

## Распространение пучков Бесселя и суперпозиций вихревых пучков в атмосфере

В.С. Васильев<sup>2</sup>, А.И. Капустин<sup>2</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1</sup>, Н.А. Ивлиев<sup>1</sup>, В.В. Подлипнов<sup>2</sup>, С.В. Ганчевская<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН,

443001, Россия, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151,

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,

443086, Россия, Самарская область, г. Самара, Московское шоссе, д. 34

### Аннотация

Описывается эксперимент по прохождению пучков Бесселя через атмосферу с тепловыми потоками. Показано, что на малых расстояниях пучок Бесселя при прохождении области с тепловыми потоками может искажаться до полной потери структуры, но при дальнейшем распространении на большие расстояния полностью её восстанавливает. Показано, что пучки Бесселя не могут быть использованы в системах связи на больших дистанциях. Также описывается эксперимент с прохождением суперпозиций вихревых пучков через атмосферу с тепловыми потоками и аэрозолями. Показано, что такие пучки при прохождении области с тепловыми потоками также сохраняют свою структуру.

**Ключевые слова:** пучки Бесселя, распространение когерентного излучения в атмосфере, аксикон, вихревой аксикон.

**Цитирование:** Васильев, В.С. Распространение пучков Бесселя и суперпозиций вихревых пучков в атмосфере / В.С. Васильев, А.И. Капустин, Р.В. Скиданов, Н.А. Ивлиев, В.В. Подлипнов, С.В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 3. – С. 376-384. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-376-384.

### Введение

Атмосферная лазерная связь в настоящий момент – это бурно развивающаяся отрасль. Системы лазерной связи широко используются при создании локальных сетей для объектов инфраструктуры, находящихся на расстоянии прямой видимости, когда прокладка оптоволоконных кабелей нецелесообразна. Однако дальнейшему развитию этих систем связи мешает стохастичность среды, в которой передаётся сигнал. В атмосфере присутствуют как твёрдые, так и жидкие взвешенные частицы, движения потоков воздуха, тепловой градиент.

В связи с этим в последние годы появляется большое количество публикаций, в которых анализируется прохождение когерентного и частично когерентного света через атмосферу с турбулентностью, пылью, аэрозольными загрязнениями [1–29, 31–40]. При этом модели строились как для простейших лазерных пучков [22, 31–34], так и для более сложных пучков, обладающих орбитальным угловым моментом [1–24, 35, 36]. Подавляющее большинство таких работ являются теоретическими исследованиями на основе математических моделей разных типов [1–25, 31–36]. Теоретические аспекты распространения пучков Бесселя исследованы очень подробно. Так, в [1] исследуется влияние спектральных ограничений на распространение пучков Бесселя в среде с неколомгоровской моделью турбулентности. В [2, 4, 10] исследуются когерентные свойства пучков Бесселя. В работах [3, 6] вводится так называемый обобщённый пучок Бесселя–Лагерра–Гаусса и исследуется приближённая формула средней осевой интенсивности при его распространении через турбулентную атмосферу. В [5] исследуется использование мультиплексирования на основе орбитального углового момента

для увеличения пропускной способности передачи данных в свободном пространстве на движущиеся платформы. В [7] теоретически и экспериментально доказывается, что пучки Бесселя высоких порядков более устойчивы к тепловым возмущениям в атмосфере. Эксперимент проводился на оптическом столе, часть оптического пути пучка проходила над нагретой пластиной. В [8, 14] исследовалось влияние анизотропии в модели неколомгоровской турбулентности морской атмосферы. В [9] оцениваются усреднённая по апертуре синтиллиация, среднее отношение сигнал/шум и средняя частота битовых ошибок как для обычных вихревых пучков, так и для пучков Бесселя, распространяющихся в турбулентной атмосфере. Показано, что по сравнению с обычными вихревыми пучками пучки Бесселя имеют меньшую усреднённую синтиллиацию. В [11] исследовано влияние сильной турбулентности на состояния орбитального углового момента при распространении инфракрасных бездифракционных пучков в атмосфере. В [12] показано, что среднее значение орбитального углового момента вихревого пучка Бесселя–Гаусса остаётся постоянным при распространении в турбулентной атмосфере.

В работах [15–25] рассматриваются разные модели искажений и разные типы пучков Бесселя, но все эти работы носят теоретический характер. Экспериментальных работ намного меньше, и большинство из них описывают эксперименты на лабораторном столе.

Связано это с техническими трудностями проведения экспериментальных исследований за пределами лаборатории. Тем не менее, есть ряд экспериментальных работ [5, 26–28, 39–42]. Экспериментальные исследования этого направления можно разделить на несколько разных типов: это эксперименты, в которых

по искажениям лазерного пучка определяли свойства атмосферы [37, 38], исследования по влиянию турбулентности на качество изображения в оптической системе [39] и исследования устойчивости разных типов пучков к атмосферным неоднородностям [15]. Есть работы по имитации передачи данных с высокой скоростью через турбулентную атмосферу [27]. Однако полностью отсутствуют эксперименты по использованию пучков Бесселя в открытой атмосфере. Единственный приведённый в этом обзоре пример экспериментальной работы в открытой атмосфере – это [5], где используются обычные вихревые пучки для увеличения скорости передачи информации.

Такой явный перекоп количества публикаций в сторону теоретического анализа и мелкомасштабных экспериментов не является случайным, что и будет показано в этой работе.

Свойство пучков Бесселя восстанавливаться после прохождения препятствия, которое закрывает часть пучка [29], известно давно. Это свойство будет, безусловно, полезным при использовании этих пучков в системах атмосферной связи. В настоящей работе предпринята попытка проведения эксперимента с пучками Бесселя, а также с суперпозицией обычных вихревых пучков в масштабах, близких к масштабам реальных систем оптической атмосферной связи. Для этого было проведено экспериментальное исследование прохождения пучков Бесселя через участок атмосферы с искусственно созданным потоком теплого воздуха, а также с искусственно созданными аэрозольными преградами.

