

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 535.317

**ОСОБЕННОСТИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТ
АБЕРРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ**¹⁾Артюхина Н. К., ^{1,2)}Пероса Лаура, ¹⁾Федорцев Р. В., ^{1, 3)}Альмахмуд Шуаиб Хассан¹⁾Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь²⁾Yacambú University, Barquisimeto, Venezuela³⁾AL-Bath University, SyriaE-mail: art49@mail.ru

Представлены результаты исследования особенностей расчета, анализа абберрационных характеристик и оценки качества изображения афокальных систем в сравнении с другими оптическими системами (ОС), имеющими изображение на конечном расстоянии от нее. Предложены способы и методики оценки качества изображения при компьютерном моделировании в зависимости от типа и версии доступных программных пакетов проектирования оптики.

Ключевые слова: качество изображения, коррекция абберраций, оптимизация, сферическая абберрация, кома, астигматизм, дисторсия.

Введение

В настоящее время афокальные системы занимают важное место при проектировании оптических систем из-за широкого разнообразия возможных применений. Такие системы применяются не только с глазом наблюдателя; они входят в состав насадок к объективам (геодезических приборов, оптических лазерных устройств и др.) [1]. Афокальные системы интенсивно изучаются, и в этой области можно ожидать много новых перспективных решений.

Афокальные композиции, полученные в результате синтеза и оптимизации, должны удовлетворять определенным требованиям качества изображения [2, 3], оценка которого на этапе абберрационного расчета и анализа параметров зависит от назначения телескопической системы в зависимости от поставленной задачи [4]. Качество изображения возможно оценивать геометрическими (величиной геометрических абберраций, разрешающей способностью) и физическими (волновыми абберрациями, распределением освещенности в дифракционной картине) методами [5]. Для технологически адаптированных систем применяют фотоэлектрический метод по частотно-контрастным характеристикам (ЧКХ) и теневой метод Фуко-Максутова. Абберрации, являясь характеристикой качества изображения, вместе с неизбежными погрешностями изготовления и сборки оптических систем (ОС) снижают качество изображения. В зависимости от назначения, типа и особенностей проектируемой оптики единицы измерения раз-

личных абберраций могут определяться в угловой или в линейной мере [6].

В этом смысле, абберрации афокальных схем вносят некоторые специфические особенности в оформление абберрационного выпуска, что требует поиска новых методов оценки с учетом различных соображений (положение глаза, абберрации в плоскостях зрачков и т. д.), предполагающих, что изображение формируется в бесконечности.

Информация, найденная в литературе по этой теме, является крайне недостаточной и разбросанной, а поскольку оценка качества изображения играет фундаментальную роль при разработке любых ОС, включая афокальные, представляется целесообразным провести анализ и структурировать абберрационные параметры на этапе компьютерной оценки качества изображения телескопических систем.

Цель статьи – установить классификационный подход к выбору различных способов оценки качества изображения афокальных систем на основе анализа абберрационных параметров трехзеркальных анастигматических систем, создающих изображение в бесконечности.

Абберрационные характеристики афокальных систем

Поперечные абберрации и продольные абберрации выражаются в миллиметрах для изображения ближнего типа. Для телескопических систем, изображение которых бесконечно удалено (дальнего типа), они становятся бесконечными и не имеют смысла.

В этом случае угловые aberrации адекватны поперечным aberrациям и обладают соответствующими свойствами. На рис. 1, а угловая aberrация представлена угловым отклонением $\Delta\sigma$ между реальным и идеальным лучами.

