

УДК 535.317.6

## ТЕЛЕЦЕНТРИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТИВЫ F-ТНЕТА ДЛЯ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

© Т. Н. Хацевич, А. И. Боднарчук

*Сибирский государственный университет геосистем и технологий,  
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханового, 10  
E-mail: khatsevich@rambler.ru*

Предложена геометрическая модель идеального объектива F-Theta. Проведены расчёты траектории перемещения сканирующего пятна по рабочему полю сканирования, приведены результаты исследования некоторых зарубежных и предлагаемых в данной работе объективов в части отступления от линейного закона и от прямолинейности траектории. Представлены результаты расчёта ряда объективов для рабочих полей сканирования размерами от  $35 \times 35$  до  $400 \times 400$  мм.

*Ключевые слова:* объектив F-Theta, телецентрический ход, дисторсия, траектория сканирования, отступление от линейности и прямолинейности.

DOI: 10.15372/AUT20220304

**Введение.** Появление в арсенале оптотехники группы объективов с линейным законом построения изображения связано с широким распространением в течение последнего полувека сканирующих устройств различного назначения для задач научного приборостроения, технологического оборудования для лазерной обработки деталей, материалов, гравировки, маркировки, сканирования, резки, скрайбирования и др. Характерной особенностью этой группы объективов является линейная зависимость между координатой сфокусированного объективом пятна в фокальной плоскости и углом наклона параллельного пучка лучей в пространстве предметов относительно оптической оси объектива. Название объектива F-Theta ( $F-\theta$ ) подчёркивает то обстоятельство, что воздействие такого объектива на падающий пучок лучей даже на уровне параксиального моделирования, а тем более при работе в оптической системе с конечными апертурами и углами, отличается от ортоскопического объектива, лежащего в основе традиционной модели идеальной оптической системы.

Несмотря на то что оптические системы объективов F-Theta были разработаны в нашей стране в 80-х гг. прошлого века, отечественные объективы F-Theta серийно не выпускаются. Разработчики и производители оборудования для лазерной обработки либо используют импортную элементную базу оптики, либо организуют собственное оптическое производство [1, 2].

Поскольку объектив F-Theta работает совместно со сканирующим устройством (сканатором) и лазерным излучением, то моделирование его работы и обоснование требований к разработке конкретной модели объектива F-Theta осуществляются с учётом характеристик современных сканаторов и лазеров (размеров сканирующих зеркал, рабочих углов поворота сканирующих зеркал, длин волн, мощности лазерного излучения), которые определяют диаметр входного зрачка, его наименьшее удаление и угловое поле объектива. Требуемый размер рабочего поля сканирования определяет фокусное расстояние объектива. Условия применения объективов F-Theta чаще всего требуют, чтобы они обеспечивали одинаковый характер облучённости всех точек рабочего поля. Отсюда вытекают требования постоянства скорости перемещения сканирующего пятна по рабочему полю и нормального угла падения пучков лучей на любые точки последнего (телецентрический ход

главных лучей) [2]. Необходимость соблюдения вышеуказанных требований имеет экспериментальное подтверждение [3]. Уровень коррекции аберраций в оптических системах F-Theta обычно позволяет отнести их к дифракционно ограниченным оптическим системам. Поэтому для удовлетворения противоречивых требований по большому рабочему полю, малому пятну сканирования, большой скорости сканирования при ограниченном размере зеркал используются более сложные решения с составными сканаторами [4]. Применение объективов F-Theta совместно с мощными лазерами требует дополнительного учёта тепловых эффектов в оптической системе объектива [5]. Для работы с инфракрасным лазером с длиной волны излучения 10,6 мкм с целью уменьшения влияния температуры все элементы объектива F-Theta изготавливаются из селенида цинка [6].

Цель работы — показать, что в арсенале отечественной оплотехники имеются методологические основы разработки и конкретные варианты расчёта объективов F-Theta, которые при необходимости в короткие сроки могут быть адаптированы (пересчитаны, переработаны, кастомизированы) под конкретные требования потребителей.