### 1. Эксперимент с пучками Бесселя

Эксперимент проводился в двух разных конфигурациях. Схема первой конфигурации приведена на рис. 1а. Этот эксперимент проводился в длинном коридоре, где сбоку от места прохождения лазерного пучка устанавливался тепловентилятор с диаметром винта 180 мм, который направлял поток горячего воздуха под небольшим углом к направлению распространения света. За счёт зеркала путь, который прошёл световой пучок, удваивался. Общая длина пути составляла 40 м. Вторая конфигурация эксперимента (рис. 1б) была использована уже на открытой местности, и общее расстояние от коллиматора до экрана, на который проецировался пучок Бесселя, составило 110 м. Коллиматор в обеих оптических схемах расширял пучок Бесселя до диаметра центрального самого яркого кольца 50 мм, с общим диаметром 250 мм, что позволяло ему сохранять свою структуру на больших дистанциях. Такой диаметр пучка подбирался, исходя из соотношения для максимального расстояния распространения пучка Бесселя с ограниченной апертурой  $z_{max} = Rk/\alpha$ , где  $R$  – радиус вихревого аксикона,  $\alpha$  – параметр функции Бесселя,  $k$  – волновое число. Для используемого аксикона  $\alpha = 25$ ,  $k$  рассчитывалось для длины волны 532 нм. В результате расчёта получилось, что для формирования пучка Бесселя, который бы сохранялся на расстоянии 110 м, необходим мини-

мальный размер апертуры около 230 мм. Этот расчёт сразу показывает причину, по которой до сих пор не проводились полномасштабные эксперименты с пучками Бесселя в атмосфере. Для более больших расстояний потребуется апертура пучка, пропорциональная расстоянию. Если пытаться передавать пучок Бесселя на 1 км, диаметр апертуры должен быть уже около 2,5 м. Есть, конечно, возможность уменьшения параметра  $\alpha$ , но в этом случае получается пучок Бесселя с малым количеством колец, что приводит к тому, что пучок теряет все свои замечательные свойства.

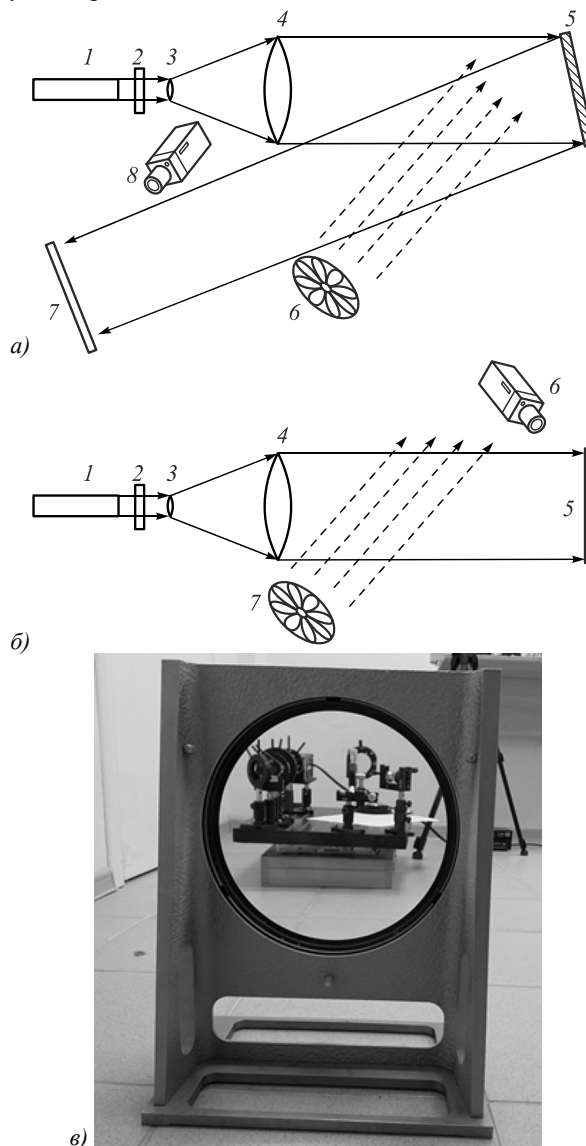


Рис. 1. Оптическая схема эксперимента по прохождению пучка Бесселя через атмосферу в помещении (а) (1 – лазер, 2 – ДОЭ, 3, 4 – коллиматор, 5 – зеркало, 6 – тепловентилятор, 7 – матовый экран, 8 – видеокамера), оптическая схема эксперимента по прохождению пучка Бесселя через атмосферу за пределами помещения (б) (1 – лазер MGL-III-532, 2 – ДОЭ, 3, 4 – коллиматор, 5 – матовый экран), фотография экспериментальной установки (в)

Для формирования пучков Бесселя был использован линейно кодированный вихревой аксикон, рельеф

которого представлен на рис. 2. На рис. 2а представлено изображение микрорельефа под оптическим микроскопом, на рис. 2б – трёхмерная реконструкция центральной части микрорельефа дифракционного оптического элемента, полученная на интерферометре белого света NewView 5000.

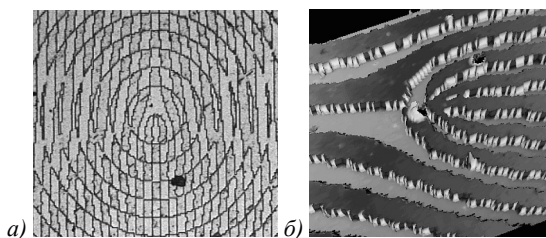


Рис. 2. Центральная часть микрорельефа ДОО, используемая в эксперименте: изображение, полученное на оптическом микроскопе (а), реконструкция на интерферометре белого света New View 7000 (б)

Представленный на рис. 2 элемент формирует в 1-м порядке дифракции пучок Бесселя 5-го порядка.

В эксперименте, который проводился в помещении, поток тёплого воздуха подавался на траекторию пучка возле оборотного зеркала. Регистрация распределения интенсивности проходила с матового белого экрана, поскольку из-за размера пучка и отсутствия второй линзы с апертурой 250 мм не хватало размера светочувствительной матрицы. В первом эксперименте не экранировали –1 порядок дифракции, поэтому рядом были сформированы два одинаковых пучка Бесселя. Эксперимент проводился в безветренную погоду при температуре воздуха 27–28°C. Поток тёплого воздуха при малой мощности создавал на оси пучка область с температурой 40–55°C, при большой мощности температура в этой области достигала 47–65°C. На рис. 3а представлен вид распределения интенсивности при отсутствии потока тёплого воздуха (а), на рис. 3б – при слабом потоке тёплого воздуха (мощность подогрева 1000 Вт), на рис. 3в – при сильном потоке (мощность подогрева 2000 Вт).

