

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЦВМ В ОПТИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

С. А. РОДИОНОВ

В статье рассмотрены некоторые вопросы программирования оптических расчетов. Приводится классификация программ по их назначению и возможностям. Описаны программы расчета аберраций и оптимизации оптических систем, разработанные в ЛИТМО.

В настоящее время все большая часть оптических расчетов производится на ЭЦВМ. Множество различных программ можно, в основном, разбить на несколько групп в соответствии с их назначением:

1. Программы для расчета аберраций и коэффициентов аберраций.
2. Программы для расчета качества изображения.
3. Оптимизирующие программы (так называемые программы автоматического расчета).
4. Программы для расчета технологических и конструктивных допусков.
5. Прочие.

С другой стороны, по возможностям программ их можно разделить на три основных класса:

I. Программы, работающие только с центрированными системами сферических поверхностей.

II. Программы, допускающие использование несферических поверхностей второго и высшего порядка.

III. Программы, позволяющие рассчитывать системы произвольно расположенных в пространстве сферических и несферических поверхностей.

Большинство программ для оптических расчетов предназначены для массового использования, поэтому к ним, кроме требований надежности и корректности, предъявляются требования, аналогичные предъявляемым к стандартным программам, а именно: универсальности, экономичности и простоты использования неспециалистом.

В настоящей статье описаны некоторые программы, разработанные на кафедре оптико-механических приборов ЛИТМО для ЭЦВМ «Минск-2».

Программы для расчета остаточных аберраций, несмотря на появление оптимизирующих программ, и программ расчета качества изображения, остаются еще наиболее употребляемыми. Эти программы могут отличаться выбором входных координат рассчитываемых лучей. Обычно эти координаты задаются конструктором для каждого луча в виде его направляющих косинусов α и γ или координат в плоскости входного зрачка m и M . Этот простой способ сильно увеличивает количество исходных данных и, следовательно, время перфорации, вероятность ошибок и т. д. Кроме того, на конструктора при этом возлагается трудоемкая задача учитывать изменение формы и размеров входного зрачка вследствие аберрационного виньетирования [1]. С другой стороны, существует единственный рациональный способ выбора лучей в сагиттальном и меридиональном сечении пучка по закону равных площадей. Поэтому в программе ЛИТМО нахождение входных координат лучей

производится автоматически. Сначала рассчитываются координаты лучей в плоскости апертурной диафрагмы (m_t^d, M_t^d для меридионального сечения и m_s^d, M_s^d – для сагиттального сечения):

$$m_t^d = h_d \left(\bar{m}_{2l}^d \pm [\bar{m}^d] \sqrt{1 - \frac{(t-1)}{p}} \right), \quad M_t^d = 0, \quad t = 1, 2 \dots p;$$

$$M_s^d = h_d [\bar{M}^d] \sqrt{1 - \frac{(s-1)}{q}}, \quad m_s^d = \bar{m}_{2l}^d h_d, \quad s = 1, 2 \dots q; \quad (1)$$

$$\bar{m}_{2l}^d = -(\tau_+ - \tau_-); \quad \bar{m}^d = 1 - (\tau_+ + \tau_-); \quad [\bar{M}^d] = \sqrt{1 - [\bar{m}_{2l}^d]^2},$$

где \bar{m}_{2l}^d – высота главного луча в плоскости диафрагмы, нормированная к радиусу диафрагмы;

$[\bar{m}^d]$ – нормированная полуширина меридионального пучка в плоскости диафрагмы;

\bar{M}^d – нормированная полуширина сагиттального пучка в плоскости диафрагмы;

τ_+ – относительное срезание пучка сверху;

τ_- – относительное срезание пучка снизу;

p – заданное количество пар лучей в меридиональном сечении;

q – заданное количество пар лучей в сагиттальном сечении;

h_d – радиус апертурной диафрагмы.

Затем находятся координаты m и M в плоскости входного зрачка путем решения лучевых уравнений $m^d = f(m)$ и $M^d = f(M)$ методом Ньютона с принудительным поиском области сходимости. Величина h_d определяется из данных расчета нулевых лучей по заданной величине, характеризующей светосилу системы. Рассчитываемые системы делятся на 4 типа в зависимости от положения предмета и изображения (см. табл. 1).

