

ГРАФИЧЕСКАЯ КОМПОЗИЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А. Н. ИВАНОВ, Ю. В. ФЕДОРОВ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: FedorovYV@yandex.ru*

Рассматривается возможность использования графических методов на стадии анализа и синтеза оптических систем, основанных на рациональном сочетании базовых оптических элементов: апланатических линз, зеркал и концентрических систем. Стройная система композиции оптических схем различного назначения, предложенная М. М. Русиновым, дополняется применением графических редакторов. Современные графические редакторы, например AUTOCAD, VISIO, COMPAS, позволяют производить построения наглядно и с высокой точностью и в результате минимизировать объем вычислений при создании новой оптической системы. Вычислительная работа сводится при этом к проверочному расчету и, при необходимости, к небольшой доработке системы, которая вполне может быть выполнена в графическом редакторе.

Ключевые слова: *апланатические точки поверхности, базовые компоненты, режимы привязок (касательная к окружности), задание требуемой точности построения*

При создании оптической системы целесообразно провести первичный анализ прохождения лучей через ее компоненты и оценить их габариты. Для этого можно использовать современные графические редакторы, например доступные САД-системы типа КОМПАС-Light или AutoCAD-Light, позволяющие обеспечить высокую точность построения поверхностей и лучей благодаря простоте определения значения aberrаций широких наклонных и осевых пучков.

На рис. 1, а показан ход апертурного луча осевого пучка, падающего на вогнутое сферическое зеркало. Для построения луча необходимо из центра кривизны зеркала построить окружность, радиус которой равен высоте прохождения апертурного луча. В этом случае отраженный от зеркала луч должен проходить по касательной к окружности. Продольную сферическую aberrацию зеркала можно оценить по разности координат пересечения оси параксиальным и проходящим через край входного зрачка лучами.

При задании в графическом редакторе уровня точности построений, соответствующего аналитическому (расчетному), для случая $R = -100$, $f' = 50$ ход луча на высоте $H = 25$ не совпадает с положением параксиального фокуса $\Delta S = 1,66$, а на $H = 20$ не совпадает с положением $\Delta S = 1,08$. Эти несовпадения соответствуют рассчитанным в OPAL значениям продольной сферической aberrации.

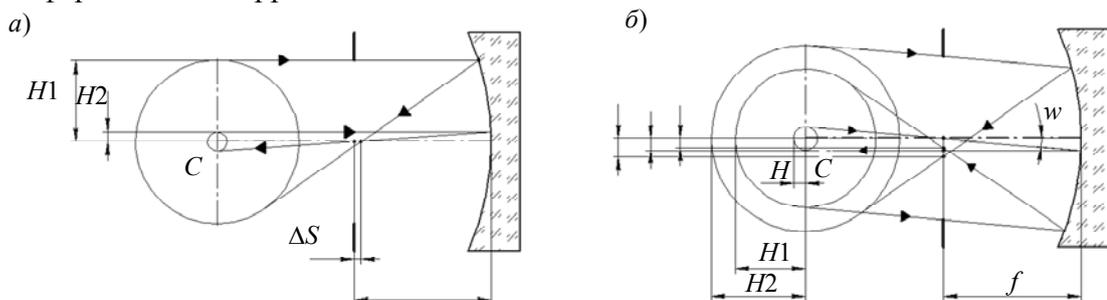


Рис. 1

Вторая монохроматическая aberrация широкого пучка лучей — кома — может быть оценена (рис. 1, б) разностью значений полусуммы расстояний до оптической оси, отсекаемых крайними лучами пучка в фокальной плоскости и отрезка, отсекаемого главным лучом наклонного пучка:

$$\delta k = \frac{1}{2}(y'_{+m} + y'_{-m}) - y'_0.$$

Для вычисления aberrации нужно задать три луча, образующих полевой угол w с осью зеркала и проходящих через центр и края входного зрачка, и три окружности, касательные к этим лучам и построенные из центра кривизны зеркала. Полученные с помощью геометрических построений значения aberrаций наклонных пучков, так же как и для рис. 1, а, совпадают с результатами расчета в OPAL.

Проанализировав ход широких наклонных лучей, можно получить также представление о характере меридиональной кривизны изображения. Сагиттальная кривизна и дисторсия оцениваются оптиком-конструктором на интуитивном уровне с учетом теоретических данных и архивных разработок.