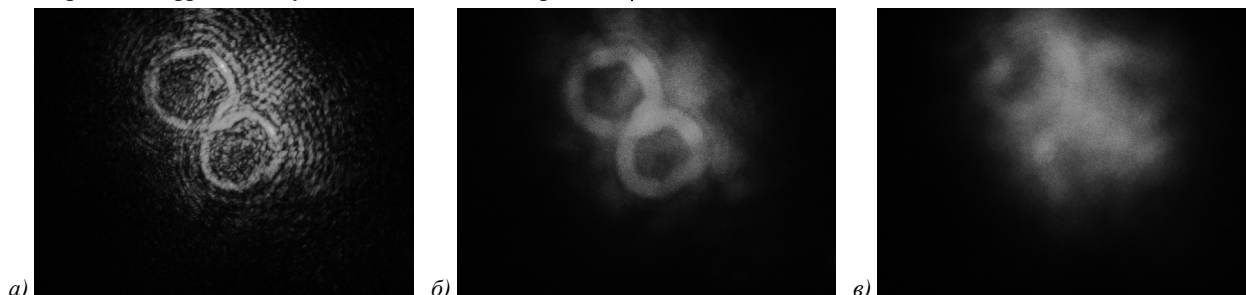


Рис. 3. Распределение интенсивности в двух распространяющихся рядом пучках Бесселя 5-го порядка при отсутствии потока тёплого воздуха (а), при слабом потоке тёплого воздуха (б) (мощность подогрева 1000 Вт), при сильном потоке (в) (мощность подогрева 2000 Вт)

Из рис. 3 хорошо видно, что уже слабый тепловой поток вносит сильные искажения в распределение интенсивности. При сильном тепловом потоке искажения настолько велики, что пучок невозможно идентифицировать как пучок Бесселя. При наличии после области искажений в атмосфере длинного участка спокойного воздуха ситуация меняется. Для этого был проведён эксперимент, в котором на пучок Бесселя действовал точно такой же поток тёплого воздуха, но регистрация распределения интенсивности осуществлялась на расстоянии 110 метров от источника искажений. На рис. 4а представлено распределение интенсивности в центральной части пучка Бесселя на расстоянии 110 м от коллиматора при отсутствии теплового потока, на рис. 4б – при слабом тепловом потоке (1000 Вт), на рис. 4в – при сильном тепловом потоке (2000 Вт).

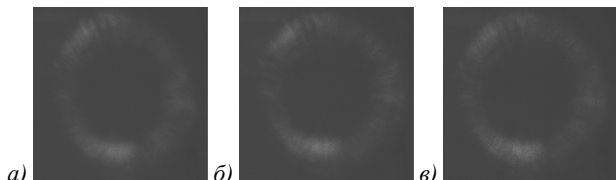


Рис. 4. Распределение интенсивности в центральной части пучка Бесселя на расстоянии 110 м от коллиматора при отсутствии теплового потока (а), при слабом тепловом потоке (1000 Вт) (б), при сильном тепловом потоке (2000 Вт) (в)

Как видно из рис. 4, наличие длинного отрезка относительно спокойного воздуха приводит к тому, что пучок Бесселя, искажённый до неузнаваемости, всё же восстанавливает свою структуру.

Визуально определить качество пучков на рис. 4 невозможно, поэтому для объективного анализа влияния атмосферных искажений на пучок был использован сцинтилляционный индекс

$$\eta = \frac{\langle I^2 \rangle}{\langle I \rangle^2} - 1, \tag{1}$$

где средние значения интенсивностей и квадратов интенсивностей считаются по последовательности изображений пучка для каждого пиксела. Чтобы исключить из расчёта сцинтилляционного индекса колебания фона, расчёт вёлся только по тем областям изображений, где интенсивность превышает среднее значение по растру. Для каждого искажающего воздействия снималась последовательность из пяти изображений, по которым и вычислялся сцинтилляционный индекс. При отсутствии теплового потока  $\eta = 0,0049$ , при включении потока горячего воздуха мощностью 1000 Вт  $\eta = 0,0055$ , при включении потока горячего воздуха мощностью 2000 Вт  $\eta = 0,0067$ . В качестве эталона использовался Гауссов пучок, расширенный до этой же апертуры. Для него соответствующие значения составили  $\eta = 0,0046$ ,  $\eta = 0,0061$ ,  $\eta = 0,0074$ . Видно, что при

наличии тепловых потоков искажение Гауссова пучка выше, чем у пучка Бесселя.

Таким образом экспериментально удалось доказать более высокую устойчивость пучков Бесселя к сильным искажениям в атмосфере по сравнению с Гауссовыми пучками, но необходимым условием для этого является наличие достаточно длинного участка спокойной атмосферы.

Расчёты, проведённые выше, показывают необходимость использования больших по апертуре линз для коллимации пучков Бесселя. Очевидно, что практическое применение пучков Бесселя в системах атмосферной связи на больших дистанциях принципиально невозможно.

### 2. Эксперимент с суперпозициями вихревых пучков

В [30] описаны вихревые аксиконы, которые позволяют формировать комбинации из нескольких оптических вихревых пучков. При этом получаются пучки с некольцевым распределением интенсивности. Поскольку формирование этих пучков осуществляется аксиконами, то следует ожидать, что эти пучки также будут устойчивы к фазовым искажениям. Для работы были выбраны два вихревых аксикона, которые формируют вихревые пучки с простым и хорошо визуально определяемым распределением интенсивности.

На рис. 5а приведена фазовая функция такого вихревого аксикона, который формирует вихревой пучок с топологическими зарядами 2 и 4. Формируемое распределение интенсивности представлено на рис. 5б.

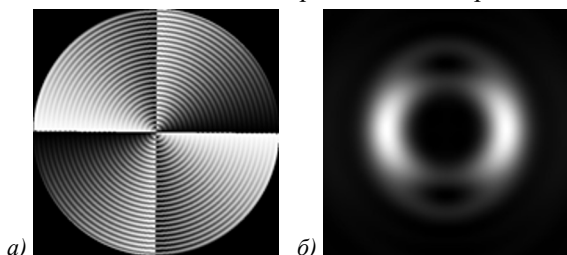


Рис. 5. Фазовая функция вихревого аксикона для формирования вихревого пучка с топологическими зарядами 2 и 4 (а), формируемое распределение интенсивности (б)

Для эксперимента была использована оптическая схема на рис. 1б. Так как необходимости расширять пучок до апертуры 250 мм не было, пучок расширялся коллиматором до размера 50 мм. На рис. 6 представлены экспериментально полученные изображения пучка при разном уровне атмосферных искажений.

