

Использование макросов в программе ZEMAX для анализа aberrаций телескопических систем

Ю.Ю. Качурин¹, А.В. Крюков¹, О.А. Кананыхин¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2-ая Бауманская 5, Москва, Россия, 105005

Аннотация. Работа с программой ZEMAX при анализе aberrаций оптических систем требует сбора и объединения данных из различных текстовых окон, таких как окна Longitudinal Aberrations, Ray Fan, Field Curvature and Distortion, Lateral Colour и др. Это занимает много времени при анализе и значительно замедляет процесс проектирования. Кроме того, необходимо всегда помнить о некоторых особенностях создания моделей оптических систем и интерпретации данных, связанных с различиями в алгоритмах расчета для отечественных и зарубежных оптических школ. В работе представлен макрос, который в одном окне формирует сводные таблицы aberrаций телескопической системы в виде оптического выпуска.

1. Введение

Моделирование оптических систем и формируемого ими изображения в современном приборостроении осуществляется с использованием программ автоматизированного проектирования, таких как ZEMAX, Code V, OSLO, OPAL и др. С 2007 года базовой программой для выполнения научно-исследовательских работ и подготовки студентов кафедры РЛЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана является программа ZEMAX.

Эффективным инструментом, расширяющим стандартные возможности программы, являются макросы - законченные подпрограммы, предназначенные для реализации пользовательских алгоритмов расчета при помощи операторов, процедур и функций с использованием данных, составляющих модель оптической системы [1,8].

Макросы применяются при работе с каталогами оптического стекла [3] и моделировании наклонных зеркал [4]. Некоторые полезные функции, такие как обеспечение афокальности телескопических систем и вычисление хроматических разностей широких пучков лучей, реализованы авторами в виде макросов, описанных в [5]. Пакет Zemax активно применяется в работах отечественных авторов для исследования aberrаций дифракционных элементов [6, 7], при этом использование макросов значительно упрощает труд разработчиков.

Дальнейшим развитием темы макросов явилось их применение для анализа качества изображения.

Заметим, что в программе ZEMAX оценка качества формируемого изображения, связанная с aberrационным анализом, происходит путем сбора и анализа определенного набора данных. Эти данные содержатся в явном и неявном виде в текстовых окнах Longitudinal Aberrations, Ray Fan, Field Curvature and Distortion, Lateral Color, а также Prescription - спецификации оптической системы и Ray Trace - текстовом окне с результатами трассировки луча.

Одновременное использование нескольких текстовых окон при анализе системы требует определенного времени на поиск нужного значения, что замедляет процесс проектирования. Дополнительная трудность заключается в ограниченном интерфейсом программы настройках окон анализа, например невозможности задания требуемого количества выводимых значений координат предмета и входного зрачка. Также интерпретация полученных данных часто требует учета отечественной практики расчета оптических систем, правила знаков и др. [2].

При оформлении рабочей документации требуется подготовка пакета чертежей, в который входят оптическая схема и оптический выпуск на рассчитанную оптическую систему. Для автоматизации этого процесса авторами созданы макросы, формирующие данные для оформления оптического выпуска на объектив и телескопическую систему. Общего для этих двух макросов является то, что данные выводятся в одном окне со структурой удобной для пользователя, исключающей избыточную информацию и учитывающей правило знаков. Также вычисляются значения, не предусмотренные стандартными текстовыми окнами анализа: хроматические разности, астигматическая разность, положение выходных зрачков для наклонных пучков лучей.

Особенностями формируемого оптического выпуска для телескопической системы является то, что значения поперечных аберраций и полевых углов выводятся в формате градусы-минуты-секунды, а также то, что значение хроматизма увеличения вычисляется как разность углов главных лучей для длин волн F' и C' .

2. Формирование оптического выпуска для телескопической системы с помощью макроса

Оптический выпуск представляет собой рабочий документ, в котором собраны данные о самой оптической системе, а также приведены результаты её абберационного расчета.

