

Разработка математического обеспечения по расчету и оценке качества изображения оптической системы

Валиев Д.Т., Россомахина Н.Е., Тюлькин Е.В., Агапов Н.А.
rubinf@tpu.ru | rossomahina96@mail.ru | anikolja@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Работа посвящена демонстрации возможностей прикладного программного обеспечения ПО «Оптика» для синтеза, расчета и анализа оптических систем, разработанного в Томском политехническом университете. Продемонстрированы основные принципы работы с программой, ее возможности. Приведен пример расчета оптической системы линзового объектива

Ключевые слова: программное обеспечение (ПО), оптическая система (ОС), расчет ОС.

1. Введение

Оптические приборы и устройства применяются во многих отраслях науки и техники, где требуются высокоточные измерения и контроль, высококачественная и информативная связь и наблюдение [1]. Повышение требований, предъявляемых к современным оптическим системам (ОС), как в количественном (увеличение светосилы, полей зрения), так и качественном (повышение разрешающей способности, улучшение измерительных свойств) отношении требует повышения качества расчетов на основе создания математических моделей, позволяющих описывать реальные ОС и волновые фронты, а также учитывать векторный характер электромагнитного поля, преобразуемого ОС.

Расчет ОС – сложный процесс, особенностью которого являются большое количество трудоемких вычислений. [2, 11]. Проектирование ОС немислимо без прикладного программного обеспечения (ПО). Современное состояние автоматизации проектирования характеризуется переходом от отдельных программ и пакетов программ, обеспечивающих трудоемкие расчеты к системам инженерного анализа (CAE), дающим возможность осуществлять проектирование ОС на более высоком, качественном уровне. Широкий набор ПО на современном этапе (как правило, зарубежных CAE – систем, таких как Optics Studio (Zemax), CodeV, Oslo и т.д.) представляют собой конкурирующие программные продукты, позволяющие решать широкий круг задач вычислительной оптики. Несмотря на то, что функциональные возможности ПО для расчета ОС во многом совпадают, каждая из них имеет свои особенности, обусловленные основными направлениями развития и методиками решения задач, наличием собственной школы оптиков; имеет свои достоинства и недостатки, т.к. успешное решение многих задач вычислительной оптики зависит от того, насколько удачно выбран и разработан соответствующий алгоритм.

Практическое использование зарубежного ПО показывает, что главным его недостатком является реализация отдельных стадий проектирования и ориентация на зарубежную элементную базу, нормы и стандарты, что не позволяет полноценно использовать их в отечественных научно-исследовательских организациях и на предприятиях оптической отрасли. Кроме того, подходы, терминология, используемые при проектировании оптических систем и анализе качества изображения, могут отличаться от принятых отечественных. Немаловажным фактором, ограничивающим использование зарубежных САПР, является высокая стоимость программных продуктов, а также англоязычная терминология.

Среди отечественных систем автоматизированного проектирования ОС можно выделить программы DEMOS (Design, Evaluation and Modeling of Optical Systems), CAPO (Система Автоматизированного Расчета Оптике), разработанные в разные годы ВНИЦ “ГОИ им. С. И. Вавилова”, а так-

же пакет ОПАЛ (ОПтических АЛгоритмов), разработанный в ЛИТМО [12].

Однако необходимо отметить, что такие системы являются аппаратно-зависимыми и доступ к ним ограничен. Бурное развитие и быстрая смена компьютерной техники привели к тому, что использование этой системы на сегодняшний день неэффективно и невозможно. Современные условия требуют более широкой интеграции ПО и поддержки жизненного цикла изделия на всех этапах. Наличие теоретической базы и создание математического обеспечения являются хорошей основой для решения задач автоматизации проектирования ОС на совершенно другом уровне.

Целью работы является демонстрация возможностей разработанного в Томском политехническом университете современного конкурентоспособного отечественного ПО «Оптика», позволяющего решать комплексную поддержку работы оптика-разработчика, начиная с этапа синтеза исходной оптической схемы или поиска аналога, включая автоматизированную оптимизацию и анализ оптических систем.

