

## Возможности передачи и детектирования модулированных пучков с длиной волны 1530 нм в условиях случайных флуктуаций среды распространения

С.В. Карпеев<sup>1,2</sup>, В.В. Подлипов<sup>1,2</sup>, Н.А. Ивлиев<sup>1,2</sup>, В.Д. Паранин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34;

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

### Аннотация

Экспериментально исследовано распространение различным образом структурированных вихревых пучков с длиной волны 1530 нм через случайную искажающую среду. Проанализировано влияние аэрозольной преграды на сцинтилляционный индекс пучка. Экспериментально исследована возможность корреляционного детектирования наличия вихревой фазы в условиях блужданий пучков, вызванных потоком теплого воздуха.

**Ключевые слова:** модулированные пучки, оптические вихри, телекоммуникационная длина волны, случайные флуктуации оптической среды, сцинтилляционный индекс.

**Цитирование:** Карпеев, С.В. Возможности передачи и детектирования модулированных пучков с длиной волны 1530 нм в условиях случайных флуктуаций среды распространения / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, В.Д. Паранин // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 368-375. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.

### Введение

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 выигршной 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].

Однако дальнейшему развитию этих систем связи мешает стохастичность среды, в которой передается сигнал. В атмосфере присутствуют как твердые, так и жидкие взвешенные частицы, движения потоков воздуха, тепловой градиент. Все это приводит к появлению эффектов естественных сред [4–9], таких как случайные мерцания (*scintillation*) и блуждания лучей (*beam wander*) у изначально детерминированных лазерных световых пучков. Именно влияние этих эффектов на технические характеристики оптических коммуникационных систем и ограничивает область их применения. Поэтому множество усилий направлено на поиск возможностей преодоления негативного влияния естественных случайных сред.

Модификация оптического канала связи возможна как путем использования средств формирования различных лазерных пучков со специальной пространственной и поляризационной структурой (вихревых, бездифракционных [10], мод высших порядков [11–14] неоднородно поляризованных [15, 16]), так и путем совершенствования средств детектирования таких пучков [17–21].

Заметим, что особый интерес для уплотнения каналов передачи информации представляют пучки, несущие

орбитальный угловой момент и имеющие бесконечное число возможных квантовых состояний [22]. Уже продемонстрированы значительные успехи в применении такого способа уплотнения каналов как в волоконных системах связи [23], так и в свободном пространстве [24, 25]. Обзор по исследованию и применению вихревых пучков в случайных средах можно найти в работах [26, 27].

Устойчивость вихревых пучков к случайному воздействию отмечалась в нескольких экспериментальных работах [11, 17, 18, 28]. Заметим, однако, что оптические вихри высоких порядков менее устойчивы к возмущениям оптической среды. В работе [11] 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 [28] было показано, что пучки с более высоким оптическим вихрем больше подвержены влиянию случайных флуктуаций. Именно поэтому для экспериментов нами были выбраны вихревые пучки первого порядка.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование распространения пучков, имеющих одинаковый вихревой топологический заряд, но различную пространственную структуру с длиной волны 1530 нм через случайную искажающую среду. Особое внимание уделено адаптации оптической системы детектирования вихревых пучков на основе корреляционной фильтрации к возникающим случайным угловым блужданиям пучков. Реализация экспериментов выполнялась с использованием ИК-лазера с волоконным выходом и бинарных амплитудных ДОЭ [29, 30].

### 1. Обоснование условий эксперимента и исследование воздействия аэрозольной преграды

Распространение структурированного лазерного пучка с вихрем через случайную среду моделировалось в работе [31] с помощью интегрального выражения, соответствующего расширенному принципу Гюйгенса–Френеля.

Было показано, что просто попадание пучка в случайную среду без всякого распространения уже приводит к искажениям, очень похожим на те, которые происходят и при дальнейшем распространении. Это служит обоснованием для применения при экспериментальном исследовании имитации протяженной случайной среды более короткими участками, чем могут быть при реальном распространении пучков в естественных случайных средах. При этом размерные параметры пучков надо выбирать такие же, как и для передачи на более дальние расстояния.