Для продольных aberrаций вместо самой aberrации используем обратное значение длин пересечений (рис. 1, б):

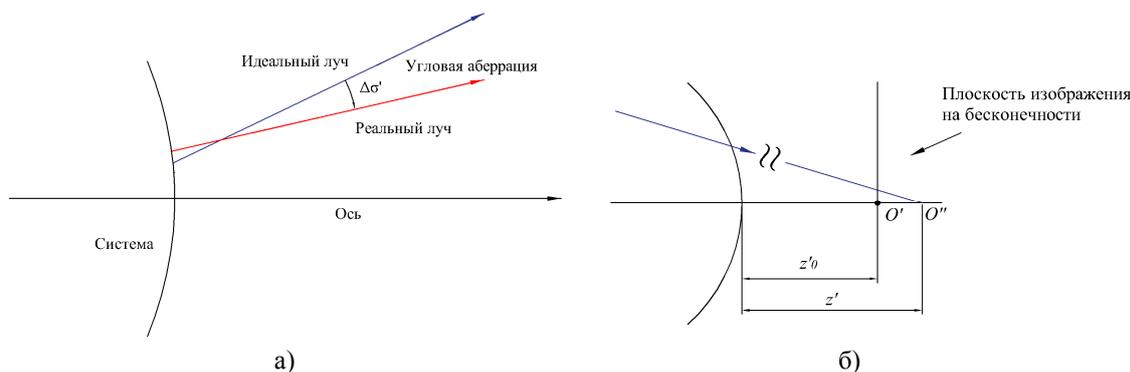


Рис 1. Представление геометрических aberrаций для удаленного изображения: а) в угловой мере; б) в линейной мере

Существуют определенные преимущества описания, основанного на волновых aberrациях:

- aberrации волнового фронта в отличие от лучевых (геометрических) легко и точно можно измерить средствами интерферометрических методов;
- волновые aberrации являются важным источником для вычисления погрешностей дифракционного изображения, когда качество изображения определяется дифракционными эффектами.

Волновые фронты строго связаны с лучами. В случае бесконечно удаленного изображения, когда точка изображения находится в бесконечности, радиус волнового фронта становится бесконечным, а эталонная «сфера» становится плоскостью, перпендикулярной главному лучу.

Связь между волновой и поперечной геометрической aberrациями определяется следующими выражениями:

$$\Delta x' = -\frac{\lambda}{O_x} \frac{\partial W}{\partial \rho_x} \quad \Delta y' = -\frac{\lambda}{O_y} \frac{\partial W}{\partial \rho_y}; \quad W = \frac{\Delta l' n'}{\lambda};$$

где Δx и Δy – поперечные aberrации в меридиональной и сагиттальной плоскостях соответственно, а W – волновые aberrации, $\Delta l'$ определяет разность между сферой референта и волновым фронтом; O – точка объекта.

Оптические системы с большими aberrациями целесообразно характеризовать геометрическими aberrациями; при малых aberrациях оказы-

$$\Delta S' = \frac{1}{Z'_0} - \frac{1}{Z'}$$

вается более удобным использование волнового описания.

Выделим некоторые aberrационные особенности, присущие афокальным системам при использовании их в качестве визуального инструмента. В этом случае обычная интерпретация aberrационных коэффициентов неуместна, т. к. площадь выходного зрачка намного больше, чем площадь зрачка глаза.

Астигматизм в окуляре. В афокальной системе (определим ее как телескоп) кома присуща объективу и не имеет существенного значения в окуляре из-за компенсации при расчете. В работе [7] отмечено, что тогда обычно доминирует окулярный астигматизм, который увеличивается с ростом углового поля зрения и изменяется пропорционально квадрату фокусного отношения телескопа (ошибка волнового фронта астигматизма в четыре раза больше при отношении $f/5$, чем при $f/10$).

Сферическая aberrация зрачка. Выходной зрачок – изображение входного зрачка, имеющее соответствующие aberrации. Интерес представляет сферическая aberrация зрачка. При большом значении этой aberrации нет правильного перекрытия лучей из разных точек поля, что делает неудобным или даже невозможным использование рассчитанного окуляра [8].

Дисторсия. Во многих визуальных инструментах исправление дисторсии обычно затруднительно: величина ее пропорциональна третьей степени углового поля зрения. Апертурная диафрагма обычно не имеет значительного выноса по отношению к объективу, который работает с небольшим углом

поля зрення, поэтому дисторсия объектива незначительна. Отметим также, что при проектировании афокальной системы углы главных лучей в пространстве предметов и изображений пропорциональны. Такие аналогии выполняются при внешнем расположении выходного зрачка по отношению к окуляру, к примеру, лазерные сканирующие линзы или линзы « f -тета» [9]. Если единственной аберрацией является дисторсия, визуально имеем резкое, хотя и искаженное изображение, форма которого не зависит от положения глаза в выходном зрачке. Когда присутствуют другие аберрации (сферическая аберрация, кома и т. д.), изображение будет размытым, и его форма будет зависеть от координат положения глаза в зрачке [10].

