

СРАВНЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ВИХРЕВЫХ ПУЧКОВ ЛАГЕРРА–ГАУССА К СЛУЧАЙНЫМ ФЛУКТУАЦИЯМ ОПТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

С.В. Карпеев^{1,2}, В.Д. Паранин¹, М.С. Кириленко¹

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва, Самара, Россия,

² Институт систем обработки изображений РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Самара, Россия

Аннотация

Численно и экспериментально исследовано распространение вихревых пучков Лагерра–Гаусса через случайную фазовую искажающую среду. Проанализировано влияние порядка моды на степень сохранения вихрей различных порядков в случайной среде. Экспериментально показано повышение устойчивости обнаружения вихря в пучке при небольшой дефокусировке выходного Фурье-каскада оптического коррелятора.

Ключевые слова: пучки Лагерра–Гаусса, оптические вихри, случайные флуктуации оптической среды.

Цитирование: Карпеев, С.В. Сравнение устойчивости вихревых пучков Лагерра–Гаусса к случайным флуктуациям оптической среды / С.В. Карпеев, В.Д. Паранин, М.С. Кириленко // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 2. – С. 208–217. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-208-217.

Введение

Влияние атмосферы и других случайных сред на распространяемые через них лазерные пучки является объектом научных и инженерных исследований на протяжении более ста лет. Актуальность этих исследований возросла в связи широким применением лазеров в оптических системах, работающих в атмосфере, океане, биологических тканях и т.п.

Одним из основных приложений световых пучков является беспроводная оптика (*Free-Space Optics*, FSO), когда оптический канал проходит через случайную среду или вакуум. Практически неограниченный трафик сигнала на оптических частотах является выигрышной особенностью, которая отличает оптический канал от классической линии связи (радиоволны). С появлением высоконаправленного лазерного излучения дополнительное преимущество оптической коммуникации, связанное с безопасностью, стало очевидным [1–3]. Оптические сигналы также могут быть использованы в лазерных радарах (LIDARs) для дистанционного зондирования материальных объектов или в метеорологии [4].

Тем не менее, эффекты естественных случайных сред [5–9], такие как мерцание (*scintillation*), блуждание лучей (*beam wander*) и рассеивание от частиц, оказываемые на детерминированные (лазерные) световые пучки, оказались настолько серьезными, что это существенно повлияло на технические характеристики оптических коммуникационных систем и ограничило область их применения. Поэтому множество усилий направлено на поиск возможностей преодоления негативного влияния естественных случайных сред.

На сегодняшний день предлагаются несколько способов модификации оптического канала: использование частично когерентных пучков [1, 10–12], лазерных пучков со специальной пространственной структурой (вихревые, бездифракционные, моды высших порядков) [13–16], векторных пучков с неоднородной поляризацией [17, 18], а также одновременно нескольких пучков с одинаковой или разными частотами [19, 20].

Заметим, что особый интерес для уплотнения каналов передачи информации представляют пучки, несущие орбитальный угловой момент и имеющие бесконечное число возможных квантовых состояний [21]. Уже продемонстрированы значительные успехи в применении такого способа уплотнения каналов как в волоконных системах связи [22], так и в свободном пространстве [23, 24]. Обзор по исследованию и применению вихревых пучков в случайных средах можно найти в работах [25, 26].

Устойчивость вихревых пучков к случайному воздействию отмечалась в нескольких экспериментальных работах [13, 27–29]. Заметим, однако, что оптические вихри высоких порядков менее устойчивы к возмущениям оптической среды. В работе [13] было показано, что вихревые пучки высокого порядка сохраняются в турбулентной среде на значительном расстоянии (несколько километров), но затем расщепляются на вихри первого порядка. В этой же работе утверждалось, что вихревой пучок может расщепляться, отклоняться, блуждать вне области детектора, но никогда не исчезает, т.е. сохраняется общий угловой момент поля. В работе [29] было показано, что пучки с более высоким оптическим вихрем больше подвержены влиянию случайных флуктуаций, хотя при дальнейшем распространении (после искажения) в свободном пространстве демонстрируют лучшую способность восстановления. Этот эффект объяснялся фазовой структурой пучка.

В данной работе выполнено сравнительное численное и экспериментальное исследование пучков Лагерра–Гаусса, имеющих одинаковый вихревой топологический заряд, но различную пространственную структуру, а именно количество колец. В каждом кольце вихревая фазовая структура пучка повторяется, т.е. имеет место структурная избыточность. Это должно повысить устойчивость пучка к случайным возмущениям по аналогии с массивами пучков.

Так как важным свойством вихревых пучков является сохранение топологического заряда, то в численных и экспериментальных исследованиях данный па-

раметр был выбран критерием устойчивости пучков. На первый план здесь выходит задача одновременного экспериментального детектирования нескольких вихрей с разными топологическими зарядами, присутствующих в пучке. В работе предлагается использовать для этой цели простой и надежный подход, основанный на согласованной корреляционной фильтрации. Реализация этого подхода выполнялась с использованием многоканального фазового ДОО, раскладывающего поле по угловым гармоникам [30, 31].

1. Численное моделирование

Распространение лазерного пучка через случайную среду можно моделировать с помощью интегрального выражения, соответствующего расширенному принципу Гюйгенса–Френеля [32, 33]:

$$E(u, v, z, t) = -(ik/2\pi z) \exp(ikz) \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x, y) \exp\left\{ik/2z \left[(x-u)^2 + (y-v)^2\right]\right\} \times \exp\{\Psi(x, y, u, v, z) - i\omega t\} dx dy, \quad (1)$$

где $E_0(x, y)$ – поле во входной плоскости (при $z=0$), $E(u, v, z, t)$ – поле на расстоянии z от входной плоскости, $\Psi(x, y, u, v, z)$ – случайная часть в операторе распространения, связанная с турбулентностью атмосферы, ω – частота колебаний лазерного излучения, t – время.