Любой сферической преломляющей поверхности соответствуют три пары сопряженных точек на оптической оси, для которых выполняется условие синусов [1]:

$$\frac{n \sin \sigma}{n' \sin \sigma'} = \text{const}$$

и отсутствует сферическая aberrация.

Первая пара апланатических точек существует, когда предмет и изображение совпадают с вершиной поверхности (и между собой), т.е. когда $s = s' = 0$.

Вторая пара сопряженных точек, также совпадающих между собой, находится в центре кривизны поверхности, т.е. когда $s = s' = r$.

Положение третьей пары сопряженных точек может быть описано следующими соотношениями:

$$s = r \left(1 + \frac{n'}{n}\right) \text{ и } s' = r \left(1 + \frac{n}{n'}\right).$$

На рис. 2 приведены возможные варианты расположения апланатических точек.

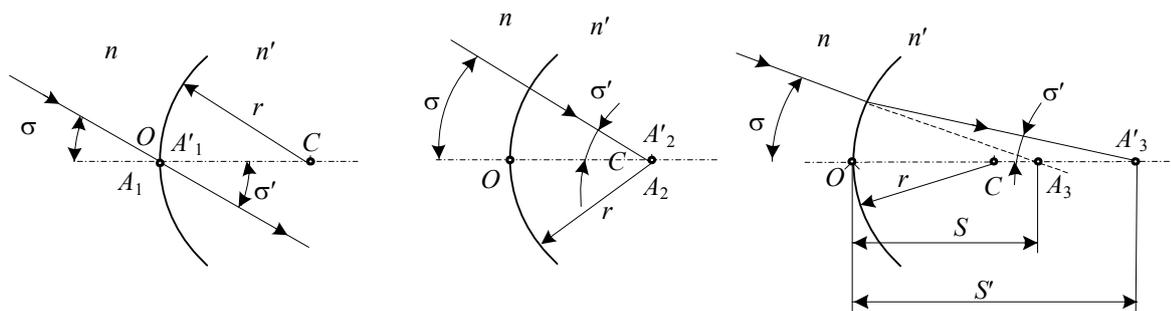


Рис. 2

Использование особых свойств апланатических точек положено М. М. Русиновым [2] в основу его теории синтеза (композиции) оптических систем. Таким образом, подход к синтезу систем с более высокими, чем у известных систем, характеристиками, состоит в рациональном использовании базовых силовых, коррекционных и коррекционно-силовых оптических компонентов с известными свойствами на основе разработанной им классификации этих элементов. При этом удается добиться требуемого качества изображения с минимально необходимым числом компонентов в системе.

Графическое построение хода лучей через оптическую систему полезно при габаритных расчетах, в частности при определении световых диаметров деталей, составляющих систему,

определении виньетирования и др. [3]. На рис. 3 выполнено построение хода луча через менисковую concentрическую систему Максутава, расположенную в воздухе. Вспомогательные окружности и продолжения лучей, касающихся этих вспомогательных окружностей, проведены пунктиром. Последовательность действий при построении хода луча следующая:

- 1) в удобном масштабе вычерчивается схема системы, т.е. вычерчиваются дуги окружностей, соответствующие радиусам r_1, r_2, r_3 , с общим центром C ;
- 2) строится вспомогательная окружность 1 с радиусом H , равным расстоянию входящего в систему луча от центра системы; естественно, что входящий луч пойдет по касательной к окружности;
- 3) для построения хода луча, преломленного первой поверхностью, строится вторая вспомогательная окружность 2 с радиусом H/n_2 . Касательная к этой окружности, проведенная через точку пересечения луча с первой поверхностью, представляет собой луч, преломленный этой поверхностью;
- 4) для построения хода луча, преломленного второй поверхностью, через точку встречи луча с этой поверхностью проводится прямая по касательной к окружности 1 ;
- 5) для построения хода луча, отраженного третьей поверхностью через точку встречи луча с этой поверхностью, проводится прямая по касательной к окружности 1 . Точка пересечения этого луча с оптической осью системы будет искомым изображением (бесконечно удаленного) предмета.