Методика компьютерной оценки качества изображения

Анализ (оценка) качества изображения – один из этапов компьютерного моделирования ОС, проводимого с использованием пакетов прикладных программ (ППП) для проектирования оптики, лидирующее положение среди которых занимают пакеты Orpal [11], Zemax, OSLO, Code V [12]. Программные комплексы, обладая большими функциональными возможностями по анализу качества изображения, имеют ограничения, которые варьируются в зависимости от их версии. В случае афокальных систем необходимо проверять, какой ППП будет использоваться для этой цели и как оценить качество изображения в зависимости от доступных для пользователя ресурсов.

Выбор способов и разработка методики оценки качества изображения афокальных систем при компьютерном моделировании в настоящей работе проведены на основе анализа аберрационных параметров трехзеркальных анастигматических систем, создающих изображение в бесконечности.

Предложены три способа оценки:

- анализ результатов аберрационного расчета (аберрации, размер пятна рассеяния, частотно-контрастная характеристика и т. д.) в угловой мере;
- применение дополнительной фокусирующей системы для анализа результатов в линейной мере;
- оценка качества изображения всей системы через аберрации отдельных модулей.

На рис. 2 дана схема трехзеркальной афокальной системы, где первое и второе зеркало представляют собой объектив, а третье – окуляр (параболическое зеркало) [13]. Объектив построен на основе классической системы Грегори: главное – параболическое зеркало; второе зеркало имеет асферическую поверхность в виде вогнутого эллипсоида.

После выполнения габаритного расчета переходим к анализу аберрационных характеристик и

оценке качества изображения, осуществляемого на этапе компьютерного моделирования.

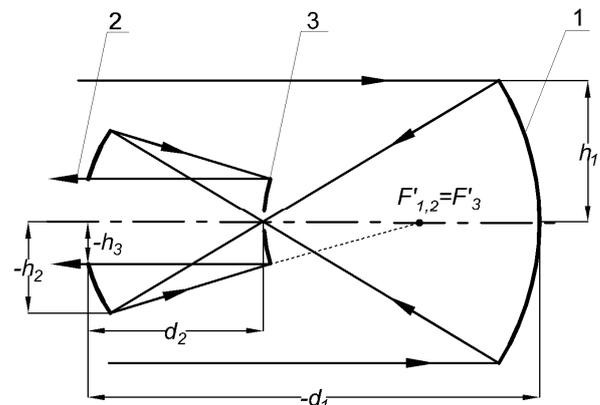


Рис. 2. Схема трехзеркальной афокальной системы

В ППП Orpal возможно анализировать результаты расчета аберраций *в угловой мере*, при установлении, что изучаемая ОС является телескопической. Отметим, что результаты аберрационного расчета для афокальных систем в угловой мере также возможно получать в новых версиях ППП Zemax и Code V.

В старых версиях вышеуказанных ППП можно проводить анализ результатов аберрационного расчета только в линейных величинах, и нет возможности установления типа (афокальности) оптической системы. В этом случае предлагается использовать *дополнительную фокусирующую систему* с идеальным изображением осевой точки, которая преобразовывает афокальную систему в фокальную ОС для оценки качества изображения системы в линейных единицах.

Одним из вариантов вспомогательной системы является параксиальная поверхность – элемент «Paraxial», устанавливаемый на выходе (в пространстве изображений) афокальной системы (рис. 3). Преимущество параксиальной поверхности в том, что она не имеет аберраций. Следовательно, все числовые величины аберрационного расчета будут описывать аберрации рассматриваемой афокальной системы.

Другим элементом дополнительной фокусирующей системы, которым можно воспользоваться вследствие идеального изображения осевой точки, является параболическое зеркало, преобразовывающее исследуемую систему в фокальную для оценки результатов осевого пучка (рис. 4).

