

ЭЙРИ-ПОДОБНЫЕ ДВУМЕРНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

© 2010 С. Н. Хонина

Институт систем обработки изображений РАН

В работе рассмотрено преобразование Фурье от фазовых функций, зависящих от кубической степени аргументов, для формирования двумерных Эйри-подобных распределений. Рассмотрены вихревые пучки Эйри, радиальная составляющая которых выражается через усечённые по n -му корню или экстремуму функции Эйри.

Усечённые функции Эйри, зеркальные функции Эйри, вихревые пучки, астигматическое преобразование, орбитальный угловой момент.

Волновые пакеты Эйри, рассмотренные в конце семидесятых годов прошлого века в контексте квантовой механики [1] как волновые объекты, распространяющиеся по изогнутой траектории, привлекли в последнее время повышенный интерес учёных-оптиков. Интерес возник в связи с успешной физической генерацией «ускоряющихся» лазерных пучков [2], согласованных с функциями, названными в честь астронома 19-го века Джорджа Эйри.

Функции Эйри являются бесконечно протяжёнными: экспоненциально спадая при положительных значениях аргумента, при отрицательных значениях, подобно бесселевым функциям, демонстрируют осциллирующий характер с плохо затухающей амплитудой [3], поэтому для их физической реализации требуется усечение. В статье [2] были рассмотрены пучки Эйри с конечной энергией, представляющие собой произведение классической моды Эйри и экспоненциальной функции, а в работе [4] получена обобщённая формула, описывающая параксиальное прохождение эйри-гауссовых пучков через оптическую ABCD-систему.

Хотя умножение на гауссовую или экспоненциальную функцию (в последнем случае Фурье-образ пропорционален гауссовой функции) позволяет достаточно просто формировать такие пучки с помощью пространственного модулятора света, освещённого лазерным излучением, в обоих случаях формируемые пучки фак-

тически перестают быть бездифракционными, хотя приблизительно сохраняют свой вид до некоторого расстояния.

В работе [5] был рассмотрен иной способ усечения бесконечной моды Эйри – с помощью прямоугольной апертуры, усекающей функцию в положительной части аргумента при спадении её практически до нуля, а в отрицательной части – до n -го нуля. Аналогичное «усечённое» распределение Эйри формируется в поперечном сечении мод лазеров «шепчущей галереи» [6-8]. В статье [5] проводилось сравнение степени расходимости трёх типов усечённых пучков Эйри: экспоненциальных, гауссовых и просто ограниченных диафрагмой – и было численно показано, что в последнем случае осциллирующая структура пучка и чётко выделенный максимум интенсивности сохраняется гораздо дольше, чем в двух первых.

В работе [9] обсуждались результаты экспериментального формирования таких пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ). При этом с помощью параметров кодирования варьировался энергетический вклад высокочастотных составляющих формируемого пучка и продемонстрирована генерация распределения, бесконечно долго сохраняющего концентрацию энергии в узком боковом лепестке. В дальней зоне к основному лепестку добавляется симметричный. Именно такой пучок был использован для захвата полистироловых мик-

рошариков и выстраивания их в ряд. Также лазерные пучки Эйри использовались и для других типов оптического манипулирования микрочастицами [10, 11].

Среди других бездифракционных мод пучки Эйри выделяются особым свойством «ускорения», которое при распространении в свободном пространстве проявляется как отклонение от прямолинейной траектории по параболическому закону [2, 12-14].

В работах [15, 16] было рассмотрено обобщённое семейство двумерных «ускоряющихся» пучков на основе пучков Эйри и параболических пучков и способы их генерации. В этом случае двумерный пучок представляется как произведение одномерного пучка Эйри (или параболического) и любого другого одномерного распределения.

Аналогичный двумерный составной пучок Эйри-Эрмита-Гаусса рассмотрен в работах [6-8, 17], где показано, что в дальней зоне дифракции после выхода лазерной моды из резонатора в свободное пространство пучок Эйри можно аппроксимировать набором смещённых гауссовых пучков различной ширины в соответствии с осцилляциями пучка Эйри. При этом расходимость пучка Эйри в дальней зоне будет такой же, как у гауссового пучка.

В работе [18] был рассмотрен новый тип пучков Эйри, сформированных в фокальной плоскости линзы при дифракции на круглой апертуре сферической волны, модифицированной кубической фазой. Такие пучки долго сохраняют хорошо выраженный максимальный пик, распространяющийся по параболической траектории.

Хотя пучки Эйри являются решением параксиального волнового уравнения, всё чаще рассматривается их распространение в условиях широких углов расходимости и даже в зоне затухающих волн [19, 20].

В работе [21] предложен к рассмотрению новый тип – «зеркальные» пучки Эйри, представляющие собой сумму двух усечённых по n -му нулю (или экстремуму) смещённых функций Эйри, одна из

функций при этом зеркально отражённа. Вид таких пучков Эйри напоминает моды Эрмита-Гаусса. Спектр зеркальных пучков Эйри описывается косинусной функцией от нелинейного аргумента (с кубической и линейной зависимостью). При распространении зеркальные пучки Эйри демонстрируют симметричное «ускорение» в противоположные стороны, т.е. расходимость, пропорциональную квадрату пройденного расстояния.

В данной работе рассмотрен аналогичный (зеркальный) подход для синтеза двумерных эйри-подобных распределений, в сечении которых по некоторому направлению можно «распознать» саму функцию Эйри или преобразование над ней.

При использовании фазовой функции с кубической зависимостью от радиуса наблюдается фокусировка освещающего излучения в набор локальных фокусов, между которыми может формироваться слабое световое пятно субволнового размера.

Также в работе рассмотрены вихревые пучки Эйри, радиальная составляющая которых выражается через усечённые по n -му корню или экстремуму ограниченные функции Эйри. При распространении такие пучки сохраняют выраженную кольцевую структуру, хотя соотношение радиусов колец меняется.

Астигматическое преобразование двумерных зеркальных пучков Эйри с индексами (n, m) позволяет получить квазикольцевые структуры, обладающие орбитальным угловым моментом.

1. Спектры от фазовых функций с кубической степенью аргументов

Известно [3], что одномерная функция Эйри представляет собой преобразование Фурье от фазовой функции с кубической степенью аргумента:

$$Ai(x) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3/3+xu)} du. \quad (1)$$

В выражении (1) использованы безразмерные аргументы. Для физических

параметров используются нормировочные коэффициенты.

Классически [2] двумерная функция Эйри определяется как произведение одномерных и может быть представлена через двумерное преобразование Фурье:

$$\begin{aligned}
 Ai(x) Ai(y) &= \\
 &= \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3/3+xu)} du \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(v^3/3+yv)} dv = \quad (2) \\
 &= \frac{1}{4} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{i(u^3+v^3)/3} e^{i(xu+yv)} du dv.
 \end{aligned}$$

Ограничивая пределы в (2), можно приближенно формировать [21] двумерные функции Эйри.