Выбор длины волны пучков для передачи информации обусловлен, прежде всего, удобством совместности с существующими телекоммуникационными системами, в основном волоконными. В этом плане длина волны 1530 нм представляется достаточно удобной, поскольку близка к телекоммуникационной длине волны 1550 нм и представлена большим выбором достаточно дешевых лазерных диодов с различными способами вывода излучения. Исходя из этих предпосылок, в качестве источника излучения был выбран лазерный диодный модуль ЛПМ-1530 СТ мощностью 2 мВт и волоконным выходом. Как показывают расчеты, диаметр коллимированного пучка 25 мм является вполне достаточным для передачи на расстояния в сотни метров как с точки зрения расходимости, так и по отношению к характерным размерам тепловых потоков воздуха и других естественных преград. Поэтому для коллимации выходящего из световода излучения мы использовали коллиматор F810FC-1550. Данный коллиматор совмещается с оптико-механическими компонентами Thorlabs, рассчитанными на дюймовую оптику, при помощи адаптера для цилиндрических компонентов AD15F с резьбой SM1. Для наблюдения за пучками мы использовали ПЗС-видеокамеру VS320-BCL производства КБ Вита, позволяющую производить съемку изображений с частотой 50 Гц. В диапазоне длин волн 900–1700 нм данная камера имеет очень большой запас чувствительности при 2 мВт мощности лазера. В условиях эксперимента для согласования меняющейся в широких пределах интенсивности пучка с динамическим диапазоном камеры, для ослабления пучка удобнее всего использовать поляризатор LPMIR050-MP2, имеющий поляризационный контраст не хуже 1:2000 в диапазоне длин волн 1500–5000 нм. Кстати, измерения показали, что в условиях свободной укладки подводящего излучение световода поляризация лазерного излучения на выходе световода очень близка к линейной.

В условиях большого запаса мощности лазера было решено использовать для формирования пучков имеющиеся в наличии бинарные амплитудные ДОЭ [29],

хорошо подходящие по размеру под дюймовую оптику. Данные ДОЭ представляют собой кодированные ДОЭ для работы в первом порядке дифракции, изготовленные в виде хромовой маски с толщиной хрома не менее 50 нм. Такая толщина хрома, как следует из справочных материалов, обеспечивает пропускание не более 6% интенсивности излучения на длине волны 1530 нм. Имелось три таких ДОЭ, все они формируют вихревые пучки первого порядка в плюс-минус первом порядке дифракции. Отличия между этими ДОЭ заключаются в амплитудно-фазовых распределениях сформированных пучков, которые соответствуют: моде вихревого Гауссова пучка, аппроксимации моды Лагерра–Гаусса (3,1) и усеченному до трех колец вихревому пучку Бесселя. Соответственно, все три пучка в какой-то степени обладают свойством самовоспроизведения и могут использоваться для атмосферной связи. В первой строке табл. 1 приведены зарегистрированные распределения интенсивности указанных пучков на расстоянии 2 м от коллиматора.

Следующим этапом эксперимента было исследование влияния аэрозолей на распространение пучков. Общая схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка содержит формирователь вихревых пучков (ДОЭ), имитатор случайной среды – нагреватель, анализирующий модан (Модан), Фурье-преобразующую линзу (Л2) и ПЗС-матрицу. Для создания искажающей среды в этом случае вместо нагревателя использовалась установка генерации аэрозолей DF-400W, которая заполняла аэрозольным облаком через трубопровод специальный контейнер около 1 м в длину вдоль оптического пути. Для входа и выхода излучения в контейнере имелись открытые окна. Контейнер способствует воспроизводимости условий эксперимента, так как в нем через достаточно короткое время устанавливается некоторая равновесная концентрация аэрозольных частиц. Такие условия эксперимента приближены к условиям эксперимента в работе [20], только в воздушной среде.