2.1. Определение и вывод основных оптических характеристик

К основным оптическим характеристикам телескопической системы относятся: видимое увеличение Γ , диаметр выходного зрачка D' и угловое поле в пространстве предметов 2ω .

Значения видимого увеличения и диаметра выходного зрачка определяются при помощи процедуры `GetSystemData`, которая формирует вектор значений по структуре аналогичный разделу `General Lens Data` текстового окна `Prescription`. Видимому увеличению Γ соответствует поле с номером 17, диаметру выходного зрачка D' – поле 13.

Значение углового поля извлекается из диалогового окна `Field Data` помощи функции `MaxF()`.

Вывод значений в текстовое окно осуществляется при помощи процедуры `Print`.

Фрагмент программы макроса, извлекающий и выводящий на экран основные характеристики телескопической системы, выглядит следующим образом:

```
GetSystemData 2
Format 4.1
Print "Г = ",VEC2(17)
Print "D'=",VEC2(13)
Print "2w= ", MAXF()*2
```

Фрагмент текстового окна со значениями основных характеристик показан на рисунке 1.

2.2. Определение и вывод конструктивных параметров

К конструктивным параметрам относятся радиусы кривизны поверхностей, осевые расстояния, марки стекол, показатели преломления, световые диаметры по поверхностям и стрелки прогиба.

Значения радиусов кривизны r , осевых расстояний d и марок стекол извлекаются из редактора `Lens Data Editor` при помощи функций `Radi(i)`, `Thic(i)`, `$Glass(i)`, соответственно, где i – номер поверхности.

Определение значения показателя преломления в языке макросов программы ZEMAX реализовано тремя способами:

- на основе дисперсионных формул Шотта (Schott), Зелльмейера (Sellmeier), Герцбергера (Herzberger) по средствам прямой подстановки значения длины волны в ряд;
- при помощи функции Indx(i), возвращающей значение показателя преломления после i-ой поверхности для основной длины волны;
- при помощи функции Grin(i, λ, x, y, z), возвращающей значение показателя преломления после i-ой поверхности для длины волны λ в точке с координатами x, y, z.

В разработанном макросе использована функция Grin.

			n_e	n_F'	n_C'	Световой диаметр	Стрелки прогиба
r 1 =	148.5900	d 1 = 3.00	1.000000	1.000000	1.000000	28.0000	0.6610
r 2 =	53.3300	d 2 = 5.00	F13 1.624065	1.633119	1.615802	27.9189	1.8594
r 3 =	-176.2000	d 3 = 229.00	KF6 1.502655	1.507168	1.498334	27.9749	-0.5561
r 4 =	96.1600	d 4 = 1.80	1.000000	1.000000	1.000000	30.2175	1.1944
r 5 =	23.5500	d 5 = 10.80	TF1 1.652161	1.662347	1.642931	30.1340	5.4506
r 6 =	-36.4800	d 6 = 0.20	BK8 1.548848	1.553316	1.544525	30.3400	-3.3038
r 7 =	36.4800	d 7 = 10.80	1.000000	1.000000	1.000000	28.0416	2.8020
r 8 =	-23.5500	d 8 = 1.80	BK8 1.548848	1.553316	1.544525	25.8702	-3.8704
r 9 =	-96.1600	d 9 = 1.80	TF1 1.652161	1.662347	1.642931	24.0100	-0.7523

Рисунок 1. Фрагмент текстового окна с основными характеристиками и конструктивными параметрами.

Для определения значения световых диаметров и стрелок прогиба был адаптирован стандартный макрос EdgeSag.

Фрагмент текстового окна, отражающий конструктивные параметры, показан на рисунке 1.

