Аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем

07, июль 2012

DOI: 10.7463/0712.0442505

Пискунов Д. Е., Хорохоров А. М.

УДК 535.317

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана

piskunovde@gmail.com

a.horohorov@yandex.ru

Введение

Расчёт оптических систем с высоким качеством изображения в системах автоматизированного проектирования в основном решается путём поиска минимального значения оценочной функции методами локальной оптимизации. При большом числе конструктивных параметров решение оптимизационной задачи занимает достаточно длительное время и не гарантирует оптимальности полученного решения вследствие использования локальных методов оптимизации. Поэтому ключевым моментом проектирования оптической системы является выбор начальной схемы для оптимизации. Как правило, в качестве исходной схемы выбирается либо известная из патентных и литературных источников, либо рассчитанная, исходя из минимизации аббераций третьего порядка. Теория и практика абберационных расчетов показывают, что реальные абберации светосильных широкоугольных оптических систем сильно отличаются от аббераций третьего порядка, поэтому для таких систем на этапе абберационного синтеза следует учитывать абберации высших порядков.

Для синтеза таких систем предлагается использовать абберации третьего и пятого порядков, определяемые из расчета хода всего двух вспомогательных лучей. При синтезе системы целесообразно использовать разложение двумерных степенных функций аббераций при фиксированном угле поля зрения по полиномам Чебышева первого рода. Впервые идея разложения аббераций по полиномам Чебышева была предложена в работе [1], впоследствии изданной в США [2], развита и применена для синтеза и оптимизации оптических систем в работе [3, 4].

Целью данной работы является разработка метода, позволяющего выполнить автоматизированный абберрационный синтез оптических систем с учётом aberrаций высших порядков.

Научная новина работы заключается в следующем:

- разработан аналитико-оптимизационный метод абберрационного синтеза оптических систем, предусматривающий разложение aberrаций по полиномам Чебышева с последующей минимизацией коэффициентов разложения;
- получены выражения, связывающие коэффициенты разложения aberrаций в степенной ряд с коэффициентами разложения по полиномам Чебышева;
- показана возможность применения разработанного метода для абберрационного синтеза систем переменного увеличения.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие научно-технические задачи:

- разработать способ вычисления aberrаций высших порядков, удобный для реализации на ЭВМ;
- разработать метод определения конструктивных параметров оптической системы, при котором обеспечивается минимизация её aberrаций;
- ввести критерий качества оптической системы на этапе абберрационного синтеза.

1. Разложение aberrаций в степенной ряд по координатам на зрачке до членов пятого порядка включительно

При автоматизированном абберрационном синтезе коэффициенты разложения по полиномам Чебышева удобно вычислить аналитически, выразив их через коэффициенты разложения в степенной ряд, которые, в свою очередь, вычисляются через параметры двух вспомогательных лучей.

Представим меридиональную составляющую поперечной aberrации при фиксированных углах поля зрения в виде степенного ряда до членов пятого порядка малости

$$\begin{aligned} \Delta y' = & a_1 m + a_2 M + a_3 m^2 + a_4 M^2 + a_5 \cdot m \cdot M + a_6 m^3 + a_7 M^3 + a_8 m \cdot M^2 + \\ & + a_9 m^2 \cdot M + a_{10} m^4 + a_{11} M^4 + a_{12} m \cdot M^3 + a_{13} m^2 \cdot M^2 + a_{14} m^3 \cdot M + \\ & + a_{15} m^5 + a_{16} m \cdot M^4 + a_{17} m^3 \cdot M^2 + a_{18}, \end{aligned} \quad (1)$$