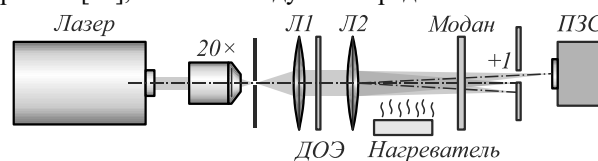


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

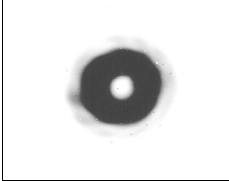
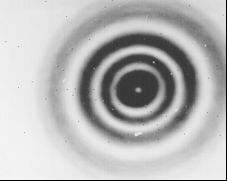

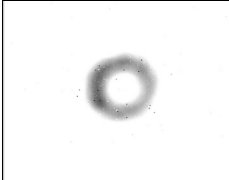
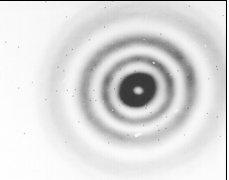

Во второй строке табл. 1 приведены зарегистрированные распределения интенсивности указанных пучков, прошедших через аэрозольное облако в контейнере в отсутствие модана перед регистрирующей камерой. Что касается интегральных характеристик прошедшего через аэрозоль излучения, то наиболее важной является потеря мощности, и она составила для всех трех пучков примерно одинаковую величину около 6,5 % (см. табл. 1). Измерения проводились измерителем мощности Thorlabs – PM122D с германиевым детектором. Другой важной характеристикой является сцинтилляционный индекс  $\eta$  [32]:

$$\sigma_c^2 = \langle \langle I^2 \rangle \rangle / \langle I \rangle^2 - 1, \quad (1)$$

где  $I$  – среднее значение интенсивности пикселей одного кадра фотоприёмного устройства;  $\langle I \rangle$  – среднее значение интенсивности всех кадров.

Значения индекса сцинтилляции для исследуемых мод приведены в третьей строке табл. 1.

Табл. 1. Распространение различных пучков в случайной среде на расстояние 1000 мм (негативные изображения)

	Вихревой гауссов пучок	Лагерра - Гаусса(3,1)	Бесселев пучок вихревой
Исходные пучки			
Пучки после прохождения аэрозоли			
Потеря мощности от аэрозолей	8 %	7,3 %	5,7 %
Сцинтилляционные индексы	0,198232	0,0220342	0,0258922

## 2. Исследование воздействия тепловых потоков и влияния блужданий пучков на работу корреляционной системы распознавания

В работе [21] было предложено использовать оптический коррелятор для распознавания вихревых пучков, прошедших через случайную среду. При этом важнейшей характеристикой такого коррелятора является его устойчивость к сдвигу распознаваемых пучков с вихрями во входной плоскости. В работе было показано, что в случае параллельного сдвига пучков во входной плоскости соответствующие им корреляционные пики не пропадают, а лишь претерпевают аналогичный масштабный сдвиг в соответствующих областях выходной плоскости. Как известно [33], наличие турбулентности в атмосфере приводит к случайным угловым смещениям энергетического центра тяжести распространяющегося оптического пучка. Угловое смещение пучка приведет к сдвигу центра пучка в спектральной плоскости и соответствующему ослаблению корреляционных пиков в зависимости от величины сдвига.

Компенсация угловых смещений пучка является достаточно сложной задачей, и для ее решения разработаны специальные системы [32]. Однако, если угловые смещения не очень велики, их влияние на ослабление корреляционных пиков также может оказаться небольшим. Проводить какие-то предварительные расчеты, видимо, нецелесообразно, поскольку готовых данных о блужданиях пучков в конкретных условиях наших экспериментов нет. Учитывая это обстоятельство все исследования как параметров блужданий, так и образования корреляционных пиков проводились в рамках одного эксперимента.

Как видно, он примерно одинаков у двух многокольцевых пучков и меньше, чем у Гауссова пучка. Это можно объяснить большей площадью сечения, по которой происходит усреднение и, как следствие, усреднением по большему ансамблю.

Очевидно, что в условиях угловых смещений пучков наличие первого Фурье-каскада коррелятора не обязательно. Смещение центра пучка в плоскости корреляционного фильтра будет наблюдаться и в том, и в другом случае, причем примерно в равной степени, поскольку для условий оптической связи удовлетворяется условие дальней зоны. Разумеется, такой подход возможен только для оптических пучков с поперечным распределением комплексной амплитуды, инвариантным к преобразованию Фурье. Обоснованием такого подхода является то, что для оптической связи наилучшими как раз и являются такие пучки, распределение комплексной амплитуды которых в дальней зоне дифракции с точностью до масштаба повторяет исходное распределение в сформированном пучке, то есть пучки, обладающие свойствами самовоспроизведения. В частности, таким свойством обладают вихревые модовые пучки, применение которых рассматривается в данной статье.