Выражение (1) соответствует методу Рытова [33], а функция $\Psi(x, y, u, v, z)$ описывает случайные отклонения фазовой функции сферической волны, распространяющейся от исходной плоскости к выходной.

Рассмотрим алгоритм расчета распространения пучка в случайной среде с заданной корреляционной функцией. Для простоты изложения алгоритм приведен в двумерном случае, однако он легко обобщается на большую размерность.

Пусть известна корреляционная функция случайного поля в виде [33]:

$$R\left\{\exp\left[\Psi(x_1, u_1, 0)\right], \exp\left[\Psi(x_2, u_2, z)\right]\right\} = \exp\left[-(1/\rho_0^2(z))(x_1 - x_2)^2\right] = R_{\exp|\Psi|}(x_1 - x_2, z), \quad (2)$$

где $\rho_0(z) = (0,545C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ – длина когерентности распространения сферической волны через турбулентную атмосферу, C_n^2 – структурная постоянная среды. Отметим, что данная корреляционная функция зависит от разности между координатами x_1 и x_2 , а не от каждой из них по отдельности. Более того, она не зависит от координат в выходной плоскости u_1 и u_2 , а зависит лишь от расстояния z до неё.

Будем считать, что средняя интенсивность Гауссова пучка, проходящего через случайную среду, сохраняется, а для этого зададим среднюю амплитуду случайного поля равной единице:

$$\left\langle \exp\left[\Psi(x, u, z)\right] \right\rangle = 1. \quad (3)$$

Для генерации случайного поля $U(x)$ воспользуемся методом, описанным в работе [29]:

$$U(x) = h(x) * \xi(x), \quad (4)$$

где звёздочкой (*) обозначена операция свёртки, $h(x)$ – детерминированная функция (импульсная характеристика), $\xi(x)$ – комплекснозначный белый шум с единичной дисперсией и корреляционной функцией, равной дельта-функции Дирака. Тогда:

$$U(x) = \mathcal{F}^{-1}\left[\mathcal{F}[h(u)]\mathcal{F}[\xi(u)]\right] = \mathcal{F}^{-1}\left[\sqrt{\mathcal{F}[R_U(u)]}\mathcal{F}[\xi(u)]\right], \quad (5)$$

где $\mathcal{F}[\cdot]$ – оператор преобразования Фурье, $R_U(x)$ – автокорреляция функции $h(x)$.

Окончательно получаем случайное поле оптической среды:

$$U(x, u, z) = \exp\left[\Psi(x, u, z)\right] - \left\langle \exp\left[\Psi(x, u, z)\right] \right\rangle. \quad (6)$$

Входной пучок будем рассматривать в виде мод Лагерра–Гаусса:

$$GL_{nm}(r, \phi) = \exp(-r^2/2\sigma^2) (r/\sigma)^{|m|} \times \times L_n^{|m|}(r^2/\sigma^2) \exp(im\phi), \quad (7)$$

где индексы (n, m) определяют число колец и заряд оптического вихря соответственно, σ – радиус перетяжки Гауссова пучка, $L_n^{|m|}(\cdot)$ – обобщенные полиномы Лагерра [35].

В табл. 1 показаны результаты моделирования распространения пучков Лагерра–Гаусса с длиной волны 0,532 мкм и радиусом луча 1 мм в случайной среде на расстояние l для различных сочетаний (n, m) . Для каждого сочетания (n, m) приводятся распределения амплитуды и фазы в разных строках таблицы. Видны сильные искажения вихревой фазы, существенно зависящие от l , при том, что искажения амплитуды не так существенны и примерно одинаковы для различных l . Хотя в табл. 1 не приводятся данные для сочетаний (n, m) , где менялся бы только один параметр, общий характер зависимости от l в различных строках таблицы примерно одинаков и позволяет сделать необходимые выводы. Прежде всего, очевидно, что уже просто попадание пучка в случайную среду без всякого распространения ($l=0$) уже приводит к искажениям, очень похожим на те, которые происходят и при дальнейшем распространении. Это служит обоснованием для применения при экспериментальном исследовании имитации случайной среды средой с сосредоточенными параметрами (ПЭТ-пленкой). Более того, при $l=0$ фазовое распределение выглядит более случайным, чем получается при распространении, хотя амплитудные распределения выглядят одинаково случайными во всех плоскостях. Параметры моделируемого пучка таковы, что 300 мм являются для него ближней зоной (конфокальное расстояние для таких параметров около 6 м). Распространение Гауссова пучка в ближней зоне не должно приводить к существенному изменению радиуса кривизны, но при моделировании мы видим некоторое уменьшение радиуса кривизны для всех пучков на расстоянии 100 мм, которого при отсутствии случай-

ной среды быть не должно. В целом же вихревая фаза неплохо сохраняется для всех пучков, что более подробно проанализировано дальнейшим моделированием. В табл. 2–4 приведены усредненные результаты мо-

делирования разложения пучков с разными (n, m) , прошедших через случайную среду, по вихрям с порядками $p = \overline{1, 10}$.

