

ДИСТОРСИЯ В F-ТНЕТА ОБЪЕКТИВАХ

Андрей Игоревич Боднарчук

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, магистрант кафедры фотоники и приборостроения, тел. (999)462-56-16, e-mail: bodnarchuk98@mail.ru

Татьяна Николаевна Хацевич

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плахотного, 10, кандидат технических наук, профессор кафедры фотоники и приборостроения, тел. (383)343-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

Рассмотрены особенности F-Theta объективов, значения характеристик наиболее распространенных моделей. Выявлены условия достижения F-Theta закона и телецентрического хода главных лучей в оптической схеме объектива. Приводится формула для дисторсии, требуемой для обеспечения линейного закона, в зависимости от угла наклонного пучка лучей относительно оптической оси. Сформулированы критерии допустимой погрешности отступления от очного соблюдения линейного закона. Обоснована актуальность разработки новых оптических систем F-Theta объективов.

Ключевые слова: F-Theta объективы, дисторсия, ортоскопический объектив, телецентрический ход луча, оптические системы, фокусное расстояние, угловое поле

F-THETA LENS DISTORTION

Andrey I. Bodnarchuk

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Graduate, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (999)462-56-16, e-mail: bodnarchuk98@mail.ru

Tatiana N. Khatsevich

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Professor, Department of Photonics and Device Engineering, phone: (383)344-29-29, e-mail: khatsevich@rambler.ru

The features of F-Theta lenses, the values of the characteristics of the most common models are considered. The conditions for achieving the F-Theta law and the telecentric run of the main rays in the optical scheme of the lens are identified. A formula for the distortion required to provide a linear law, depending on the angle of the inclined beam of rays relative to the optical axis is given. The criteria for the permissible error of deviation from the exact compliance with the linear law are formulated. The relevance of the development of new optical systems for F-Theta lenses is justified.

Keywords: F-Theta lens, distortion, orthoscopic lens, telecentric ray trace, optical systems, focal length, angular field

Введение

Объективы с линейным законом построения изображения, появившиеся более полувека назад в связи с широким распространением сканирующих устройств, получили в дальнейшем название F- θ (F-Theta) объективов. В названии объектива подчеркивается, что между углом наклона параллельного пучка лучей в пространстве предметов относительно оптической оси объектива и координатой сфокусированного объективом пятна в фокальной плоскости имеет место линейная зависимость в отличие от безаберрационного объектива, рассматриваемого в параксиальных моделях идеальной оптики, или ортоскопического объектива с устраненной дисторсией.

Первые оптические системы F-Theta объективов были разработаны в нашей стране в 80-х годах прошлого века [например, 1 – 3]. В настоящее время отечественные F-Theta объективы серийно не выпускаются, потребности в них покрываются в основном импортными поставками [4]. Разработчики и производители оборудования для лазерной обработки либо используют импортную элементную базу оптики, либо организуют собственное оптическое производство [5].

Данное исследование посвящено расширению отечественной элементной базы оптических систем за счет разработки новых оптических систем F-Theta объективов, а именно начальному этапу разработки – обоснованию требований и условий достижения F-Theta закона построения изображения.

Особенности F-Theta объективов

В настоящее время сфера применения F-Theta объективов – научное приборостроение, технологическое оборудование для лазерной обработки деталей и материалов, гравировки, маркировки, сканирования, резки, скрайбирования и др.

F-Theta объектив работает с лазерным излучением и со сканирующим устройством. В качестве последнего выступает одно- или двухкоординатный оптико-механический сканер, обеспечивающий управляемый поворот сканирующих зеркал с высокой скоростью вокруг одной или двух взаимно перпендикулярных осей. Размеры сканирующих зеркал в различных моделях оптико-механических сканеров составляют от 3 до 25 мм и более. Именно размеры зеркал имеющихся на рынке оптико-механических сканеров определяют закладываемый при разработке диаметр входного зрачка F-Theta объектива.