где m, M — нормированные координаты точки пересечения луча с плоскостью входного зрачка, $a_1 \dots a_{18}$ — коэффициенты разложения, вычисляемые следующим образом:

$$\begin{aligned}
a_1 &= A \cdot [0,5 \cdot R \cdot (S_{III} + S_{IV}) + R^2 F_{XI} + R_y^2 S_{III} - R_y^2 R \cdot F_X]; \\
a_2 &= A \cdot [R_y R_z S_{III} - R \cdot R_y R_z F_X]; \\
a_3 &= A^2 \cdot [-R_y S_{II} + R \cdot R_y F_{IX} - 0,5 \cdot R_y S_{II} - R_y^3 F_{VI} - R_y R \cdot F_{VIII}]; \\
a_4 &= A^2 \cdot [-0,5 \cdot R_y S_{II} - R_y R_z^2 F_{VI} - R_y R \cdot F_{VIII}]; \\
a_5 &= A^2 \cdot [-R_z S_{II} + R \cdot R_z F_{IX} - 2R_y^2 R_z F_{VI}]; \\
a_6 &= A^3 \cdot [0,5 \cdot S_I + R_y^2 F_V + R \cdot F_{VII} - R_y^2 F_{IV}]; \\
a_7 &= A^3 \cdot [-R_y R_z F_{IV}]; \\
a_8 &= A^3 \cdot [0,5 \cdot S_I + R_z^2 F_V + R \cdot F_{VII} - R_y^2 F_{IV}]; \\
a_9 &= A^3 \cdot [2R_y R_z F_V - R_z R_y F_{IV}]; \quad a_{10} = A^4 \cdot [R_y F_{III} - R_y F_{II}]; \\
a_{11} &= A^4 \cdot [-R_y F_{II}]; \quad a_{12} = A^4 \cdot [R_z \cdot F_{III}]; \\
a_{13} &= A^4 \cdot [R_y F_{III} - 2 \cdot R_y \cdot F_{II}]; \quad a_{14} = A^4 \cdot [R_z F_{III}]; \\
a_{15} &= A^5 \cdot F_I; \quad a_{16} = A^5 \cdot F_I; \\
a_{17} &= A^5 \cdot 2 \cdot F_I; \quad a_{18} = -0,5 \cdot R_y R \cdot S_V - R_y R^2 F_{XII}.
\end{aligned} \tag{2}$$

В формулах (2) A — радиус входного зрачка, $S_I, \dots, S_V$, $F_I, \dots, F_{XII}$ — коэффициенты разложения в степенной ряд (по координатам на зрачке и по полю) аббераций третьего и пятого порядков соответственно, рассчитываемые через параметры двух вспомогательных лучей, $R_y = -tg \omega / h_1$, $R_z = -tg \delta / h_1$, ω , δ — углы проекций луча на меридиональную и сагиттальную плоскости с осью оптической системы, h_1 — координата первого вспомогательного луча на первой поверхности [5, 6].

2. Разложение аббераций по полиномам Чебышева

Представим степенной ряд (1) в виде разложения по полиномам Чебышева

$$\begin{aligned}
\Delta y' &= b_1 T_{1m} + b_2 T_{1M} + b_3 T_{2m} + b_4 T_{2M} + b_5 T_{1m} T_{1M} + b_6 T_{3m} + b_7 T_{3M} + b_8 T_{1m} T_{2M} + \\
&\quad + b_9 T_{2m} T_{1M} + b_{10} T_{4m} + b_{11} T_{4M} + b_{12} T_{1m} T_{3M} + b_{13} T_{2m} T_{2M} + \\
&\quad + b_{14} T_{3m} T_{1M} + b_{15} T_{5m} + b_{16} T_{1m} T_{4M} + b_{17} T_{3m} T_{2M} + b_{18},
\end{aligned} \tag{3}$$