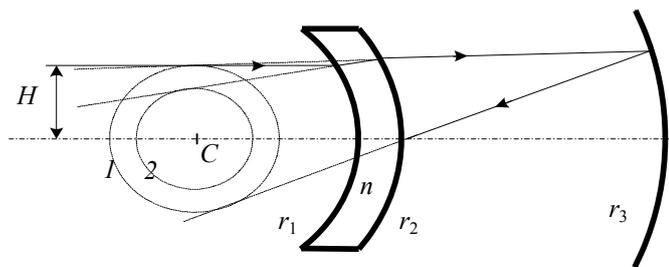


Рис. 3

Описанный метод построения хода луча пригоден и для более общего случая — центрированной оптической системы. При этом центры вспомогательных окружностей будут совпадать с центрами кривизны соответствующих преломляющих и отражающих поверхностей.

Описанные построения можно выполнять с приемлемой для практики точностью при работе в графическом редакторе AutoCAD [4]. Возможность выполнения высокоточных построений достигается применением режима привязок (касательная к окружности) и заданием требуемой точности (числом значащих цифр после запятой). В качестве примера удобно воспользоваться данными (характеристиками) любой из шести базовых линз по классификации М. М. Русинова, приведенных в таблице.

Базовые линзы по М. М. Русинову

№	Обозначение	Вид	Параксиальные отрезки	
			S'_F	f'
1	Б(о,к) ∞ 20 1,6126 -61,26		100,0	100,0
2	Б(к,к) 75,978 151,956 1,6126 -75,978		24,024	100,002

Продолжение таблицы

3	Б(κ,ο] 61,26 161,26 1,6126 ∞		0,0	100,0
4	Б(κ,β(61,26 160,0 1,6126 61,26		0,7875	100,7875
5	Б(κ,α(23,76 5,9 1,6126 35,95		91,052	98,964
6	Б(κ,α(23,76 23,76 1,5126 23,76		63,313	102,098

На рис. 4, а (в редакторе AutoCAD) приведен фрагмент оптической системы Б[ο,κ) с ходом апертурного и полевого лучей, осевые отрезки которых соответствуют рассчитанным значениям (рис. 4, б).

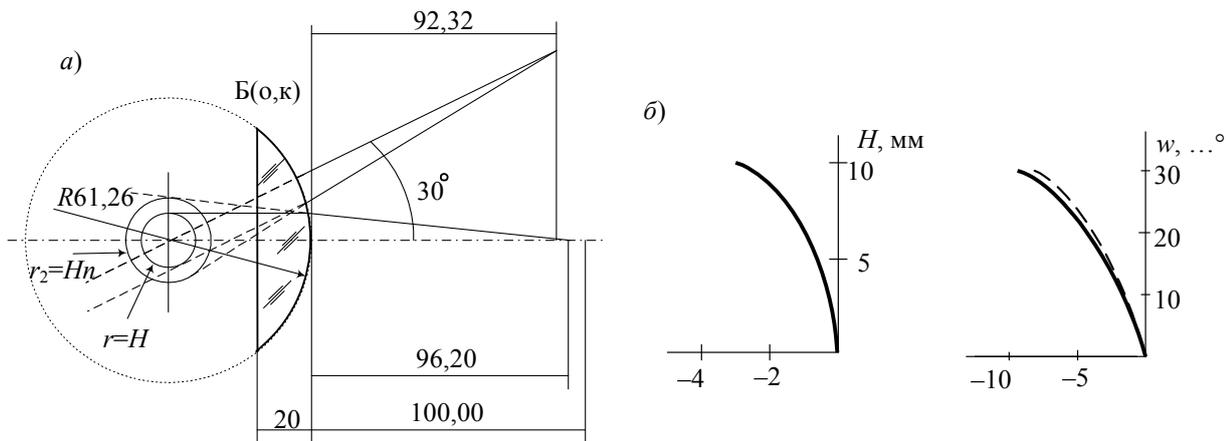


Рис. 4

Проверка правильности графических построений, оценка и, при необходимости, корректировка полученных результатов могут осуществляться с использованием программ расчета типа OPAL либо вручную по известным алгоритмам [5—7]. Оптические системы, разработанные с помощью предложенного метода, могут быть использованы в качестве основы для создания оптических систем с асферическими поверхностями, переход к которым может быть осуществлен с помощью математических пакетов, например, MathCAD [8].

Изложенная методика разработки оптических систем отличается простотой, наглядностью, носит творческий характер и соответствует современному уровню развития вычислительной техники.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М.—Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
2. Русинов М. М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.