Табл. 1. Моделирование распространения пучков Лагерра–Гаусса в случайной среде на расстояние l [мм]

	Исходное поле	$l=0$	$l=100$	$l=200$	$l=300$
$n=0, m=3$					
$n=1, m=4$					
$n=2, m=5$					

Табл. 2. Коэффициенты разложения искаженного пучка с $m = 1$ по вихрям разных порядков в зависимости от n

$m = 1$	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$p = 0$	0,00922	0,02341	0,00979	0,05748	0,03475	0,04716
$p = 1$	0,9456	0,90811	0,92048	0,86856	0,91958	0,90443
$p = 2$	0,03915	0,04492	0,04599	0,04092	0,03229	0,03478
$p = 3$	0,00403	0,01558	0,01353	0,01908	0,00709	0,00929
$p = 4$	0,00155	0,00677	0,00540	0,00645	0,00234	0,00146
$p = 5$	0,00032	0,00075	0,00291	0,00389	0,00162	0,00115
$p = 6$	0,00007	0,00041	0,00132	0,00119	0,00104	0,00061
$p = 7$	0	0,00006	0,00044	0,00178	0,00076	0,00038
$p = 8$	0	0,00003	0,00007	0,00050	0,00026	0,00046
$p = 9$	0	0	0,00003	0,00006	0,00011	0,00013
$p = 10$	0	0	0	0,00005	0,00008	0,00009

В каждой строке таблиц приведены усредненные результаты вычисления вклада вихря порядка p в зависимости от числа колец n в исходном пучке. В таблицах серым цветом выделены строки, соответствующие вычислению вклада вихря, который присутствовал в исходном пучке.

Прежде всего, следует отметить, что общее снижение интенсивности полезного сигнала из-за случайных помех нигде не превышает 22%, а по большей части составляет 5–10%. Если выбором n оптимизировать это значение, то можно добиться сниже-

ния до уровня не более 7%. Что касается распределения этих перекрестных помех по вихрям других (от-

личных от передаваемого) порядков, то нигде они не превышают 4%, если брать оптимальное n .

Табл. 3. Коэффициенты разложения искаженного пучка с $m = 2$ по вихрям разных порядков в зависимости от n

$m = 2$	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$p = 0$	0,00043	0,00209	0,00176	0,00895	0,00415	0,00860
$p = 1$	0,02510	0,02860	0,02171	0,03890	0,03193	0,03095
$p = 2$	0,92355	0,90626	0,90938	0,86155	0,91954	0,90945
$p = 3$	0,03500	0,03426	0,03873	0,05482	0,02921	0,03909
$p = 4$	0,01199	0,01954	0,01364	0,01031	0,00513	0,00548
$p = 5$	0,00322	0,00610	0,00711	0,01596	0,00472	0,00246
$p = 6$	0,00056	0,00267	0,00517	0,00414	0,00234	0,00133
$p = 7$	0,00011	0,00032	0,00202	0,00297	0,00122	0,00072
$p = 8$	0	0,00014	0,00025	0,00140	0,00076	0,00078
$p = 9$	0	0,00001	0,00015	0,00062	0,00060	0,00057
$p = 10$	0	0	0,00003	0,00024	0,00033	0,00030

Табл. 4. Коэффициенты разложения искаженного пучка с $m = 5$ по вихрям разных порядков в зависимости от n

$m = 5$	$n = 0$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$p = 0$	0	0	0	0	0,00001	0,00001
$p = 1$	0,00014	0,00001	0,00004	0,00008	0,00020	0,00008
$p = 2$	0,00169	0,00077	0,00029	0,00152	0,00225	0,00144
$p = 3$	0,00750	0,00556	0,00622	0,00654	0,01974	0,01084
$p = 4$	0,04570	0,02451	0,02737	0,02378	0,05522	0,04201
$p = 5$	0,88500	0,92239	0,91367	0,87160	0,77713	0,90894
$p = 6$	0,02961	0,02572	0,02233	0,03966	0,07045	0,01819
$p = 7$	0,02470	0,00893	0,01246	0,02596	0,03486	0,00711
$p = 8$	0,00262	0,00917	0,01037	0,01125	0,02407	0,00453
$p = 9$	0,00230	0,00165	0,00447	0,01304	0,00762	0,00297
$p = 10$	0,00052	0,00083	0,00167	0,00362	0,00334	0,00114

Теперь про зависимость от n : для вихрей низких (первого и второго) порядков наилучшие результаты дает пучок с $n = 0$, для вихря с $m = 5$ наилучший результат достигается при $n = 1$. По всей видимости, вышеупомянутая структурная избыточность начинает действовать только когда вихрь более высокого порядка больше подвержен влиянию случайных флуктуаций и требует усреднения по большей площади.

2. Экспериментальные результаты

Имитация случайной среды в эксперименте осуществлялась с использованием неокрашенной полиэтиленовой (ПЭТ) пленки толщиной 22 ± 2 мкм. Вначале производилась регистрация энергетического спектра излучения гелий-неонового лазера, прошедшего через пленку. В эксперименте использовалась Фурье-преобразующая линза с фокусом 500 мм при диаметре освещающего пучка 11 мм. В дальнейших экспериментах эти параметры не менялись. Одна из реализаций пространственного энергетического спектра излучения гелий-неонового лазера, прошедшего через пленку, приведена на рис. 1. Хорошо видно, что ширина спектра меняется в зависимости от полярного

угла, что свидетельствует о неизотропности свойств этой пленки. Анизотропия углового рассеяния вызвана визуально наблюдаемой полосчатой структурой пленки, которая обусловлена протягиванием пленки при ее производстве. Спекл-структура рассеянного лазерного излучения указывает на случайные фазовые искажения, вносимые образцом. Исследование пленки поляризационно-оптическим методом показало отсутствие двулучепреломления (поляризационных искажений).

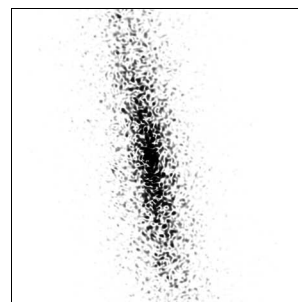


Рис. 1. Изображение пространственного энергетического спектра излучения гелий-неонового лазера, прошедшего через пленку ПЭТ

Разумеется, такая среда и условия распространения излучения существенно отличаются от случайной среды, которая моделировалась в параграфе 1. Однако несмотря на это, как будет показано далее, основные закономерности, обнаруженные при моделировании, подтверждаются проведенными экспериментами. Кроме того, анизотропия свойственна некоторым природным явлениям (например, дождю, восходящим тепловым потокам воздуха), и в этом плане исследование, безусловно, полезно.