где $T_{1m}, \dots, T_{5m}$, $T_{1M}, \dots, T_{5M}$ — наименее отклоняющиеся от нуля полиномы Чебышева для меридионального и сагиттального сечений соответственно, $b_1, \dots, b_{18}$ — коэффициенты разложения, выражаемые через коэффициенты (2):

$$\begin{aligned}
b_1 &= a_1 + \frac{3}{4}a_6 + \frac{1}{2}a_8 + \frac{5}{8}a_{15} + \frac{3}{8}a_{16} + \frac{3}{8}a_{17}; \\
b_2 &= a_2 + \frac{3}{4}a_7 + \frac{1}{2}a_9; & b_3 &= a_3 + a_{10} + \frac{1}{2}a_{13}; \\
b_4 &= a_4 + a_{11} + \frac{1}{2}a_{13}; & b_5 &= a_5 + \frac{3}{4}a_{12} + \frac{3}{4}a_{14}; \\
b_6 &= a_6 + \frac{5}{4}a_{15} + \frac{1}{2}a_{17}; & b_7 &= a_7; \\
b_8 &= a_8 + a_{16} + \frac{3}{4}a_{17}; & b_9 &= a_9; \\
b_{10} &= a_{10}; & b_{11} &= a_{11}; & b_{12} &= a_{12}; & b_{13} &= a_{13}; \\
b_{14} &= a_{14}; & b_{15} &= a_{15}; & b_{16} &= a_{16}; & b_{17} &= a_{17}; \\
b_{18} &= \frac{1}{2}a_3 + \frac{1}{2}a_4 + \frac{3}{8}a_{10} + \frac{3}{8}a_{11} + \frac{1}{4}a_{13} + a_{18}.
\end{aligned} \tag{4}$$

Первые пять полиномов Чебышева наименее отклоняющихся от нуля представляют в виде

$$\begin{aligned}
T_{0m} &= 1, & T_{3m} &= m^3 - \frac{3}{4}m, \\
T_{1m} &= m, & T_{4m} &= m^4 - m^2 + \frac{1}{8}, \\
T_{2m} &= m^2 - \frac{1}{2}, & T_{5m} &= m^5 - \frac{5}{4}m^3 + \frac{5}{16}m.
\end{aligned}$$

Аналогично записывают полиномы Чебышева для сагиттального сечения.

Важными аргументами в пользу целесообразности использования полиномов Чебышева являются следующие их свойства. Во-первых, из всех полиномов степени n полиномы Чебышёва в области $[-1, 1]$ имеют наименьшее отклонение от нуля. Во-вторых, область значений полиномов по модулю не превышает $1/2^{n-1}$.

Учитывая вышеизложенные свойства, задача расчёта объектива на этапе аналитико-оптимизационного синтеза может быть сведена к минимизации абсолютных значений коэффициентов разложения (3) по полиномам Чебышева. При этом автоматически минимизируются aberrации третьего и пятого порядков для всего зрачка. Кроме того, значения коэффициентов разложения позволяют оценить уровень этих aberrаций, то есть контролировать ход процесса при автоматизированном aberrационном синтезе.

Следует отметить, что для минимизации коэффициентов (4) требуются значительно меньшие вычислительные мощности, чем для минимизации реальных

аббераций, полученных из расчёта хода лучей, поскольку для вычисления коэффициентов разложения достаточно рассчитать ход всего двух вспомогательных лучей.

3. Критерий качества оптической системы

При оптимизации необходимо не только минимизировать коэффициенты (4), но и обеспечить конструктивные ограничения: минимальные толщины линз и воздушные промежутки, габариты системы и фокусное расстояние. Для выбора наилучшей системы при оптимизации введём оценочную функцию в виде суммы квадратичных функций

$$\Phi = \Phi_1^2 + \Phi_2^2 + \sum_{k=1}^K \Phi_{3k}^2 + \sum_{i=1}^{18} \Phi_{4i}^2, \quad (5)$$

где — K количество поверхностей в системе, k — номер поверхности, i — индекс коэффициентов разложения (3), Φ_1 , Φ_2 , Φ_{3i} , Φ_{4i} — оптимизируемые функции вида:

$$\Phi_1 = W_1 L; \quad \Phi_2 = W_2 (f' - \overline{f}'); \quad \Phi_{3i} = W_{3k} d_k^{-1}; \quad \Phi_{4i} = W_{4i} b_i.$$

Здесь L — текущая длина системы f' , $\overline{f}'$ — текущее и заданное фокусные расстояния, d_k — текущая k -я толщина компонента или воздушный промежуток, b_i — коэффициенты (4), W_1 , W_2 , W_{3k} , W_{4i} — соответствующие весовые коэффициенты.