2. Возможности программы

Алгоритмы, на которых базируется ПО «Оптика», опубликованы в работах [5-10]. ПО “Оптика” позволяет рассчитать:

- гауссовы характеристики ОС с осевой симметрией и с двумя плоскостями симметрии;
- световые диаметры оптических элементов;
- точечные диаграммы (ТД) на поверхностях ОС и в любой заданной плоскости;
- ход меридионального, сагиттального и полного пучка лучей;
- ход нескольких пучков;
- ход гауссового пучка через ОС;
- функцию концентрации энергии (ФКЭ);
- волновые aberrации и aberrации третьего порядка ОС;
- положение плоскости наилучшей установки (ПНУ);
- кардинальные элементы ОС в области реальных лучей в меридиональном и сагиттальном сечениях;
- зрачки ОС по заданному положению и величине апертурной диафрагмы;
- люки ОС по заданному положению и величине полевой диафрагмы;
- технологические параметры асферических поверхностей;
- конструктивные параметры линзы в воздухе;
- конструктивные параметры объектива Кассегрена;
- конструктивные параметры двухлинзового склеенного ахроматического объектива (предмет в бесконечности и на конечном расстоянии);
- конструктивные параметры двухлинзового несклеенного ахроматического объектива (предмет в бесконечности и на конечном расстоянии)

- сканирующую систему из двух плоских зеркал;
 - сканирующую систему из двух оптических клиньев.
- Кроме того ПО «Оптика» позволяет произвести:
- асферизацию последней поверхности ОС;
 - оптимизацию параметров ОС.

Имеет базу данных на объективы.

Возможные типы систем:

- Пространственная – Р;
- Центрированная – С;

Типы поверхностей:

- Поверхности второго порядка с осевой симметрией;
- Поверхности второго порядка с двумя плоскостями симметрии;
- Поверхности второго порядка с зональной ошибкой;
- Поверхности высшего порядка;
- Конические поверхности;
- Цилиндрические поверхности;
- Тороидальные поверхности;
- Плоские дифракционные решетки;
- Диафрагмы и экраны круглые, прямоугольные, полуплоскости.

Большинство оптических систем являются «центрированными». С точки зрения разработчика на схемотехническом уровне такая оптическая система использует в качестве функциональных элементов оптические среды и оптические поверхности. Она полностью описывается такими параметрами, как радиусы кривизны поверхностей (при необходимости — коэффициенты асферики), осевые расстояния между поверхностями, показатели преломления или марки оптических материалов, из которых состоят среды, разделяющие эти поверхности, световые диаметры. Результатом проектирования является оптическая схема («оптический выпуск»), содержащая численные значения и допускаемые отклонения указанных параметров.

Форма поверхности второго порядка в программе «Оптика» задается уравнением в системе координат, расположенной в вершине поверхности:

$$x^2 + y^2 = 2 \cdot R \cdot z + (e^2 - 1) \cdot z^2$$

где R – радиус кривизны при вершине поверхности, e – эксцентриситет. Вершиной поверхности считается точка пересечения оси симметрии поверхности с самой поверхностью. В программе Оптика правило знаков принимают согласно ГОСТ 7427-76 «Геометрическая оптика» [10]. Ход луча слева направо считается положительным, справа налево – отрицательным.

3. Пользовательский интерфейс ПО «Оптика»

Внешний вид программы Оптика представляет собой две таблицы (Рис. 1):

1. Верхняя таблица определяет общие характеристики оптической системы (название системы, количество поверхностей, количество лучей, единицы измерения углов, диаметр и положение входного зрачка, положение и величину предмета, показатель преломления и направление хода луча в пространстве предметов).

2. В нижнюю таблицу заносятся конструктивные параметры ОС (радиусы кривизны поверхности, осевые расстояния, эксцентриситеты, показатели преломления, направление хода луча и другие параметры, используемые для описания формы поверхности и ее положения в пространстве).

Основное меню программы располагается в ее верхней части. Здесь можно рассчитать гауссовы характеристики, гауссовы пучки, световые высоты, оптимизировать оптиче-

скую систему, рассчитать положение зрачков и люков системы и т.д. Также программа может произвести графическое построение точечной диаграммы в заданной плоскости (ЗП), плоскости Гаусса (ПГ) и в плоскости наилучшей установки (ПНУ).

Одной из особенностей программы является автоматическая запись отчета о проведенных расчетах, которая формирует все результаты в единый документ.

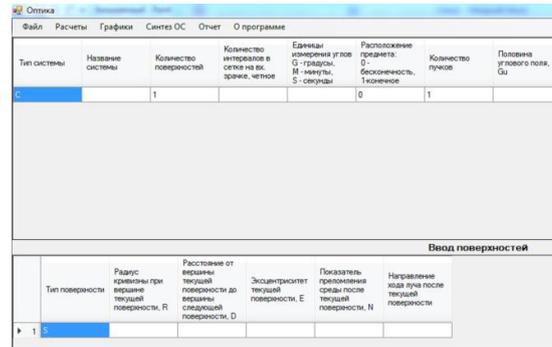


Рис. 1. Фрагмент внешнего вида ПО «Оптика».