На рис. 1 показаны результаты расчёта преобразования Фурье от фазового распределения с кубической степенью $e^{ia(u^3+v^3)}$, $a=1/3$ для безразмерных аргументов $u \in [-5,5]$, $v \in [-5,5]$. На рис. 1а видно, что функция Эйри модулирована sinc-функцией из-за ограничения области в спектре. Улучшить воспроизведение пучков, согласованных с функциями Эйри, можно либо увеличением области ограничения, либо повышением дискретизации (при соответствующем увеличении коэффициента a) [21].

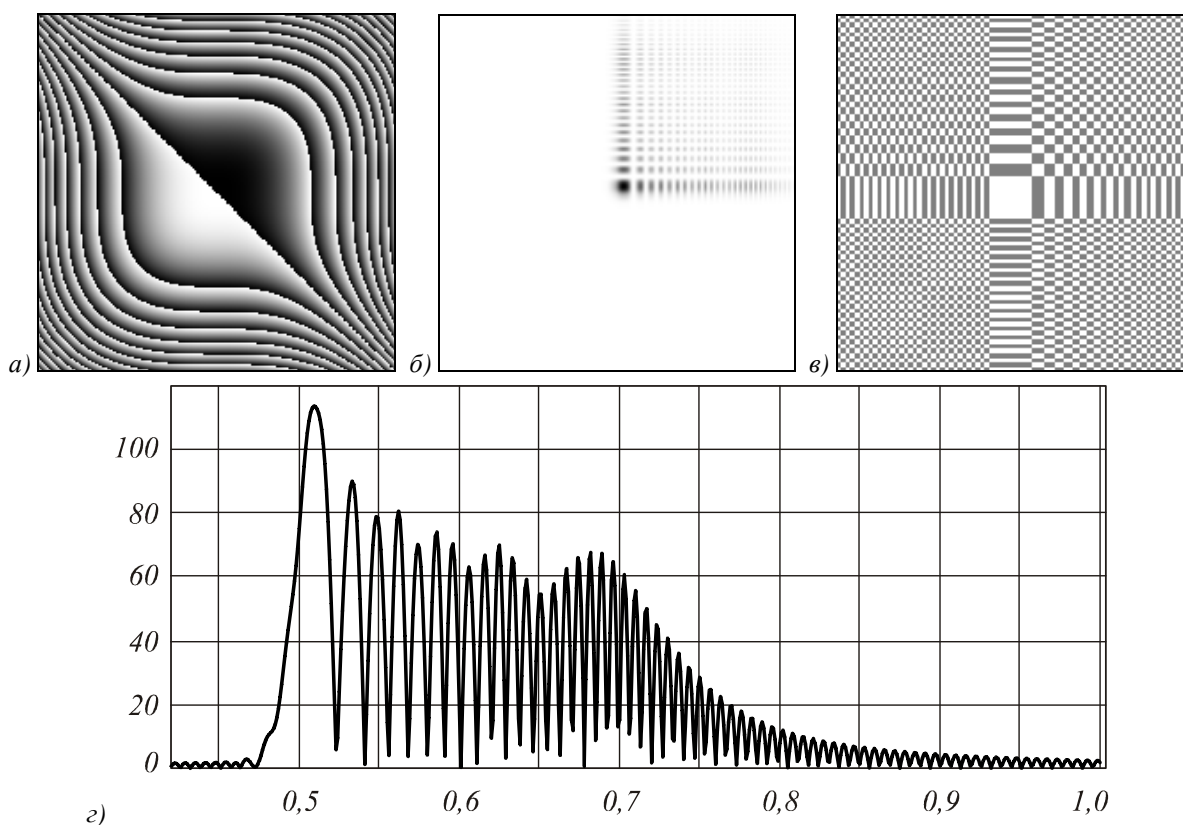


Рис. 1. Преобразование Фурье от фазового распределения с кубической степенью вида $e^{i(u^3+v^3)/3}$ (а): интенсивность (б) и фаза (в), а также сечение амплитуды вдоль оси Ox (г)

Также известно [22], что для положительных x выполняется соотношение

$$Ai^2(x) = \frac{1}{4\sqrt{3}} \int_0^{\infty} J_0\left(\frac{t^3}{12} + xt\right) t dt. \quad (3)$$

Учитывая известное интегральное выражение для бесселевых функций:

$$J_m(z) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \exp(iz \cos \theta) \exp(im\theta) d\theta, \quad (4)$$

вместо (3) можно записать:

$$Ai^2(x) = \frac{1}{8\sqrt{3}} \int_0^{\infty} \int_0^2 \exp\left[i\left(t^3/12 + xt\right) \cos\left(\frac{2(x^3 - y^3)}{3}\right)\right] dt, \quad (5)$$

или в полярных координатах:

$$Ai^2(r \cos \theta) = \frac{1}{8\sqrt{3}} \int_0^{\infty} \int_0^2 \exp\left\{i\frac{r^3}{12} \cos^3(\theta - \phi)\right\} \times \exp\{i r \cos(\theta - \phi)\} d\phi r, \quad (6)$$

что соответствует двумерному преобразованию Фурье (ПФ) от фазовой функции вида

$$(r, \theta) = \exp\{ic^3 \cos^3 \theta\}. \quad (7)$$

При различных значениях угла θ в (7) в спектральной плоскости будут производиться различные эйри-подобные функции (табл. 1), например, при $\theta = 0$

$$(u, v) = \exp\{ic(u^3 + v^2u)\}. \text{ Аналогично (с точностью до поворота) можно получить выражение через функцию Эйри, для } (u, v) = \exp\{ic(u^2v + v^3)\}.$$

Также известна аппроксимация функций Эйри для больших отрицательных значений аргумента:

$$Ai(-z) \approx \frac{1}{\sqrt{z}} \sin\left(\frac{2z^{3/2}}{3} + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{48z^{3/2}} \cos\left(\frac{2z^{3/2}}{3} + \frac{\pi}{4}\right), \quad (8)$$

откуда следует, что

$$Ai(-x^2)Ai(-y^2) \approx \left\{ \frac{1}{\sqrt{x}} \sin\left(\frac{2x^3}{3} + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{48x^3} \cos\left(\frac{2x^3}{3} + \frac{\pi}{4}\right) \right\} \times \left\{ \frac{1}{\sqrt{y}} \sin\left(\frac{2y^3}{3} + \frac{\pi}{4}\right) - \frac{1}{48y^3} \cos\left(\frac{2y^3}{3} + \frac{\pi}{4}\right) \right\}. \quad (9)$$

Это выражение можно привести к виду

$$Ai(-x^2)Ai(-y^2) \approx c_1(x, y) \cos\left(\frac{2(x^3 - y^3)}{3}\right) + c_2(x, y) \sin\left(\frac{2(x^3 - y^3)}{3}\right) + c_3(x, y) \sin\left(\frac{2(x^3 + y^3)}{3}\right) + c_4(x, y) \cos\left(\frac{2(x^3 + y^3)}{3}\right). \quad (10)$$

Таким образом, ПФ от суперпозиции функций вида $e^{ic(u^3 \pm v^3)}$ соответствует некоторой суперпозиции функций Эйри, имеющих квадратичную зависимость аргументов.