**Геометрическая модель идеального объектива F-Theta.** Для рассмотрения действия оптических систем в параксиальном приближении широко используется модель идеальной оптической системы, основанная на наличии у оптического компонента трёх пар кардинальных точек и следующих постулатов: точка в пространстве предметов изображается точкой в пространстве изображений, прямая в пространстве предметов изображается прямой в пространстве изображений. Для проведения расчётов в параксиальном приближении используются формулы Ньютона, Гаусса, произвольных тангенсов и другие хорошо известные формулы геометрической оптики, при этом моделирование и расчёты можно проводить с помощью компьютерных методов проектирования (например, путём использования программы Zemax Optic Studio с параксиальными компонентами). Однако параксиальные модели компонентов F-Theta в программах по расчёту оптических систем отсутствуют. Для создания параксиальной модели объектива F-Theta надо допустить, что в идеальной оптической системе имеет место непостоянство углового увеличения в узловых точках (далее, учитывая, что компонент размещён в воздухе, будем говорить о главных точках), а нелинейный характер углового увеличения  $\gamma_{F-\Theta}$  в главных точках в зависимости от угла наклона луча в меридиональном сечении относительно оптической оси:  $\gamma_{F-\Theta} = \omega / \operatorname{tg} \omega$ . В этом случае зависимость между координатой  $y'_{F-\Theta}$  сфокусированного пятна в задней фокальной плоскости и углом  $\omega$  будет иметь линейный характер:  $y'_{F-\Theta} = f' \omega$  в отличие от тангенциальной зависимости, характерной для идеального ортоскопического объектива:  $y'_0 = f' \operatorname{tg} \omega$ .

Иными словами, в параксиальной модели объектива F-Theta по сравнению с идеальной ортоскопической моделью должна присутствовать отрицательная дисторсия, относительное значение  $\Delta$  которой нелинейно зависит от угла  $\omega$  [2]:

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

В диапазоне углов  $\omega$  от 0 до 45° требуемая относительная дисторсия имеет характер, близкий к квадратичному относительно угла  $\omega$  (табл. 1).

На рис. 1 условно для сравнения наложены действия двух параксиальных моделей объективов с одинаковыми фокусными расстояниями: I — ортоскопический объектив, II — объектив F-Theta. Предполагается, что фокусные расстояния объективов равны, точки  $F$  и  $F'$  — передний и задний фокусы объективов. На объективы падают параллельные пучки лучей, угол наклона  $\omega$  которых относительно оптической оси меняется, например, с помощью качания плоского зеркала, ось качания которого перпендикулярна плоскости рисунка. Для того чтобы в пространстве изображений объективов был обеспечен телецентрический ход главных лучей, ось качания сканатора в объективе I должна проходить

Таблица 1

Значение дисторсии, требуемое для получения зависимости F-Theta

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

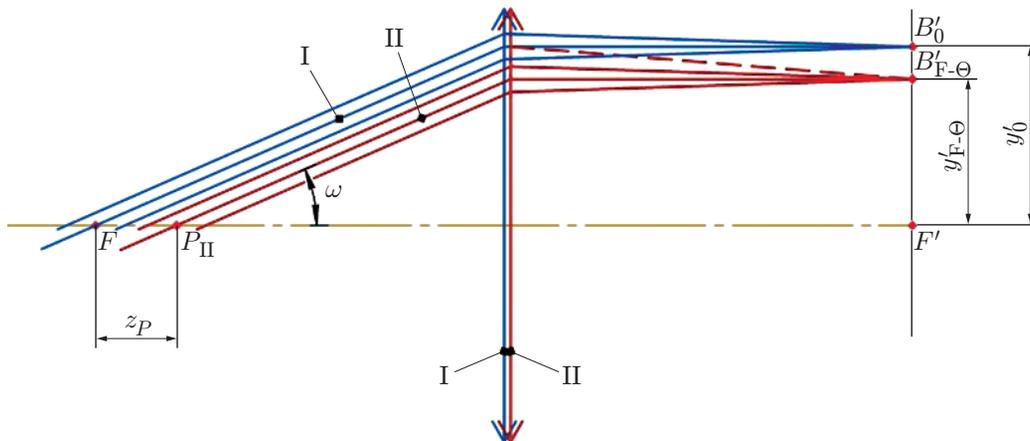


Рис. 1. Параксиальные модели объективов: ортоскопического (I) и параксиального (II)

через точку  $F$ , а в объективе II — через точку  $P_{II}$ , смещённую на отрезок  $z_P = f' \Delta$  вдоль оптической оси в сторону объектива.

