

## ПРИМЕНЕНИЕ АКСИКОНОВ В ИЗОБРАЖАЮЩИХ СИСТЕМАХ ДЛЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ГЛУБИНЫ ФОКУСА

© 2011 С.Н. Хонина<sup>1</sup>, Д.А. Савельев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт систем обработки изображений РАН;

<sup>2</sup> Самарский государственный аэрокосмический университет имени С.П. Королёва  
(Национальный государственный университет);

Поступила в редакцию 026.09.2011

В рамках параксиального приближения проведен анализ изображающих способностей осесимметричных оптических элементов. Показано, что оптические элементы, не имеющие квадратичной зависимости от радиуса, не могут формировать четкое изображение в одной плоскости, как это делает линза, компенсируя распространение в свободном пространстве. Однако однолинзовая изображающая система характеризуется очень короткой глубиной фокуса, которую можно эффективно увеличить введением в оптическую систему дополнительного оптического элемента, например, аксикона. Также можно улучшить качество изображения при использовании дополнительных фазовых оптических элементов с другой степенной зависимостью от радиуса, в том числе дробной (фраксикон). Введение аксикона в объектную плоскость изображающей системы позволяет также несколько компенсировать негативное действие препятствий, расположенных на оптической оси.

Ключевые слова: изображающая система, увеличенная глубина фокуса, аксикон, фраксикон, спектральное перераспределение.

### ВВЕДЕНИЕ

Как определил в 1954 году J. H. Mcleod [1, 2] аксикон – это любой оптический элемент, обладающий осевой симметрией, который за счет отражения и/или преломления преобразует свет от точечного источника, расположенного на оптической оси, в осевую отрезок.

В этом состоит отличие аксикона от линзы, которая изображает точечный источник в точку, и его преимущество. К сожалению, это преимущество аксикона сопровождается низким качеством изображения при использовании его как отдельного изображающего элемента [3].

Также другое преимущество аксикона - изображение точки с меньшим поперечным дифракционным пределом (меньшим расплыванием) – имеет своим продолжением в качестве недостатка более высокий уровень боковых лепестков, что также препятствует получению качественного изображения [4].

Поэтому, как правило, аксикон используется дополнительным элементом в изображающих системах. В частности, известное свойство аксикона формировать в Фурье-плоскости

кольцевое распределение, используется в сканирующих изображающих системах [5]. В этом случае можно избежать энергетических потерь, связанных с введением узкой кольцевой диафрагмы.

Элемент с кольцевым импульсным откликом был использован Л. М. Сороко при разработке мезооптического Фурье-микроскопа для анализа треков в ядерной фотоэмульсии [6].

В изображающих системах аксикон как правило используется для увеличения глубины фокальной области [7]. Данный эффект аналогичен увеличению глубины поля при кодировании волнового фронта с помощью дополнительного оптического элемента с кубической фазой [8].

Возникает вопрос: какой именно тип осесимметричного элемента, с какой зависимостью от радиуса будет лучше выполнять функцию увеличения глубины фокуса изображающей системы. А также какие еще преимущества можно приобрести дополнив классические одно- и двухлинзовые изображающие системы аксиконоподобными элементами.

В данной работе аналитически и численно проанализированы различные изображающие схемы, основанные на использовании одной или двух линз с дополнительным оптическим элементом, фаза которого имеет степенную зависимость от радиуса. Такой элемент мы называем аксиконоподобным.

*Хонина Светлана Николаевна, ведущий научный сотрудник, доктор физико-математических наук, профессор.*

*E-mail: khonina@smr.ru.*

*Савельев Дмитрий Андреевич, аспирант.*

*E-mail: d.a.savelev@mail.ru*

В частности, показано, что однолинзовая изображающая система характеризуется очень короткой глубиной резкости изображения, что приводит к быстрой деградации изображения при смещении вдоль оптической оси из плоскости изображения. Использование дополнительных элементов позволяет удлинить область приемлемого формирования изображения, причем на численных примерах показано, что линза в этом случае не является оптимальным вариантом.

Также рассмотрены дополнительные фазовые оптические элементы с другой степенной зависимостью от радиуса, в том числе дробной – фракционной. Показано, что в этом случае среднеквадратичное отклонение изображения от объекта меньше, чем при использовании дополнительной линзы.