По результатам измерения скинтилляционного индекса получились следующие значения: для движущегося воздуха  $\eta = 0,0054$ , для мощности 1000 Вт  $\eta = 0,0061$ , для мощности 2000 Вт  $\eta = 0,0083$ . На первый взгляд результаты получились хуже, чем для Гауссова пучка. Однако, надо учитывать, что Гауссов пучок в предыдущем эксперименте формировался в апертуре 250 мм. После повторения этого эксперимента с апертурой 50 мм соответствующие значения скинтилляционного индекса для Гауссова пучка

составили для движущегося воздуха  $\eta = 0,0051$ , для мощности 1000 Вт  $\eta = 0,0064$ , для мощности 2000 Вт  $\eta = 0,0087$ , что показывает лучшую сохранность составного вихревого пучка.

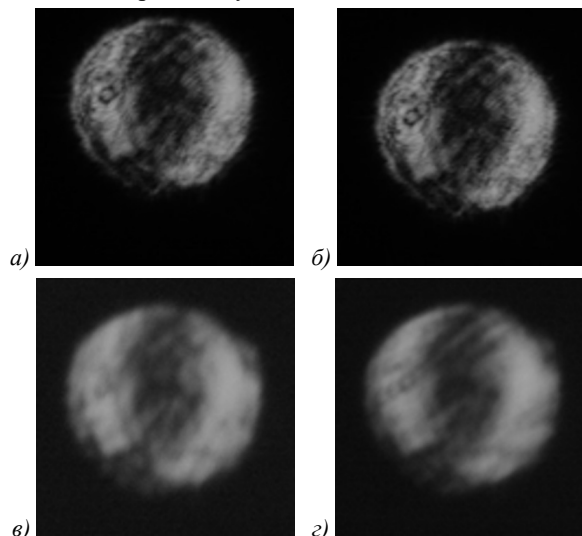


Рис. 6. Распределение интенсивности вихревого пучка с топологическими зарядами 2 и 4 на расстоянии 40 м с неподвижным воздухом (а), при наличии воздушных потоков (б), при наличии потока тёплого воздуха мощностью 1000 Вт (в), при наличии потока тёплого воздуха мощностью 2000 Вт (г)

В экспериментах был использован ещё один вихревой аксикон (рис. 7а), который формирует вихревой пучок топологическими зарядами 5 и 8. На рис. 7б представлено распределение интенсивности в таком пучке.

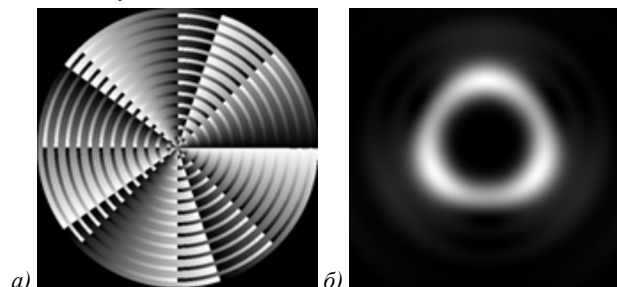


Рис. 7. Фазовая функция вихревого аксикона для формирования вихревого пучка с топологическими зарядами 5 и 8 (а), формируемое распределение интенсивности (б)

Для эксперимента была использована оптическая схема на рис. 1б.

На рис. 8 представлены экспериментально полученные изображения пучка при разном уровне атмосферных искажений.

По результатам измерения скинтилляционного индекса получились следующие значения: для движущегося воздуха  $\eta = 0,0042$ , для мощности 1000 Вт  $\eta = 0,0065$ , для мощности 2000 Вт  $\eta = 0,0076$ . Результаты получились лучше, чем для Гауссова пучка такого же масштаба.

Для пучков этого типа было также изучено влияние аэрозолей на устойчивость их распространения. В

оптическую схему вместо тепловентилятора монтировалась установка для генерации аэрозолей, которая заполняла аэрозольным облаком часть оптической траектории (около 4 м). Установка показана на рис. 9.

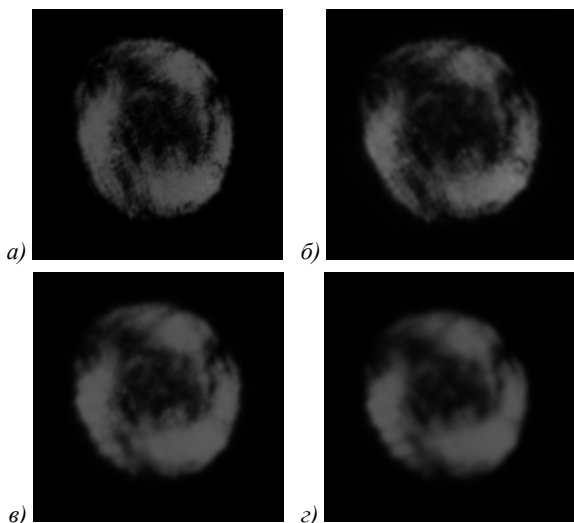


Рис. 8. Распределение интенсивности вихревого пучка с топологическими зарядами 5 и 8 на расстоянии 40 м с неподвижным воздухом (а), при наличии воздушных потоков (б), при наличии потока тёплого воздуха мощностью 1000 Вт (в), при наличии потока тёплого воздуха мощностью 2000 Вт (г)

Поскольку сделать непосредственное измерение концентрации аэрозольных частиц в воздухе не представлялось возможным, контроль этой концентрации осуществлялся по косвенным параметрам. Известна производительность установки по массе использованной жидкости и средний размер генерируемых аэрозольных частиц, а также объём заполняемой части оптической траектории. Примерную концентрацию частиц аэрозоля можно задать, контролируя время генерации. Используемая установка переводит в аэрозольное состояние 24 г жидкости в минуту, средний размер частиц – 15 мкм. Таким образом, каждые 5 с генерации создают концентрацию аэрозольных частиц примерно  $4,2 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$ . Последующие эксперименты проводились с генерацией аэрозоля в течение 5 с, 10 с и 15 с соответственно. На рис. 10 представлены распределения интенсивности.

В табл. 1 приведены данные по значению сцинтилляционного индекса для каждой концентрации аэрозольных частиц для каждого пучка.

Табл. 1 Данные по значению сцинтилляционного индекса для каждой концентрации аэрозольных частиц

Концентрация частиц $\text{м}^{-3}$	Пучок с топологическими зарядами 2 и 4	Пучок с топологическими зарядами 5 и 8
$4,2 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$	0,0058	0,0054
$8,4 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$	0,0079	0,0061
$1,2 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$	0,0097	0,0072

Как видно из табл. 1, пучок с более высокими значениями топологических зарядов в суперпозиции более устойчив к аэрозольному туману.