3. Попов Г. М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969. 129 с.
4. Сладкий А. Л. AutoCAD 2008 как дважды два. СПб: Питер, 2007.
5. Хваловский В. В., Федоров Ю. В. Решение задач по прикладной оптике на программируемых микрокалькуляторах. Л.: ЛИТМО, 1985. 85 с.
6. Хваловский В. В., Федоров Ю. В. Синтез оптических систем из базовых компонентов на микрокалькуляторах. Л.: ЛИТМО, 1988. 81 с.
7. Уокенбах Д. Microsoft EXCEL 2010. Библиотека пользователя. М.: Вильямс, 2010. 873 с.
8. Иванов А. Н., Каракулев Ю. А. Основы применения пакета MATHCAD в инженерных расчетах. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.

Сведения об авторах

Александр Николаевич Иванов

— канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра компьютерной фотоники и видеоинформатики; E-mail: FedorovYV@yandex.ru

Юрий Владимирович Федоров

— канд. техн. наук; Университет ИТМО, кафедра технологий интраскопии; старший научн. сотр.; E-mail: FedorovYV@yandex.ru

Поступила в редакцию
03.05.18 г.

Ссылка для цитирования: Иванов А. Н., Федоров Ю. В. Графическая композиция оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 12. С. 1077—1082.

GRAPHIC COMPOSING OF OPTICAL SYSTEMS

A. N. Ivanov, Yu. V. Fedorov

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: FedorovYV@yandex.ru

The possibility of using graphic methods at the stage of analysis and synthesis of optical systems based on a rational combination of basic optical elements: aplanatic lenses, mirrors and concentric systems is considered. The harmonious system of optical schemes composition for various purposes, proposed by M. M. Rusinov, is supplemented using graphic editors. Modern graphic editors, e.g. AUTOCAD, VISIO, KOMPAS, allow to make constructions visually and with high accuracy and as a result to minimize volume of calculations at creation of new optical system. Computational work is reduced to the verification calculation and, if necessary, to a small revision of the system, which may well be performed in a graphical editor.

Keywords: aplanatic points of a surface, basic power components, the modes of bindings (tangential to a circle), required accuracy of optical design

REFERENCES

1. Churilovskiy V.N. *Teoriya opticheskikh priborov* (Theory of Optical Devices), Moscow, Leningrad, 1966, 565 p. (in Russ.)
2. Rusinov M.M. *Kompozitsiya opticheskikh sistem* (Composition of Optical Systems), Moscow, 2011. (in Russ.)
3. Popov G.M. *Kontsentricheskiye opticheskiye sistemy i ikh primeneniye v opticheskom priborostroyenii* (Concentric Optical Systems and Their Application in Optical Instrumentation), Moscow, 1969, 129 p. (in Russ.)
4. Sladkiy A.L. *AutoCAD 2008 kak dvazhdy dva* (AutoCAD 2008 as Clear as a Day), St. Petersburg, 2007. (in Russ.)
5. Khvalovskiy V.V., Fedorov Yu.V. *Resheniye zadach po prikladnoy optike na programmiruyemykh mikrokal'kulyatorakh* (Solution of Problems in Applied Optics on Programmable Microcalculators), Leningrad, 1985, 85 p. (in Russ.)
6. Khvalovskiy V.V., Fedorov Yu.V. *Sintez opticheskikh sistem iz bazovykh komponentov na mikrokal'kulyatorakh* (Synthesis of Optical Systems from Basic Components on Microcalculators), Leningrad, 1988, 81 p. (in Russ.)
7. Walkenbach J. *Microsoft Excel 2010. Bible*, Wiley, 2010, 1056 p.
8. Ivanov A.N., Karakulev Yu.A. *Osnovy primeneniya paketa MATHCAD v inzhenernykh raschetakh* (Basic Usage of MATHCAD in Engineering Calculations), St. Petersburg, 2010. (in Russ.)

Data on authors**Alexander N. Ivanov**

— PhD, Associate professor; ITMO University, Department of Computational Photonics and Video-informatics; E-mail: i_off@mail.ru

Yury V. Fedorov— PhD; ITMO University, Department of Introscopy Technologies; Senior scientist; E-mail: Fedorov YV@yandex.ru;
E-mail: FedorovYV@yandex.ru**For citation:** Ivanov A. N., Fedorov Yu. V. Graphic composing of optical systems. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 12. P. 1077—1082 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-12-1077-1082