В отличие от параксиальной модели ортоскопического объектива в объективе F-Theta принципиально не достигается телецентрический ход главных лучей для всех точек изображения при фиксированном положении оси качания сканера. Минимизация нетелецентричности в рабочем диапазоне углов  $\omega$  обеспечивается выбором положения оси сканатора.

Схема лучей на рис. 1 демонстрирует ещё одну особенность параксиальной модели объектива F-Theta: в прямом ходе лучей, также как и в традиционной ортоскопической параксиальной модели, пучки лучей, параллельные оптической оси, собираются в одну точку, тогда как в обратном ходе лучей должна иметь место отрицательная сферическая аберрация.

При постоянной угловой скорости  $d\omega/dt$  поворота сканера в параксиальной модели объектива F-Theta (II) линейная скорость  $v$  перемещения сканирующего пятна вдоль направления сканирования будет постоянной:  $v_{F-\Theta} = f' d\omega/dt$ , тогда как в идеальном ортоскопическом объективе I она увеличивается к краям строки:  $v_0 = (f'/\cos^2 \omega) d\omega/dt$ . Постоянство линейной скорости перемещения сканирующего пятна вдоль строки сканирования в совокупности с нормальным падением сканирующего пучка на любую точку поверхности сканирования обеспечивают одинаковое действие энергии сканирующего пятна во всех точках на поверхности сканирования и по существу определяют принципиальную необходимость использования объективов F-Theta в сканирующих устройствах.

При работе с двухкоординатным сканатором, состоящим из двух зеркал, оси качания которых взаимно перпендикулярны и начальные положения зеркал соответствуют углам  $\alpha_0 = \gamma_0 = 45^\circ$  (рис. 2), координаты луча в плоскости сканирования для параксиальных моделей могут быть рассчитаны с использованием методов матричной оптики. Опуская тривиальные алгебраические преобразования, получим

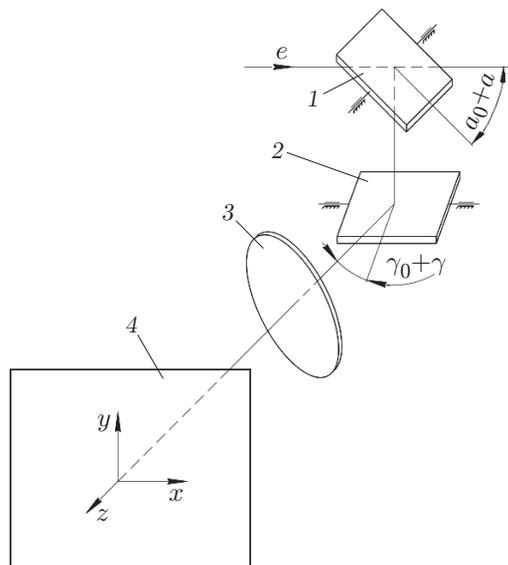


Рис. 2. Схема работы объектива с двухкоординатным сканатором: 1 — первое зеркало, 2 — второе зеркало, 3 — объектив, 4 — сканируемая поверхность

— в случае ортоскопического объектива

$$x = -f' \operatorname{tg} 2\alpha / \cos 2\gamma; \quad y = -f' \operatorname{tg} 2\gamma, \quad (2)$$

— в случае объектива F-Theta

$$x = -f' \operatorname{arctg} (\operatorname{tg} 2\alpha / \cos 2\gamma); \quad y = -f' 2\gamma. \quad (3)$$

Наибольшая относительная непрямолинейность траектории в направлении  $y$  составит — для ортоскопического объектива

$$\Delta_{x \text{ орто}} = \frac{\delta_{x \text{ орто}}}{x} = \frac{1}{\cos 2\gamma} - 1,$$

— для объектива F-Theta

$$\Delta_{x \text{ F-}\theta} = \frac{\delta_{x \text{ F-}\theta}}{x} = \frac{\operatorname{arctg} (\operatorname{tg} 2\alpha / \cos 2\gamma)}{2\alpha} - 1,$$

где  $\delta_{x \text{ F-}\theta}$  — разность координат  $x$  вдоль траектории сканирования зеркалом 2 при фиксированном положении зеркала 1.