Если же аргументы комплексные, то зависимость будет ещё сложнее:

$$Ai(-z^2)Ai(-\bar{z}^2) = Ai(-(x+iy)^2)Ai(-(x-iy)^2) \approx \frac{\cos(4iy(4x^2 - y^2)/3) + \sin(4x(x^2 - 4y^2)/3)}{2(x^2 - y^2)^{1/2}} + \frac{\cos(4iy(4x^2 - y^2)/3) - \sin(4x(x^2 - 4y^2)/3)}{48^2(x^2 - y^2)^3} + \frac{\sin(4iy(4x^2 - y^2)/3) + \cos(4x(x^2 - 4y^2)/3)}{48\sqrt{-z^5}(x^2 - y^2)^{1/2}} + \frac{\sin(4iy(4x^2 - y^2)/3) - \cos(4x(x^2 - 4y^2)/3)}{48\sqrt{z^5}(x^2 - y^2)^{1/2}}. \quad (11)$$

В табл. 1 показаны эйри-подобные распределения, которые можно формировать с помощью ПФ от чисто фазовых функций, зависящих от кубической степени аргументов.

2. Радиальные функции Эйри

2.1. Фазовая функция с кубической зависимостью от радиуса

В полярных координатах выражение (1) записывается следующим образом:

$$Ai(r \cos \varphi) Ai(r \sin \varphi) = T(r, \varphi) = \frac{1}{4} \int_0^2 \int_0^2 e^{i^3(\cos^3 \varphi + \sin^3 \varphi)/3} e^{ir \cos(\varphi - \varphi')} d\varphi d\varphi'. \quad (12)$$

Обратное ПФ от (12):

$$4 \int_0^2 \int_0^2 T(r, \varphi) e^{-ir \cos(\varphi - \varphi')} r dr d\varphi = e^{i^3(\cos^3 \varphi + \sin^3 \varphi)/3} \quad (13)$$

можно рассмотреть при различных фиксированных значениях параметра

$$= (\cos^3 \varphi_0 + \sin^3 \varphi_0) / 3, \text{ где } \varphi_0 = \text{const}.$$

Тогда выражение (13) можно переписать:

$$4 \int_0^2 \int_0^2 T(r, \varphi) e^{-ir \cos(\varphi - \varphi_0)} r dr d\varphi = e^{i^3 \varphi_0}. \quad (14)$$

Рассмотрим преобразование Ханкеля от обеих частей:

$$\int_0^\infty e^{i^3 \varphi_0} J_0(\varphi) d\varphi = c \int_0^\infty \left(\int_0^\infty (r) J_0(\varphi) d\varphi \right) r dr, \quad (15)$$

где

$$(r) = \int_0^2 T(r, \varphi) e^{-i r \cos \varphi} d\varphi. \quad (16)$$

Напомним, что функция $T(r, \varphi)$ в (16) выражается через произведение функций Эйри.

На рис. 2 показано формирование лазерного пучка с длиной волны $\lambda = 1 \text{ мкм}$ с помощью осесимметричного фазового распределения $\exp[i^3(\cos^3 \varphi + \sin^3 \varphi)/3]$, где $\varphi_0 = 0,01$, $\varphi \in [0, 10]$. Сечение при $z = 3,5$ (рис. 2в) соответствует локальному максимуму на оптической оси с шириной центрального пятна по уровню полуспада интенсивности $\text{FWHM} = 0,656$, а сечение при $z = 12$ (рис. 2г) соответствует локальному осевому минимуму, в котором, однако, находится слабое световое пятно с $\text{FWHM} = 0,446$, что меньше дифракционного предела ($\text{FWHM} = 0,51$), причём в зоне распространяющихся волн.

В фокусе (при $z = 27$, рис. 2д) световое пятно имеет максимальное значение интенсивности, а его размер $\text{FWHM} = 1,41$.

2.2. Функции Эйри от радиальной координаты

Как видно из результатов моделирования, с помощью осесимметричной кубической фазы не удаётся получить эйри-подобное распределение, сохраняющее свою структуру.

Однако можно рассмотреть поле с зависимостью от радиуса в виде усечённой по n -му корню или экстремуму и сдвинутой функции Эйри [21] и вихревой зависимостью от полярного угла $\exp(im \varphi)$:

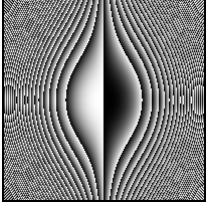
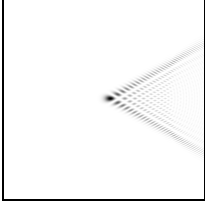
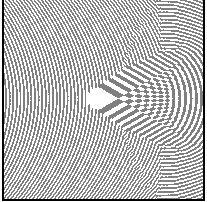
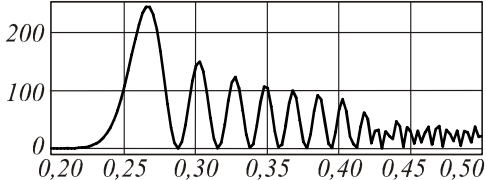
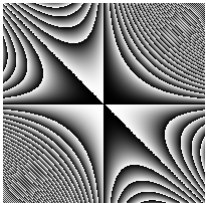
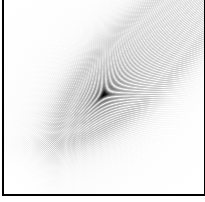
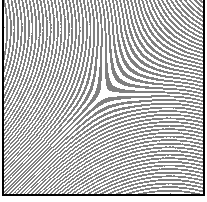
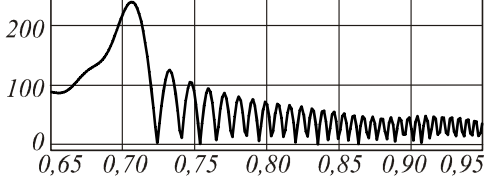
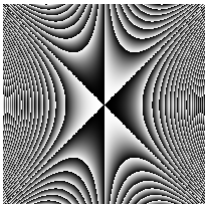
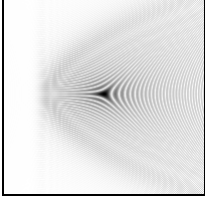
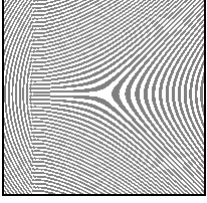
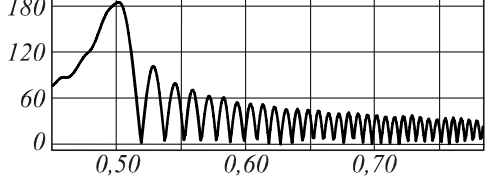
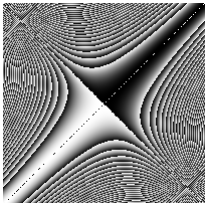
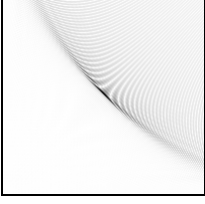
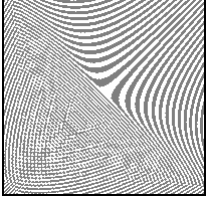
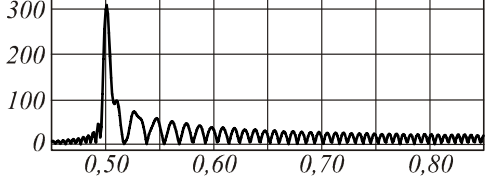
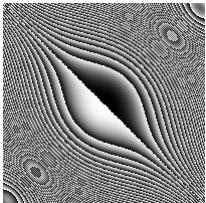
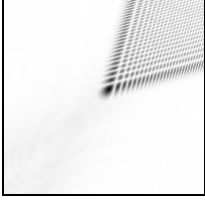
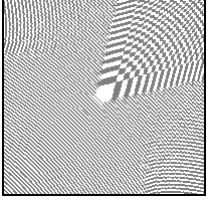
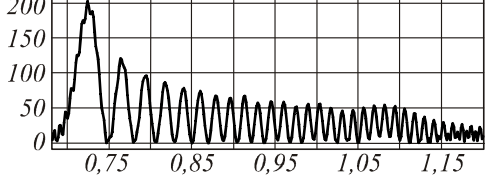
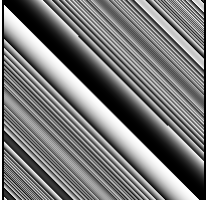