Введение аксикона в объектную плоскость изображающей системы позволяет использовать еще одно свойство аксикона – отклонять свет в от оптической оси в кольцевую область. Это несколько компенсирует искажающее действие препятствий, расположенных на оптической оси. Способность аксикона перераспределять энергию в высокие частоты также рассмотрена в двухлинзовой изображающей системе. В этом случае действие теневого фильтра приводит не к выделению краев, а потере высокочастотной информации.

### 1. АНАЛИЗ ИЗОБРАЖАЮЩИХ СВОЙСТВ АКСИКОНА В РАМКАХ ПАРАКСИАЛЬНОЙ СКАЛЯРНОЙ ТЕОРИИ.

При радиальной симметрии рассматриваемой задачи распространение монохроматического светового поля  $g(r)$  в свободном пространстве на расстояние  $z$  можно описывать с помощью преобразования Френеля-Бесселя:

$$G(\rho, z) = \frac{k}{iz} \exp(ikz) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z}\right) \int_0^\infty g(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z}\right) J_0\left(\frac{k\rho r}{z}\right) r dr, \quad (1)$$

где  $k = 2\pi / \lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны света,  $J_0(x)$  – функция Бесселя первого рода, нулевого порядка.

Тогда изображение объекта  $g(r)$  с помощью осесимметричного оптического элемента  $\tau(r)$ , расположенного на расстоянии  $z_1$  от объекта, в плоскости  $z_2$  описывается выражением:

$$f(s, z_2) = \frac{k}{iz_2} \exp(ikz_2) \exp\left(\frac{iks^2}{2z_2}\right) \int_0^\infty G(\rho, z_1) \tau(\rho) \exp\left(\frac{ik\rho^2}{2z_2}\right) J_0\left(\frac{ks\rho}{z_2}\right) \rho d\rho \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2) получим:

$$f(s, z_2) = \frac{k^2}{z_1 z_2} \exp[ik(z_1 + z_2)] \exp\left(\frac{iks^2}{2z_2}\right) \times \int_0^\infty g(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z_1}\right) \left\{ \int_0^\infty \tau(\rho) \exp\left[\frac{ik\rho^2}{2}\left(\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2}\right)\right] J_0\left(\frac{k\rho r}{z_1}\right) J_0\left(\frac{ks\rho}{z_2}\right) \rho d\rho \right\} r dr \quad (3)$$

При использовании в качестве изображающего элемента обычной собирающей линзы с фокусным расстоянием  $f_L$ :

$$\tau_L(r) = \exp\left(-\frac{ikr^2}{2f_L}\right) \quad (4)$$

и наложении условия:

$$\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f_L} = 0 \quad (5)$$

выражение (3) существенно упрощается:

$$f(s, z_2) = \frac{k^2}{z_1 z_2} \exp[ik(z_1 + z_2)] \exp\left(\frac{iks^2}{2z_2}\right) \int_0^\infty g(r) \exp\left(\frac{ikr^2}{2z_1}\right) \left\{ \int_0^\infty J_0\left(\frac{k\rho r}{z_1}\right) J_0\left(\frac{ks\rho}{z_2}\right) \rho d\rho \right\} r dr \quad (6)$$

Используя соотношение:

$$\int_0^\infty J_0(\alpha\rho) J_0(\beta\rho) \rho d\rho = \frac{\delta(\alpha - \beta)}{\alpha} \quad (7)$$

и фильтрующее свойство d-функции, получаем в плоскости  $z_2$  масштабированное изображение объекта с дополнительной квадратичной фазой:

$$f(s, z_2) = -\frac{z_1}{z_2} \exp[ik(z_1 + z_2)] \exp\left[\frac{iks^2}{2z_2}\left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right)\right] g\left(\frac{z_1 s}{z_2}\right). \quad (8)$$

Если  $z_1 = z_2 = 2f$ , то изображение будет масштабировано соответствовать объекту с точностью до фазового множителя:

$$f(s, 2f_L) = -\exp(ik4f_L) \exp\left(\frac{iks^2}{2f_L}\right) g(s). \quad (9)$$

Именно этот квадратичный множитель приводит к быстрой деградации изображения при смещении плоскости регистрации относительно плоскости формирования изображения, соответствующей условию (5).