При оценке качества изображения *третьим способом* (через аберрации отдельных модулей – компонентов) следует иметь в виду, что аберрационный расчет отдельных элементов выполняется самостоятельно. При этом возникают две задачи:

- по суммированию аберраций отдельных оптических узлов;
- по оценке качества изображения всей системы за окуляром.

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000000
1	Standard		Infinity	800.000000		250.000000
STO*	Standard		-1000.000000	-750.000000	MIRROR	250.000000
3*	Standard		333.333333	250.000000	MIRROR	121.212081
4	Standard		500.000000	-800.000000	MIRROR	62.498703
5	Paraxial			-100.000000		62.490297
IMA	Standard		Infinity	-		1.045690E-003

Рис. 3. Использование параксиальной поверхности для получения результатов в линейной мере при компьютерном моделировании в ППП Zemax

Для анализа *поперечных aberrаций* рассматриваемой афокальной системы третьим способом составим следующий алгоритм:

– расчет поперечных aberrаций объектива

$$\Delta g'_{об} = \Delta y'_1 \beta + \Delta y'_2,$$

где $\Delta y'_1, \Delta y'_2$ – поперечные aberrации первого и второго компонентов, составляющих объектив.

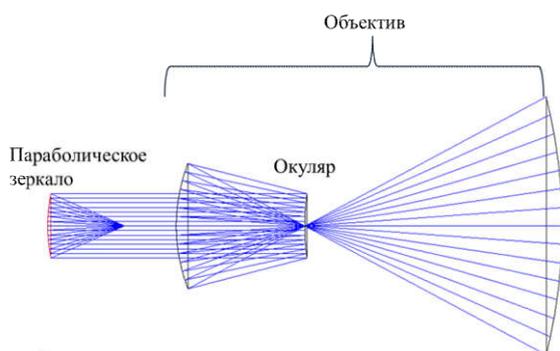


Рис. 4. Использование параболического зеркала – дополнительной фокусирующей системы в ППП Zemax

Примечание: для ОС, обладающих небольшой светосилой и малыми угловыми полями, aberrации отдельных компонентов можно переносить в сопряженные плоскости изображений других компонентов по правилу сложения aberrаций 3-го порядка: поперечные aberrации умножаются на линейное увеличение β , тех компонентов, через которые «переносятся» aberrации; продольные – на β^2 .

– расчет поперечных aberrаций окуляра (поперечная aberrация окуляра $\Delta \bar{g}'_{ок}$ вычисляется в обратном ходе лучей для линейного изображения);

– расчет поперечной суммарной aberrации $\Sigma = \Delta g'_{об} - \Delta \bar{g}'_{ок}$ в передней фокальной плоскости окуляра [14].

$\Delta g'_{об}$ – является поперечной aberrацией объектива (или предшествующей окуляру части системы).

– вычисление суммарных поперечных aberrаций после окуляра (угловых aberrаций (мин.)):

$$\Delta \omega' = \frac{(\Delta g'_{об} - \Delta \bar{g}'_{ок})}{f'_{ок}} 3438.$$

Таким образом рассчитывается суммарная сферическая поперечная aberrация за окуляром в угловой мере.

Вычисление aberrаций отдельных компонентов осуществлено в компьютерных программах; при этом исследуемые системы разделены на отдельные узлы с последующим компьютерным моделированием по частям. Выполнено суммирование и перевод результатов в угловые единицы измерения. Преимуществом третьего способа является его доступность: легко просматривается полное поведение исследуемой афокальной системы с целью необходимой корректировки конструктивных параметров отдельных оптических элементов, входящих в ОС.