В параксиальном приближении без учёта aberrаций широких пучков лучей, в том числе и aberrаций в зрачках, непрямолинейность для случая объектива F-Theta получается несколько меньше, чем для ортоскопического. Так, например, для углов качания зеркал  $\pm 10^\circ$  непрямолинейность снизится соответственно с 6,4 до 5,9 %.

На рис. 3 продемонстрирован характер траектории сканирования на примере четверти рабочего поля при нормированном значении фокусного расстояния, равного 1: ортоскопическим объективом (2) для углов поворота зеркал  $\pm 10^\circ$  и объективом F-Theta (3) для  $\gamma = \pm 10^\circ$  при  $\alpha = 10^\circ$ ,  $\alpha = 7^\circ$ ,  $\alpha = 5^\circ$ .

Теоретически траектория сканирования в направлении  $x$  представляет собой прямую линию, так как координата  $y$  не зависит от угла поворота зеркала 1, а определяется только

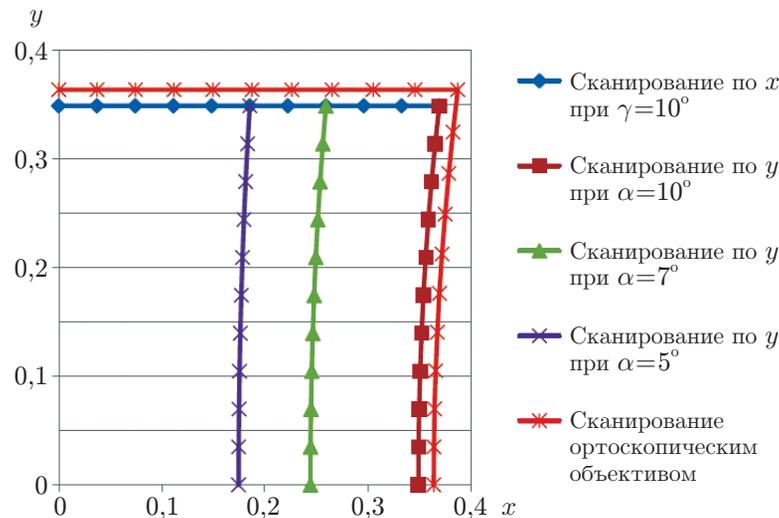


Рис. 3. Характер траектории сканирования

положением зеркала 2. При фиксированном положении зеркала 1 и изменении угла поворота зеркала 2 происходит изменение не только координаты  $y$ , но и координаты  $x$ , что приводит к непрямолинейности траектории в направлении  $y$ . Вид траектории движения сканирующего пятна, демонстрируемый на рис. 3, отличается от типичного вида искажения изображения квадратного объекта, характерного для объективов с положительной или отрицательной дисторсией.

Уменьшение геометрических искажений траектории сканирования может осуществляться активными и пассивными методами. Активный метод связан с введением поправок в угол сканирования зеркал [2]. Пассивный метод направлен на компромиссную компенсацию искажений непрямолинейности сканирования оптической системой.