### Заключение

Проведённый эксперимент наглядно показал, что пучки Бесселя действительно могут восстанавливать свою структуру не только после экранирования части пучка, но и в случае фазовых искажений по всему диаметру пучка. На малых дистанциях фазовые искажения меняют распределение пучка так, что он становится неидентифицируемым как пучок Бесселя. При наличии достаточно продолжительного участка спокойного воздуха пучок Бесселя восстанавливается. Приведённые в статье расчёты показывают, что пучки Бесселя вряд ли могут быть использованы в системах связи на дистанциях более 100 м, что, по всей видимости, и обуславливает отсутствие крупномасштабных экспериментальных работ.

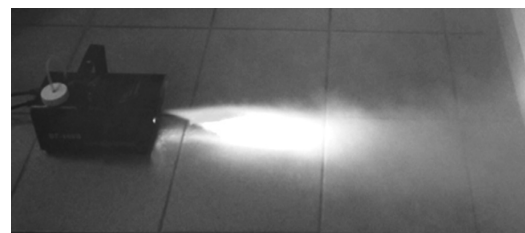


Рис. 9. Внешний вид установки для генерации аэрозоля во время работы

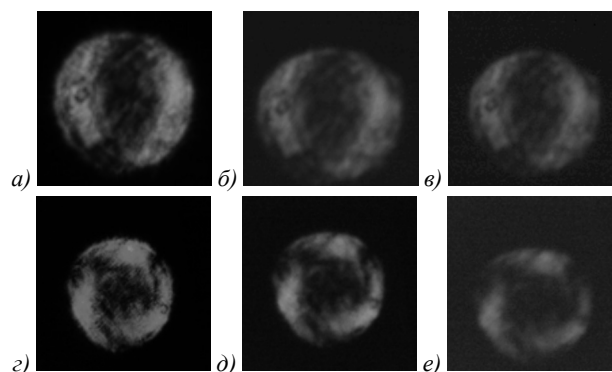


Рис. 10. Распределение интенсивности вихревого пучка с топологическими зарядами 2 и 4 на расстоянии 40 м с концентрацией аэрозольных частиц  $4,2 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$  (а), с концентрацией аэрозольных частиц  $8,4 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$  (б), с концентрацией аэрозольных частиц  $1,2 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$  (в), распределение интенсивности вихревого пучка с топологическими зарядами 5 и 8 на расстоянии 40 м с концентрацией аэрозольных частиц  $4,2 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$  (г), с концентрацией аэрозольных частиц  $8,4 \times 10^5 \text{ м}^{-3}$  (д), с концентрацией аэрозольных частиц  $1,2 \times 10^6 \text{ м}^{-3}$  (е)

Суперпозиции вихревых пучков, генерируемых вихревыми аксиконами, не имеют существенных ограничений по апертуре, но по результатам экспериментов практически также устойчивы к атмосферным искажениям, как и пучки Бесселя. Так, предельное значение сцинтилляционного индекса для пучка Бесселя 5-го порядка составило 0,0074, при тех же самых условиях для суперпозиции вихревых пучков с топологическими зарядами 2 и 4 значение сцинтилляционного индекса составило 0,0083, а для суперпозиции вихревых пучков с топологическими зарядами 5 и 8 – 0,0076. Т.е. результаты во втором случае почти совпадают с результатом для пучка Бесселя.

**Благодарности**

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках госзадания проект № 3.3025.2017/8.9, а также в рамках государственного задания ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26) в части изготовления вихревых аксионов, а также при поддержке грантов РФФИ №№ 18-29-20045мк, 16-29-11744 офм, 16-29-09528 офм.