Сам эксперимент проводился с тем же набором оборудования, что и в предыдущем эксперименте, только на место контейнера с аэрозолем устанавливался спиральный нагреватель прямоугольной формы со сторонами 15×20 см и мощностью 600 Вт, на котором поддерживалась температура 530–580°С. Свет распространялся над нагревателем на расстоянии 15 см по направлению длинной стороны. Легко понять, что угловые смещения пучков, полученные на сравнительно небольшом отрезке оптического пути, по своему воздействию на процесс фильтрации будут аналогичны полученным на более длинных участках турбулентности. Единственное отличие состоит в том, что при увеличении длины распространения ли-

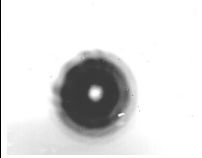
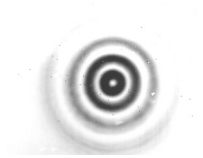
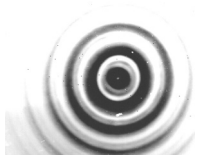
нейное смещение пучка может приводить к его выходу из апертуры оптической системы, но мы не будем рассматривать такие случаи. В табл. 2 приведены данные по смещению энергетического центра тяжести разных пучков при их распространении после участка с потоком нагретого воздуха на расстояние около метра. Видимых искажений распределения интенсивности пучков при этом не происходит.

Таким образом, для определения устойчивости вихревых пучков к искажениям в турбулентной атмосфере достаточно оценить величину смещения положений центров тяжести изображений, определяемых в долях пикселя по зависимостям [34]:

$$X = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} n}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad Y = \frac{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m} m}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M I_{n,m}}, \quad (2)$$

где  $I_{n,m}$  – интенсивность пикселя  $n, m$  (порядковые номера пикселей по столбцам и строкам матрицы фотоприёмного устройства);  $N, M$  – число столбцов и строк матрицы фотоприёмного устройства.

Табл. 2. Смещения энергетического центра тяжести (негативные изображения)

Вихревой гауссов пучок	Лагерра–Гаусса (3,1)	Бесселев пучок вихревой
		
Среднее и максимальное отклонения центра тяжести, пикс		
0,7227 / 5,2528	0,837467 / 5,2766	0,7017 / 3,7034

Нагреватель располагался в начале оптического пути, непосредственно за формирующим ДОО. Из данных табл. 2 можно получить соответствующие углы, в пределах которых происходят смещения пучков. Легко видеть, что эти углы не превышают  $10^{-4}$  рад. Аналогичный эксперимент проводился и для случая формирования изображений пучков в плоскости ПЗС-матрицы при помощи телеобъектива Юпитер-37А. Общее расстояние между оптически сопряженными плоскостями за нагревателем и плоскостью ПЗС составляло около 670 мм, причем на ПЗС получалось уменьшенное изображение. Кратность уменьшения при этом около 1:2,5. Средние флуктуации центра изображения при этом снизились приблизительно в 2,5 раза и составили 0,2844 пикселей на матричном сенсоре. Это лишний раз показывает правильность отказа от одного линзового каскада в оптической схеме.

Поскольку для формирования вихревых пучков в эксперименте использовались соответствующие ДОО с несущей частотой [30], работающие в первом порядке дифракции, часть оптической установки за формирующим ДОО была установлена под углом к оптической оси и настроена на прием первого порядка дифракции.