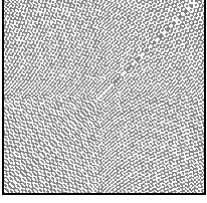
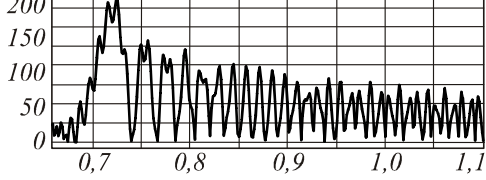
$$Ai_{n,m}^z(r, \varphi) = Ai \left(c \frac{r - r_n^z}{|r_n^z| + r_0} \right) \exp(im \varphi), \quad (17)$$

$$Ai_{n,m}^e(r, \varphi) = Ai \left(c \frac{r - r_n^e}{|r_n^e| + r_0} \right) \exp(im \varphi), \quad (18)$$

где r_n^z – соответствует координате n -го корня (нуля), а r_n^e – соответствует координате n -го экстремума функции Эйри, $r_0 = 5$ – правая граница усечения функции Эйри.

На рис. 3 показано распространение лазерного пучка ($\lambda = 633 \text{ нм}$), согласованного с вихревой функцией Эйри $Ai_{21,1}^z(r, \varphi)$. Такая структура достаточно долго сохраняется при распространении в свободном пространстве, однако при этом происходит перераспределение энергии между центральной и периферийной частью. Также на рис. 3г видно, что в дальней зоне дифракции зависимость функции от радиуса меняется нелинейно.

Таблица 1. Эйри-подобные распределения, производимые двумерными фазовыми функциями, имеющими кубическую степень аргументов

Вид фазовой функции, $u, v \in [-7, 7]$	Эйри-подобное распределение: амплитуда, фаза и сечение вдоль указанного направления		
$e^{i(u^2+v^2)u/3}$ 			
$e^{i(u+v)uv/3}$ 			
$e^{i(u^2-v^2)u/3}$ 			
$e^{i(u^2-v^2)(u-v)/3}$ 			
$e^{i(u^2+v^2)(u+v)/3}$ 			
$e^{i(u+v)^3/3}$ 			

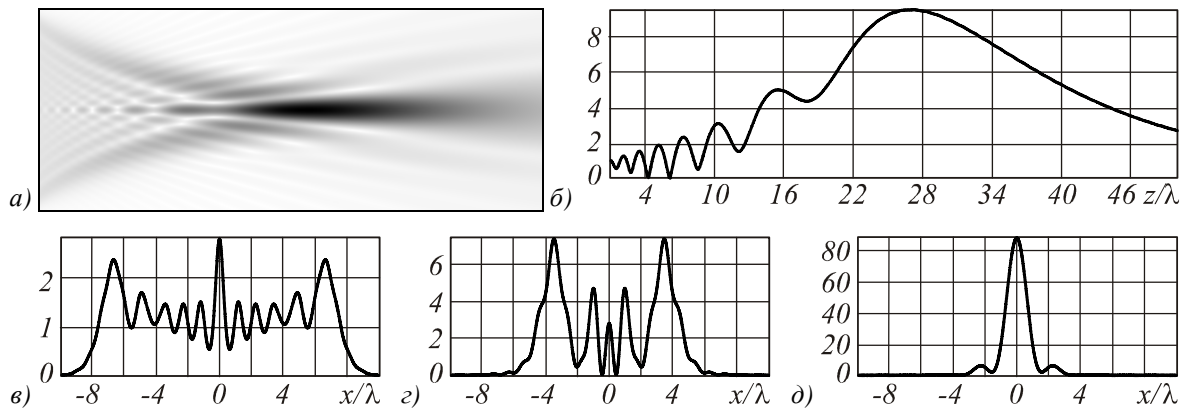


Рис. 2. Формирование пучка с помощью осесимметричного фазового распределения $\exp[i(\dots)^3]$: распределение амплитуды в плоскости $y = 0$ в области $z \in [1, 50]$, $x \in [-10, 10]$ (а) и вдоль оптической оси $z \in [1, 50]$ (б), а также сечения интенсивности в плоскостях на расстоянии $z = 3,5$ (в), $z = 12$ (г), $z = 27$ (д) от входной плоскости