Понятно, что любые другие отдельные оптические элементы, не имеющие квадратичной зависимости от радиуса, не смогут формировать изображение столь четко, как это делает линза, компенсируя импульсный отклик свободного пространства.

Рассмотрим использование в качестве изображающего элемента отдельный аксикон:

$$\tau_{ax}(r) = \exp(-ikar), \quad (10)$$

где параметр  $\alpha$  связан с углом наклона к оптической оси преломленных лучей  $\alpha = \sin \theta$ , что соответствует числовой апертуре аксикона, а также связан с углом конического аксикона  $\beta$ , изготовленного из прозрачного материала с показателем преломления  $n$ :  $\alpha = \beta(n - 1)$ .

В этом случае выражение (3) для получения идеального изображения приводит к необходимости рассматривать условие:

$$\rho \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right) - 2\alpha = 0, \quad (11)$$

которое предполагает различные плоскости изображения для различных частей (радиусов) объекта:

$$z_2 = \frac{\rho z_1}{2\alpha z_1 - \rho}. \quad (12)$$

Т.о., центральная часть объекта хорошо изображается в непосредственной близости от аксикона  $z_2 \ll 0$ , а периферийная на расстоянии

$$z_2 = \frac{Rz_1}{2\alpha z_1 - R}. \text{ Если } z_1 \text{ велико, то } z_2 \approx \rho/2\alpha.$$

Также дополнение аксикона к линзе и использование такого тандема в качестве изображающего элемента не позволяет получить хорошее изображение в одной плоскости:

$$\rho \left( \frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} - \frac{1}{f_L} \right) - 2\alpha = 0, \quad (13)$$

т.к. это возможно лишь при обнулении  $\alpha$ , т.е. при отсутствии аксикона.

Отдельные части объекта изображаются на различных плоскостях:

$$z_2 = \frac{\rho z_1 f_L}{2\alpha z_1 f_L - \rho f_L + \rho z_1}. \quad (14)$$

При значительной удаленности объекта от изображающего элемента  $z_2 \approx \frac{\rho f_L}{2\alpha f_L + \rho}$ .

## 2. ДОПОЛНЕНИЕ ОДНО-ЛИНЗОВОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СОБИРАЮЩИМ АКСИКОНОМ

Однако наличие собирающего аксикона может быть полезно в плоскости формирования изображения одной линзой для компенсации нежелательной квадратичной фазы и углубления таким образом отрезка качественного формирования изображения.

Разумеется, лучше всего компенсировать квадратичный набег еще одной собирающей линзой, но в этом случае, как показывают результаты моделирования, глубина формирования изображения получается меньше, чем с аксиконом. Обычная двухлинзовая изображающая система будет рассмотрена ниже.

Заметим, что компенсирующий аксикон может находиться и объектной плоскости. Это также легко видеть из выражений (8) или (9). Если объект имеет дополнительное фазовое распределение  $g(r) \exp(-ik\alpha r)$ , то в плоскости изобра-

жения он будет выполнять компенсирующее набег фазы действие:

$$f(s, 2f_L) = -\exp(ik4f_L) \exp\left[iks\left(\frac{s}{2f_L} - \alpha\right)\right] g(s). \quad (15)$$

Из выражения (15) можно определить параметр аксикона, позволяющий оптимально скомпенсировать набег фазы на интервале  $s \in [0, R]$ , где  $R$  – размер объекта.

Ниже приведены результаты численного моделирования однолинзовой изображающей системы, в том числе с дополнительными аксиконом или линзой для компенсации набег фазы.

Параметры моделирования: длина волны излучения  $\lambda=633$  нм, использовалась линза с фокусным расстоянием  $f_L = 100$  мм и радиусом  $R=1$  мм. В качестве объекта рассматривалось кольцо с внутренним и внешним радиусами  $R_1 = 0,25$  мм,  $R_2 = 0,75$  мм.

В связи с конечностью размера линзы среднеквадратичное отклонение изображения от исходной функции объекта по интенсивности составило 13%.

В табл. 1 приведены результаты моделирования однолинзовой изображающей системы с дополнительными оптическими элементами, предназначенными компенсировать квадратичную фазу.