Аналогичный алгоритм может быть составлен для вычисления продольных aberrаций; в этом случае результаты расчета суммарных aberrаций за окуляром получаем в диоптрийной мере:

– расчет продольных aberrаций объектива:

$$\Delta S'_{об} = \Delta S'_1 \beta^2 + \Delta S'_2;$$

– расчет продольных aberrаций окуляра в обратном ходе $\Delta \bar{S}'_{ок}$;

– расчет суммарных продольных aberrаций за окуляром:

$$L = \frac{(\Delta S'_{об} + \Delta \bar{S}'_{ок}) 1000}{-f'_{ок}{}^2}.$$

Результаты компьютерного моделирования

Использование предложенных способов было проверено на примере компьютерного моделирования трехзеркальной афокальной системы (рис. 2), рассчитанной для следующих оптических характеристик: углового поля зрения $2\omega = 1^\circ$, диаметра входного зрачка $D = 500$ мм, относительного отверстия объектива Грегори $D:f_{1,2} = 1:2$ и видимого увеличения $\Gamma = -4^x$. Анализ качества изображения проводился в программах Oral и Zemax по каждому из трех методов.

На рис. 5 показаны результаты aberrационного расчета в угловой мере для данной трехзеркальной системы.

кальной системы при компьютерном моделировании в ППП Oral.

Аберрации по главному лучу: относительная дисторсия не превышает величины $\Delta' = 0.04\%$; величина астигматической разности $Z_m - Z_s = 2'40''$. В таблице 1 дана поперечная угловая аберрация $\Delta\omega'$.

На рис. 6 показаны результаты компьютерного моделирования в ППП Zemax с использованием *параксиальной поверхности*: графики поперечных аберраций, диаграммы пятна рассеяния и графики ЧКХ (оценка результатов дана в линейной мере), поскольку в доступной версии нет возможности определения афокальности системы.

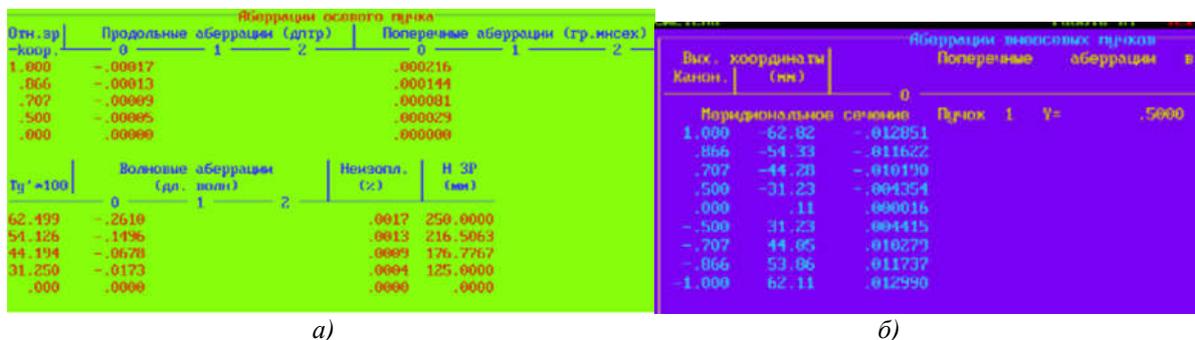


Рис. 5. Результаты компьютерного моделирования в ППП Oral в угловой мере: а) аберрации осевого пучка; б) аберрации внеосевого пучка

Таблица 1. Аберрационные характеристики для точки вне оси (компьютерные расчеты ППП Oral)

Меридиональное сечение: $2\omega = 1^\circ$									
Координаты на выходном зрачке	1.000	0.866	0.707	0.500	0.000	-0.500	-0.707	-0.866	-1.000
$\Delta\omega'$ 1 способ	1' 28"	-1' 16"	-1' 01"	-0' 43"	-0' 00"	0' 44"	1' 02"	1' 17"	1' 29"
Координаты на выходном зрачке	-1.000	-0.850	-0.700	-0.500	0.000	0.500	0.700	0.850	-1.000
$\Delta\omega'$ 3 способ	-0' 6"	-0' 4"	-0' 2"	-0' 1"	0' 00"	0' 0"	0' 0"	0' 0"	0' 0"