**Литература**

- Xu, Y** Bandwidth-limited orbital angular momentum mode of Bessel Gaussian beams in the moderate to strong non-Kolmogorov turbulence / Y. Xu, Y. Zhang // *Optics Communication*. – 2019. – Vol. 438. – P. 90-95.
- Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: Review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepagina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- Boufalal, F.** Introduction of generalized Bessel-Laguerre-Gaussian beams and its central intensity travelling a turbulent atmosphere / F. Boufalal, L. Dalil-Essakali, L. Ezziary, A. Belafhal // *Optical and Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 50, Issue 8. – P. 305.
- Lukin, I.P.** Coherence of Bessel-Gaussian beams propagating in a Turbulent atmosphere / I.P. Lukin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2018. – Vol. 31, Issue 1. – P. 49-59.
- Li, Y.** OAM mode of the Hankel-Bessel vortex beam in weak to strong turbulent link of marine-atmosphere / Y. Li, Y. Zhang // *Laser Physics*. – 2017. – Vol. 27, Issue 4. – P. 045201.
- Saad, F.** A theoretical study of the on-axis average intensity of generalized spiraling Bessel beams in a turbulent atmosphere / F. Saad, E.M. El Halba, A. Belafhal // *Optical and Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 49, Issue 3. – P. 94.
- Yuan, Y.** Beam wander relieved orbital angular momentum communication in turbulent atmosphere using Bessel beams / Y. Yuan, T. Lei, Z. Li, Y. Li, S. Gao, Z. Xie, X. Yuan // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – P. 42276.
- Zhu, Y.** Propagation of the OAM mode carried by partially coherent modified Bessel-Gaussian beams in an anisotropic non-Kolmogorov marine atmosphere / Y. Zhu, M. Chen, Y. Zhang, Y. Li // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2016. – Vol. 33, Issue 12. – P. 2277-2283.
- Zhang, Y.** Numerical investigation of flat-topped vortex hollow beams and Bessel beams propagating in a turbulent atmosphere / Y. Zhang, D. Ma, X. Yuan, Z. Zhou // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 32. – P. 9211-9216.
- Lukin, I.P.** Spatial scales of coherence of diffraction-free beams in a turbulent atmosphere / I.P. Lukin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2016. – Vol. 29, Issue 5. – P. 431-440.
- Li, Y.** Statistical distribution of the OAM states of Bessel-Gaussian-Schell infrared beams in strong turbulent atmosphere / Y. Li, Y. Zhang, D. Wang, L. Shan, M. Xia, Y. Zhao // *Infrared Physics and Technology*. – 2016. – Vol. 76. – P. 569-573.
- Lukin, I.P.** Integral momenta of vortex Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere / I.P. Lukin // *Applied Optics*. – 2016. – Vol. 55, Issue 12. – P. B61-B66.
- Teen, Y.P.A.** Study on intensity distributions of a BG beam with effect of tilt and astigmatism aberration in a turbulent atmosphere / Y.P.A. Teen, P. Suresh, T. Nathiyaa, K.B. Rajesh, T.V.S. Pillai // *Optik*. – 2015. – Vol. 126, Issue 23. – P. 3830-3837.
- Wang, X.** Evolution properties of Bessel-Gaussian Schell-model beams in non-Kolmogorov turbulence / X. Wang, M. Yao, Z. Qiu, X. Yi, Z. Liu // *Optics Express*. – 2015. – Vol. 23, Issue 10. – P. 12508-12523.
- Aksenov, V.P.** Random wandering of laser beams with orbital angular momentum during propagation through atmospheric turbulence / V.P. Aksenov, V.V. Kolosov, C.E. Pogutsa // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 17. – P. 3607-3614.
- Nelson, W.** Propagation of Bessel and Airy beams through atmospheric turbulence / W. Nelson, J.P. Palastro, C.C. Davis, P. Sprangle // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2014. – Vol. 31, Issue 3. – P. 603-609.
- Zhu, K.** Study on the propagation parameters of Bessel-Gaussian beams carrying optical vortices through atmospheric turbulence / K. Zhu, S. Li, Y. Tang, Y. Yu, H. Tang // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. – 2012. – Vol. 29(3). – P. 251-257.
- Lukin, I.P.** Bessel-Gaussian beam phase fluctuations in randomly inhomogeneous media / I.P. Lukin // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2010. – Vol. 23(3). – P. 236-240.
- Cang, J.** Axial intensity distribution of truncated Bessel-Gauss beams in a turbulent atmosphere / J. Cang, Y. Zhang // *Optik*. – 2010. – Vol. 121, Issue 3. – P. 239-245.
- Zhu, K.** Propagation of Bessel-Gaussian beams with optical vortices in turbulent atmosphere / K. Zhu, G. Zhou, X. Li, X. Zheng, H. Tang // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16, Issue 26. – P. 21315-21320.
- Eyyuboğlu, H.T.** Intensity fluctuations in J-Bessel-Gaussian beams of all orders propagating in turbulent atmosphere // H.T. Eyyuboğlu, E. Sermetli, Y. Baykal, Y. Cai, O. Korotkova // *Applied Physics B: Lasers and Optics*. – 2008. – Vol. 93, Issue 2-3. – P. 605-611.
- Chen, B.** Propagation of partially coherent Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere / B. Chen, Z. Chen, J. Pu // *Optics & Laser Technology*. – 2008. – Vol. 40, Issue 6. – P. 820-827.
- Eyyuboğlu, H.T.** Propagation of modified Bessel-Gaussian beams in turbulence / H.T. Eyyuboğlu, F. Hardalaç // *Optics and Laser Technology*. – 2008. – Vol. 40, Issue 2. – P. 343-351.
- Noriega-Manez, R.J.** Rytov theory for Helmholtz-Gauss beams in turbulent atmosphere / R.J. Noriega-Manez, J.C. Gutiérrez-Vega // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, Issue 25. – P. 16328-16341.
- Zhu, X.** Transmission matrix-based Electric field Monte Carlo study and experimental validation of the propagation characteristics of Bessel beams in turbid media / X. Zhu, L. Lu, Z. Cao, B. Zeng, M. Xu // *Optics Letters*. – 2018. – Vol. 43(19). – P. 4835-4838.
- Knyazev, B.A.** Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere / B.A. Knyazev, Y.Y. Choporova, V.S. Pavelyev, N.D. Osintseva, B.O. Volodkin // 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). – 2016. – DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758816.
- Chen, S.** Demonstration of 20-Gbit/s high-speed Bessel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation / S. Chen, S. Li, Y. Zhao, J. Liu, L. Zhu, A. Wang, J. Du, L. Shen, J. Wang // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41, Issue 20. – P. 4680-4683.
- Arul Teen, Y.P.** Bessel Gaussian beam propagation through turbulence in free space optical communication / Y.P. Arul Teen, T. Nathiyaa, K.B. Rajesh, S. Karthick // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2018. – Vol. 27(2). – P. 81-88.
- Durnin, J.** Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, Jr, J.H. Eberly // *Physical Review Letters*. – 1987. – Vol. 58. – P. 1499-1501.
- Skidanov, R.V.** Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects / R.V. Skidanov, S.V. Ganchevskaya // *Computer Optics*. – 2014. – Vol. 38(1). – P. 65-71.
- Tozer, T.C.** High-altitude platforms for wireless communications / T.C. Tozer, D. Grace // *IEE Electronics & Com-*

- munication Engineering Journal. – 2001. – Vol. 13(3). – P. 127-137.
32. **Al-Habash, M.A.** Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media / M.A. Al-Habash, L.C. Andrews, R.L. Phillips // *Optical Engineering*. – 2001. – Vol. 40, Issue 8. – P. 1554-1562.
33. **Strömqvist-Vetelino, F.** PDF models of the irradiance fluctuations in Gaussian beam waves / F. Strömqvist-Vetelino, J. Rekolons, L.C. Andrews, C. Young, B. Clare, K. Corbett, K. Grant // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6215. – 62150A.
34. **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.
35. **Weyrauch, T.** Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications / T. Weyrauch, M. Vorontsov // *Applied Optics*. – 2005. – Vol. 44. – P. 6388-6401.
36. **Tunick, A.** Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path / A. Tunick // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16. – P. 14645-14654.
37. **Vorontsov, M.** Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3.63 m telescope / M. Vorontsov, G. Carhart, L. Beresnev, M. Vorontsov, T. Weyrauch, J. Riker, R.V.S. Gudimetla, L.C. Roberts // *Applied Optics*. – 2009. – Vol. 48. – P. A47-A57.
38. **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.
39. **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.
40. **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.

### Сведения об авторах

**Васильев Вадим Сергеевич** (родился 4.04.1993), старший лаборант в Самарском национальном исследовательском университете. Научные интересы: дифракционная оптика, оптическое микроманипулирование. Имеет 3 статьи. E-mail: [yadimka.vasilev.93@mail.ru](mailto:yadimka.vasilev.93@mail.ru).

**Капустин Артем Игоревич** (родился 12.09.1993), аспирант в Самарском национальном исследовательском университете. Научные интересы: дифракционная оптика, оптическое микроманипулирование. E-mail: [kapustin@rocketmail.com](mailto:kapustin@rocketmail.com).