Для исследования устойчивости вихревых лазерных пучков Лагерра–Гаусса к действию случайной среды была собрана оптическая установка (рис. 2). Установка содержала гелий-неоновый лазер с линейно-поляризованным излучением, пространственный фильтр – расширитель пучка, ирисовую диафрагму (ИД), формирователь вихревых пучков Лагерра–Гаусса (ДОЭ), имитатор случайной среды – пленку ПЭТ, анализирующий модан (Модан), Фурье-преобразующую линзу (Л2) и ПЗС-матрицу.

В качестве анализирующего модана использовался многоканальный фазовый фильтр, согласованный с угловыми гармониками различных порядков [30, 31]. Такой элемент позволяет не только оптически детектировать топологический заряд вихревого пучка, но может быть использован для адаптивной компенсации смещения мод в волоконных телекоммуникационных системах [36].

Для формирования вихревых пучков Лагерра–Гаусса в эксперименте использовались соответствующие ДОЭ с несущей частотой [37, 38], работающие в первом порядке дифракции. Поэтому выходная часть оптической установки была установлена под углом к оптической оси и настроена на прием первого порядка дифракции. Пространственная фильтрация и расширение лазерного пучка до диаметра 25 мм осуществлялись объективом 20×, точечной диафрагмой диаметром 15 мкм и линзой Л1 с фокусным расстоянием 200 мм. Размер пучка, освещающего ДОЭ, ограничивался до 11 мм ирисовой диафрагмой ИД. Исходное расстояние h_1 между формирующим ДОЭ и пленкой ПЭТ составляло 25 мм, расстояние h_2 – 125 мм.

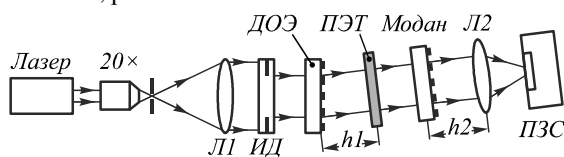


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

В первом эксперименте исследовалось распространение искаженных вихревых пучков Лагерра–Гаусса в отсутствие Модана для $n=0$ и $n=2$ (по аналогии с первыми двумя колонками табл. 1). Распределения интенсивности, зарегистрированные до и после прохождения пленки ПЭТ, показаны на рис. 3. Дискретизация вырезанных областей изображения одинакова и составляла 300×300 точек.

Результаты, приведенные на рис. 3, весьма сходны с результатами моделирования для $n=0$. Но для $n=2$ вид искаженных пучков несколько отличается от моделиро-

вания, что можно объяснить существенными отличиями имитатора искажений в эксперименте от моделирования. Интенсивности искаженных пучков в эксперименте также мало менялись при перемещении пленки ПЭТ между ДОЭ и линзой Л2, как и интенсивности, показанные в табл. 1. Фазовые распределения в эксперименте не исследовались, но такое поведение интенсивности косвенно свидетельствует также о сходном поведении фазы в моделировании и эксперименте.

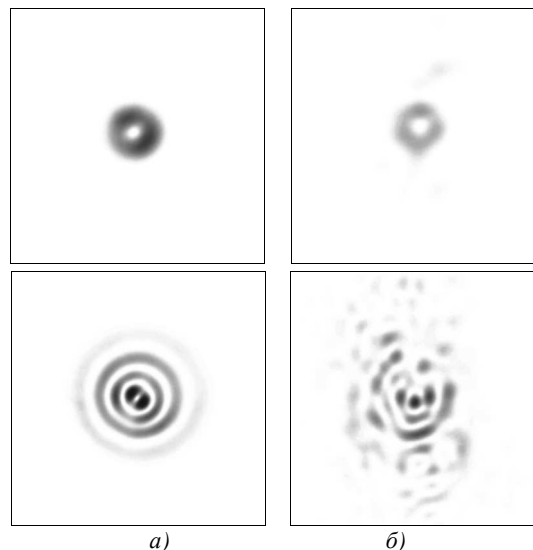


Рис. 3. Распределения интенсивности пучков Лагерра–Гаусса диаметром 11 мм до и после прохождения пленки ПЭТ толщиной 22 мкм: для $n=0$ (верхние изображения) и $n=2$ (нижние изображения)

Во втором эксперименте исследовалась обнаружительная способность используемой схемы детектирования вихрей. Измеренная интенсивность всех вихрей, кроме +1 порядка оказалась весьма мала и сравнима с интенсивностью шумов. В принципе это соответствует результатам моделирования, где интенсивность паразитных вихрей не превышала 4%. Поэтому в дальнейшем в табл. 5–7 мы приводим только распределения интенсивности в порядке, соответствующем вихрю +1 порядка.

В табл. 5 приведены результаты исследования влияния расстояния h_1 между ДОЭ и пленкой ПЭТ (рис. 2). Расстояние h_1 изменялось в пределах 25–225 мм. Используемая пленка ПЭТ имела незначительную толщину, поэтому ее перемещение не сопровождалось сдвигом изображения пучка.

Прежде всего, результаты исследования демонстрируют довольно сильную зависимость обнаружительной способности для вихрей первого порядка от расстояния ДОЭ – пленка ПЭТ. По-видимому, причиной этого является сближение случайной среды и анализирующего модана, в результате чего шумы с высокими пространственными частотами не успевают рассеяться, попадают на Модан и искажают результат. Иными словами, вихрь не успевает восстановиться на столь малом расстоянии. Кроме того, как уже говорилось, свойства пленки ПЭТ неизотропны, и влияние этого хорошо видно, особенно для $n=0$

(распределение интенсивности становится асимметричным). Однако это не приводит к каким-то существенным трудностям при обнаружении вихрей, и метод в целом показал хорошую устойчивость к изме-

нениям свойств среды. Данные табл. 5 также показывают лучшую устойчивость вихревого пучка первого порядка при $n = 0$, что полностью согласуется с результатами численного моделирования (табл. 2, 3).