Как видно из топологии распределения интенсивности, введение аксикона, параметр которого с учетом выражения (13) был выбран равным  $\alpha = 0,005$ , позволяет получить более протяженную зону формирования изображения, чем дополнительная линза.

Глубина фокуса линзы определяется из следующего соотношения [7]:

$$DOF_L = \frac{\lambda f_L^2}{4R^2}. \quad (14)$$

Для используемых в этом разделе параметров эта величина равна  $DOF_L \approx 0,4$  мм.

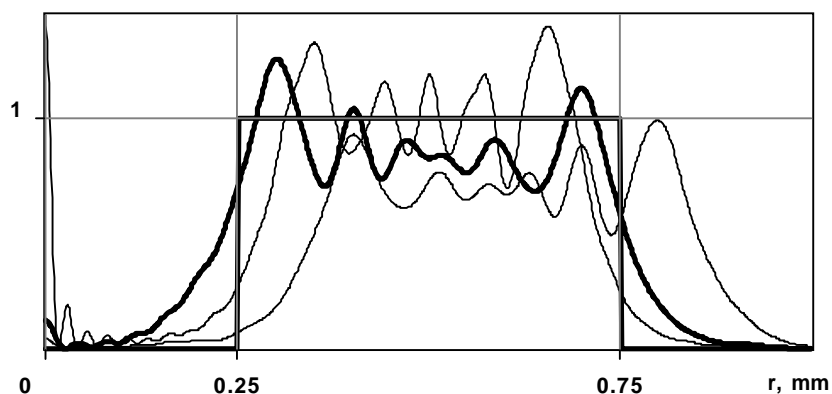
На рис. 1 приведены сравнительные сечения для распределения интенсивности в различных схемах при сдвиге из плоскости изображения на величину 20 мм, что составляет 20% от фокального расстояния линзы и в 50 раз превышает глубину фокуса линзы. При этом среднеквадратичное отклонение формируемого распределения интенсивности от функции объекта составляет для обычной однолинзовой изображающей системы – 59%, дополненной линзой – 30% и дополненной аксиконом – 29%.

Таким образом, дефокусированное изображение при использовании аксикона получаются более корректными, чем при полной компенсации квадратичного набег фазы дополнительной линзой.

Данный эффект аналогичен увеличению глубины поля при кодировании волнового фронта с помощью дополнительного оптического элемента с кубической фазой [8].

**Таблица 1.** Компенсация квадратичной фазы в одно-линзовой изображающей системе

	Топология распределения интенсивности (негатив) $z \in [50 \text{ мм}, 500 \text{ мм}], x \in [-2 \text{ мм}, 2 \text{ мм}]$	Изображение: интенсивность, фаза и радиальное сечение
Обычная схема		
Дополнение компенсирующим аксиконом		
Дополнение линзой		



**Рис. 1.** Сравнительные сечения для распределения интенсивности при сдвиге из плоскости изображения на величину 20 мм: для обычной однолинзовой изображающей системы (тонкая линия), дополненной линзой (тонкая линия) и дополненной аксиконом (толстая линия)

### 3. ДОПОЛНЕНИЕ ОДНОЛИНЗОВОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СОБИРАЮЩИМ ФРАКСИКОНОМ

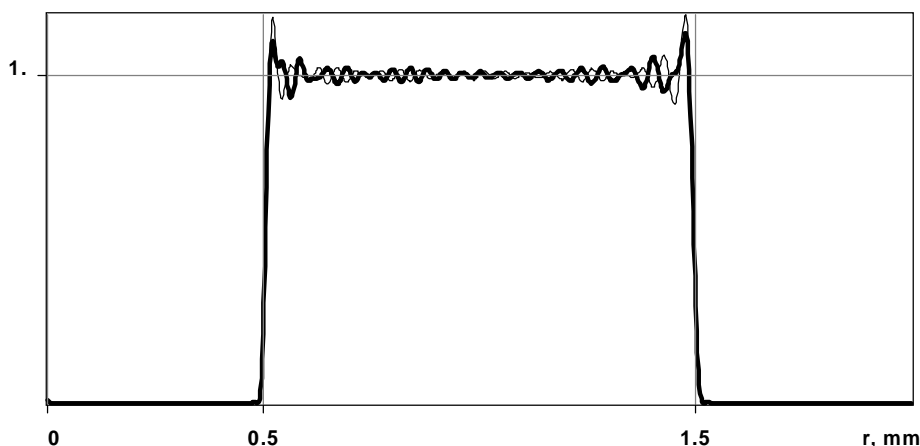
В работе [9] был рассмотрен дифракционный оптический элемент, имеющий нелинейную за-

висимость от радиуса следующего вида:

$$\tau_{frac}(r) = \exp(-ikar^g). \quad (15)$$

Он был назван фраксиконом, т.к. степень  $g$  может быть не целой.