**Скиданов Роман Васильевич**, 1973 года рождения. В 1990 году с отличием окончил Самарский государственный университет (СамГУ) по специальности «Физика». Доктор физико-математических наук (2007 год), работает заведующим лаборатории микро- и нанотехнологий Института систем обработки изображений РАН (ИСОИ РАН), профессором кафедры технической кибернетики Самарского университета. Р.В. Скиданов – специалист в области дифракционной оптики, математического моделирования, обработки изображений и нанофоники. В списке научных работ Р.В. Скиданова 160 статей, 7 монографий. E-mail: [romans@smr.ru](mailto:romans@smr.ru).

Сведения об авторе **Подлипов Владимир Владимирович** см. стр. 377 этого номера.

**Ивлиев Николай Александрович**, 1987 года рождения, в 2010 году окончил Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королёва (СГАУ, ныне – Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва) 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).

**Ганчевская София Владиславовна**, 1992 года рождения, в 2015 получила степень магистра Самарского государственного аэрокосмического университета им. С.П. Королёва по специальности «Прикладные математика и физика». Работает ассистентом кафедры технической кибернетики Самарского университета, инженером лаборатории микро- и нанотехнологий. Область научных интересов: дифракционная оптика, оптическая микроманипуляция, технология изготовления дифракционных оптических элементов. E-mail: [sofi@smr.ru](mailto:sofi@smr.ru).

ГРНТИ: 29.31.41

Поступила в редакцию 22 февраля 2019 г. Окончательный вариант – 15 мая 2019 г.

## Experimental investigation of the stability of Bessel beams in the atmosphere

V.S. Vasilyev<sup>1</sup>, A.I. Kapustin<sup>2</sup>, R.V. Skidanov<sup>1</sup>, V.V. Podlipnov<sup>1</sup>, N.A. Ivliev<sup>1</sup>, S.V. Ganchevskaya<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia;

<sup>2</sup>Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia

**Abstract**

We described an experiment on passing Bessel beams through the atmosphere with heat-trolled flows. We showed that at small distances, while passing through the region with a hot air flow, the Bessel beam can be distorted to a complete loss of the structure, but with further propagation over large distances it completely restores its structure. We also described an experiment with the passage of superpositions of vortex beams through the atmosphere with heat flows and aerosols.

**Keywords:** Bessel beams, propagation of coherent radiation in the atmosphere, axicon.

**Citation:** Vasilyev VS, Kapustin AI, Skidanov RV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Ganchevskaya SV. Experimental investigation of the stability of Bessel beams in the atmosphere. *Computer Optics* 2019; 43(3): 376-384. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-3-376-384.

**Acknowledgements:** The work was funded by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of the state project project No. 3.3025.2017 / 8.9, as well as within the state assignment of the FNITs Crystallography and Photonics of the Russian Academy of Sciences (agreement No. 007-GZ / Ch3363 / 26) production of vortex axicons, as well as with the support of RFBR grants №№ 18-29-20045МК, 16-29-11744 офи\_м, 16-29-09528 офи\_м.

**References**

- [1] Xu Y, Zhang Y. Bandwidth-limited orbital angular momentum mode of Bessel Gaussian beams in the moderate to strong non-Kolmogorov turbulence. *Opt Commun* 2019; 438: 90-95.
- [2] 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.
- [3] Boufalah F, Dalil-Essakali L, Ezzariy L, Belafhal A. Introduction of generalized Bessel–Laguerre–Gaussian beams and its central intensity travelling a turbulent atmosphere. *Optical and Quantum Electronics* 2018; 50(8): 305.
- [4] Lukin IP. Coherence of Bessel-Gaussian beams propagating in a Turbulent atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2018; 31(1): 49-59.
- [5] Li Y, Zhang Y. OAM mode of the Hankel-Bessel vortex beam in weak to strong turbulent link of marine-atmosphere. *Laser Physics* 2017; 27(4): 045201.
- [6] Saad F, El Halba EM, Belafhal A. A theoretical study of the on-axis average intensity of generalized spiraling Bessel beams in a turbulent atmosphere. *Optical and Quantum Electronics* 2017; 49(3): 94.
- [7] Yuan Y, Lei T, Li Z, Li Y, Gao S, Xie Z, Yuan X. Beam wander relieved orbital angular momentum communication in turbulent atmosphere using Bessel beams. *Sci Rep* 2017; 7: 42276.
- [8] Zhu Y, Chen M, Zhang Y, Li Y. Propagation of the OAM mode carried by partially coherent modified Bessel-Gaussian beams in an aniso-tropic non-Kolmogorov marine atmosphere. *J Opt Soc Am A* 2016; 33(12): 2277-2283.
- [9] Zhang Y, Ma D, Yuan X, Zhou Z. Numerical investigation of flat-topped vortex hollow beams and Bessel beams propagating in a turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2016; 55(32): 9211-9216.
- [10] Lukin IP. Spatial scales of coherence of diffraction-free beams in a turbulent atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2016; 29(5): 431-440.
- [11] Li Y, Zhang Y, Wang D, Shan L, Xia M, Zhao Y. Statistical distribution of the OAM states of Bessel-Gaussian-Schell infrared beams in strong turbulent atmosphere. *Infrared Physics and Technology* 2016; 76: 569-573.
- [12] Lukin IP. Integral momenta of vortex Bessel-Gaussian beams in turbulent atmosphere. *Appl Opt* 2016; 55(12): B61-B66.
- [13] Teen YPA, Suresh P, Nathiyaa T, Rajesh KB, Pillai TV. Study on intensity distributions of a BG beam with effect of tilt and astigmatism aberration in a turbulent atmosphere. *Optik* 2015; 126(23): 3830-3837.
- [14] Wang X, Yao M, Qiu Z, Yi X, Liu Z. Evolution properties of Bessel-Gaussian Schell-model beams in non-Kolmogorov turbulence. *Opt Express* 2015; 23(10): 12508-12523.
- [15] Aksenov VP, Kolosov VV, Pogutsa CE. Random wandering of laser beams with orbital angular momentum during propagation through atmospheric turbulence. *Appl Opt* 2014; 17: 3607-3614.
- [16] Nelson W, Palastro JP, Davis CC, Sprangle P. Propagation of Bessel and Airy beams through atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am A* 2014; 31(3): 603-609.
- [17] Zhu K, Li S, Tang Y, Yu Y, Tang H. Study on the propagation parameters of Bessel-Gaussian beams carrying optical vortices through atmospheric turbulence. *J Opt Soc Am A* 2012; 29(3): 251-257.
- [18] Lukin IP. Bessel-Gaussian beam phase fluctuations in randomly inhomogeneous media. *Atmospheric and Oceanic Optics* 2010; 23(3): 236-240.
- [19] Cang J, Zhang Y. Axial intensity distribution of truncated Bessel-Gauss beams in a turbulent atmosphere. *Optik* 2010; 121(3): 239-245.
- [20] Zhu K, Zhou G, Li X, Zheng X, Tang H. Propagation of Bessel–Gaussian beams with optical vortices in turbulent atmosphere. *Opt Express* 2008; 16(26): 21315-21320.
- [21] Eyyuboğlu HT, Sermetulu E, Baykal Y, Cai Y, Korotkova O. Intensity fluctuations in J-Bessel-Gaussian beams of all orders propagating in turbulent atmosphere. *Appl Phys B* 2008; 93(2-3): 605-611.
- [22] Chen B, Chen Z, Pu J. Propagation of partially coherent Bessel–Gaussian beams in turbulent atmosphere. *Opt Laser Technol* 2008; 40(6): 820-827.
- [23] Eyyuboğlu HT, Hardalaç F. Propagation of modified Bessel-Gaussian beams in turbulence. *Opt Laser Technol* 2008; 40(2): 343-351.
- [24] Noriega-Manez RJ, Gutiérrez-Vega JC. Rytov theory for Helmholtz-Gauss beams in turbulent atmosphere. *Opt Express* 2007; 15(25): 16328-16341.
- [25] Zhu X, Lu L, Cao Z, Zeng B, Xu M. Transmission matrix-based Electric field Monte Carlo study and experimental validation of the propagation characteristics of Bessel beams in turbid media. *Opt Lett* 2018; 43(19): 4835-4838.
- [26] Knyazev BA, Choporova YY, Pavelyev VS, Osintseva ND, Volodkin BO. Transmission of high-power terahertz beams with orbital angular momentum through atmosphere. 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz) 2016: 7758816. DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2016.7758816.
- [27] Chen S, Li S, Zhao Y, Liu J, Zhu L, Wang A, Du J, Shen L, Wang J. Demonstration of 20-Gbit/s high-speed Bessel beam encoding/decoding link with adaptive turbulence compensation. *Opt Lett* 2016; 41(20): 4680-4683.
- [28] Arul Teen YP, Nathiyaa T, Rajesh KB, Karthick S. Bessel Gaussian beam propagation through turbulence in free space optical communication. *Optical Memory and Neural Networks* 2018; 27(2): 81-88.
- [29] Durnin J, Miceli JJ Jr, Eberly JH. Diffraction-free beams. *Phys Rev Lett* 1987; 58: 1499-1501.
- [30] Skidanov RV, Ganchevskaya SV. Diffractive optical elements for the formation of combinations of vortex beams in the problem manipulation of microobjects. *Computer Optics* 2014; 38(1): 65-71.