2.3. Определение и вывод аберраций осевого луча

Для осевого луча формируется сводная таблица из продольных и поперечных аберраций для параксиальной области, зоны и края зрачка. Расчет аберраций производится в плоскости выходного зрачка. Основой получения данных для расчета аберраций является процедура трассировки луча <RayTrace Hx, Hy, Px, Py, длина_волны>, где Hx, Hy – относительные координаты предмета, Px, Py – относительные высоты луча во входном зрачке в сагиттальном и меридиональном сечениях, соответственно, длина_волны – номер длины волны в диалоговом окне WaveLength. После выполнения этой процедуры становятся доступны значения координаты встречи луча с поверхностями и направляющие косинусы луча в этих точках. Среди этой совокупности значений для составления таблиц оптического выпуска нами использовались значения RayL(NSur()), RayM(NSur()), RayN(NSur()) направляющих косинусов луча с осями координат x, y, z, соответственно, в точке пересечения лучом плоскости выходного зрачка, а также RayY(NSur()) – y координата этой точки.

Особенностью задания трассировки луча идущего на нулевой высоте является то, что для такого луча следует задать не нулевое значение Py, а малое конечное, например 0,00001.

Для вычисления продольной сферической аберрации мы использовали выражение:

$$\Delta s' = \frac{-1000 \cdot \text{RayM}(\text{NSur}(\quad))}{\text{RayY}(\text{NSur}(\quad)) \cdot \text{RayN}(\text{NSur}(\quad))},$$

Знак минус в выражении использован для приведения значения аберраций в соответствие с правилом знаков, принятым в России.

Так как для телескопических систем изображение находится в бесконечности, наклон осевого луча в плоскости выходного зрачка является поперечной сферической аберрацией.

Вид таблицы aberrаций осевого луча показан на рисунке 2.

Осевой луч		продольная aberrация				поперечная aberrация			
m	m'	e	F'	C'	F'-C'	e	F'	C'	F'-C'
14.0000	-1.9875	-0.0801	-0.0836	-0.3533	0.2698	0o 0'33''	0o 0'34''	0o 2'25''	- 0o 1'51''
9.8000	-1.3946	-0.0102	0.0301	-0.3186	0.3487	0o 0' 3''	- 0o 0' 9''	0o 1'32''	- 0o 1'40''
0.0000	0.0000	0.0000	0.0794	-0.3396	0.4190	0o 0' 0''	0o 0' 0''	0o 0' 0''	0o 0' 0''

Рисунок 2. Фрагмент текстового окна с таблицей aberrаций осевого пучка лучей.

Дополнительно осуществлено вычисление хроматических разностей, а также вывод поперечной сферической aberrации в формате градусы-минуты-секунды [5] с приведением значений к принятому в России правилу знаков.

2.4. Определение и вывод aberrаций широкого наклонного пучка лучей меридионального сечения

Для широкого наклонного пучка лучей меридиональные отклонения вычислялись в плоскости выходного зрачка относительно главного луча основной длины волны. При этом главным лучом считается луч, идущий через центр действующего отверстия.

Вид таблицы aberrаций широкого наклонного пучка меридионального сечения показан на рисунке 3.

меридиональное сечение		коэффициент виньетирования VCU = 0.5000		VDU = 0.0000		меридиональные отклонения		
m	m'	m' - m' пл	e	F'	C'	F'-C'		
7.0000	-2.3069	-1.2590	0o26'30''	0o21'46''	0o29'37''	- 0o 7'51''		
4.9000	-1.9365	-0.8887	0o18'15''	0o13' 1''	0o21'33''	- 0o 8'32''		
0.0000	-1.0478	0.0000	0o 0' 0''	- 0o 6'33''	0o 3'47''	- 0o10'20''		
-4.9000	-0.1081	0.9398	- 0o18'30''	- 0o26'42''	- 0o13'52''	- 0o12'50''		
-7.0000	0.3174	1.3652	- 0o27' 6''	- 0o36'11''	- 0o21'56''	- 0o14'15''		

Рисунок 3. Фрагмент текстового окна с таблицей aberrаций широкого пучка лучей меридионального сечения.