Необходимость согласования совместной работы объектива и оптико-механического сканера требует осуществлять разработку оптической системы объектива при вынесенном входном зрачке. Наиболее предпочтительным является обеспечение телецентрического хода главных лучей после объектива. Однако в объективах, предназначенных для больших размеров рабочих полей, отступление от телецентричности позволяет сократить диаметры линз объектива.

Требования к угловому полю F-Theta объектива должны быть согласованы с диапазоном углов поворота сканирующих зеркал оптико-механического сканера. Судя по анализу характеристик импортных объективов, угловые поля находятся в диапазоне от 10 до 64°.

Рабочее поле сканирования определяется как углами качания зеркал оптико-механического сканера, так и фокусным расстоянием объектива. Типовые рабочие поля составляют от 50 x 50 до 300 x 300 мм. Значения фокусных расстояний большинства объективов находятся в диапазоне от 90 до 420 мм.

Диапазон длин волн используемого при работе лазера определяет спектральный диапазон, для которого в оптической системе объектива должны быть минимизированы aberrации и обеспечен высокий коэффициент пропускания лазерного излучения. Наиболее востребованными, для технологического оборудования по лазерной обработке материалов, являются лазеры с основной длиной волны 1,064 мкм, а также лазеры с основной длиной волны 0,532 мкм и 0,355 мкм.

Степень устранения aberrаций в оптических системах F-Theta объективов должна быть такой, чтобы их можно было считать дифракционно ограниченными. Иными словами основным фактором, определяющим размер пятна фокусировки лазерного излучения в любой точке рабочего поля, должна выступать дифракция, а влияние aberrаций должно быть минимизировано.

Условия применения F-Theta объективов чаще всего требуют, чтобы они обеспечивали одинаковые условия облученности всех точек рабочего поля. Отсюда вытекает два требования: постоянство скорости перемещения сканирующего пятна по рабочему полю и одинаковый угол падения пучков лучей на последнее.

Условие обеспечения линейного закона и телецентрического хода главных лучей в F-Theta объективе

Используя законы геометрической оптики, рассмотрен ход главного луча в ортоскопическом (идеальном) и F-Theta объективах. На рис. 1 условно, для сравнения, наложены действия указанных объективов с одинаковыми фокусными расстояниями: I – ортоскопический (идеальный) объектив; II – F-Theta объектив. Предполагается, что фокусные расстояния объективов равны, точки F и F' – передний и задний фокусы объективов.