Результаты численного моделирования в предыдущем разделе показали, что полная компенса-



**Рис. 2.** Сравнительные сечения для распределения интенсивности в плоскости изображения при дополнении однолинзовой изображающей системы фраксиконом с  $\gamma = 0,5$  (толстая линия) и  $\gamma = 3$  (тонкая линия).

ция квадратичного набега фазы с помощью второй линзы может быть неоптимальной с точки зрения удлинения зоны формирования изображения.

Рассмотрим однолинзовую изображающую систему, дополненную фраксиконом (15). Тогда, при размещении его в объектной плоскости, в плоскости изображения он будет выполнять следующую компенсацию набега фазы:

$$f(s, 2f_L) = -\exp(ik4f_L) \exp\left[iks^\gamma \left(\frac{s^{2-\gamma}}{2f_L} - \alpha\right)\right] g(s). \quad (16)$$

Из выражения (16) можно определить параметр фраксикона, позволяющий оптимально скомпенсировать набег фазы для отдельных частей изображения. В частности, если объект изображается без изменения масштаба и определен на радиусе  $R$ , то для центральной части изображения  $R/2$  наилучшим будет:

$$\alpha_c = \frac{(R/2)^{2-\gamma}}{2f_L}. \quad (17)$$

При изображении объекта в виде кольца с внутренним и внешним радиусами  $R_1 = 0,5$  мм,  $R_2 = 1,5$  мм линзой с фокусным расстоянием  $f_L = 100$  мм для внутреннего и внешнего краев:  $\alpha_1 = (0,5)^{2-\gamma}/200$  (мм) $^{1-\gamma}$ ,  $\alpha_2 = (1,5)^{2-\gamma}/200$  (мм) $^{1-\gamma}$ , соответственно.

В частности,

для  $\gamma = 0,5$ :

$$\alpha_1 \approx 0,0018 \text{ (мм)}^{0,5}, \quad \alpha_2 \approx 0,0091 \text{ (мм)}^{0,5};$$

для  $\gamma = 1$ :

$$\alpha_1 = 0,0025, \quad \alpha_2 = 0,0075;$$

для  $\gamma = 1,5$ :

$$\alpha_1 \approx 0,0035 \text{ (мм)}^{-0,5}, \quad \alpha_2 \approx 0,006 \text{ (мм)}^{-0,5};$$

для  $\gamma = 2$ :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 0,005 \text{ (мм)}^{-1};$$

для  $\gamma = 3$ :

$$\alpha_1 = 0,01 \text{ (мм)}^{-2}, \quad \alpha_2 \approx 0,0033 \text{ (мм)}^{-2}.$$

Таким образом, линза равномерно компенсирует набег фазы по всему изображению, при  $\gamma < 2$  для компенсации фазового набега в изображении внешнего края нужен более “сильный” фраксикон, чем для внутреннего, а при  $\gamma > 3$  - наоборот.

Однако, как следует из результатов моделирования, компенсация набега фазы не является гарантией корректного формирования изображения. На рис. 2 приведены сравнительные сечения для распределения интенсивности плоскости изображения при дополнении однолинзовой изображающей системы фраксиконом (15) при различных параметрах. При этом среднеквадратичное отклонение формируемого распределения интенсивности от функции объекта составляет для  $\gamma = 2$ ,  $\alpha = 0,005$  (мм) $^{-1}$  - 8,37%, для  $\gamma = 0,5$ ,  $\alpha = 0,01$  (мм) $^{0,5}$  - 7,92%, для  $\gamma = 3$ ,  $\alpha = 0,01$  (мм) $^{-2}$  - 8,2%.

Как видно из рис. 2 при использовании более высокой степени фраксикона  $\gamma$ , резче подчеркиваются края в изображении.