Дополнительно вычислены хроматические разности, а также осуществлен вывод поперечной aberrации в формате градусы-минуты-секунды с приведением значений к принятому в России правилу знаков.

2.5. Определение и вывод aberrаций широкого наклонного пучка лучей сагиттального сечения

Для широкого наклонного пучка лучей сагиттального сечения вычислялись проекции отклонений от главного луча основной длины волны в плоскостях xz и yz.

$$\Delta \psi' = - \arcsin \frac{\text{RayL}(\text{NSur}(\quad))}{\text{RayN}(\text{NSur}(\quad))},$$

$$\Delta \sigma' = \omega'_{\text{пл}} - \arcsin(\text{RayM}(\text{NSur}(\quad))),$$

где $\omega'_{\text{пл}}$ – наклон главного луча в плоскости выходного зрачка.

Вид таблицы aberrаций широкого наклонного пучка сагиттального сечения показан на рисунке 4. Дополнительно осуществлено приведение значений к правилу знаков, принятому в России, и вывод aberrаций в формате градусы-минуты-секунды.

2.6. Определение и вывод aberrаций главного луча и узких астигматических пучков лучей

Для главного луча определялись значения положения выходного зрачка, дисторсия и хроматизм увеличения. Для узкого пучка лучей определялись значения меридиональной и сагиттальной кривизны, а также астигматизм.

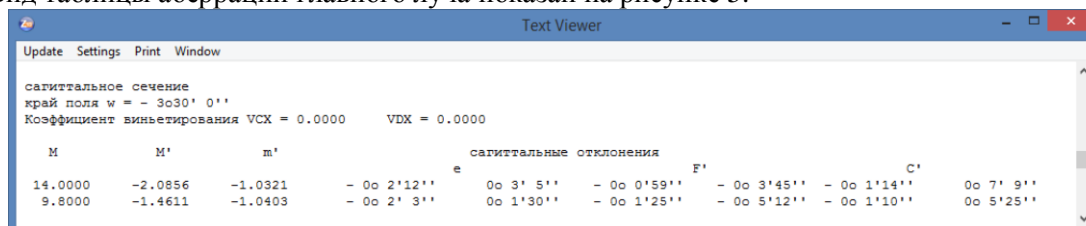
Положение выходного зрачка для наклонного пучка лучей вычислялось по лучу, идущему через центр действующего отверстия при симметричном виньетировании по формуле:

$$s'_{p'} = \text{Thic}(\text{NSur}(\quad) - 1) - \frac{\text{RayY}(\text{NSur}(\quad)) \cdot \text{RayN}(\text{NSur}(\quad))}{\text{RayM}(\text{NSur}(\quad))}.$$

При определении дисторсии для расчета хода нулевого луча включался режим Paraxial On. Хроматизм увеличения вычислялся как разность значений углов главных лучей в плоскости выходного зрачка для длин волн F' и C' .

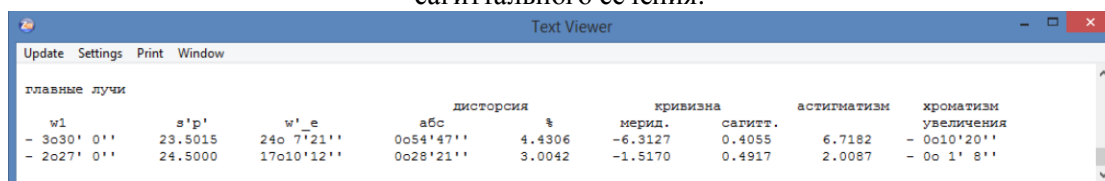
Меридиональная и сагиттальная кривизна определялись на основе обработки текстового файла, сформированного процедурой GetTextFile для анализа FCD.

Вид таблицы aberrаций главного луча показан на рисунке 5.



