	–0,07410	–0,13601

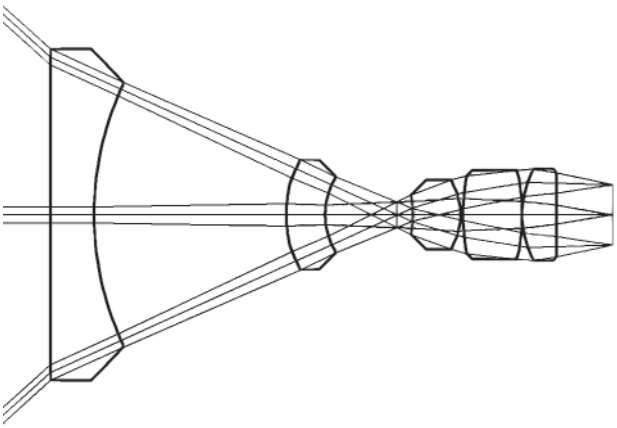


Рис. 2. Схема объектива к первому примеру.

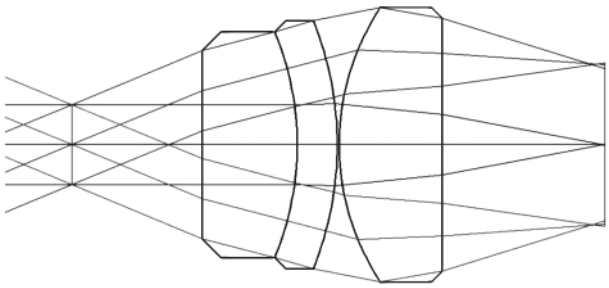


Рис. 3. Схема объектива ко второму примеру.

Заключение

В настоящей работе показаны примеры процесса выбора исходной системы для расчета объектива. Сравнивая полученный результат с существующими аналогичными решениями из патентной и научной литературы, можно сделать вывод, что предлагаемое техническое решение является приемлемым и по количеству оптических элементов соответствует существующим аналогам. Следует отметить, что в ряде случаев предлагаемые методикой исходные системы обладают более быстрой сходимостью в процессе оптимизации. Предлагаемый подход ограничивает появление в оптической схеме "лишних" элементов, так как введение в схему очередного элемента обуславливается его функциональным назначением.

Важным преимуществом данного подхода является возможность рассмотрения значительного количества вариантов схем в масштабе реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Anitropova I.L.* Training in principles of synthesis and composition of optical systems at the level of qualification promotion // Technical Conf. "Education in Optics'91". Proc. SPIE. 1991. V. 1603.
2. *Анитропова И.Л., Голованевский Г.Л.* Система эвристического синтеза оптических схем. М.: Препринт ИПМ АН СССР 31, 1990.
3. *Лившиц И.Л., Сальников А.В.* Классификация оптических систем, пригодная для организации базы данных // Тез. Межд. конф. "Оптика-99", СПб., 1999.
4. *Anitropova I.L.* Formalizing the heuristic synthesis procedure in lens design // OSA Proc. of the International Optical Design Conf. Rochester, USA, June 1994.
5. *Dilworth D.C.* SYNOPSYS, version 11, user manual, 2005.
6. *Anitropova I.L.* Simple method for computer-aided lens design with the elements of artificial intelligence // Intern. Symp. on Optical Systems Design. Proc. SPIE. 1992. V. 1780.
7. *Русинов М.М.* Техническая оптика. Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1979.
8. *Shafer D.* Simple method for designing lenses // Lens Design Conf. Proc. SPIE. 1980 V. 237. P. 234–241.
9. *Анитропова И.Л., Пряничников В.Е.* Проектирование базовых оптических модулей. М.: Препринт ИПМ АН СССР 43, 1987.