4. Расчет линзового объектива

В качестве примера работы с программой произведем расчет линзового объектива, состоящего из четырех поверхностей [9]. Схема линзового объектива приведена на Рис. 2. Параметры объектива: $2\omega = 5^\circ$, $\forall = 1:2$, $\lambda = 10$ мкм, материал – Ge.

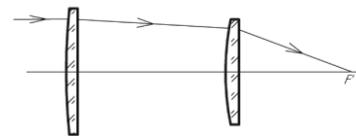


Рис. 2. Оптическая схема линзового объектива.

Отчет о проведенных расчетах

Данные по системе:

Тип системы: С

Название системы: Линзовый объектив

Количество поверхностей: 4

Количество интервалов в сетке на входном зрачке: 50

Единицы измерения углов: G (градусы)

Расположение предмета: 0 (бесконечность)

Количество пучков: 1

Половина углового поля, $G_H:0$

Диаметр входного зрачка: 50

Координата центра входного зрачка по оси X, $X_c: 0$

Координата центра входного зрачка по оси Y, $Y_c: 0$

Показатель преломления среды в пространстве предметов: 1

Направление хода луча в пространстве предметов: 1

Данные по поверхностям приведены в таблице 1.

Таблица 1- Данные по поверхностям линзового объектива

Тип поверхности	R	d	e	n	δ
S	1025,64	3,37	0	4,0052	1
S	0	104,8	0	1	1
S	293,69	4,67	0	4,0052	1
S	0	0	0	1	1

где S – поверхности второго порядка,

R – радиус кривизны при вершине текущей поверхности, мм,
d – расстояние от вершины текущей поверхности до верши-

ны следующей поверхности, мм,
 e - эксцентриситет поверхности,
 n – показатель преломления среды после текущей поверхности,
 δ – направление хода луча после текущей поверхности.

Результаты расчетов

1) Гауссовы характеристики

Таблица 2 - Гауссовы характеристики линзового объектива

Переднее фокусное расстояние	-100,047268
Заднее фокусное расстояние	100,047268
Передний фокальный отрезок	8,102011
Задний фокальный отрезок	67,912950
Расстояние от вершины передней поверхности до передней главной точки	108,149278
Расстояние от вершины задней поверхности до задней главной точки	-32,134318
Расстояние от вершины передней поверхности до передней узловой точки	108,149278
Расстояние от вершины задней поверхности до задней узловой точки	-32,134318
Величина гауссового изображения	0

2) Полный пучок. Точечная диаграмма в ЗП

Количество лучей на входе системы: 1961
 Количество лучей на выходе системы: 1961
 Координаты X, Y центра тяжести пятна:
 X=0, Y=0

Размеры кружка рассеяния (координаты границ точечной диаграммы):

$X_{min} = -16,948985$, $Y_{min} = 16,948985$
 $X_{max} = 16,948985$, $Y_{max} = 16,948985$

3) Полный пучок. Точечная диаграмма и функция концентрации энергии (ФКЭ) в ПГ (Рис. 3-4)

Количество лучей на входе системы: 1961
 Количество лучей на выходе системы: 1961
 Координаты X, Y центра тяжести пятна: X=0, Y=0
 Размеры кружка рассеяния (координаты границ точечной диаграммы):

$X_{min} = -0,537609$, $Y_{min} = 0,537609$
 $X_{max} = 0,537609$, $Y_{max} = 0,537609$

4) Полный пучок. Точечная диаграмма и ФКЭ в ПНУ (Рис. 3-4)

Расстояние до ПНУ: 66,5201369967688
 Координаты X, Y центра тяжести пятна:
 X=0, Y=0

Размеры кружка рассеяния (координаты границ точечной диаграммы):

$X_{min} = -0,178980$, $Y_{min} = 0,178980$
 $X_{max} = 0,178980$, $Y_{max} = 0,178980$

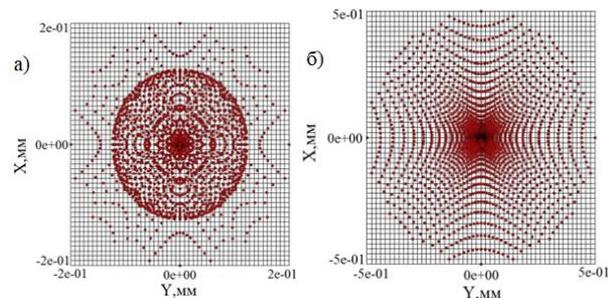


Рис. 3. Точечная диаграмма в ПНУ (а) и ПГ (б).