**Результаты разработки серии объективов F-Theta.** Алгоритм расчёта любого объектива включает несколько этапов, ключевыми из которых являются: формирование стартовой системы, создание оптимизационной модели и оптимизация, оценка качества изображения. Стартовая система создаётся как осесимметричный объектив с вынесенным входным зрачком, при этом удаление входного зрачка принимается равным расстоянию от первой поверхности объектива до примерно середины расстояния между зеркалами сканатора. В оптимизационной модели на этапе создания стартовой системы для обеспечения линейного закона используется стандартный оператор, вычисляющий дисторсию F-Theta. На следующем этапе добавляются сканирующие зеркала, определяются оси и углы поворота, переводящие расчёт в мультиконфигурационный режим. При этом в оптимизационную модель вводятся так называемые «сложные» операторы, обеспечивающие непосредственный контроль в ходе компьютерной оптимизации соблюдения линейной зависимости между координатами и углами поворота зеркал, а также контроль прямолинейности траекторий по полю сканирования. Контроль аберраций широких пучков в ходе оптимизации осуществляется по волновым аберрациям. Переход к интегральным характеристикам качества изображения, учитывающим дифракционные явления, происходит на заключительном этапе расчёта.

Необходимость обеспечения телецентрического хода в объективе F-Theta требует применения в оптической системе линз с диаметрами, превышающими диагональ рабочего поля, что неизбежно приводит к увеличению массогабаритных показателей изделия. Так, расчёты серии телецентрических объективов F-Theta [2] показали, что масса объектива для поля размером  $100 \times 100$  мм составляет 1,5 кг и возрастает до 16,3 кг для рабочего

Таблица 2

## Характеристики серии объективов F-Theta

Характеристика объектива	КН-100	КН-200	КН-300	КН-400
Размер линейного поля, мм	100 × 100	200 × 200	300 × 300	400 × 400
Фокусное расстояние, мм	143	382	536	560
Рабочая длина волны, мкм	1,064	1,064	1,064	1,064
Отклонение от закона F-Theta, %	0,04	0,04	0,15	0,05
Диаметр входного зрачка, мм	12	15	15	15
Угол сканирования, градус	±20	±15	±16	±20
Задний фокальный отрезок, мм	184,8	479,0	657,8	694,4
Передний фокальный отрезок, мм	87,2	280,2	413,2	401,8
Положение сканера относительно объектива, мм	27	29	27	40
Длина объектива, мм	50,4	46,1	42,4	80,2
Наибольший световой диаметр, мм	79,7	70,7	73,1	132,6
Количество элементов, шт	3	3	3	3
Масса, кг	0,5	0,35	0,28	1,58
Наибольшее отклонение от нормали, градус	11,2	13,5	15,7	17,0

поля размером 200 × 200 мм. Очевидно, что практическая потребность в таких объективах ограничена. Отступление от строгой телецентричности используется для уменьшения диаметра последней линзы объектива [7].

Ряд практических применений объективов F-Theta допускает отступление от перпендикулярного падения пучка лучей на рабочее поле, что позволяет, размещая сканирующие зеркала в непосредственной близости от объектива, существенно улучшить массогабаритные показатели изделия. В табл. 2 представлены характеристики серии разработанных объективов F-Theta для рабочих полей размером от 100 × 100 до 400 × 400 мм. В последней строке таблицы приведены значения наибольшего отклонения от нормали для пучка лучей, соответствующего углу рабочего поля.

Из-за ограниченного размера сканирующих зеркал объективы F-Theta, разработанные для больших размеров рабочих полей, имеют низкое относительное отверстие: от 1 : 12 до 1 : 37. В силу последнего обстоятельства пятно сканирования во всех точках рабочего поля для объективов, характеристики которых приведены в табл. 2, отличается от дифракционного размера не более чем на 5 %.

Необходимость формирования сканирующих пятен малого диаметра при ограниченных размерах сканаторов обусловила разработку телецентрического объектива F-Theta для рабочего поля размером 35 × 35 мм, имеющего следующие характеристики: фокусное расстояние 100 мм, диаметр пучка 14 мм, угол качания зеркал ± 5° (рис. 4, *a, b*).

Расстояние между осями поворота сканирующих зеркал 16 мм, расстояние от последнего зеркала до первой поверхности объектива 30 мм. Задний фокальный отрезок объектива 145 мм, длина по оси от первой до последней поверхности объектива 60 мм, наибольший диаметр линз 70 мм, масса 0,5 кг. При разработке оптической схемы в оптимизационную функцию, кроме требований по коррекции волновых aberrаций, включались требования по соблюдению закона F-Theta и прямолинейности траекторий перемещения сканирующего пятна для всех значений углов поворота сканирующих зеркал, что позволило обеспечить постоянство концентрации энергии сканирующего пятна во всех точках на поверхности сканирования (рис. 4, *c*).