При выборе весовых коэффициентов ввиду вышеперечисленных свойств полиномов Чебышева следует обращать особое внимание на коэффициенты при полиномах низких порядков.

Оценочная функция (5) приведена исключительно в качестве примера. Разработчик самостоятельно выбирает её вид.

Таким образом, разработан аналитико-оптимизационный метод автоматизированного абберационного синтеза объективов. Метод предусматривает выбор исходной схемы, назначение параметров оптимизации, определение оценочной функции, включающей конструктивные ограничения, требования к параметрам объектива, а также коэффициенты разложения абберационной функции по полиномам Чебышева, вычисляемые аналитически, минимизацию оценочной функции. В качестве исходной схемы для оптимизации может быть выбран, например, объектив, рассчитанный на минимум аббераций третьего порядка известными методами.

Отметим, что разработанный метод может быть применён не только для расчёта систем с фиксированным фокусным расстоянием, но и для систем переменного увеличения. Для этого в оценочную функцию (5) необходимо включить оптимизируемые

функции, содержащие требования к оптическим характеристикам и конструктивным параметрам при различных увеличениях.

4. Аберрационный синтез четырёхкратного вариообъектива

На основе предложенного метода разработаны программы, позволяющие проводить аберрационный синтез объективов. В качестве примера выполнен аберрационный синтез вариообъектива с четырёхкратным перепадом фокусных расстояний. Параметры объектива представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры вариообъектива

Фокусное расстояние	25,6..103,9 мм
Размер приёмника излучения	22,3x14,9 мм
Диафрагменное число при минимальном фокусном расстоянии при максимальном фокусном расстоянии	2,8 5,6
Падение освещённости на краю поля для широкопольной позиции для телепозиции	< 50% < 15%
Длина системы в рабочем режиме от первой поверхности до приёмника	165 мм
Задний фокальный отрезок	28 мм
МПФ на частоте 40 л/мм для широкопольной позиции для телепозиции	> 70 % > 40 %
Дисторсия для широкопольной позиции для телепозиции	<±5% <±2%
Количество подвижных компонентов	2

Оптическая схема с ходом лучей для трёх позиций компонентов (двух крайних и промежуточного) и законы перемещения в виде зависимостей фокусного расстояния разработанного вариообъектива от положения компонентов относительно первого представлены на рисунках 1 и 2 соответственно. Вариообъектив состоит из пяти групп линз, из которых две подвижные. Апертурная диафрагма неподвижна и расположена

между компонентами третьей группы. Минимизация коэффициентов разложения (4) проводилась для пяти положений компонентов, которые отмечены на рисунке 2 точками.

Рисунок 1 - Схема вариообъектива для
а) широкопольной позиции, б) средней и в) телепозиции

Рисунок 2 - Законы перемещения компонентов:

1-5 — номера компонентов, ПИ — плоскость изображения

Рассчитанный вариообъектив имеет высокие оптические характеристики, что подтверждает эффективность разработанного аналитико-оптимизационного метода абберационного синтеза оптических систем. Отметим также, что данный метод позволяет значительно сократить время расчёта объективов.

Заключение

Таким образом, разработан аналитико-оптимизационный метод абберационного синтеза оптических систем. Метод позволяет определить конструктивные параметры оптической системы, при которых обеспечивается минимизация aberrаций до пятого порядка включительно. Расчёт осуществляется с помощью параметров всего двух вспомогательных лучей, что позволяет значительно сократить время синтеза. В основе метода лежит разложение aberrаций по полиномам Чебышева. Коэффициенты разложения позволяют оценить уровень aberrаций для всего зрачка, таким образом, появляется возможность контролировать ход процесса при автоматизированном абберационном синтезе. В качестве критерия качества оптической системы введена оценочная функция, в которую входят требования к минимизации коэффициентов разложения по полиномам Чебышева, к параметрам объектива и конструктивные ограничения. Метод применим для расчёта систем, как с постоянными, так и переменными оптическими характеристиками. Эффективность разработанного метода подтверждается высокими оптическими характеристиками рассчитанных систем, а также значительным сокращением времени оптимизации.