В качестве анализирующего модана использовался многоканальный фазовый фильтр, согласованный с угловыми гармониками первых трех порядков [35–37]. В эксперименте использовалась Фурье-преобразующая линза с фокусом 500 мм при диаметре освещающего пучка 15 мм. Изображение в выходной плоскости коррелятора, полученное в отсутствие тепловых потоков, приведено на рис. 2. Хорошо виден корреляционный максимум в центре порядка дифракции, соответствующего вихрю 1-го порядка. Далее включался нагреватель и были получены изображения в корреляционной плоскости при наличии турбулентности. Пример таких изображений в разные моменты времени приведен на рис. 3. На этих изображениях так же, как и у исходного пучка, во времени происходят случайные смещения энергетического центра тяжести, но существенных изменений интенсивности корреляционного пика не происходит. Более точно можно проанализировать этот процесс, если по аналогии с исследованиями прохождения пучка через аэрозоли применить понятие сцинтилляционного индекса к интенсивности корреляционного пика. В нашем случае значение индекса  $\eta$  составило 0,00057, что существенно меньше, чем в случае аэрозольной преграды. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная модификация корреляционного метода распознавания вихрей может успешно применяться в условиях турбулентности, сходных с условиями постановки эксперимента.

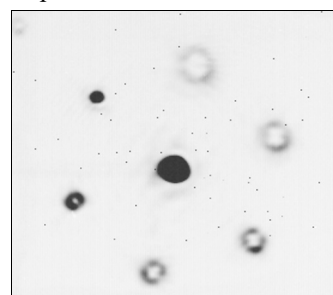


Рис. 2. Изображение в выходной плоскости коррелятора в отсутствие тепловых потоков (негативное изображение)

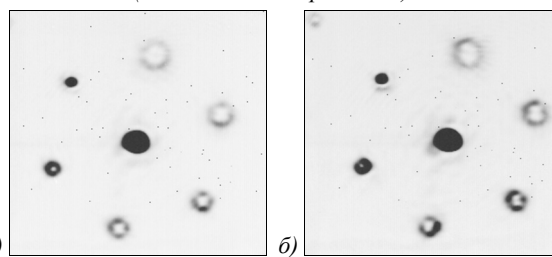


Рис. 3. Примеры распределения интенсивности в выходной плоскости коррелятора при наличии тепловых потоков (а, б – в разные моменты времени) (негативные изображения)

**Заключение**

Теоретически и экспериментально исследовано распространение различным образом структурированных вихревых пучков с длиной волны 1530 нм через случайную искажающую среду. Показано, что зату-

хание пучка не превышает 8% при максимально достижимой концентрации аэрозольных частиц на длине распространения около 1 м. По скинтилляционным индексам наилучшие результаты получены для многокольцевых пучков. Эксперименты также показали применимость модифицированного оптического коррелятора для детектирования наличия вихревой фазы в условиях угловых блужданий пучков, вызванных потоком теплого воздуха.

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (МК-1797.2019.2) в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН в части расчета ДОЭ, гранта РФФИ (№18-29-20045 МК) в части экспериментальных исследований, а также гранта РФФИ (№18-07-01470) в части формирования вихревых пучков.

### 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/PIER15010802.
2. **Korotkova, O.** Random light beams: theory and applications / O. Korotkova. – Boca Raton, FL: CRC Press, 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. **Паранин, В.Д.** Управление формированием вихревых пучков Бесселя в с-срезах одноосных кристаллов за счёт изменения расходимости пучка / В.Д. Паранин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // *Квантовая электроника*. – 2016. – Т. 46, № 2. – С. 163-168.
11. **Kotlyar, V.V.** Algorithm for the generation of non-diffracting Bessel modes / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Journal of Modern Optics*. – 1995. – Vol. 42, Issue 6. – P. 1231-1239.
12. **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, Issue 1. – P. 225-230. – DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
13. **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.
14. **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.
15. **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.
16. **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.
17. **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.
18. **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.
19. **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.
20. **Lavery, M.P.J.** Refractive elements for the measurement of the orbital angular momentum of a single photon / M.P.J. Lavery, D.J. Robertson, G.C.G. Berkhout, G.D. Love, M.J. Padgett, J. Courtial // *Optics Express*. – 2012. – Vol. 20, Issue 3. – P. 2110-2115. – DOI: 10.1364/OE.20.002110.
21. **Aksenov, V.P.** Orbital angular momentum of a laser beam in a turbulent medium: preservation of the average value and variance of fluctuations / V.P. Aksenov, V.V. Kolosov, G.A. Filimonov, C.E. Pogutsa // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 18, Issue 5. – P. 054013. – DOI: 10.1088/2040-8978/18/5/054013.
22. **Khonina, S.N.** A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Paraniin // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74. – DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
23. **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.
24. **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. Willer, S. Ramachandran // *Science*. – 2013. – Vol. 340, Issue 6140. – P. 1545-1548. – DOI: 10.1126/science.1237861.