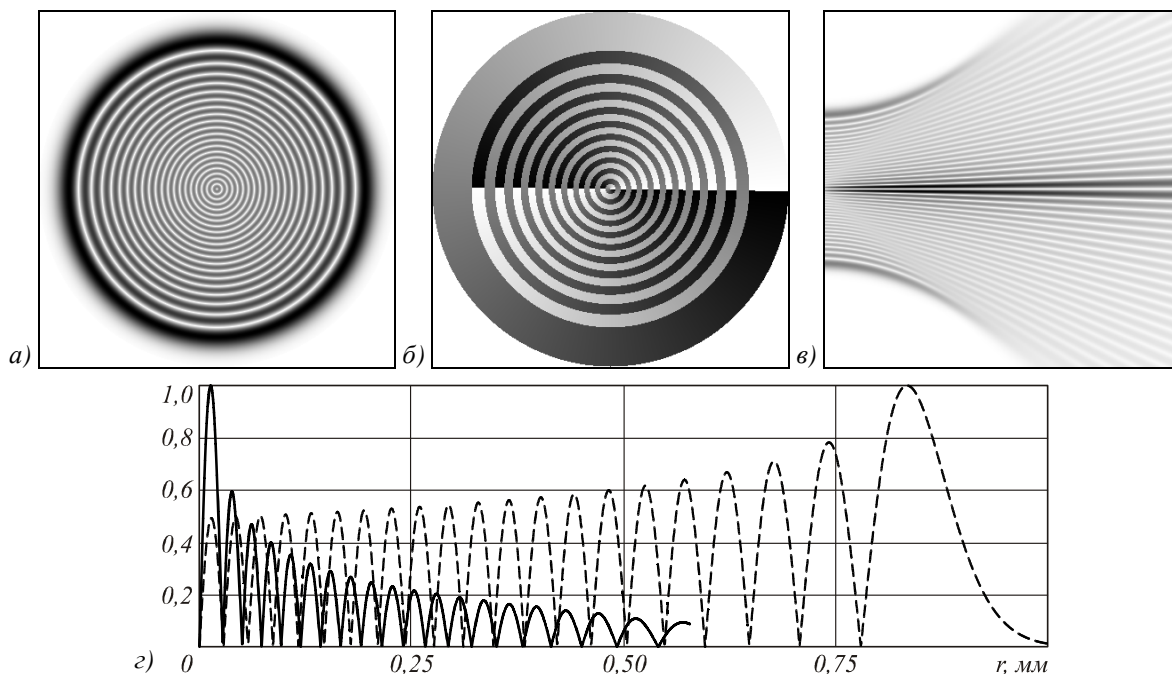


Рис. 3. Распространение вихревого пучка, согласованного в радиальном сечении с усечённой функцией Эйри $Ai_{21,1}^z(r, \dots)$: амплитуда (а) и фаза (б) на входе, распределение амплитуды в плоскости $y = 0$ в области $z \in [5 \text{ мм}, 300 \text{ мм}]$, $x \in [-2 \text{ мм}, 2 \text{ мм}]$ (в), нормированные радиальные сечения амплитуды на входе (пунктирная линия) и в фокальной плоскости (сплошная линия) (г)

Назовем распределения (17) и (18) вихревыми пучками Эйри.

На рис. 4 показано преобразование Фурье пучка, согласованного с осесимметричной функцией Эйри-Гаусса:

$$\exp(-r^2 / \dots^2) Ai_{21,0}^e(r, \dots),$$

где \dots – радиус перетяжки гауссового пучка. Как видно на радиальном сечении (рис. 4в), амплитуда пучка имеет огибающую, практически равную постоянному

значению. На рис. 4г показано радиальное сечение амплитуды пучка после преобразования Фурье (пунктирная линия) и, для сравнения, распределение амплитуды моды Лагерра-Гаусса с индексами (20, 0).

2.3. Астигматическое преобразование зеркальных функций Эйри

Зеркальные функции Эйри были введены в работе [21] как суперпозиция усечённых по n -му нулю (или экстремуму-

му) смещённых и зеркально отражённых функций Эйри:

$$Ai_n^{\{z,e\}}(x) = Ai_n \left(\frac{c(x + x_n^{\{z,e\}})}{|x_n^{\{z,e\}}| + x_0} \right) + (-1)^{n-1} Ai_n \left(\frac{-c(x + x_n^{\{z,e\}})}{|x_n^{\{z,e\}}| + x_0} \right), \quad (19)$$

где $x_n^{\{z,e\}}$ – соответствует координате n -го корня (нуля) или экстремума функции Эйри, $x_0 = 5$ – правая граница усечения функции Эйри.

Пространственный спектр таких распределений представляет собой косинусную функцию с кубической и линейной зависимостью $\cos(au^3 - bu)$ [21].

Следовательно, пространственный спектр двумерной зеркальной функции Эйри:

$$\Psi_{n,m}^{\{z,e\}}(x, y) = Ai_n^{\{z,e\}}(x) Ai_m^{\{z,e\}}(y) \quad (20)$$

можно представить как произведение двух косинусных функций:

$$S(u, v) = \cos(au^3 - bu) \cos(cv^3 - dv) \quad (21)$$

или суперпозицию фазовых функций с кубической и линейной зависимостью от аргументов, где линейная составляющая отвечает за смещение в объектной плоскости.

В [23] было рассмотрено астигматическое преобразование пучков Эрмита-Гаусса в пучки Лагерра-Гаусса, которое можно применить и к двумерным зеркальным функциям Эйри (20).