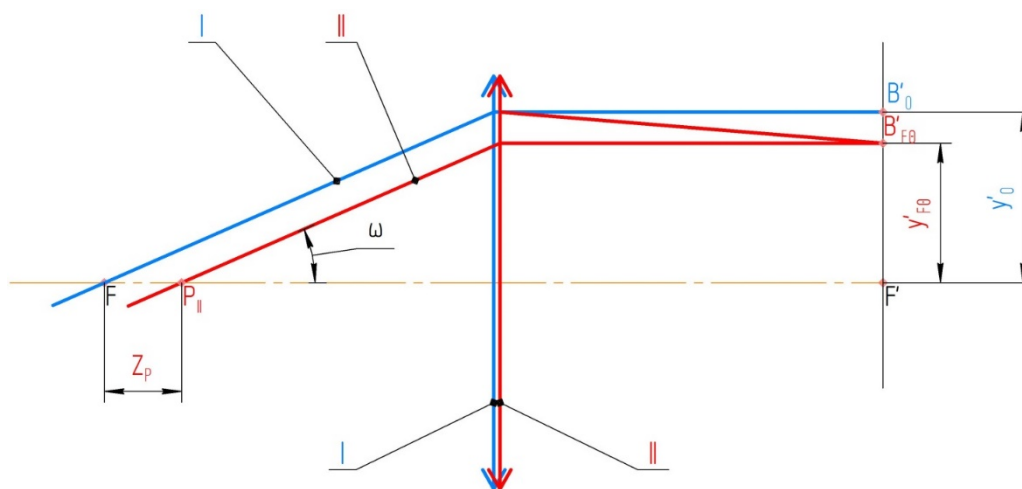


Рис. 1. Сравнение хода главных лучей в ортоскопическом и F-Theta объективах

На объективы падают параллельные пучки лучей, угол наклона которых относительно оптической оси меняется, например, с помощью качания плоского зеркала (сканера), ось качания которого перпендикулярна плоскости рисунка. При этом ось качания сканера для объектива I проходит через точку F, а ось качания сканера для объектива II – через точку P_{II} . Угол параллельного пучка лучей относительно оптической оси обозначен через ω (в соответствии с обозначениями углов [6], в отличие от обозначения Θ , используемого в зарубежной литературе). Для простоты схемы сканер на рис. 1 не показан, а из параллельных лучей пучков показаны только их главные лучи, причем синим цветом для объектива I и красным цветом – для объектива II.

Зависимость между координатой y' сфокусированного пятна в задней фокальной плоскости и углом ω

$$\text{для объектива I:} \quad y'_0 = f' \operatorname{tg} \omega, \quad (1)$$

$$\text{для объектива II:} \quad y'_{F\Theta} = f' \omega. \quad (2)$$

На основании законов геометрической оптики установлено, что для обеспечения зависимости (2) оптическая система объектива II должна иметь отрицательную относительную дисторсию $\Delta_{F\Theta}$, значения которой нелинейно зависят от угла ω :

$$\Delta_{F\Theta} = \frac{y'_{F\Theta} - y'_0}{y'_0} = \frac{f' \omega - f' \operatorname{tg} \omega}{f' \operatorname{tg} \omega} = \frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega} - 1. \quad (3)$$

Телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений за объективом I обеспечивается тем, что ось качания сканирующего зеркала (центр входного зрачка объектива) проходит через передний фокус объектива. Положение центра входного зрачка для объектива II, требуемое для обеспечения хода главного луча параллельно оптической оси за объективом, отличается от традиционного и находится ближе к объективу – в точке P_{II} . Отрезок z_p , определяющий положение оси качания сканера при использовании объектива II, зависит от угла ω и может быть рассчитан по формуле:

$$z_p = f' \Delta_{F\Theta}. \quad (4)$$

Таким образом, строгое обеспечение телецентрического хода главных лучей в объективе II в рабочем диапазоне углов сканирования $\pm \omega$ достигается при переменном положении входного зрачка между точками F и P_{II} . Иными словами, при фиксированном положении оси качания сканера в F-Theta объективе принципиально не достигается телецентрический ход главных лучей для всех точек

изображения, а отступление от такого хода (нетелецентричность) может быть минимизировано выбором положения оси сканера между точками F и P_{II} с учетом формулы (4).

Скорость перемещения сканирующего пятна вдоль направления сканирования определится

для объектива I:
$$v_0 = \frac{f'}{\cos^2 \omega} \frac{d\omega}{dt}, \quad (5)$$

для объектива II:
$$v_{F\Theta} = f' \frac{d\omega}{dt}, \quad (6)$$

и при постоянной угловой скорости $\frac{d\omega}{dt}$ поворота сканера в объективе I будет уменьшаться по мере увеличения угла ω , в объективе II будет сохраняться постоянной по всей площади сканирования.

Результаты и обсуждения

Вывод о скорости перемещения сканирующего пятна, сделанный на основании формул (5), (6), подтверждает принципиальную необходимость использования F-Theta объективов в сканирующих устройствах: одинаковое действие энергии сканирующего пятна во всех точках на поверхности сканирования. В то время как применение ортоскопического объектива в соответствии с формулами (1), (2) приводит к снижению скорости перемещения сканирующего пятна в 1,33 раза для угла ω , равного 30° , и в 2 раза для 45° .