Табл. 5. Распределения интенсивности в дифракционном порядке для $n = 0$ в зависимости от расстояния $h1$
















	Без образца	$h1=25$ мм	$h1=75$ мм	$h1=150$ мм	$h1=225$ мм
$n = 0$					
$n = 2$					

Табл. 6. Дефокусированные изображения 1-го порядка при $n = 2$

$h1=25$ мм	$h1=75$ мм	$h1=125$ мм	$h1=175$ мм	$h1=225$ мм
				

В определенной мере трудности при $n = 2$ являются проблемой измерений, поскольку корреляционный максимум для $n = 2$ существенно меньше по размеру, чем для $n = 0$ и, соответственно, ближе по размеру к радиусу корреляции шума (рис. 1), что делает его менее устойчивым. Для уменьшения влияния этого фактора предлагается ввести небольшую дефокусировку в Фурье-плоскости при $n = 2$, тем самым увеличив размер максимума и сделав его более заметным на фоне шумов. Соответствующие результаты приведены в табл. 6. Введенная дефокусировка составила около 40 мм. По сравнению с нижней строкой табл. 5 видно улучшение обнаружительной способности вихрей первого порядка. Для экономии места неискаженное изображение не приводится, а дано одно дополнительное искаженное. Корреляционный пик четко виден на всех расстояниях вплоть до 175 мм, в то время как в предыдущей серии он пропал уже при 150 мм.

Заключение

Теоретически и экспериментально исследовано прохождение вихревых пучков Лагерра–Гаусса через случайную искажающую среду. Установлено численным моделированием и подтверждено экспериментально, что для вихрей низких порядков наилучшие результаты при прохождении через случайную среду дает мода низшего порядка. Теоретически показано, что для вих-

рей высоких порядков применение многокольцевого пучка улучшает результат. Имитация случайной искажающей среды осуществлялась в эксперименте с помощью ПЭТ-пленки толщиной 22 мкм. Отличие свойств такого имитатора искажений от заложенных при моделировании не привело к существенному изменению основных результатов, связанных с влиянием порядка вихревых лазерных пучков Лагерра–Гаусса на сохранение топологического заряда вихрей. Это свидетельствует об устойчивости вихрей и измерительной системы к изменениям в искажающей среде. Экспериментально достигнуто некоторое улучшение обнаружительной способности пучков с вихрем первого порядка путем небольшой дефокусировки Фурье-каскада оптического коррелятора.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках инициативного научного проекта по госзаданию 3.5319.2017/БЧ, а также Российского фонда фундаментальных исследований (грант РФФИ 16-47-630546 p_a).

Литература

1. Wang, F. Propagation of partially coherent beam in turbulent atmosphere: a review (invited review) / F. Wang, X. Liu, Y. Cai // Progress In Electromagnetics Research.