#### 4. ДОПОЛНЕНИЕ ОДНОЛИНЗОВОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ РАССЕИВАЮЩИМ АКЦИКОНОМ

Введение аксикона в объектную плоскость позволяет также использовать еще одно свойство аксикона – отклонять свет в от оптической оси в кольцевую область. Это может быть полезным при формировании изображений в случае наличия препятствий на оптической оси. Тогда нужно использовать не компенсирующий аксикон, как было рассмотрено выше, а рассеивающий.

На рис. 3 показана оптическая схема однолинзовой изображающей системы, позволяющей уменьшать влияние препятствий.

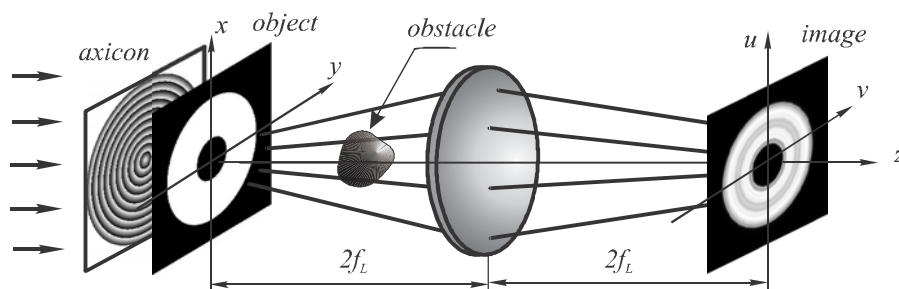


Рис. 3. Однолинзовая изображающая система с дополнительным рассеивающим аксиконом

Таблица 2. Наличие препятствий в однолинзовой изображающей системе

	Топология распределения интенсивности (негатив) $z \in [50 \text{ мм}, 500 \text{ мм}], x \in [-2 \text{ мм}, 2 \text{ мм}]$	Изображение: интенсивность, фаза и радиальное сечение
Обычная схема		
Дополнение рассеивающим аксиконом		

В табл. 2 приведены результаты моделирования однолинзовой изображающей системы в присутствии непрозрачных препятствий на оптической оси.

Видно, что наличие непрозрачного препятствия, размером в четверть объекта, приводит к существенному ухудшению качества изображения при использовании классической однолинзовой схемы – среднеквадратичное отклонение составило 27%. Однако наличие дополнительного рассеивающего аксикона в объектной плоскости, отклоняющего лучи от оптической оси, позволяет несколько скомпенсировать негативное действие препятствия – среднеквадратичное отклонение снизилось до 22%.

Увеличение параметра аксикона  $\alpha$  позволяет сильнее отклонять лучи, а следовательно, “обходить” более крупные препятствия, но в этом случае для построения качественного изображения потребуется более протяженная линза, чтобы собрать все отклоненные лучи.

## 5. ДОПОЛНЕНИЕ ДВУХЛИНЗОВОЙ ИЗОБРАЖАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ АКСИКОНОМ

Обычная двухлинзовая изображающая система состоит из двух линз, расположенных так, чтобы спектральная плоскость первой линзы являлась входной плоскостью второй. Первая линза выполняет преобразование Фурье над входным полем, а вторая еще одно над спектром, что с точностью до симметричного отражения соответствует обратному преобразованию Фурье, а следовательно, получению изображения объекта.

Такая схема удобна возможностью выполнения различных преобразований над спектром входного поля с помощью оптических элементов, расположенных в спектральной плоскости. В частности, введение теневого фильтра (блокирование центральной части спектра) позволяет выполнять оптическое дифференцирование.

Однако, если спектральную информацию об объекте перераспределить из области низких

частот в высокие, например, введением аксикона в плоскости объекта, то действие теневого фильтра будет иным.

На рис. 4 показана оптическая схема двухлинзовой изображающей системы, дополненной в плоскости объекта аксиконом.

Параметры моделирования такие же как в разделе 2, но используются две линзы с фокусным расстоянием  $f_L = 100 \text{ мм}$  и радиусом  $R=2 \text{ мм}$ .

На рис. 5 показано сравнительное распределение в спектральной плоскости для обычного объекта и при дополнении аксиконом. Как видно из рис. 5 при дополнении объекта аксиконом энергия в спектральной плоскости перераспределяется в высокие частоты.