Формула (3) позволяет определить требуемые значения относительной дисторсии для обеспечения линейной (F-Theta) связи между углом ω и координатой y' (2). Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение дисторсии, требуемое для получения F-Theta зависимости

Величина	Значение								
ω , градус	5	10	15	20	25	30	35	40	45
$-\Delta_{F\Theta}$, %	0,25	1,02	2,30	4,09	6,43	9,31	12,76	16,80	21,46

Обращает внимание характер зависимости относительной дисторсии, представленной в табл. 1: близкий к квадратичному относительно угла, а не тангенса угла.

Согласно теории aberrаций третьих порядков, дисторсия объектива, работающего с параллельными пучками лучей, пропорциональна квадрату тангенса

угла наклона [7] и для создания F-Theta объектива потребуется соблюдение нижеприведенного равенства:

$$\frac{S_v}{2} \operatorname{tg}^2 \omega = \frac{\omega}{\operatorname{tg} \omega} - 1, \quad (7)$$

где S_v – пятая сумма Зейделя.

Из (7) можно определить

$$S_v = \frac{2(\omega - \operatorname{tg} \omega)}{\operatorname{tg}^3 \omega}. \quad (8)$$

С другой стороны, рассматривая F-Theta объектив в виде тонкого компонента, при выносе зрачка, примерно равным фокусному расстоянию, можно записать выражение для S_v , через основные параметры P и W Слюсарева следующим образом:

$$S_v = 3W - P - \pi - 3, \quad (9)$$

при этом значение параметра π равняется в среднем 0,62 для различных марок стекол [7].

Приравнявая (8) и (9), можно определить требуемые соотношения между P и W в зависимости от угла ω . В силу малого относительного отверстия F-Theta объектива условием получения малого пятна сканирования на оси объектива будет равенство нулю параметра P . При этом для углов ω от нуля до 45° значения параметра W находятся в диапазоне от минус 0,98 до минус 1,06 и слабо зависят от угла сканирования. При отрицательном значении W в объективе будет присутствовать кома третьего порядка. Для устранения последней и получения малых пятен сканирования по всей площади сканирования конструктивное исполнение компонентов объектива должно быть таким, чтобы обеспечивать компенсацию комы третьего порядка комой высших порядков.

С позиции обоснования требований к точности соблюдения обсуждаемой линейной зависимости был проведен анализ найденных в открытых источниках оптических систем F-Theta объективов. Анализировались сайты таких производителей как «Thorlabs», «SintecOptronics» и «SillOptics» и др. Учитывая свои коммерческие интересы, производители предоставляют информацию по оптическим системам объективов в ограниченном объеме. Так, фирма «Thorlabs» [8] предоставляет файл в формате *zar* (в виде «черного ящика»), который скрывает конструктивное исполнение и ход лучей внутри объектива, но позволяет оценивать качество изображения, в том числе отступление от F-Theta закона. В ряде патентов [например, 9, 10] отсутствует информация о диаметрах входного зрачка, что затрудняет проведение оценки качества пятна фокусировки, но позволяет оце-

нить отступление от F-Theta закона. Результаты анализа восьми оптических схем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Отклонение от F-Theta закона в оптических системах объективов

Источник информации	Длина волны, мкм	Фокусное расстояние, мм	2ω , градус	Относительная дисторсия по формуле (3), %	Относительная дисторсия в рассматриваем объективе, %	Отклонение от F-Theta закона, %
[8]	1,06	254	50	-6,43	-6,41	0,05
	1,06	160	28	-2,00	-1,39	0,63
	1,06	160	46	-5,43	-3,84	1,68
	1,06	100	32	-2,61	-2,60	0,02
[9]	0,35	100	40	-4,09	-6,79	2,81
[10]	1,06	160	40	-4,09	-7,15	3,19
[1, 11]	0,63	254	10	-0,25	-0,37	0,12
[1]	0,63	131	36	-3,31	-3,36	0,18
[2]	0,44	92	20	-1,02	-1,11	0,09

Из приведенных данных следует, что наименьшая погрешность составляет 0,02 %, наибольшая – примерно 3,2 %, среднее значение – 1 %.