- 2015. – Vol. 150. – P. 123-143. – DOI: 10.2528/PI-ER15010802.
2. **Korotkova, O.** Random light beams: theory and applications / O. Korotkova. – Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – 366 p. – ISBN: 978-1-4398-1950-0.
 3. **Majumdar, A.K.** Free-space laser communications: principles and advances / A.K. Majumdar, J.C. Ricklin. – New York: Springer Science & Business Media, 2008. – 418 p. – ISBN: 978-0-387-28652-5.
 4. **Mishchenko, M.I.** Electromagnetic scattering by particles and particle groups: An introduction / M.I. Mishchenko. – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 450 p. – ISBN: 978-0-521-51992-2.
 5. **Татарский, В.И.** Теория флуктуационных явлений при распространении волн в турбулентной атмосфере / В.И. Татарский. – М.: Издательство Академии наук СССР, 1959. – 232 с.
 6. **Dainty, J.C.** Laser speckle and related phenomena / J.C. Dainty, A.E. Ennos, M. Françon, J.W. Goodman, T.S. McKechnie, G. Parry. – Berlin: Springer, 1975. – 286 p. – ISBN: 978-3-540-07498-4.
 7. **Ishimaru, A.** Wave propagation and scattering in random media / A. Ishimaru. – New York: Academic Press, 1978. – 572 p. – ISBN: 978-0-12-374701-3.
 8. **Fante, R.L.** Wave propagation in random media: a systems approach. / R.L. Fante // Progress in Optics. – 1985. – Vol. 22. – P. 341-398. – DOI: 10.1016/S0079-6638(08)70152-5.
 9. **Andrews, L.C.** Laser beam propagation through random media / L.C. Andrews, R.L. Phillips. – Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 1998. – 434 p. – ISBN: 978-0-819-42787-8.
 10. **Gbur, G.** Spreading of partially coherent beams in random media / G. Gbur, E. Wolf // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19, Issue 8. – P. 1592-1598. – DOI: 10.1364/JOSAA.19.001592.
 11. **Eyyuboglu, H.T.** Complex degree of coherence for partially coherent general beams in atmospheric turbulence / H.T. Eyyuboglu, Y. Baykal, Y. Cai // Journal of the Optical Society of America A. – 2007. – Vol. 24, Issue 9. – P. 2891-2901. – DOI: 10.1364/JOSAA.24.002891.
 12. **Wang, D.** Evolution properties of the complex degree of coherence of a partially coherent Laguerre-Gaussian beam in turbulent atmosphere / D. Wang, F. Wang, Y. Cai, J. Chen // Journal of Modern Optics. – 2012. – Vol. 59, Issue 4. – P. 372-380. – DOI: 10.1080/09500340.2011.628419.
 13. **Gbur, G.** Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation / G. Gbur, R.K. Tyson // Journal of the Optical Society of America A. – 2008. – Vol. 25(1). – P. 225-230. – DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
 14. **Cai, Y.** Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere / Y. Cai, S. He // Optics Express. – 2006. – Vol. 14, Issue 4. – P. 1353-1367. – DOI: 10.1364/OE.14.001353.
 15. **Eyyuboğlu, H.T.** Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence / H.T. Eyyuboğlu // Applied Physics B. – 2007. – Vol. 88, Issue 2. – P. 259-265. – DOI: 10.1007/s00340-007-2707-6.
 16. **Chu, X.** Evolution of an Airy beam in turbulence / X. Chu // Optics Letters. – 2011. – Vol. 36, Issue 14. – P. 2701-2703. – DOI: 10.1364/OL.36.002701.
 17. **Du, X.** Changes in the statistical properties of stochastic anisotropic electromagnetic beams on propagation in the turbulent atmosphere / X. Du, D. Zhao, O. Korotkova // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, Issue 25. – P. 16909-16915. – DOI: 10.1364/OE.15.016909.
 18. **Wang, H.** The propagation of radially polarized partially coherent beam through an optical system in turbulent atmosphere / H. Wang, D. Liu, Z. Zhou // Applied Physics B. – 2010. – Vol. 101, Issue 1. – P. 361-369. – DOI: 10.1007/s00340-010-4106-7.
 19. **Ji, X.** Effective Rayleigh range of Gaussian array beams propagating through atmospheric turbulence / X. Ji, Z. Pu // Optics Communications. – 2010. – Vol. 283, Issue 20. – P. 3884-3890. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.06.025.
 20. **Chen, C.** Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence / C. Chen, H. Yang, M. Kavehrad, Z. Zhou // Optics and Lasers in Engineering. – 2014. – Vol. 52. – P. 106-114. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.003.
 21. **Soskin, M.S.** Singular optics / M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov. – In book: Progress in Optics / E. Wolf, ed. – Chapter 4. – Amsterdam, North Holland: Elsevier Science, 2001. – P. 219-276. – DOI: 10.1016/S0079-6638(01)80018-4.
 22. **Bozinovic, N.** Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran // Science. – 2013. – Vol. 340, Issue 6140. – P. 1545-1548. – DOI: 10.1126/science.1237861.
 23. **Gibson, G.** Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum / G. Gibson, J. Courtial, M.J. Padgett, M. Vasnetsov, V. Pas'ko, S.M. Barnett, S. Franke-Arnold // Optics Express. – 2004. – Vol. 12, Issue 22. – P. 5448-5456. – DOI: 10.1364/OPEX.12.005448.
 24. **Wang, J.** Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A.E. Willner // Nature Photonics. – 2012. – Vol. 6. – P. 488-496. – DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
 25. **Хонина, С.Н.** Вихревые лазерные пучки и их применение / С.Н. Хонина. – В кн.: Нанофотоника и её применение в системах ДЗЗ / Е.А. Безус, Д.А. Быков, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, С.В. Карпеев, А.А. Морозов, П.Г. Серафимович, Р.В. Скиданов, В.А. Соифер, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Соифера. – Самара: Новая техника, 2016. – Гл. 4. – С. 275-351. – ISBN: 978-5-88940-140-7.
 26. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: Review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // Computer Optics. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
 27. **Wang, T.** Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere / T. Wang, J. Pu, Z. Chen // Optics Communications. – 2009. – Vol. 282, Issue 7. – P. 1255-1259. – DOI: 10.1016/j.optcom.2008.12.027.
 28. **Malik, M.** Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding / M. Malik, M. O'Sullivan, B. Rodenburg, M. Mirhosseini, J. Leach, M.P.J. Lavery, M.J. Padgett, R.W. Boyd // Optics Express. – 2012. – Vol. 20, Issue 12. – P. 13195-13200. – DOI: 10.1364/OE.20.013195.
 29. **Porfirev, A.P.** Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium / A.P. Porfirev, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.A. Soifer // Applied Optics. – 2017. – Vol. 56, Issue 11. – P. E8-E15. – DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
 30. **Kotlyar, V.V.** Light field decomposition in angular harmonics by means of diffractive optics / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1998. – Vol. 45, Issue 7. – P. 1495-1506. – DOI: 10.1080/09500349808230644.
 31. **Khonina, S.N.** An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, P. Pääkkönen, J. Simonen, J. Tu-

- runen // Journal of Modern Optics. – 2001. – Vol. 48(10). – P. 1543-1557. – DOI: 10.1080/09500340108231783.
32. **Lutomirski, R.F.** Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium / R.F. Lutomirski, H.T. Yura // Applied Optics. – 1971. – Vol. 10, Issue 7. – P. 1652-1658. – DOI: 10.1364/AO.10.001652.
33. **Feizulin, Z.I.** Broadening of a laser beam in a turbulent medium / Z.I. Feizulin, Y.A. Kravtsov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1967. – Vol. 10, Issue 1. – P. 33-35. – DOI: 10.1007/BF01038157.
34. **Young, C.Y.** Turbulence induced beam spreading of higher order mode optical waves / C.Y. Young, Y.V. Gilchrest, B.R. Macon // Optical Engineering. – 2002. – Vol. 41, Issue 5. – P. 1097-1103. – DOI: 10.1117/1.1465427.
35. **Прудников, А.П.** Интегралы и ряды. Специальные функции / А.П. Прудников, Ю.А. Брычков, О.И. Маричев. – М.: Наука, 1983. – 748 с.
36. **Любобытов, В.С.** Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод / В.С. Любобытов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика. – 2013. – Т. 37, № 3. – С. 352-359.
37. **Berezny, A.E.** Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography / A.E. Berezny, S.V. Karpeev, G.V. Uspleniev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15(5). – P. 331-340. – DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
38. **Khonina, S.N.** Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, Issue 12. – P. 2385-2387. – DOI: 10.1364/OL.37.002385.