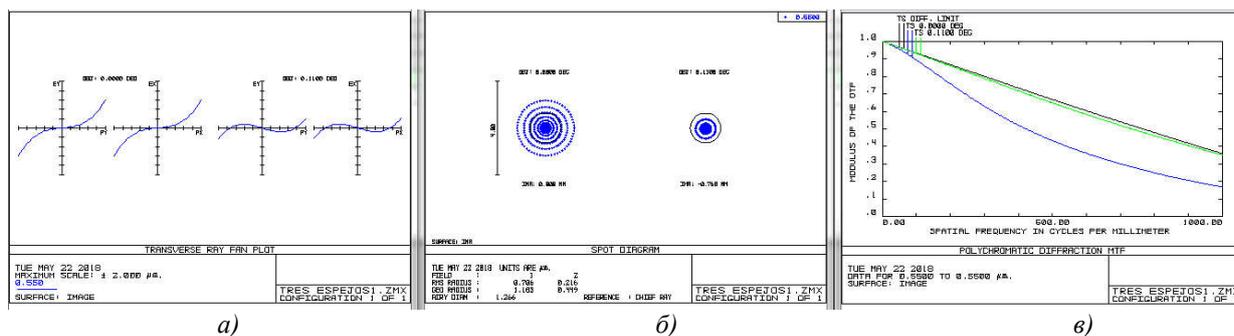


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования в ППП Zemax с использованием поверхности «Paraxial»: а) графики поперечных аберраций; б) диаграммы пятна рассеяния; в) графики ЧКХ

На рис. 7 показаны результаты аберрационного расчета в ППП Zemax с использованием *параболического зеркала*.

В табл. 1 даны результаты расчета суммарных поперечных аберраций для внеосевого пучка $2\omega = 1^\circ$ в меридиональной плоскости *третьим способом*.

Анализ всех результатов показал, что исследуемая система обладает хорошей коррекцией аберраций, обладает допустимыми значениями критериев качества изображения.

Выводы

1. Проведен анализ трех различных способов оценки качества изображения афокальных систем на этапе компьютерного моделирования.
2. Установлены критерии функциональных возможностей пакетов прикладных программ в отношении анализа аберраций афокальных систем.
3. В ППП Oral и новых версиях программных сред Zemax и Code V результаты расчета поперечных аберраций при моделировании афокальных

систем оценивают в угловой мере; старые версии ППП Zemax и Code V, показывают результаты расчета в линейной мере, что требует применения

определенных критериев, таких, как форма кружка рассеяния, анализ волнового фронта.

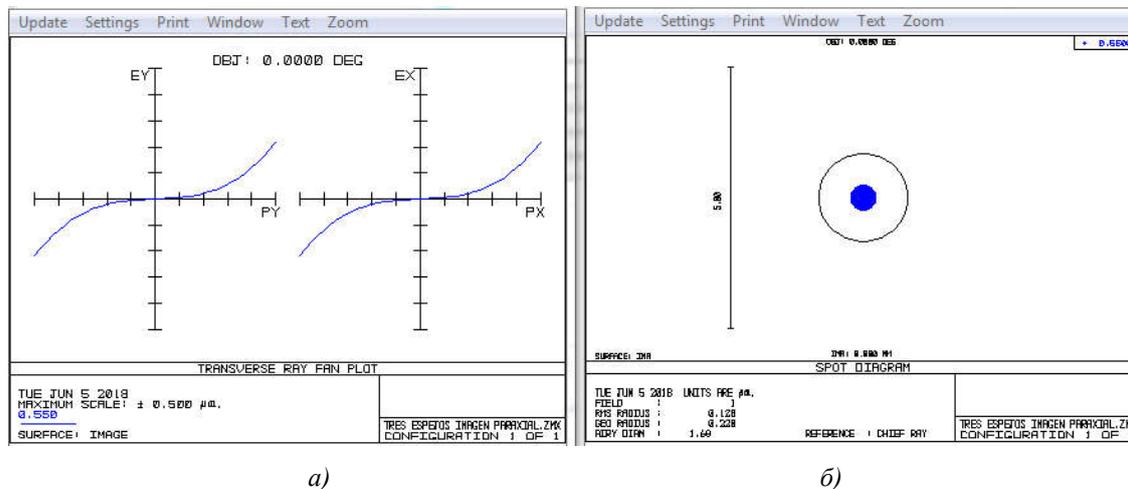


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования в ППП Zemax с использованием параболического зеркала: а) графики поперечных aberrаций; б) диаграмма пятна рассеяния

4. В тех программных средах, где нет возможности установления типа (афокальности ОС), предложено применять дополнительную фокусирующую систему типа парааксиальной поверхности – элемента «Paraaxial» или параболического зеркала, имеющих идеальное изображение осевой точки, с целью оценки и анализа результатов расчета в линейной мере.