Список литературы

1. Пахомов, И.И., Цибуля А.В. Расчёт оптических систем лазерных приборов. М.: Радио и связь, 1986, 150 с.
2. Pachomov I.I., Tsibulya A.B. Computational Methods for Laser Optical Systems Design // Journal of Soviet Laser Research. 1988. V.9, №3. P. 321-429.
3. Пахомов, И.И., Хорохоров А.М. Использование полиномов Чебышева для синтеза и оптимизации оптических систем // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 1995. №3. С. 69-73.
4. Автоматизированный абберационный синтез объективов / И. И. Пахомов, Д. Е. Пискунов, М.Е. Фролов, А. М. Хорохоров, А. Ф. Ширанков // Труды 9 Международной конференции «Прикладная оптика - 2010». СПб, 2010. Т. 2. С. 279–282.
5. Гальперн Д. Ю. Исследования по геометрической оптике: автореф. дис. ... доктор техн. наук. Л., 1959. 23 с.
6. Шейнис Н. В., Вычисление аббераций высших порядков // Труды ГОИ, т. XXXVII, вып. 167, Л.: Машиностроение, 1970. С. 124-143.

Analytical and optimization method of aberration synthesis in optical systems

07, July 2012

DOI: **10.7463/0712.0442505**

Piskunov D.E., Horohorov A.M.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

piskunovde@gmail.com

a.horohorov@yandex.ru

The authors proposes an analytical and optimization method of aberration synthesis in optical system to allow automated analysis of lenses with fifth-order aberrations. The method is based on expansion of lateral aberration into Chebyshev polynomials, followed by minimization of the expansion coefficients.

Publications with keywords:[aberrations](#), [aberration synthesis](#), [combined analytical and optimization method](#), [synthesis of optical systems](#), [Chebyshev polynomials](#)

Publications with words:[aberrations](#), [aberration synthesis](#), [combined analytical and optimization method](#), [synthesis of optical systems](#), [Chebyshev polynomials](#)

References

1. Pakhomov I.I., Tsibulia A.V. *Raschet opticheskikh sistem lazernykh priborov* [Calculation of the optical systems of laser devices]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1986. 150 p.
2. Pachomov I.I., Tsibulya A.B. Computational Methods for Laser Optical Systems Design. *Journal of Soviet Laser Research*, 1988, vol. 9, no. 3, pp. 321-429.
3. Pakhomov I.I., Khorokhorov A.M. Ispol'zovanie polinomov Chebysheva dlia sinteza i optimizatsii opticheskikh sistem [The use of Chebyshev polynomials for synthesis and optimization of optical systems]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrumentation], 1995, no. 3, pp. 69-73.
4. Pakhomov I.I., Piskunov D.E., Frolov M.E., Khorokhorov A.M., Shirankov A.F. Avtomatizirovannyi aberratsionnyi sintez ob"ektivov [Automated aberrational synthesis of lens]. «*Prikladnaia optika – 2010*». Tr. 9 Mezhdunar. konf. [“Applied Optics – 2010”. Proc. 9th Int. Conf.]. St. Petersburg, 2010, vol. 2, pp. 279-282.
5. Gal'pern D.Iu. *Issledovaniia po geometricheskoi optike. Diss. dokt. tekhn. nauk. Aftoref.* [Investigations on geometrical optics. Dr. tech. sci. diss. Synop.]. Leningrad, 1959. 23 p.
6. Sheinis N.V. Vychislenie aberratsii vysshikh poriadkov [The calculation of higher-order aberrations]. *Trudy GOI* [Proc. Vavilov State Optical Inst.], 1970, vol. 37, no. 167, pp. 124-143.