- [31] Tozer TC, Grace D. High-altitude platforms for wireless communications. *IEE Electronics & Communication Engineering Journal* 2001; 13(3): 127-137.
- [32] Al-Habash MA, Andrews LC, Phillips RL. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media. *Optical Engineering* 2001; 40(8): 1554-1562.
- [33] Strömqvist-Vetelino F, Reolons J, Andrews LC, Young C, Clare B, Corbett K, Grant K. PDF models of the irradiance fluctuations in Gaussian beam waves. *Proc SPIE* 2006; 6215: 62150A.
- [34] Eyyuboğlu HT. Propagation of higher order Bessel–Gaussian beams in turbulence. *Appl Phys B* 2007; 88(2): 259-265.
- [35] Weyrauch T, Vorontsov M. Atmospheric compensation with a speckle beacon in strong scintillation conditions: directed energy and laser communication applications. *Appl Opt* 2005; 44: 6388-6401.
- [36] Tunick A. Optical turbulence parameters characterized via optical measurements over a 2.33 km free-space laser path. *Opt Express* 2008; 16: 14645-14654.
- [37] Vorontsov M, Carhart G, Beresnev L, Vorontsov M, Weyrauch T, Riker J, Gudimetla RVS, Roberts LC. Deep turbulence effects compensation experiments with a cascaded adaptive optics system using a 3.63 m telescope. *Appl Opt* 2009; 48: A47-A57.
- [38] Porfirev AP, Kirilenko MS, Khonina SN, Skidanov RV, Soifer VA. Study of propagation of vortex beams in aerosol optical medium. *Appl Opt* 2017; 56(11): E8-E15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [39] Karpeev SV, Parinin VD, Kirilenko MS. Comparison of the stability of LaguerreGauss vortex beams to random fluctuations of the optical environment [In Russian]. *Computer Optics* 2017; 41(2): 208-217. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-2-208-217.
- [40] Khonina SN, Karpeev SV, Parinin 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.

#### *Authors' information*

**Vadim Sergeevich Vasilev** (born in 4.04.1993), he works as senior assistant in Samara National Research University, have 3 papers. Research interests: diffractive optics, optical manipulation. E-mail: [vadimka.vasilev.93@mail.ru](mailto:vadimka.vasilev.93@mail.ru) .

**Artem Igorevich Kapustin** (born in 12.09.1993), he is graduate student in Samara National Research University, have 3 papers. Research interests: diffractive optics, optical manipulation. E-mail: [kapustin@rocketmail.com](mailto:kapustin@rocketmail.com) .

**Roman Vasilevich Skidanov** (b. 1973). Graduated with honours (1990) from Samara State University (SSU), majoring in Physics. He received his Doctor in Physics & Maths (2007) degrees from Samara State University. He is the head of Micro- and Nanotechnologies Laboratory of the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” of the Russian Academy of Sciences, holding a part-time position of professor at SSU’s Technical Cybernetics sub-department. He is co-author of 160 scientific papers, 7 monographs. His current research interests include diffractive optics, mathematical modeling, image processing, and nanophotonics. E-mail: [romans@smr.ru](mailto:romans@smr.ru) .

The information about author **Vladimir Vladimirovich Podlipnov** you can find on page 379 of this issue.

**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 Radio-electronic Equipment. Candidate of Engineering Sciences (2015). Currently he works as a 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) .

**Sofiya Vladislavovna Ganchevskaya** (b. 1992), graduated from Samara State Aerospace University in 2015, majoring in “Applied Mathematics and Physics”. Currently she works as an assistant professor of Technical Cybernetics sub-department of Samara University. Her research interests: diffractive optics, optical manipulation, manufacturing technology of diffractive optical elements. E-mail: [sofi@smr.ru](mailto:sofi@smr.ru) .

*Received February 22, 2019. The final version – May 15, 2019.*