**Результаты исследования оптических систем объективов F-Theta.** Спектр зарубежных объективов F-Theta достаточно широк: иностранные разработчики, такие как Thorlabs, США [8], Sintec Optronics, Сингапур [9], Edmund, США [10] и др., предлагают

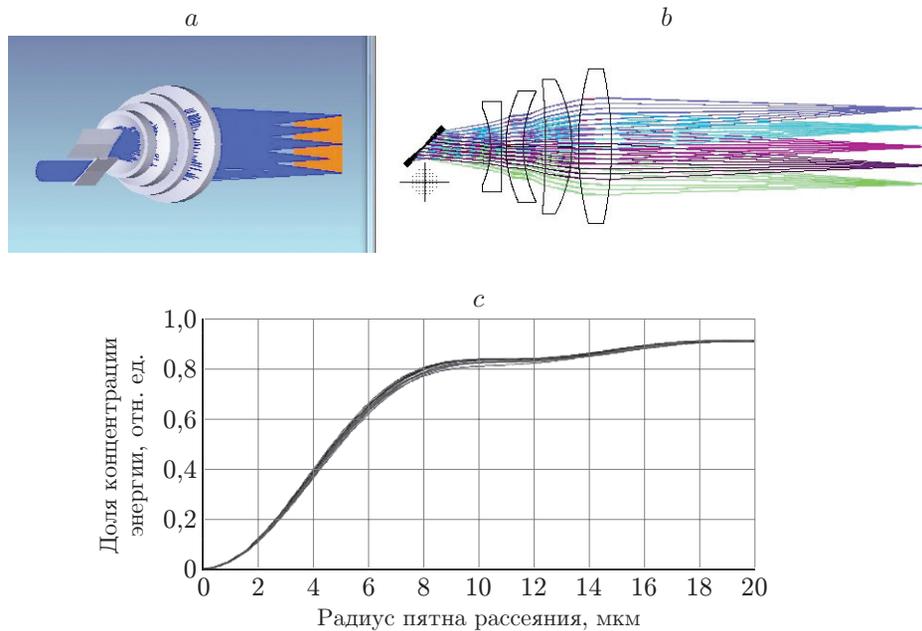


Рис. 4. Телецентрический объектив F-Theta КНВ-35: *a* — сканирование поля поворотом зеркал, *b* — иллюстрация телецентричности объектива, *c* — функция концентрации энергии в пятне

Таблица 3

#### Нелинейность объективов F-Theta

Объектив	$2\alpha, ^\circ$	$2\gamma, ^\circ$	$\Delta_x, \%$	$\Delta_y, \%$	Объектив	$2\alpha, ^\circ$	$2\gamma, ^\circ$	$\Delta_x, \%$	$\Delta_y, \%$
Thorlabs FTH160-1064	0	20	0,00	0,01	КН-100	0	20	0,00	0,04
	20	0	0,01	0,00		20	0	0,04	0,00
	10	10	0,48	1,05		10	10	0,52	1,00
	20	20	1,91	4,24		20	20	1,68	4,42
Edmund JENar F-Theta 17-024	0	12	0,00	0,99	КНВ-35	0	10	0,00	0,76
	12	0	0,76	0,00		10	0	0,76	0,00
	6	6	0,38	1,15		5	5	0,25	0,85
	12	12	0,47	2,87		10	10	1,07	2,56

объективы F-Theta для различных рабочих полей размером от  $6 \times 6$  до  $400 \times 400$  мм, различных длин волн лазерного излучения как с телецентрическим, так и с нетелецентрическим ходом лучей. При этом некоторые фирмы, предлагающие объективы F-Theta, например Thorlabs и Edmund, на своих сайтах предоставляют файл в формате *zaf* (в виде «чёрного ящика»), который, скрывая конструктивное исполнение и ход лучей внутри объектива, позволяет проводить трассировку лучей через объектив и анализировать результаты.