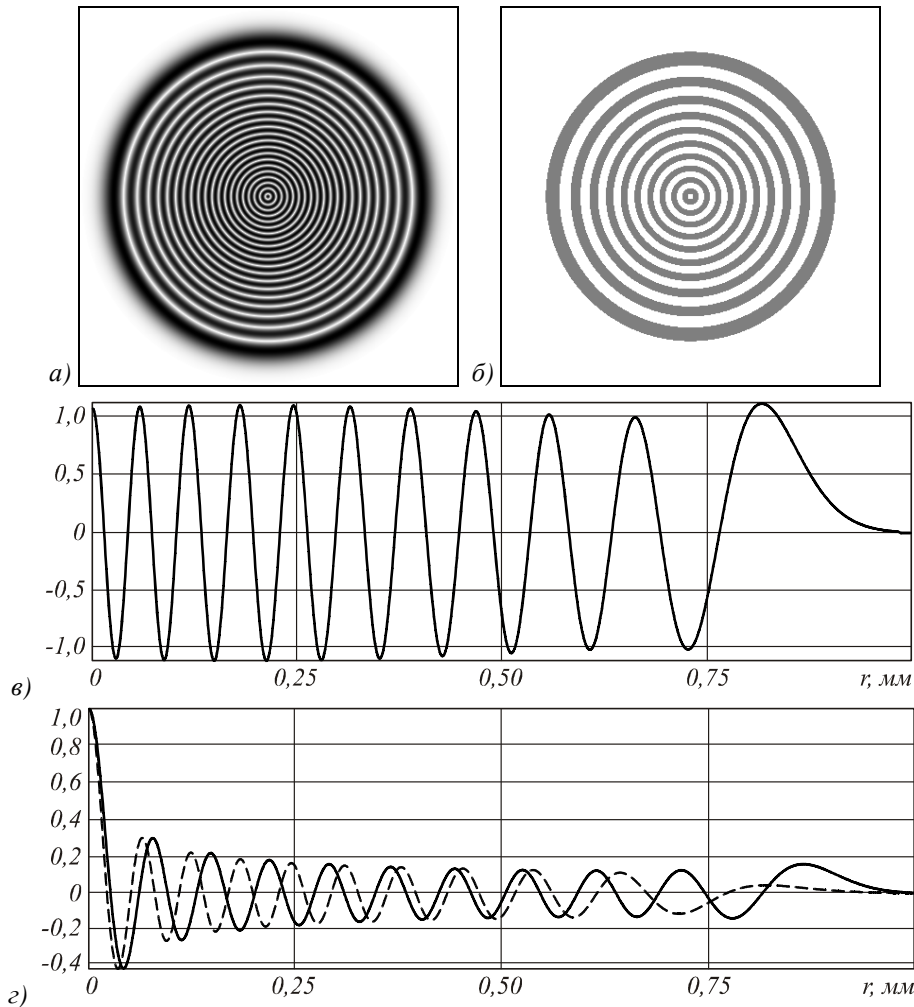


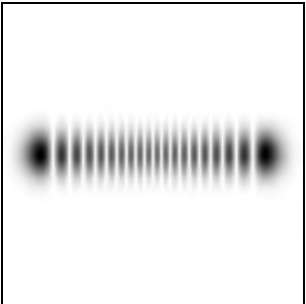
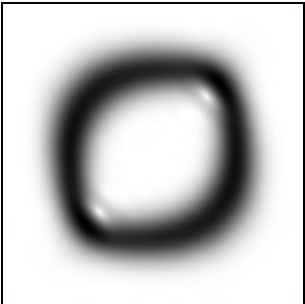
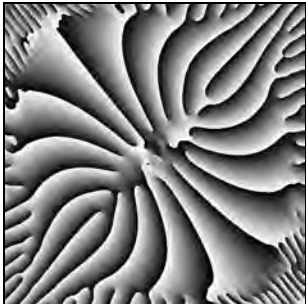
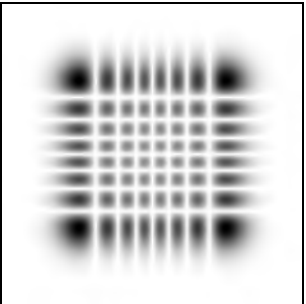
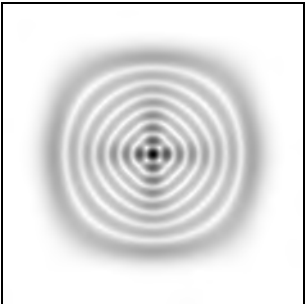

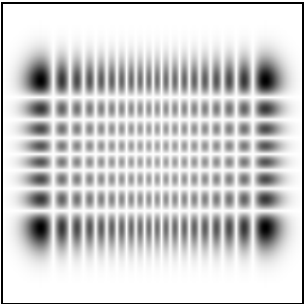
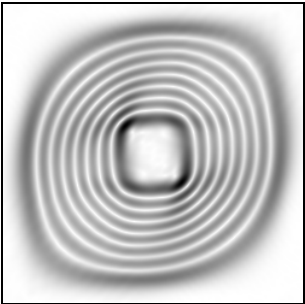
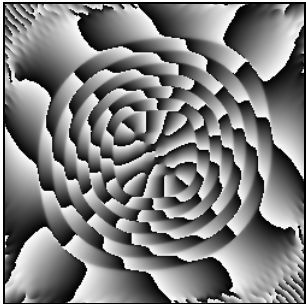
Рис. 4. Пучок, согласованный с функцией Эйри-Гаусса $\exp(-r^2 / \dots) Ai_{21,0}^e(r, \dots)$: амплитуда (а) и фаза (б) на входе, радиальное сечение амплитуды на входе (в), нормированные радиальные сечения амплитуды пучка Эйри-Гаусса (21, 0) после преобразования Фурье (пунктирная линия) и моды Лагерра-Гаусса (20, 0) (сплошная линия) (г)

В табл. 2 приведены результаты астигматического преобразования некоторых двумерных зеркальных функций Эйри.

Как видно из табл. 2, аналогично преобразованию мод Эрмита-Гаусса, астигматическое преобразование зеркальных пучков Эйри позволяет получать квази-

кольцевые структуры, внутри которых происходит $2(n - m)$ переходов фазы через 2π , что соответствует наличию орбитального углового момента соответствующего порядка.

Таблица 2. Примеры астигматического преобразования зеркальных функций Эйри

Входная функция: распределение амплитуды	Результат преобразования: распределение амплитуды и фазы	
$\Psi_{10,0}^z(x, y)$ 		
$\Psi_{4,4}^z(x, y)$ 		
$\Psi_{10,4}^z(x, y)$ 		

Заключение

В работе рассмотрено преобразование Фурье от фазовых функций, зависящих от кубической степени аргументов, для формирования двумерных эйри-подобных распределений.

При использовании фазовой функции с кубической зависимостью от радиуса наблюдается фокусировка освещающего излучения в набор локальных фокусов, между

которыми может формироваться слабое световое пятно субволнового размера.

Также в работе на основе моделирования с использованием непараксиального оператора распространения показано, что вихревые пучки, радиальная составляющая которых выражается через усеченные по n -му корню или экстремуму функции Эйри, бесконечно долго сохраняют выраженную кольцевую структуру. При этом происходит перетекание

энергии из периферийных колец в центральные, а также наблюдается нелинейное преобразование по радиальной координате.

Астигматическое преобразование двумерных зеркальных пучков Эйри с индексами (n, m) позволяет получать квазикольцевые структуры. При замкнутом обходе по каждому квазикольцу происходит $2(n-m)$ переходов фазы через 2π , что соответствует наличию орбитального углового момента соответствующего порядка.

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.