Таблица 1

Тип системы	Расстояние до плоскостей	
	предмета	изображения
Фотографический объектив	∞	конечное
Репродукционный объектив	конечное	конечное
Телескопическая система	∞	∞
Лупа и микроскоп	конечное	∞

Для каждой системы характеристика светосилы может задаваться как входной, так и выходной. Если соответствующая плоскость (предмета или изображения) находится на ∞ , то характеристикой светосилы является диаметр

входного (выходного) зрачка; если на конечном расстоянии, то синус входного (выходного) – апертурного угла. Аналогично отрезки и aberrации в пространстве предметов и изображений задаются и рассчитываются: для случая плоскости предмета (изображения) на конечном расстоянии – в линейной мере, для случая «∞» – продольные отрезки в диоптрийной мере, поперечные – в угловой.

Расчет лучей производится по общепринятой для ЭЦВМ схеме Федера [2]. Несферические поверхности могут задаваться уравнениями двух типов:

$$by^2 + cz^2 = a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (2)$$

и

$$x = \frac{\rho_0 u}{1 + (1 - \rho_0^2 u)^{1/2}} + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n \quad (3)$$

где $u = x^2 + y^2$

Первое уравнение аналогично описанному в [3] и удобно для представления поверхностей вращения и цилиндрических второго и высшего порядка. Второе уравнение особенно удобно для представления сферических поверхностей с малыми деформациями высшего порядка [4], параболы высшего порядка и коррекционных пластин. Скорость расчета составляет 15 поверхностей в секунду для сферических поверхностей и от 2 до 7 пов/сек для несферических поверхностей.

Для оптимизирующих программ основными проблемами являются: выбор оптимизируемых функций и оценочной функции; выбор метода оптимизации; контроль граничных условий. В экспериментальной программе ЛИТМО в качестве оптимизируемых функций взяты нормированные лучевые aberrации:

$$f_i = \frac{f_{a_i} - f_{r_i}}{\Delta f_i}; \quad \varphi = \sum_{i=1}^m f_i^2, \quad i = 1 \dots m \quad (4)$$

где f_{r_i} – заданные значения лучевых aberrаций;

f_{a_i} – значения, полученные в результате расчета (пробы) системы;

Δf_i – допускаемые отклонения, которые играют роль весовых коэффициентов;

φ – оценочная функция.

В качестве функций f_{a_i} используются: задний отрезок s'_0 ; фокусное расстояние f'_0 ; продольная сферическая aberrация $\Delta s'$; отступление от изопланатизма η и продольный хроматизм $\Delta s'_{F-C}$ для двух лучей осевого пучка; aberrационное виньетирование AV , дисторсия $\Delta Y\%$, астигматизм $x_t - x_s$, средняя кривизна $\frac{(x_t - x_s)}{2}$ и хроматизм увеличения Δu_{F-C} для главных лучей двух внеосевых пучков; поперечная кома σ_{II_t} и поперечная сферическая aberrация σ_{III_t} [1] для двух пар меридиональных и σ_{II_s} , σ_{III_s} для двух

сагиттальных лучей каждого пучка при заданном абберационном виньетировании. Всего оптимизируется 34 функции. Использование aberrаций σ_{II} и σ_{III} вместо обычно употребляемых отклонений луча $\Delta y'$ и $\Delta z'$ более благоприятно с точки зрения «ортогонализации» функций f_i .

Оптимизирующими параметрами являются кривизны отдельных поверхностей ρ_i , расстояния между вершинами d_i и положение апертурной диафрагмы d_a . Число параметров может быть любым, но не более 25.

Оптимизация производится по демпфированному методу наименьших квадратов (DLSM) [5], который является в настоящее время одним из наиболее употребительных [6-8]. Демпфирование производится по аддитивному методу. Как это обычно практикуется, в пространстве параметров вводится метрика таким образом, что все параметры x_j нормируются своими малыми

приращениями δx_j : $u_j = \frac{x_j}{\delta x_j}$.