M	M'	m'	сагиттальные отклонения					
14.0000	-2.0856	-1.0321	- 0o 2'12''	0o 3' 5''	- 0o 0'59''	- 0o 3'45''	- 0o 1'14''	0o 7' 9''
9.8000	-1.4611	-1.0403	- 0o 2' 3''	0o 1'30''	- 0o 1'25''	- 0o 5'12''	- 0o 1'10''	0o 5'25''

Рисунок 4. Фрагмент текстового окна с таблицей aberrаций широкого пучка лучей сагиттального сечения.



главные лучи		дисторсия		кривизна		астигматизм	хроматизм
w1	s'p'	w'_e	abc	%	мерид.	сагитт.	увеличения
- 3o30' 0''	23.5015	24o 7'21''	0o54'47''	4.4306	-6.3127	0.4055	- 0o10'20''
- 2o27' 0''	24.5000	17o10'12''	0o28'21''	3.0042	-1.5170	0.4917	- 0o 1' 8''

Рисунок 5. Фрагмент текстового окна с таблицей aberrаций главного луча и узких астигматических пучков лучей.

Таким образом, разработан макрос, формирующий в едином текстовом окне основные оптические характеристики, конструктивные параметры и таблицы aberrаций телескопической системы с визуализацией данных в форме оптического выпуска и с приведением данных к требованиям ГОСТ в отношении правила знаков и размерностей отображаемых величин.

3. Литература

- [1] Наджип, А.Э. Руководство пользователя пакетом программ ZEMAX – Москва, 2010. – 986 с.
- [2] Качурин, Ю.Ю. Оформление оптического выпуска на основании расчетов в программе ZEMAX. Учебно-методическое пособие / Ю.Ю. Качурин, А.В. Крюков, А.А.Каратеева – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019. – 65 с.
- [3] Малькин, А.А. Использование макросов при проектировании центральных оптических систем в программе Zemax // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83, № 3. – С. 45-47.
- [4] Горячева, В.А. Макрос для моделирования наклона зеркала в программе ZEMAX / В.А. Горячева, Мазаев В.Л. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 2. – С. 210-212.
- [5] Качурин, Ю.Ю. Оптимизация расчета афокальных систем с использованием языка макросов программы ZEMAX / Ю.Ю. Качурин, А.А. Каратеева // Оптический журнал. – 2019 – Т. 88, № 1. – С. 48-51.
- [6] Грейсух, Г.И. Однослойные киноформные элементы для фото- и видеокамер мобильных устройств / Г.И. Грейсух, Е.Г. Ежов, С.В. Казин, С.А. Степанов // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 218-226. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-2-218-226.
- [7] Грейсух, Г.И. Спектральная и угловая зависимость эффективности двухслойной однорельефной пилообразной микроструктуры / Г.И. Грейсух, В.А. Данилов, А.И. Антонов, С.А. Степанов, Б.А. Усиевич // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 38-43. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-1-38-43.
- [8] Web Site [Electronic resource]. – Access mode: <https://osphotonics.wordpress.com/2018/02/10/application-of-zemax-programming-language-paperback-version-available-for-purchase/>.

Macro usage for analyzing of a telescopic system aberration in ZEMAX

Yu.Yu. Kachurin¹, A.V. Krukov¹, O.A. Kananykhin¹

¹Bauman Moscow State Technical University, 2ya Baumanskaya street 5, Moscow, Russia, 105005

Abstract. The experience of working with ZEMAX software for optical system aberration analysis demonstrates the necessity to acquire and combine data from different text windows such as windows of Longitudinal Aberrations, Ray Fan, Field Curvature and Distortion, Lateral Colour etc. This routine operation takes much time and significantly slows down the design process. Moreover, an engineer should always remember about some features in data interpretation connected with different calculation algorithms of different optical schools. It instigated us to develop a macro that forms one-window aberration summary for afocal systems with proper data interpretation according to domestic optical science school.