25. **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.
26. **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.
27. **Хонина, С.Н.** Вихревые лазерные пучки и их применение / С.Н. Хонина. – В кн.: Нанопотоника 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. Сойфер, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – Самара: Новая техника, 2016. – Гл. 4. – С. 275-351. – ISBN: 978-5-88940-140-7.
28. **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.
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. **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.
31. **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.
32. **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.
33. **Peleg, A.** Scintillation index for two Gaussian laser beams with different wavelengths in weak atmospheric turbulence / A. Peleg, J.V. Moloney // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2006. – Vol. 23, Issue 12. – P. 3114-3122. – DOI: 10.1364/JOSAA.23.003114.
34. **Гурвич, А.С.** Лазерное излучение в турбулентной атмосфере / А.С. Гурвич, А.И. Кон, В.Л. Миронов, С.С. Хмелевцов. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
35. **Лукин, В.П.** Коррекция случайных угловых смещений оптических пучков / В.П. Лукин // *Квантовая электроника*. – 1980. – Т. 7, № 6. – С. 1270-1279.
36. **Методы компьютерной оптики** / А.В. Волков, Д.Л. Головашкин, Л.Д. Досколович, Н.Л. Казанский, В.В. Котляр, В.С. Павельев, Р.В. Скиданов, В.А. Сойфер, В.С. Соловьёв, Г.В. Успенъев, С.И. Харитонов, С.Н. Хонина; под ред. В.А. Сойфера. – 2-е изд., исп. – М.: Физмалит, 2003. – 688 с. – ISBN: 5-9221-0434-9.
37. **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. Turunen // *Journal of Modern Optics*. – 2001. – Vol. 48, Issue 10. – P. 1543-1557. – DOI: 10.1080/09500340108231783.

#### Сведения об авторах

Сведения об авторе **Карпеев Сергей Владимирович** см. стр 353 этого номера.

**Подлипов Владимир Владимирович**, инженер НИЛ-35 и ассистент кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженер лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН – филиала Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук (ИСОИ РАН). Область научных интересов: математическое моделирование, электронно-лучевая литография и оптимизация технологических процессов травления в микроэлектронике, дифракционной оптике, технологии обработки и контроля поверхности. E-mail: [podlipnovvv@ya.ru](mailto:podlipnovvv@ya.ru).

**Ивлиев Николай Александрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Кандидат технических наук (2015 год), работает научным сотрудником в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, доцентом кафедры технической кибернетики Самарского университета. Область научных интересов: физика поверхности твердого тела. E-mail: [ivlievn@gmail.com](mailto:ivlievn@gmail.com).

**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](mailto:vparanin@mail.ru).

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 2 апреля 2019 г. Окончательный вариант – 13 мая 2019 г.

## Transmission and detection of informationally loaded beams of wavelength 1530 nm in a random fluctuating medium

S.V. Karpeev<sup>1,2</sup>, V.V. Podlipnov<sup>1,2</sup>, N.A. Ivliev<sup>1,2</sup>, V.D. Paraniin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia;

<sup>2</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

### Abstract

The propagation of variously structured vortex beams of wavelength 1530 nm through a random distorting medium was experimentally investigated. An effect of the aerosol barrier on the scintillation index of the beam was analyzed. The possibility of the correlation detection of the presence of a vortex phase under the beam wandering caused by a flow of warm air was experimentally investigated.

**Keywords:** information loaded beams, optical vortices, telecommunication wavelength, random fluctuations of the optical medium, scintillation index.

**Citation:** Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Paraniin VD. Transmission and detection of informationally loaded beams of wavelength 1530 nm in a random fluctuating medium. *Computer Optics* 2019; 43(3): 368-375. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-368-375.