Производные функций по нормированным параметрам u_j находятся численным методом путем последовательного изменения каждого параметра на величину δx_j , т.е. $\frac{\partial f_i}{\partial u_j} \cong \frac{\delta f_i}{\delta x_j}$ (δf_i – приращение i -й функции при увеличении j -го параметра на величину δx_j). Затем на каждом шаге итерации решается нормальная система

$$(A^T A + p^2 E) \Delta U = -A^T F \quad (5)$$

где A – матрица производных;

A^T – транспонированная матрица A ;

E – единичная матрица;

p – коэффициент демпфирования;

ΔU – матрица-столбец нормированных приращений параметров;

F – матрица-столбец значений функций f_i



Рис. 1. Схема оптики объектива «Триплет»: $f'_0 = 67 \text{ мм}$ 1:3 $2\beta = 20^\circ$: а – исходная система; б – результат оптимизации

В (5) все величины безразмерны. Благодаря нормированию демпфирование параметров производится обратно пропорционально величинам δx_j , которые

приняты равными: для кривизны $\delta x_j = 0.01 \left(\rho_i + \frac{0.2}{h_{св_i}} \right)$; для расстояний $\delta x_j = 0.05 h_{св_i}$, где $h_{св_i}$ – половина светового диаметра данной поверхности.

Коэффициент демпфирования p на каждом шаге выбирается таким образом, чтобы получить максимальное уменьшение оценочной функции φ .