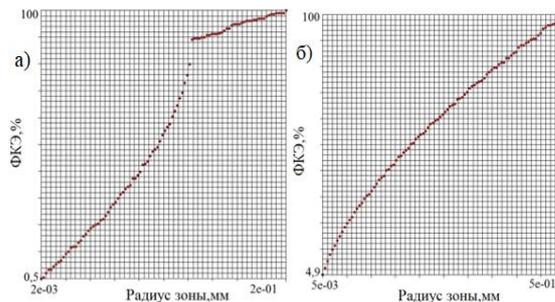
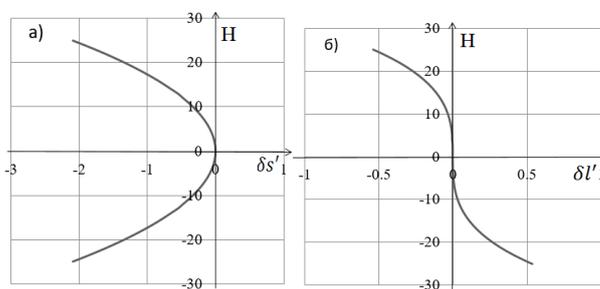
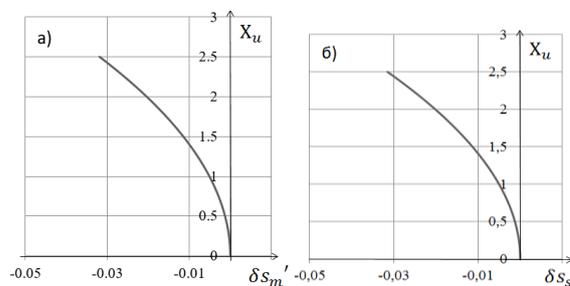


Рис. 4. ФКЭ в ПНУ (а) и в ПГ (б).

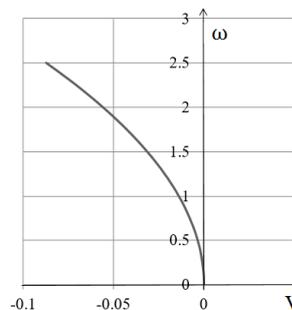
5) Расчет aberrаций Зейделя третьего порядка. (Рис. 5-8). Плоскость предмета расположена в бесконечности.



H – высота луча на входном зрачке, $\delta s'_l$ – продольная сферическая aberrация, $\delta l'_l$ – поперечная сферическая aberrация
Рис. 5. Продольная (а) и поперечная (б) сферическая aberrация.



X_u – координата точки предмета, $\delta s_m l$ – меридиональный astigmatизм, $\delta s_s l$ – сагиттальный astigmatизм
Рис. 6. Меридиональный (а) и сагиттальный (б) astigmatизм.



ω – угловая величина предмета (градусы), V – дисторсия
Рис. 7. Дисторсия.

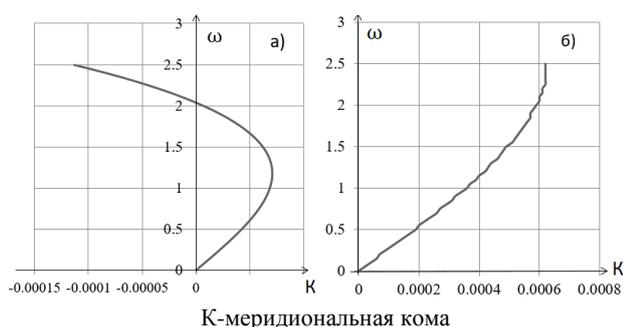


Рис. 8. Меридиональная кома в ПГ (а) и в ПНУ (б).

б) Расчет волновых aberrаций.

Для примера рассчитаем волновые aberrации линзового объектива в меридиональном сечении в ПНУ и в ПГ. Точка предмета находится в бесконечности и на оси (Рис. 9). Волновые aberrации рассчитываются относительно двух сфер сравнения: центр первой сферы сравнения расположен в центре тяжести ТД в ПГ, а вершина – в точке пересечения главного луча с выходным зрачком; центр второй сферы сравнения расположен в центре тяжести ТД в ПНУ, а вершина также – в точке пересечения главного луча с выходным зрачком.