При использовании фильтра, блокирующего центральную часть спектра (обычно применяется для выделения контуров [10]), радиусом  $0,25 \text{ мм}$  вся низкочастотная информация об объекте будет утеряна.

Если же объект дополнен аксиконом, то будет утеряна высокочастотная информация, которая была перераспределена в центральную часть спектра. При этом в изображении объекта останется "узнаваемым", т.к. потерянной высокочастотной части содержалась информация только о мелких деталях. Из рис. 5 видно, что для сохранения данного эффекта размера фильтра должен не превышать размеров спектрального кольца, который пропорционален параметру аксикона  $\alpha$ .

В табл. 3 приведены результаты моделирования двухлинзовой изображающей системы и

действие теневого фильтра при наличии и отсутствии аксикона.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ действия осесимметричных оптических элементов в параксиальном приближении показал, что параболическая линза в этом случае является оптимальным изображающим оптическим элементом. Любые другие отдельные оптические элементы, не имеющие квадратичной зависимости от радиуса, не смогут формировать изображение столь четко, как это делает линза, компенсируя импульсный отклик свободного пространства.

Однако однолинзовая изображающая система характеризуется очень короткой глубиной фокуса, а наличие квадратичного фазового множителя в плоскости изображения что приводит к быстрой деградации изображения при продольном смещении. Использование дополнительных элементов позволяет удлинить область приемлемого формирования изображения. При этом численное моделирование показало, что компенсация фазового набега с помощью еще одной параболической линзы, не является оптимальной для удлинения отрезка сохранения изображения. В этом случае лучше использовать осесимметричный фазовый элемент с линейной зависимостью от радиуса - аксикон.

В работе также рассмотрены дополнительные фазовые оптические элементы с другой сте-

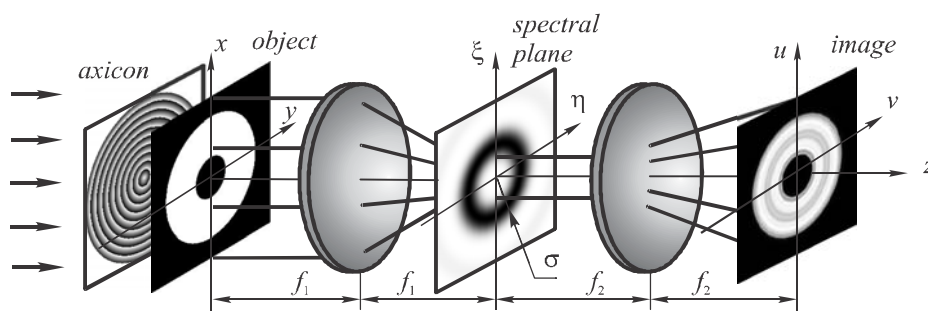


Рис. 4. Двухлинзовая изображающая система, дополненная в плоскости объекта аксиконом

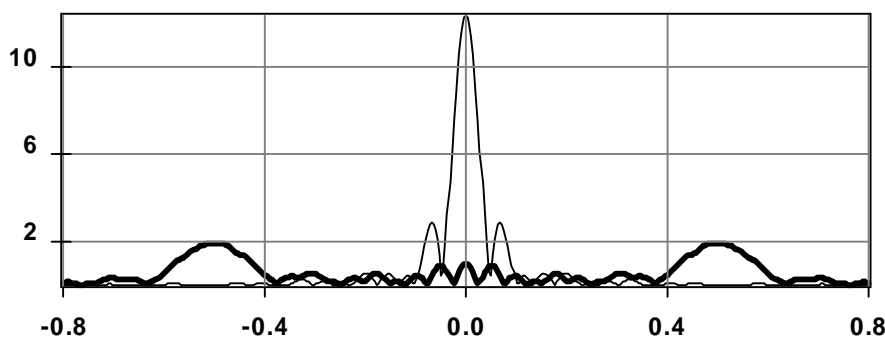


Рис. 5. Распределение амплитуды в спектральной плоскости: для обычного объекта (тонкая линия) и при дополнении аксиконом (толстая линия)

**Таблица 3.** Сравнение действия теневого фильтра в 2-х линзовой изображающей системе

	Топология распределения интенсивности (негатив) $z \in [50 \text{ мм}, 500 \text{ мм}], x \in [-2 \text{ мм}, 2 \text{ мм}]$	Изображение: интенсивность, фаза и радиальное сечение
Обычная схема		
Теневой фильтр		
Дополнение аксиконом		
Теневой фильтр при дополнении аксиконом		

пенной зависимостью от радиуса, в том числе дробной – фраксиконы. Численно показано, что в этом случае среднеквадратичное отклонение изображения от объекта меньше, чем при использовании дополнительной линзы.