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; ведущий научный сотрудник ИСОИ РАН – филиала ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

Паранин Вячеслав Дмитриевич, 1986 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П.Королева (СГАУ) по специальности 210201 «Проектирование и технология электронных средств», работает ассистентом кафедры нанотехнологий Самарского университета. Область научных интересов: методы и средства управления лазерным излучением. E-mail: vparanin@mail.ru.

Кириленко Михаил Сергеевич, 1990 года рождения, в 2013 году окончил магистратуру Самарского государственного аэрокосмического университета (Самарского университета) по специальности «Прикладная математика и информатика». В настоящее время является аспирантом третьего года обучения кафедры технической кибернетики данного университета по специальности «Оптика». Работает стажёром-исследователем в Институте систем обработки изображений РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптические операторы распространения, программирование. E-mail: areatangent@gmail.com.

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 17 марта 2017 г. Окончательный вариант – 27 марта 2017 г.

COMPARISON OF THE STABILITY OF LAGUERRE-GAUSS VORTEX BEAMS TO RANDOM FLUCTUATIONS OF THE OPTICAL ENVIRONMENT

S.V. Karpeev^{1,2}, V.D. Paraniin¹, M.S. Kirilenko¹,

¹ Samara National Research University, Samara, Russia,

² Image Processing Systems Institute of RAS, – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Samara, Russia

Abstract

The propagation of Laguerre-Gauss vortex beams through a random phase distorting medium is numerically and experimentally investigated. The influence of the order of the mode on the degree of conservation of vortices of different orders in a random environment is analyzed. An increase in the stability of the detection of a vortex in a beam with a small defocusing of the output Fourier cascade of the optical correlator is shown experimentally.

Keywords: Laguerre-Gaussian beams, optical vortices, random optical media.

Citation: Karpeev SV, Paraniin VD, Kirilenko MS. Comparison of the stability of Laguerre-Gauss vortex beams to random fluctuations of the optical environment. Computer Optics 2017; 41(2): 208-217. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-208-217.

Acknowledgements: This work was financially supported by the RF Ministry of Education and Science as an initiative scientific project within a state contract 3.5319.2017/BC and by the Russian Foundation for Basic Research (grant 16-47-630546-r_a).