На основании анализа выбран критерий для дальнейших разработок: отклонение менее 0,2 % можно считать отличным уровнем соблюдения линейной зависимости; отклонение от 0,2 до 4 % можно считать приемлемым уровнем соблюдения линейной зависимости; отклонение более 4 % не позволяет отнести объектив к F-Theta объективам.

Заключение

В заключение формулируются основные выводы:

- разработка новых оптических систем объективов с линейным законом построения изображения – F-Theta объективов – соответствует тенденции импортозамещения, проводимой отечественными предприятиями оптического и оптико-электронного приборостроения;

- выявлены условия достижения F-Theta закона и телецентрического хода главных лучей в оптической схеме объектива;

- выбраны критерии допустимой погрешности отступления от точного соблюдения F-Theta закона, позволяющие классифицировать разработанный объектив как F-Theta объектив;

- основные направления дальнейших исследований авторов ориентированы на разработку оптических систем серии F-Theta объективов для различных длин волн лазерного излучения, углов сканирования, размеров сканируемой поверхности, отвечающих условию дифракционного ограниченных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 1089534А СССР. МПК G02В 13/22; Линзовый монохроматический объектив с вынесенным входным зрачком [Текст] / В. В. Хваловский, Т. Н. Хацевич; Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени институт точной механики и оптики – 3540284/18-10; заявл. 11.01.1983; опубл. 30.04.1984 – 4 с. : ил.
2. Пат. 1097084А СССР. МПК G02В 11/22; Оптико-механическое устройство для плоскостной развертки и объектив [Текст] / В. В. Хваловский, Т. Н. Хацевич, В. Е. Иосифов; Ленинградский ордена Трудового Красного Знамени институт точной механики и оптики – 3478623/18-10; заявл. 29.07.1982; опубл. 08.02.1984 – 5 с. : ил.
3. Хацевич Т. Н. Оптические системы с линейным законом построения изображения для устройств записи информации [Текст] / Т. Н. Хацевич // Автометрия. – Новосибирск, 1983. – 112 с.
4. Сканирующие объективы F-Theta [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://azimp.ru/thorlabs/f-theta-scan-lenses/> – Загл. с экрана
5. Лазерный центр [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.newlaser.ru/> – Загл. с экрана.
6. ГОСТ 7427-76* . Геометрическая оптика. Термины, определения и буквенные обозначения. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 17 с
7. Дубовик А. С. Прикладная оптика [Текст] / А. С. Дубовик, М. И. Апенко, Г. В. Дурейко и др.: учеб. пособие. Для вузов – М. : Недра, 1982. – 612 с.
8. F-Theta Scan Lenses [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=6430/ – Загл. с экрана.
9. Пат. 0023220U1 Германия. МПК G02В 11/30, G02В 13/00, G02В 26/10; FThetaObjectiv [Текст] / Waldauf, Alexander; заявитель и патентообладатель JENOPTIK OpticalSystemsGmbH, Jena, DE – 26/184,369; заявл. 16.07.2013; опубл. 15.05.2014 – 6 с. : ил.
10. Пат. 8879171В2 США. МПК G02В 9/62, G02В 9/00, G02В 13/00, G02В 27/00; Color-corrected F-Thetaobjectiveforlasermaterialprocessing [Текст] / JoergWunderlich, UllrichKrueger; заявитель и патентообладатель JENOPTIK Optical Systems GmbH, Jena, DE – 13/848,233; заявл. 21.03.2013; опубл. 04.11.2014 – 4 с. :ил.
11. Верхотуров О. П. Введение в вычислительную оптику: учеб. пособие для вузов – Новосибирск : СГГА, 1998. – 272 с.

© А. И. Боднарчук, Т. Н. Хацевич, 2021