Введение аксикона в объектную плоскость изображающей системы позволяет несколько компенсировать искажающее действие препятствий, расположенных на оптической оси за счет еще одного свойства аксикона – отклонять свет в от оптической оси в кольцевую область.

Способность аксикона перераспределять энергию в высокие частоты также рассмотрена в двухлинзовой изображающей системе. В этом

случае действие теневого фильтра, расположенного в спектральной плоскости, обычно используемого для выделения высокочастотной информации, приводит к ее потере.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке российско-американской программы «Фундаментальные исследования и высшее образование» (грант CRDF PG08-014-1), грантов РФФИ 10-07-00109-а, 10-07-00438-а и гранта Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-7414.2010.9.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *McLeod J.H.* The axicon: a new type of optical element // *J. Opt. Soc. Am.* 44, 592–592 (1954).
2. *McLeod J.H.*, Axicons and their uses // *J. Opt. Soc. Am.* 50, 166-169 (1960).
3. *Mikuia G., Kolodziejczyk A., Makowski M., C.Prokopowicz, Sypek M.* Diffractive elements for imaging with extended depth of focus // *Optical Engineering* 44(5), 058001-7pp (2005).
4. *Moshfeghi M.* Sidelobe suppression in annular array and axicon imaging systems // *J. Acoust. Soc. Am.* 83 (6), 2202-2209 (1988).
5. *Arimoto R., Saloma C., Tanaka T., Kawata S.* Imaging properties of axicon in a scanning optical system // *Applied Optics* (1992). Vol. 31. No. 31, 6653-6657
6. *Сороко Л.М.* Мезооптика и методика трековых детекторов // *Физика элементарных частиц и атомного ядра.* 1989. Т. 20. Вып. 1. С. 155-197.
7. *Zalevsky Z.* Extended depth of focus imaging: a review, *SPIE Reviews.* Vol. 1, (2010) 018001-1-11.
8. *Dowski E.R., Jr., and Cathey W.T.* Extended depth of field through wave-front coding // *Applied Optics.* Vol. 34. No. 11. 1859-1866 (1995).
9. *Хонина С.Н., Волотовский С.Г.* Фраксикон – дифракционный оптический элемент с конической фокальной областью // *Компьютерная оптика.* 2009. № 33(4), С. 401-411.
10. *Biss D.P., Youngworth K.S., Brown T.G.* Dark-field imaging with cylindrical-vector beams // *Appl. Opt.* 45(3). 470-479 (2006)

**AXICONS APPLICATION IN IMAGING SYSTEMS  
FOR INCREASING DEPTH OF FOCUS**

© 2011 S.N. Khonina<sup>1</sup>, D.A. Savelyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institution of Russian Academy of Sciences, Image Processing Systems Institute of RAS, Samara

<sup>2</sup>Samara State Aerospace University

The analysis of imaging abilities of axially symmetric optical elements within the limits of paraxial approach is executed. It is shown, that the optical elements which are not having square-law dependence on radius, cannot form the precise image in one plane as it is doing by a lens, compensating propagation in free space. However the one-lens imaging system is characterized by very short depth of focus which can be effectively extended by an additional optical element, for example, an axicon. Also it is possible to improve quality of the image using of additional phase optical elements with other dependence on radius, including fractional (fracxicon). Inserting an axicon in an objective plane of imaging system allows to compensate a little negative action of the obstacles located on optical axis.

Keywords: imaging system, extended depth of focus, axicon, fracxicon, spectral redistribution

---

*Svetlana Khonina, Leading Researcher, Doctor of Physics and Mathematics, Professor. E-mail: khonina@smr.ru.*

*Dmitry Savelyev, Graduate Student.*

*E-mail: d.a.savelev@mail.ru*