На примере некоторых объективов с доступными «чёрными ящиками» выявлено, насколько точно выполняется линейный закон связи координаты и угла. Прямые расчёты по трассировке лучей через оптические системы показали, что закон F-Theta достаточно хорошо соблюдается только для направлений  $y$  и  $x$ , проходящих через центр симметрии рабочего поля. Однако по мере рассмотрения траекторий, параллельных оси  $y$  или оси  $x$ , отклонение от линейной зависимости между соответствующей координатой и углом

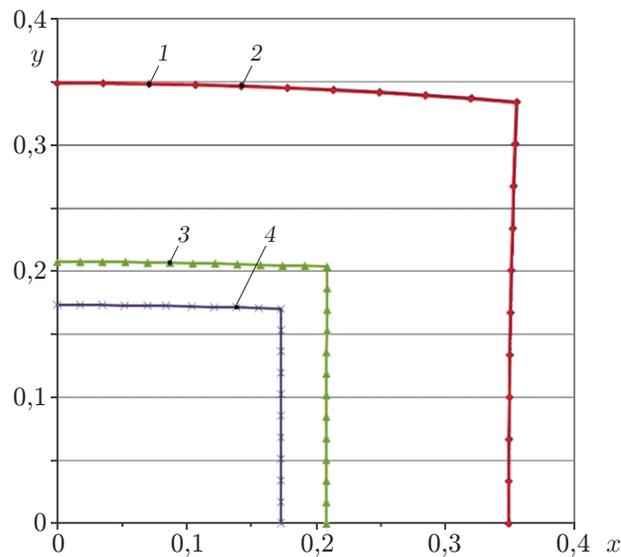


Рис. 5. Траектории сканирования в объективах F-Theta: 1 — FTH160-1064, 2 — КН-100, 3 — Edmund, 4 — КНВ-35

поворота сканера возрастает. В табл. 3 приведены результаты расчётов отклонения от линейного закона для четырёх объективов, а также значения при отступлении от закона F-Theta в четырёх точках поля сканирования. Детальный анализ множества точек поля показал, что наибольшее значение отступления от закона F-Theta не во всех объективах соответствует краю поля сканирования. Такой характер исправления дисторсии F-Theta наблюдается в объективе FTH160-1064 (Thorlabs), в котором наибольшее значение дисторсии F-Theta по полю достигает 0,07 %. Таким образом, отступление от закона F-Theta (дисторсия F-Theta, или нелинейность) для направлений  $x$  и  $y$ , проходящих через оптическую ось объектива (центр симметрии рабочего поля), составляет для представленных в табл. 3 зарубежных объективов 0,07 и 0,99 %; для разработанных — 0,04 и 0,76 %. Максимальное значение отклонения от закона F-Theta, проявляющееся для края рабочего поля, в объективе КН-100 равно 4,42 %, в объективе FTH160-1064 — 4,24 %. Таким образом, нелинейность для края рабочего поля превышает в несколько десятков раз нелинейность, обеспеченную для траекторий  $y$  и  $x$ , проходящих через центр симметрии рабочего поля. Отмечается, что указанное в каталогах значение дисторсии F-Theta приводится для траекторий  $y$  и  $x$ , проходящих через оптическую ось объектива (ось симметрии рабочего поля).

Результаты расчёта прямолинейности траекторий приведены на рис. 5, при этом для удобства сравнения использовалась нормировка фокусных расстояний к единице.

Детальный анализ трассированных пучков лучей показал, что искривление (непрямолинейность) для объектива FTH160-1064 в направлении оси  $x$  составило 1,92 %, в направлении  $y$  — 4,23 %, для объектива КН-100 в направлении оси  $x$  составила 1,72 %, в направлении  $y$  — 4,38 %, что демонстрируется наложением траекторий 1 и 2 друг на друга. Соответственно для объектива Edmund искривление в направлении оси  $x$  составило 0,29 %, в направлении  $y$  — 1,89 %, а для объектива КНВ-35 в направлении оси  $x$  составило 0,31 %, в направлении  $y$  — 1,83 %. При этом максимальное отступление от телецентричности у объективов FTH160-1064 и КН-100 примерно  $16^\circ$ , у объектива Edmund —  $5^\circ$ , у объектива КНВ-35 —  $1,5^\circ$ .