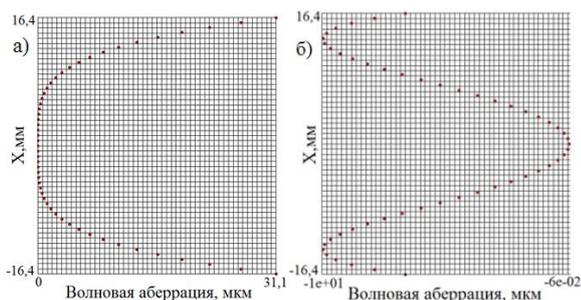


Рис. 9. Меридиональный профиль волновых aberrаций в ПГ (а) и в ПНУ (б).

7) Расчёт производных.

Осуществляется расчёт производных от заднего фокального отрезка по расстояниям между поверхностями и по радиусам кривизны поверхностей в параксиальном приближении. Результаты расчета приведены в Таблице 3.

Таблица 3 – Производные от заднего фокального отрезка

№	Производные $\frac{\partial S'_F}{\partial d_i}$	Производные $\frac{\partial S'_F}{\partial R_i}$
1	-0,0214557212018727	0,0285952530805739
2	-0,0859344545577407	–
3	-0,249675421951463	0,166259441408024
4	–	–

Зная производные, можно рассчитать допуски на расстояния между поверхностями и радиусы кривизны поверхностей при заданном допуске на задний фокальный отрезок.

5. Заключение

Значимость работы обусловлена ее направленностью на решение как фундаментальных так и практических вопросов

расчета ОС и обработки результатов измерений в процессе контроля оптических деталей, узлов и материалов фотоники. Полученные в работе результаты позволяют:

- на этапе проектирования получать полную информацию о качестве ОС, оценить допуски и технологичность ОС;
- применять отечественное программное обеспечение, обеспечивающее решение основных задач по расчету, синтезу и анализу качества изображения оптических систем;
- обеспечить возможность подготовки высококвалифицированных кадров в области фотоники (расчет и конструирование оптических систем): включение в образовательный процесс.

Литература

- [1] Philip C. D. Hobbs Building Electro-Optical Systems: Making it All Work. 2000 John Wiley & Sons, Inc. p. 710.
- [2] Warren J. Smith Modern Optical Engineering 3rd ed. McGraw-Hill, 2008, p. 641
- [3] Агапов Н.А. Двухзеркальная сканирующая система. // ОМП, 1986, №6, 11-13 с.
- [4] Агапов Н.А. К вопросу о главных поверхностях оптических систем. Ред. журн. «Изв. вузов. Физика». - Томск, 2010. - Деп. в ВИНТИ 20.12.2010, Рег. № 707-B2010, 24 с.
- [5] Агапов Н.А., Кулешов В.К., Корнев В.А. Расчет хода лучей через конические поверхности второго порядка, не обладающие осевой симметрией. // Образование. Наука. Научные кадры, 2013, №1, с. 123-133.
- [6] Агапов Н.А., Лялин Ю.В., Калошина Х.С. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ ППП «ОПТИКА» № 960502, заявка № 960412. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22.11.96.
- [7] Агапов Н.А. Оптика реальных лучей: монография / Н.А. Агапов, В.К. Кулешов; под ред. д-ра техн. наук Н.А. Агапова. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2017. 100 с.
- [8] Герцбергер М. Современная геометрическая оптика. – М.: ИЛ, 1962, 487 с.
- [9] Ефремов В.С. Оптические устройства оптико-электронных приборов: методические указания по курсу «Конструирование оптико-электронных приборов», Изд-во НИИГ АиК, 1991. – 37 с.
- [10] ГОСТ 7427-76 Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения; М.: Издательство стандартов, 1988, – 19 с.
- [11] Шеннон Р., Вайант Дж. Проектирование оптических систем, Мир, 1983. 422 с.
- [12] Шехонин А.А. Методология проектирования оптических приборов: учеб. пособие / А.А. Шехонин, В.М. Домненко, О.А. Гаврилина.– СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 91 с.

Об авторах

- 1) Валиев Дамир Талгатович, к. ф.-м. н., доцент отделения Материаловедения Томского политехнического университета. E-mail: rubinfc@tpu.ru
- 2) Россомахина Наталья Евгеньевна, студент отделения Материаловедения Томского политехнического университета. E-mail: rossomahina96@mail.ru.
- 3) Тюлькин Евгений Викторович, магистрант Томского политехнического университета
- 4) Агапов Николай Афанасьевич, д. т. н., профессор отделения Материаловедения Томского политехнического университета. E-mail: anikolja@tpu.ru.