Библиографический список

1. **Berry, M.V.** Nonspreiding wave packets [Text] / M.V. Berry, N.L. Balazs // Am. J. Phys. – 1979. – V. 47(3). – P. 264-267.
2. **Siviloglou, G.A.** Accelerating finite energy Airy beams [Text] / G.A. Siviloglou, D.N. Christodoulides // Opt. Letters. – 2007. – V. 32(8). – P. 979-981.
3. **Abramowitz, M.** Handbook of Mathematical Functions [Text] / M. Abramowitz and I.A. Stegun – Courier Dover Publications, 1972. – 1046 p.
4. **Banders, M.A.** Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems [Text] / M.A. Banders, J.C. Gutierrez-Vega // Opt. Express. – 2007. – V. 15(25). – P. 16719-16728.
5. **Хонина, С.Н.** Ограниченные 1D пучки Эйри: лазерный веер [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Волотовский // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32, № 2. – С. 168-174.
6. **Marhic, M.E.** Whispering-Gallery CO2 Laser [Text] / M.E. Marhic, L.I. Kwan, M. Epstein // IEEE J. Quant. Electr. – 1979. – QE-15(6). – P. 487-490.
7. **Grossman, J.G.** Radio-frequency-excited carbon dioxide metal waveguide laser [Text] / J.G. Grossman, L.W. Casperson, and O.M. Stafsudd // App. Opt. – 1983. – V. 22(9). – P. 1298-1305.
8. **Al-Mashaabi, F.S.** Direct current-excited CW CO2 metal waveguide laser [Text] / F.S. Al-Mashaabi and L.W. Casperson // App. Opt. – 1989. – V. 28(10). – P. 1899-1903.
9. **Хонина, С.Н.** Формирование лазерных пучков Эйри с помощью бинарно-кодированных дифракционных оптических элементов для манипулирования микрочастицами [Текст] / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, О.Ю. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 2. – С. 138-146.
10. **Baumgartl, J.** Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets [Text] / J. Baumgartl, M. Mazilu and K. Dholakia // Nat. Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 675–678.
11. **Baumgartl, J.** Optical redistribution of microparticles and cells between microcells [Text] / J. Baumgartl, G. Hannappel, D.J. Stevenson, D. Day, M. Gu, and K. Dholakia // Lab on a Chip. – 2009. – V. 9. – P. 1334-1336.
12. **Besieris, I.M.** A note on an accelerating finite energy Airy beam / I.M. Besieris and A.M. Shaarawi // Opt. Lett. – 2007. – V. 32. – P. 2447-2449.
13. **Siviloglou, G.A.** Observation of accelerating Airy beams [Text] / G.A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, and D.N. Christodoulides // Phys. Rev. Lett. – 2007. – V. 99. – P. 213901.
14. **Saari, P.** Laterally accelerating Airy pulses [Text] / Peeter Saari // Optics express. – 2008. – Vol. 16, No. 14. – P. 10303-10308.
15. **Bandres, M.A.** Accelerating beams [Text] / Miguel A. Bandres // Optics Letters. – 2009. – Vol. 34, No. 24. – P. 3791-3793.
16. **Davis, J.A.** Generation of accelerating Airy and accelerating parabolic beams using phase-only patterns [Text] / Jeffrey A. Davis, Mark J. Mitry, Miguel A. Bandres,

Isaac Ruiz, Kevin P. McAuley, and Don M. Cottrell // *Applied optics*. – 2009. – Vol. 48, No. 17. – P. 3170-3176.

17. **Grossman, J.G.** Propagation of Airy-Hermite-Gaussian waveguide modes in free space [Text] / Jonathan G. Grossman, Lee W. Casperson, Oscar M. Stafsudd, and Leroy V. Sutter, Jr. // *Applied optics*. – 1984. – Vol. 23, No. 1. – P. 48-52.

18. **Carretero, L.** Nonparaxial diffraction analysis of Airy and SAiry beams [Text] / Luis Carretero, Pablo Acebal, Salvador Blaya, Celia Garcia, Antonio Fimia, Roque Madrigal, Angel Murciano // *Optics express*. – 2009. – Vol. 17, No. 25. – P. 22432-22441.

19. **Novitsky, A.V.** Nonparaxial Airy beams: role of evanescent waves [Text] / A.V. Novitsky and D.V. Novitsky // *Optic*

Letters. – 2009. – Vol. 34, No. 21. – P. 3430-3432.

20. **Torre, A.** Airy beams beyond the paraxial approximation [Text] / A. Torre // *Optics Communications*. – 2010. – V. 283. – P. 4146–4165.

21. **Хонина, С.Н.** Зеркальные лазерные пучки Эйри [Текст] / С.Н. Хонина, С.Г. Вологовский // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 2. – С. 203-213.

22. **Vallee, O.** Airy functions and applications in physics [Text] / Vallee O., Soares M. // *Imperial College Press, London*, 2004. 194 p.

23. **Абрамочкин, Е.Г.** Спиральные пучки света [Текст] / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников // *Успехи физических наук*. – 2004. – № 12. – С. 1273-1300.

References

1. **Berry, M.V.** Nonspreiding wave packets / M.V. Berry, N.L. Balazs // *Am. J. Phys.* – 1979. – V. 47(3). – P. 264-267.

2. **Siviloglou, G.A.** Accelerating finite energy Airy beams / G.A. Siviloglou, D.N. Christodoulides // *Opt. Letters*. – 2007. – V. 32(8). – P. 979-981.

3. **Abramowitz, M.** *Handbook of Mathematical Functions* / M. Abramowitz and I.A. Stegun – Courier Dover Publications, 1972. – 1046 p.

4. **Banders, M.A.** Airy-Gauss beams and their transformation by paraxial optical systems / M.A. Banders, J.C. Gutierrez-Vega // *Opt. Express*. – 2007. – V. 15(25). – P. 16719-16728.

5. **Khonina, S.N.** Bounded 1D Airy beams: laser fan / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Computer Optics*. – 2008. – V. 32(2) – P. 168-174. – [in Russian].

6. **Marhic, M.E.** Whispering-Gallery CO2 Laser / M.E. Marhic, L.I. Kwan, M. Epstein // *IEEE J. Quant. Electr.* – 1979. – QE-15(6). – P. 487-490.

7. **Grossman, J.G.** Radio-frequency-excited carbon dioxide metal waveguide laser / J.G. Grossman, L.W. Casperson, and O.M. Stafsudd // *App. Opt.* – 1983. – V. 22(9). – P. 1298-1305.

8. **Al-Mashaabi, F.S.** Direct current-excited CW CO2 metal waveguide laser / F.S. Al-Mashaabi and L.W. Casperson // *App. Opt.* – 1989. – V. 28(10). – P. 1899-1903.

9. **Khonina, S.N.** Airy laser beams generation by binary-coded diffractive optical elements for microparticles manipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, O.Yu. Moiseev // *Computer Optics*. – 2009. – V. 33(2). – P. 138-146. – [in Russian].

10. **Baumgartl, J.** Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets / J. Baumgartl, M. Mazilu, and K. Dholakia // *Nat. Photonics*. – 2008. – Vol. 2. – P. 675–678.

11. **Baumgartl, J.** Optical redistribution of microparticles and cells between microcells / J. Baumgartl, G. Hannappel, D.J. Stevenson, D. Day, M. Gu, and K. Dholakia // *Lab on a Chip*. – 2009. – V. 9. – P. 1334-1336.

12. **Besieris, I.M.** A note on an accelerating finite energy Airy beam / I.M. Besieris and A.M. Shaarawi // *Opt. Lett.* – 2007. – V. 32. – P. 2447-2449.

13. **Siviloglou, G.A.** Observation of accelerating Airy beams / G.A. Siviloglou, J. Broky, A. Dogariu, and D.N. Christodoulides // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – V. 99. – P. 213901.