**Acknowledgements:** This work was partly funded by the RF Ministry of Education and Science under the research project MK-1797.2019.2 within the State task of the Federal Research Center for "Crystallography and Photonics" RAS (DOE calculation) and the Russian Foundation for Basic Research under RFBR grants ## 18-29-20045-mk (experimental research) and 18-07-01470 (formation of vortex beams).

### 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; 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] Paraniin VD, Karpeev SV, Khonina SN. Control of the formation of vortex Bessel beams in uniaxial crystals by varying the beam divergence. *Quantum Electronics* 2016; 46(2): 163-168. DOI: 10.1070/QEL15880.
- [11] Kotlyar VV, Khonina SN, Soifer VA. Algorithm for the generation of non-diffracting Bessel modes. *J Mod Opt* 1995; 42(6): 1231-1239.
- [12] Gbur G, Tyson RK. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation. *J Opt Soc Am A* 2008; 25(1): 225-230. DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Chu X. Evolution of an Airy beam in turbulence. *Opt Lett* 2011; 36(14): 2701-2703. DOI: 10.1364/OL.36.002701.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Lavery MPJ, Robertson DJ, Berkhout GCG, Love GD, Padgett MJ, Courtial J. Refractive elements for the measurement of the orbital angular momentum of a single photon. *Opt Express* 2012; 20(3): 2110-2115. DOI: 10.1364/OE.20.002110.
- [21] Aksenov VP, Kolosov VV, Filimonov GA, Pogutsa CE. Orbital angular momentum of a laser beam in a turbulent medium: preservation of the average value and variance of fluctuations. *J Opt* 2016; 18(5): 054013. DOI: 10.1088/2040-8978/18/5/054013.

- [22] Khonina SN, Karpeev SV, Paraniin VD. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre–Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles. *Optics and Lasers in Engineering* 2018; 105: 68-74. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2018.01.006.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [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] Berezny AE, Karpeev SV, Uspleniev GV. Computer-generated holographic optical elements produced by photolithography. *Optics and Lasers in Engineering* 1991; 15(5): 331-340. DOI: 10.1016/0143-8166(91)90020-T.
- [31] Khonina SN, Karpeev SV, Alferov SV. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter. *Opt Lett* 2012; 37(12): 2385-2387. DOI: 10.1364/OL.37.002385.
- [32] 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.
- [33] Peleg A, Moloney JV. Scintillation index for two Gaussian laser beams with different wavelengths in weak atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am A* 2006; 23(12): 3114-3122. DOI: 10.1364/JOSAA.23.003114.
- [34] Gurvich AS, Kon AI, Mironov VL, Khmelevtsov SS. Laser radiation in a turbulent atmosphere [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1976.
- [35] Lukin VP. Correction of random angular displacements of optical beams. *Soviet Journal of Quantum Electronics* 1980; 10(6): 727-732. DOI: 10.1070/QE1980v010n06ABEH010279.
- [36] Soifer VA, ed. *Methods for computer Design of Diffractive Optical Elements* [In Russian]. New York: "John Willey & Sons, Inc" Publisher; 2002. ISBN: 978-0-471-09533-0.
- [37] 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.

#### Author's information

The information about author **Sergei Vladimirovich Karpeev** you can find on page 355 of this issue.

**Vladimir Vladimirovich Podlipnov**, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of Image Processing Systems Institute of the RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences. His research interests: mathematical modeling, electron-beam lithography, optimization of etching procedures in microelectronics, diffractive optics and techniques for surface processing and inspection. E-mail: [podlipnovvv@ya.ru](mailto:podlipnovvv@ya.ru).

**Nikolay Alexandrovich Ivliev** (b. 1987), graduated from Samara State Aerospace University in 2010 (presently, Samara National Research University, short – Samara University), majoring in Design and Technology of Radioelectronic Equipment. Candidate of Engineering Sciences (2015). Currently he works as the researcher at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, assistant at Technical Cybernetics sub-department of Samara University. Research interests: surface physics, micro- and nanotechnology. E-mail: [ivlievn@gmail.com](mailto:ivlievn@gmail.com).

**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: [vparaniin@mail.ru](mailto:vparaniin@mail.ru).

*Received April 2, 2019. The final version – May 13, 2019.*