Отступление от закона F-Theta, наличие aberrаций в зрачках, смещение зрачка с оптической оси объектива при повороте сканирующих зеркал приводят к изменению непря-

молинейности траектории в направлении  $y$  и появлению непрямолинейности в направлении  $x$ . Характер траекторий, полученных в результате трассировки лучей через оптические системы объективов F-Theta, свидетельствует о нехарактерной для осесимметричных оптических систем дисторсии с различными по знаку искажениями прямолинейности во взаимно перпендикулярных направлениях.

**Заключение.** Геометрическая модель идеального объектива F-Theta отличается от традиционного идеального ортоскопического объектива, и уже на уровне параксиального моделирования требуется ввести в модель переменные значения отрицательной дисторсии и сферической аберрации в обратном ходе лучей, изменяемые в зависимости от угла наклона сканирующих пучков лучей. В силу этого в геометрической модели идеального объектива F-Theta принципиально недостижим телецентрический ход главных лучей в пространстве изображений для всех точек рабочего поля. Показано, что при работе идеального объектива F-Theta с двухкоординатным сканатором имеет место непрямолинейность траектории сканирования, относительное значение которой при углах качания зеркал  $\pm 10^\circ$  для края рабочего поля достигает примерно 6 %. Результаты разработки ряда объективов F-Theta показали, что включение сканирующих зеркал в алгоритм проектирования и непосредственный контроль в ходе оптимизации специфических особенностей (соблюдение зависимости F-Theta, прямолинейность траектории сканирования, телецентричность, размер сканирующего пятна в различных точках рабочего поля) позволяют обеспечить характеристики объективов, сопоставимые с известными зарубежными аналогами. Разработанные оптические системы объективов могут служить основой для развития отечественной элементной базы оплотехники.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хацевич Т. Н.** Оптические системы с линейным законом построения изображения для устройств записи информации // Автометрия. 1983. **19**, № 2. С. 86–88.
2. **Боднарчук А. И., Хацевич Т. Н.** Дисторсия в F-Theta объективах // Сб. мат. XVII Междунар. конф. «СибОптика-2021. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». Интерэкспо ГЕО-Сибирь. Новосибирск : СГУГиТ, 2021. С. 25–32.
3. **Chen M. F., Chen Y. P., Hu C. W., Chen C. C.** Method of analyzing the singlet F-Theta scan lens for laser drilling system // Key Eng. Mater. 2007. **364-366**, N 19. P. 521–526.
4. **Бессмельцев В. П., Голошевский Н. В.** Система управления составными двухкоординатными сканаторами // Автометрия. 2007. **43**, № 1. С. 116–126.
5. **Yurevich V. I., Grimm V. A., Afonyushkin A. A. et al.** Optical design and performance of F-Theta lenses for high-power and high-precision applications // Proc. SPIE. 2015. **9626**. 96261S.
6. **Araki T., Yajima K., Sato N., Fuse K.** All-ZnSe F-Theta lens for printed wiring board processing // Sumitomo Electric Techn. Rev. 2021. **93**, N 2. P. 42–49.
7. **Giliazov M. R., Gilmutdinov A. Kh., Nagulin K. Yu.** Design of f-theta lens for laser beam scanning // Eng. Journ. Don. 2018. **52**, N 4. 5205.
8. **Thorlabs** F-Theta Scan Lenses. URL: [https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup\\_id=6430](https://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=6430) (дата обращения: 04.04.2022).
9. **Sintec Optronics** Scan Lenses (f-theta Lenses) for YAG Lasers. URL: <http://www.sintecoptronics.com/scanlensYAG.asp> (дата обращения: 04.04.2022).
10. **Edmund** F-Theta Lenses. Edmund Optics Inc. URL: <https://www.edmundoptics.com/c/f-theta-lenses/1255> (дата обращения: 04.04.2022).

*Поступила в редакцию 18.04.2022*

*После доработки 15.05.2022*

*Принята к публикации 18.05.2022*