References

- [1] Wang F, Liu X, Cai Y. Propagation of partially coherent beam in turbulent atmosphere: a review (invited review). *Progress In Electromagnetics Research* 2015; 150: 123-143. DOI: 10.2528/PIER15010802.
- [2] Korotkova O. *Random light beams: theory and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group; 2013. ISBN: 978-1-4398-1950-0.
- [3] Majumdar AK, Ricklin JC. *Free-space laser communications: principles and advances*. New York: Springer Science & Business Media; 2008. ISBN: 978-0-387-28652-5.
- [4] Mishchenko MI. *electromagnetic scattering by particles and particle groups: An introduction*. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. ISBN: 978-0-521-51992-2.
- [5] Tatarskii VI. *Wave propagation in a turbulent medium*. New York: McGraw-Hill; 1961.
- [6] Dainty JC, Ennos AE, Françon M, Goodman JW, McKechnie TS, Parry G. *Laser speckle and related phenomena*. Berlin: Springer, 1975. ISBN: 978-3-540-07498-4.
- [7] Ishimaru A. *Wave propagation and scattering in random media*. New York: Academic Press; 1978. ISBN: 978-0-12-374701-3.
- [8] Fante RL. Wave propagation in random media: a systems approach. *Progress in Optics* 1985; 22: 341-398. DOI: 10.1016/S0079-6638(08)70152-5.
- [9] Andrews LC, Phillips RL. *Laser beam propagation through random media*. Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press; 1998. ISBN: 978-0-819-42787-8.
- [10] Gbur G, Wolf E. Spreading of partially coherent beams in random media. *J Opt Soc Am A* 2002; 19(8): 1592-1598. DOI: 10.1364/JOSAA.19.001592.
- [11] Eyyuboglu HT, Baykal Y, Cai Y. Complex degree of coherence for partially coherent general beams in atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am A* 2007; 24(9): 2891-2901. DOI: 10.1364/JOSAA.24.002891.
- [12] Wang D, Wang F, Cai Y, Chen J. Evolution properties of the complex degree of coherence of a partially coherent Laguerre-Gaussian beam in turbulent atmosphere. *J Mod Opt* 2012; 59(4): 372-380. DOI: 10.1080/09500340.2011.628419.
- [13] Gbur G, Tyson RK. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation. *JOSA A* 2008; 25(1): 225-230. DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
- [14] Cai Y, He S. Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere. *Opt Express* 2006; 14(4): 1353-1367. DOI: 10.1364/OE.14.001353.
- [15] Eyyuboğlu HT. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence. *Appl Phys B* 2007; 88(2): 259-265. DOI: 10.1007/s00340-007-2707-6.
- [16] Chu X. Evolution of an Airy beam in turbulence. *Opt Lett* 2011; 36(14): 2701-2703. DOI: 10.1364/OL.36.002701.
- [17] Du X, Zhao D, Korotkova O. Changes in the statistical properties of stochastic anisotropic electromagnetic beams on propagation in the turbulent atmosphere. *Opt Express* 2007; 15(25): 16909-16915. DOI: 10.1364/OE.15.016909.
- [18] Wang H, Liu D, Zhou Z. The propagation of radially polarized partially coherent beam through an optical system in turbulent atmosphere. *Appl Phys B* 2010; 101(1): 361-369. DOI: 10.1007/s00340-010-4106-7.
- [19] Ji X, Pu Z. Effective Rayleigh range of Gaussian array beams propagating through atmospheric turbulence. *Opt Commun* 2010; 283(20): 3884-3890. DOI: 10.1016/j.optcom.2010.06.025.
- [20] Chen C, Yang H, Kavehrad M, Zhou Z. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence. *Optics and Lasers in Engineering* 2014; 52: 106-114. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.003.
- [21] Soskin MS, Vasnetsov MV. Singular optics. In book: Wolf E, ed. *Progress in Optics*. Chap 4. Amsterdam, North Holland: Elsevier Science; 2001. DOI: 10.1016/S0079-6638(01)80018-4.
- [22] Bozinovic N, Yue Y, Ren Y, Tur M, Kristensen P, Huang H, Willer AE, Ramachandran S. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers. *Science* 2013; 340(6140): 1545-1548. DOI: 10.1126/science.1237861.
- [23] Gibson G, Courtial J, Padgett MJ, Vasnetsov M, Pas'ko V, Barnett SM, Franke-Arnold S. Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum. *Opt Express* 2004; 12(22): 5448-5456. DOI: 10.1364/OPEX.12.005448.
- [24] Wang J, Yang J-Y, Fazal IM, Ahmed N, Yan Y, Huang H, Ren Y, Yue Y, Dolinar S, Tur M, Willner AE. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing. *Nat Photonics* 2012; 6: 488-496. DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
- [25] Khonina SN. Vortex laser beams and their applying. In book: Soifer VA, ed. *Nanophotonics and its application in ERS systems [In Russian]*. Chap 4. Samara: "Novaya Tehnika" Publisher; 2016. ISBN: 978-5-88940-140-7.
- [26] Soifer VA, Korotkova O, Khonina SN, Shchepakina EA. Vortex beams in turbulent media: Review. *Computer Optics* 2016; 40(5): 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [27] Wang T, Pu J, Chen Z. Beam-spreading and topological charge of vortex beams propagating in a turbulent atmosphere. *Opt Commun* 2009; 282(7): 1255-1259. DOI: 10.1016/j.optcom.2008.12.027.
- [28] Malik M, O'Sullivan M, Rodenburg B, Mirhosseini M, Leach J, Lavery MPJ, Padgett MJ, Boyd RW. Influence of atmospheric turbulence on optical communications using orbital angular momentum for encoding. *Opt Express* 2012; 20(12): 13195-13200. DOI: 10.1364/OE.20.013195.
- [29] Porfirev AP, Kirilenko MS, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium. *Applied Optics* 2017; 56(11): E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [30] Kotlyar VV, Khonina SN, Soifer VA. Light field decomposition in angular harmonics by means of diffractive optics. *J Mod Opt* 1998; 45(7): 1495-1506. DOI: 10.1080/09500349808230644.
- [31] Khonina SN, Kotlyar VV, Soifer VA, Pääkkönen P, Simonen J, Turunen J. An analysis of the angular momentum of a light field in terms of angular harmonics. *J Mod Opt* 2001; 48(10): 1543-1557. – DOI: 10.1080/09500340108231783.
- [32] Lutomirski RF, Yura HT. Propagation of a finite optical beam in an inhomogeneous medium. *Appl Opt* 1971; 10(7): 1652-1658. DOI: 10.1364/AO.10.001652.
- [33] Feizulin ZI, Kravtsov YA. Broadening of a laser beam in a turbulent medium. *Radiophysics and Quantum Electronics* 1967; 10(1): 33-35. DOI: 10.1007/BF01038157.
- [34] Young CY, Gilcrest YV, Macon BR. Turbulence induced beam spreading of higher order mode optical waves. *Opt Eng* 2002; 41(5): 1097-1103. DOI: 10.1117/1.1465427.
- [35] Prudnikov AP, Brychkov YuA, Marichev OI. *Integrals and Series, Vol. 2: Special Functions*. Amsterdam, Netherlands: Gordon & Breach, Science Publishers, Inc.; 1986. ISBN: 2-88124-090-9.
- [36] Lyubopytov VS, Tlyavlin AZ, Sultanov AK, Bagmanov VK, Khonina SN, Karpeev SV, Kazanskiy NL. Mathematical model of completely optical system for detection of

mode propagation parameters in an optical fiber with few-mode operation for adaptive compensation of mode coupling [In Russian], *Computer Optics* 2013; 37(3): 352-359.

[37] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV Computer-generated holographic optical elements produced by photo-

lithography. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.

[38] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Optics Letters* 2012; 37(12): 2385-2387. DOI: 10.1364/OL.37.002385.

Authors' information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara State Aerospace University named after S.P. Korolyov. Leading researcher of the Image Processing Systems Institute of the RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: karp@smr.ru.

Vyacheslav Dmitrievich Paraniin (b. 1986) graduated from Samara State Aerospace University in 2010, majoring in Design and Technology of Radio-electronic Equipment. Currently he works as the professor assistant at Nanoengineering department of Samara National Research University. Research interests are methods and devices for controlling of laser radiation. E-mail: vparanin@mail.ru.

Mikhail Sergeevich Kirilenko, born in 1990, he graduated from Samara State Aerospace University (National Research University) in 2013 with Master degree, majoring in Applied Mathematics and Computer Science. He is currently a post-graduated student of third year of Technical Cybernetics department. He is working as a laboratory assistant at the Image Processing Systems Institute of the Russian Academy of Sciences. Research interests: diffractive optics, optical propagation operators, programming. E-mail: vparanin@mail.ru.

Received March 17, 2017. The final version – March 27, 2017.