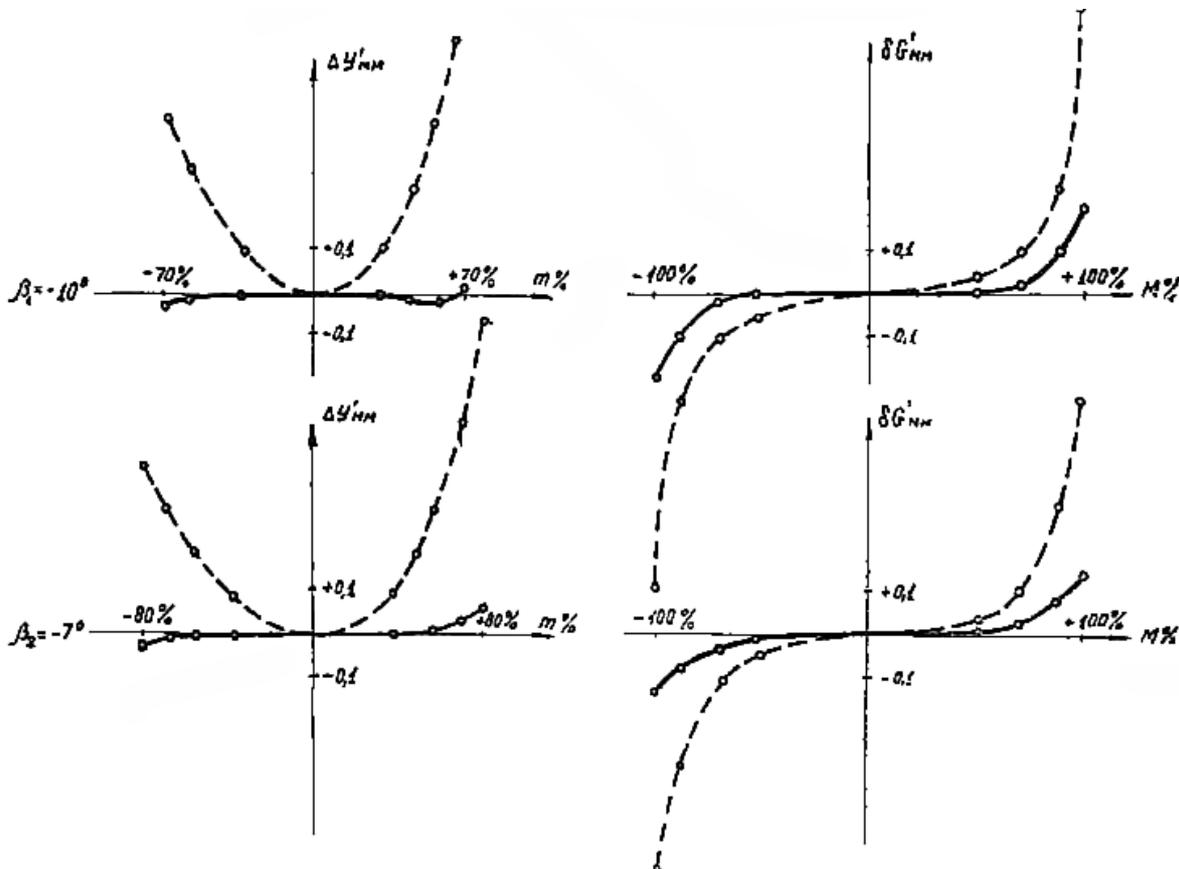


Рис.2. Графики поперечных aberrаций:

a – меридиональное сечение; *б* – сагиттальное сечение;

— — — — исходная система, - - - - - результат оптимизации.

Одним из наиболее важных граничных условий является условие непересечения поверхностей: $n_i \bar{d}_i \leq \delta_i$, где n_i – показатель преломления; \bar{d}_i – толщина вдоль луча («косая» толщина); δ_i – заданная минимальная величина. Для контроля этих условий в программе применен метод «раздвижки», заключающийся в том, что в случае нарушения условия соответствующая осевая толщина d_i увеличивается в 1,1 – 1,5 раза. Метод основан на предположении, что φ слабее зависит от d_i чем от радиусов r_{i-1} и r_i . Во многих случаях это предположение оправдывалось, и метод давал хорошие результаты, тем не менее он подлежит дальнейшей проверке.

Программа была испытана на 40 системах и дала обнадеживающие результаты. Время, затраченное на одну итерацию, в среднем равно $2,5 \times (\text{число поверхностей}) \times (\text{число параметров} + 4)$ секунд, число итераций колебалось от 3 до 10. Оптимизация заканчивалась, если $\Delta\varphi < 0,05\varphi$. Труднее

всего поддаются оптимизации большие отклонения в габаритных функциях: дисторсии, отношении отрезка к фокусу и в абберационном виньетировании, так как они являются медленно меняющимися и требуют значительного изменения системы, которое тормозится другими абберационными функциями. Рис. 1 и 2 иллюстрируют один из примеров оптимизации.

Конструктивные параметры исходной и оптимизированной систем приведены в табл.2.

Таблица 2

Исходная система			Результаты оптимизации		
<i>r</i>	<i>d</i>	сорт стекла	<i>r</i>	<i>d</i>	сорт стекла
21.476	5	ТК21	22.61	11.82	ТК21
138.0	8		153.34	5.82	
-88.616	0.3	ТФЗ	-45.439	0.28	ТФЗ
15.6159	8		17.821	8.76	
52.741	4	ТК21	48.47	5.85	ТК21
31.354			-31.765		

ЛИТЕРАТУРА

1. Русинов М.М. Техническая оптика. Машгиз, 1961.
2. Feder D. P. Calculation of an Optical Merit Function and Its Derjvatives with Respect fo the System Parameters. «Journ. Opt. Soc. Am.», 47, 1957/.
3. Бабинцев В. Ф. Формулы для расчета хода лучей в оптической системе на ЭЦВМ. «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 5.
4. Feder D. P. Optical Calculation with Automatic Computing Machinery. «Journ. Opt. Soc. Am.», 41, 1951.
5. Levenberg K. A method for the solution of certain non-linear problems in the least squares, Quart. Appl. Math. 2. 1944.
6. Feder D. P. Automatic Optical Design, Appl. Optics, 2, 1963. . 7. Цено Н. В. Автоматический метод расчета сложных оптических систем. «Оптико-механическая промышленность», 1966, № 9.
7. Kidger M. I., Wynne C. G. Experiments with lens Optimization procedure. Optica Acta, 14, 1967.