5. Даны результаты практического применения способов на примере трехзеркальной телескопической системы, имеющей анастигматическую коррекцию aberrаций.

Литература

- [1] J. Hutson, "Afocal optical concentrator", United States Patent 9,127,822 USA, GO2B 19/0019, 2015.
- [2] Г. Н. Репинский, "Новые панкратические наблюдательные системы", *Оптический журнал*, №8, с. 69-76, 1994.
- [3] Н. К. Артюхина, Шуаиб Хасан Альмахмуд, Лаура Пероса, А. П. Шкадаревич, "Разработка критериев компьютерной оценки aberrаций систем оптических прицелов" на XVII Міжнарод. наук.-техн. конф. "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи", Київ, 2018, с. 42.
- [4] Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов, "Оценки качества для анализа цифровых изображений", *Штучний інтелект*, № 4, с. 376-386, 2008.
- [5] М. Н. Сокольский, *Допуски на качество оптического изображения*. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1989.
- [6] H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger, *Handbook of Optical Systems, Volume 3: Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. WILEY-VCH, 2007.
- [7] A. Nagler, "Wide angle eyepiece", United States Patent 4,525,035 USA, GO2B 25/04, 5/6.1984.
- [8] Michael D. Missig, G. Michael Morris. "Diffractive optics applied to eyepiece design", *Appl. Opt.*, Vol. 34, No. 14, P. 2452, 1995.
- [9] M. J. Kidger, *Fundamental Optical Design*. Spie press book, 2001.
- [10] P. J. Sands, "Visual Aberrations of Afocal Systems", *Optica Acta: International Journal of Optics*, Vol. 18, No 8, p. 627, 2010.
- [11] Н. К. Артюхина, В. А. Марчик, *Компьютерное проектирование оптических систем. В 2-х ч. Ч 1. Анализ центрированных оптических систем. Учебно-методическое пособие для студентов*. Минск, Республика Беларусь: Мин. обр. РБ. БНТУ, 2007.
- [12] Keith B. Doyle. Optical modeling of finite element surface displacements using commercial software // Keith B. Doyle. *Optical Modeling and Performance Predictions II. Optics and Photonics*. San Diego, California, United States. 24 August 2005/Proc. SPIE 5867.
- [13] Н. К. Артюхина, Лаура Пероса, "Афокальная анастигматическая система из трех зеркал" на 10-й МНТК «Приборостроение 2017», БНТУ, с. 409-411.
- [14] М. Я. Кругер и др., *Справочник конструктора оптико-механических приборов*. Ленинград, СССР: Машиностроение, 1968.

¹⁾Н. К. Артюхина, ^{1,2)}Лаура Пероса, ¹⁾Р. В. Федорцев, ^{1,3)}Шуаиб Хасан Альмахмуд

¹⁾Білоруський національний технічний університет, Мінськ, Республіка Білорусь

²⁾Yacambu University, Barquisimeto, Venezuela

³⁾Аль-Баат університет, Сирія

ОСОБЛИВОСТІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК АБЕРАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛЕСКОПІЧНИХ СИСТЕМ