14. **Saari, P.** Laterally accelerating Airy pulses, / Peeter Saari // *Optics express*. – 2008. – Vol. 16, No. 14. – P. 10303-10308.
15. **Bandres, M.A.** Accelerating beams / Miguel A. Bandres // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34, No. 24. – P. 3791-3793.
16. **Davis, J.A.** Generation of accelerating Airy and accelerating parabolic beams using phase-only patterns / Jeffrey A. Davis, Mark J. Mitry, Miguel A. Bandres, Isaac Ruiz, Kevin P. McAuley, and Don M. Cottrell // *Applied optics*. – 2009. – Vol. 48, No. 17. – P. 3170-3176.
17. **Grossman, J.G.** Propagation of Airy-Hermite-Gaussian waveguide modes in free space / Jonathan G. Grossman, Lee W. Casperson, Oscar M. Stafsudd, and Leroy V. Sutter, Jr. // *Applied optics*. – 1984. – Vol. 23, No. 1. – P. 48-52.
18. **Carretero, L.** Nonparaxial diffraction analysis of Airy and SAiry beams, / Luis Carretero, Pablo Acebal, Salvador Blaya, Celia Garcia, Antonio Fimia, Roque Madrigal, Angel Murciano // *Optics express*. – 2009. – Vol. 17, No. 25. – P. 22432-22441.
19. **Novitsky, A.V.** Nonparaxial Airy beams: role of evanescent waves / A.V. Novitsky and D.V. Novitsky // *Optic Letters*. – 2009. – Vol. 34, No. 21. – P. 3430-3432.
20. **Torre, A.** Airy beams beyond the paraxial approximation // *Optics Communications*. – 2010. – V. 283. – P. 4146–4165.
21. **Khonina, S.N.** Mirror laser Airy beams / S.N. Khonina, S.G. Volotovskiy // *Computer Optics*. – 2010. – V. 34(2). – P. 203-213. – [in Russian].
22. **Vallee, O.** Airy functions and applications in physics / Vallee O., Soares M. // Imperial College Press, London, 2004. 194 p.
23. **Abramochkin, E.G.** Spiral light beams / E.G. Abramochkin, V.G. Volostnikov // *Usp. Phys. Nauk*. 2004. Vol. 12. C. 1273–1300. – [in Russian].

AIRY-LIKE TWO-DIMENSIONAL DISTRIBUTIONS

© 2010 S.N. Khonina

Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences

Fourier transformation from the phase functions depending on a cubic degree of arguments for formation of two-dimensional Airy-like distributions is considered. Vortical Airy beam which radial component is expressed through truncated on n-th root or extremum of Airy function are considered.

Truncated Airy functions, mirror Airy functions, vortical beams, astigmatic transformation, orbital angular momentum.

Информация об авторах

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник. Институт систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: *khonina@smr.ru*

Khonina Svetlana Nikolaevna, doctor of physical and mathematical sciences, professor, leading researcher. Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Area of research: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: *khonina@smr.ru*.

ВЕСТНИК
САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АЭРОКОСМИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
имени академика С. П. КОРОЛЁВА
(национальный исследовательский университет)

№ 4 (24)

2010

Корректор **Чегодаева Л. Я.**
Компьютерная вёрстка **Кузьмишина Т. М.**
Переводчик **Безрукова Е. И.**

Каталожная цена: 1000 руб.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Тираж 200. Заказ _____

Отпечатано в издательстве СГАУ
443086, г. Самара, Московское шоссе, 34

**Правила оформления статей для журнала
«Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета
имени академика С. П. Королёва
(национального исследовательского университета)»**

1. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на лазерном принтере на одной стороне бумаги в режиме качественной печати, а также в электронном виде на отдельном носителе по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34, 212а – 3А, тел.: (846) 267 48 41, электронная почта: vest@ssau.ru.

2. Текст статьи представляется в формате Microsoft Word на дискетах, CD или DVD. Объём статьи – до 10 страниц формата А4. Имя файла определяется по фамилии первого автора: фамилия.doc. Поля – по 2,5 см с каждой стороны, текст – кегль 12, одинарный междустрочный интервал. Выравнивание: по ширине страницы. Шрифты – Times New Roman, Symbol. Отступ первой строки абзаца – 1 см. Страницы должны быть пронумерованы.

Замена буквы «ё» на букву «е» недопустима. Написание в тексте буквы «ё» является обязательным.

3. Допускается наличие рисунков, формул и таблиц по тексту.

Рисунки могут быть созданы средствами Microsoft Word/Excel или представлены в форматах JPEG, GIF, TIFF, PNG. Подпись к рисунку начинается со слова «Рис.» и номера по порядку, подпись располагается снизу, выравнивание – по центру. Для ссылки по тексту статьи на рисунок 1 следует использовать сокращение: рис. 1.

Для математических выражений и формул следует использовать Microsoft Equation 3.0 и буквы латинского (*Times New Roman, курсив, размер 12*) и греческого (*Symbol, курсив, размер 12*) алфавитов. Формулы, на которые в статье делаются ссылки, следует печатать с новой строки, при этом формулы нумеруются в порядке следования по тексту статьи. Номер формулы и ссылка на неё в тексте обозначается числом в круглых скобках: (1), (2), (3). Длина формулы на строке строго ограничена – до 80 мм (допускается перенос на следующие строки).

Заголовок таблицы начинается со слова «Таблица» и её номера по порядку, заголовок размещается сверху, выравнивание – по левому краю. Для ссылки по тексту статьи на таблицу 1 следует использовать сокращение: табл. 1.

4. Библиографический список оформляется отдельным разделом в конце статьи, при этом литературные источники располагаются в порядке их использования по тексту статьи в виде нумерованного списка, и оформляется в соответствии с действующим ГОСТ 7.1-2003.

5. К тексту статьи прилагается направление организации (если авторы не являются сотрудниками СГАУ), рецензия специалиста по научному направлению статьи (не являющегося сотрудником подразделения, где работают авторы), акт экспертизы, информация об авторах для опубликования в журнале. На отдельной странице указываются сведения об авторах для служебного пользования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, служебный и домашний адреса, телефон, электронная почта. Статья должна быть подписана всеми авторами.

6. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются. Рукописи и сопроводительные документы не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста.

7. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Образец оформления:

УДК 536.04

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ СЛОЖНОЙ ЗАМКНУТОЙ СТРУКТУРЫ НА БОРТУ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ

© 2011 Г. П. Аншаков¹, В. В. Бирюк², В. В. Васильев², В. В. Никонов², В. В. Салмин²

¹ФГУП ГНПРКЦ «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

²Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

(аннотация статьи 50...150 слов, кегль: 10)

(ключевые слова 8-12 слов, кегль: 10, начертание: курсив)

(текст статьи)

(библиографический список)

(информация об авторах для опубликования: фамилия, имя, отчество, учёная степень, учёное звание, должность, место работы, электронная почта, область научных интересов – до 10 слов)

THERMAL FIELDS SIMULATING OF COMPLEX CLOSED STRUCTURE ABOARD RESEARCH SPACE
LABORATORY

© 2011 G. P. Anshakov¹, V. V. Biruk², V. V. Vasiliev², V. V. Nikonov², V. V. Salmin²

¹FSUE SRPSRC "TsSKB-Progress"

²Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

(аннотация статьи – на английском языке)

(ключевые слова – на английском языке)

(библиографический список – на английском языке)

(информация об авторах для опубликования – на английском языке)