Представлено результати дослідження особливостей комп'ютерного моделювання і розрахунку абераційних характеристик афокальних оптичних систем порівняно з іншими системами, що мають зображення на кінцевій відстані від неї, з метою встановлення класифікаційного підходу до вибору різних способів оцінки якості зображення. Виділено абераційні особливості, притаманні афокальним системам при застосуванні їх у якості візуального інструменту. Встановлено критерії функціональних можливостей пакетів прикладних програм (ППП) щодо аналізу аберацій афокальних систем. Розроблено оригінальні методики і три способи оцінки якості зображення при комп'ютерному моделюванні залежно від типу і версії доступних PPP оптики. Встановлено, що у PPP Opal і нових версіях PPP Zemax і Code V при моделюванні афокальних систем зручно оцінювати результати кутовою мірою. Виявлено, що у тих програмних середовищах, де немає можливості визначення афокальності оптичної системи, необхідно застосовувати додаткову фокусуєчу систему, для аналізу результатів розрахунку у лінійній мірі, або застосовувати такі критерії, як форма кола розсіяння, аналіз хвильового фронту. За необхідності перегляду повної поведінки досліджуваної афокальної системи, з метою необхідного корегування конструктивних параметрів окремих оптичних елементів, що входять до оптичної системи, необхідно застосувати метод обчислення аберацій окремих компонентів. У випадках, коли оптичні системи мають якість зображення, близьку до дифракційної, виявляється більш зручним застосування хвильового опису. Проведено комп'ютерне моделювання у PPP Zemax і Opal трьохдзеркальної телескопічної системи і досліджено практичне застосування запропонованих способів. Використання запропонованих способів перевірено на прикладі комп'ютерного моделювання трьохдзеркальної афокальної системи, розрахованої для наступних оптичних характеристик: кутового поля зору $2\omega=1^\circ$, діаметру вхідної зіниці $D=500$ мм і видимого збільшення $\Gamma = -4^x$, якій притаманне стабільне корегування аберацій за полем. Встановлено, що результати комп'ютерного моделювання відповідають застосованим методам і узгоджуються між собою.

Ключові слова: розрахунок оптичних систем, коригування аберацій, оптимізація, сферична аберація, кома, астигматизм, відомості про основні параметри системи, якість зображення.

¹⁾N. K. Artioukhina, ^{1,2)}Laura Peroza, ¹⁾Fedortsev R. V., ^{1,3)}Shoab Hasan AL Mahmoud

¹⁾Belarussian National Technical University, Minsk, Republic Belarus

²⁾Yacambu University, Barquisimeto, Venezuela

³⁾Al-Baat University, Syria

FEATURES OF COMPUTER MODELING AND CALCULATION OF TELESCOPIC SYSTEM ABERRATIONS

The study results of the features of computer modeling and aberrations analysis of afocal systems in comparison with other systems, where the image is located at a finite distance from the optical system are presented, in order to establish a classification approach to the selection of various image quality evaluation methods. The aberration characteristics inherent to afocal systems have been highlighted when they are used as a visual instrument. The criteria for the functionality of application software packages for the aberrations analysis in afocal systems are established. Original methods for estimating image quality in computer modeling are proposed, depending on the type and version of the available software packages for designing optics. It was found that in the software opal and the new versions of the Zemax and Code V is convenient to estimate the results in an angular measure for afocal systems. It was found that those software environments where there is no possibility of establishing the afocality of the optical system, proposed to apply an additional focusing system, to analyze the results of calculation in a linear measure, or to resort to the application of certain criteria, such as the shape of the spot diagram, wave front analysis. It was established, that if required to review the complete behavior of the afocal system, is necessary the correction of the design parameters of the individual optical elements entering the OS, for this purpose, a method of calculating the aberrations of the individual components should be performed. In cases where the aberrations of the optical system are small, it is more convenient to carry out a descriptive analysis of the wave aberrations. The use of the proposed methods was verified by the example of computer simulation of an afocal three-mirror system, calculated for the following optical characteristics: angular field of view $2\omega = 1^\circ$, entrance pupil diameter $D = 500$ mm and magnification $\Gamma = -4x$, which has a stable correction of field aberrations: It was established, that the results of the computerized modeling are in accordance with the methods used, and the methods are consistent with each other.

Keywords: optical calculation, optical schemes, correction of aberrations, optimization, spherical aberration, coma, astigmatism, summary of main system parameters, image quality.

Надійшла до редакції
04 липня 2018 року

Рецензовано
18 липня 2018 року