

Передача через атмосферу высокоскоростного сигнала формата 1000BASE-SX/LX вихревыми пучками ближнего ИК-диапазона при помощи модифицированных SFP-трансиверов DEM-310GT

С.В. Карпеев^{1,2}, В.В. Подлипов^{1,2}, Н.А. Ивлиев^{1,2}, С.Н. Хонина^{1,2}

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

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

Аннотация

Экспериментально исследована возможность построения атмосферной оптической системы связи в ближнем ИК-диапазоне на основе пары медиаконвертеров сигнала формата 100Base-TX/1000BASE-T в формат 1000BASE-SX/LX с SFP-трансиверами DEM-310GT. Проведена модификация коннектора волоконного кабеля FAN-OUT TUBING FTB900 SN-Y4, идущего из приемного коллиматора излучения для согласования с трансивером DEM-310GT. Передающий коллиматор излучения дополнен спиральной фазовой пластинкой для формирования вихревого пучка. Проанализировано влияние атмосферных помех на скорость передачи данных.

Ключевые слова: высокоскоростная модуляция, оптические вихри, ближний ИК-диапазон, трансивер, волоконный коллиматор излучения.

Цитирование: Карпеев, С.В. Передача через атмосферу высокоскоростного сигнала формата 1000BASE-SX/LX вихревыми пучками ближнего ИК-диапазона при помощи модифицированных SFP-трансиверов DEM-310GT / С.В. Карпеев, В.В. Подлипов, Н.А. Ивлиев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 4 – С. 578-581. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Khonina SN. High-speed format 1000BASE-SX/LX transmission through the atmosphere by vortex beams near IR range with help modified SFP-transmitters DEM-310GT. Computer Optics 2020; 44(4): 578-581. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.

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 выигранным преимуществом, которая отличает оптический канал [1–3] от классической линии связи (радиочастотной).

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. Наиболее часто для преодоления этих явлений для связи используют лазерные пучки со специальной структурой – вихревые и бездифракционные [10, 11]. Обзор по исследованию и применению вихревых пучков в случайных средах можно найти в работах [12–14].

Успехи в теоретическом исследовании оптической связи в свободном пространстве позволяют перейти к ее

практическому освоению с использованием существующих на данный момент компонент. С технической точки зрения наиболее простой вариант построения атмосферной линии связи состоит в адаптации компонент волоконно-оптических линий связи к работе с участками свободного пространства.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование возможности встраивания в стандартный набор «медиа-конвертер плюс трансивер» пары коллиматоров для волоконной оптики и спиральной фазовой пластинки, формирующей вихревой пучок. Реализация экспериментов выполнялась с использованием медиаконвертеров сигнала формата 100Base-TX/1000BASE-T в формат 1000BASE-SX/LX с SFP-трансиверами DEM-310GT.

1. Доработка стандартного оборудования для проведения эксперимента

Комплект пары медиаконвертеров сигнала формата 100Base-TX/1000BASE-T в формат 1000BASE-SX/LX с SFP-трансиверами DEM-310GT предназначен для двусторонней волоконно-оптической связи по одномодовому волоконному кабелю SM 9/125 LSZH с коннекторами типа LC. Для ввода-вывода излучения из воздуха и в воздух мы использовали коллима-

торы F810FC-1550. Данный коллиматор совмещается с оптико-механическими компонентами Thorlabs, рассчитанными на крепление оптических элементов стандарта диаметра 1", при помощи адаптера для цилиндрических компонентов AD15F с резьбой SM1. Коллиматор рассчитан на патчкорд с коннектором типа FC. И если коллимация выходящего из световода излучения не вызывает труда, то обратный ввод излучения в одномодовый световод с диаметром сердечника 9 мкм при помощи такого коллиматора наталкивается на серьезные трудности. Дело в том, что никакие юстировки собирающей линзы относительно световода не предусмотрены, а юстировка путем управления падающим пучком в этом случае весьма затруднительна. Специальное оборудование для ввода в одномодовые световоды [15–17] не предназначено для подключения стандартных патчкордов.

Выход может быть найден в использовании на этом участке многомодового оптического кабеля типа FAN-OUT TUBING FTB900 SN-Y4, коннекторы которого совместимы с FC-коннекторами. Таким образом, подключение к коллиматору не представляет трудности, а вот совмещение с LC-коннектором требует некоторой доработки. Опытным путем было установлено, что небольшое осевое смещение коннектора LC в разьеме не приводит к потере связи, и, следовательно, несоответствие диаметров LC и FC в данном случае не является препятствием для их стыковки. Для осуществления предложенной доработки на многомодовый кабель с коннектором типу FC-коннектора была закреплена наружная часть LC-коннектора. В результате, хотя торец кабеля и не достигал штатного положения в коннекторе, поглощение в коннекторе оказалось небольшим и слабо влияющим на качество связи.

Для формирования вихревого пучка использовалась спиральная фазовая пластинка, подробно изученная в [18]. Выходящий из коллиматора пучок диаметром 8 мм проходит через пластинку, установленную на штатном механическом трансляторе из комплекта Thorlabs. Как показано в [18], при этом на длине волны 1310 нм формируется вихрь первого порядка. Замеренная мощность излучения в канале передачи данных после спиральной фазовой пластинки составила 0,2 мВт. Измерения проводились измерителем мощности Thorlabs – PM122D с германиевым детектором S122C (700–1800 нм).

2. Исследование воздействия атмосферной турбулентности на скорость передачи информации

Для исследования атмосферного канала связи был собран стенд на основе медиаконвертеров сигнала формата 100Base-TX/1000BASE-T в формат 1000BASE-SX/LX с двухволоконными SFP-трансиверами DEM-310GT, использующими длину волны 1310 нм. Внешний вид и коммутация

устройств, входящих в комплект стенда, показан на рис. 1а, его схема представлена на рис. 1б.

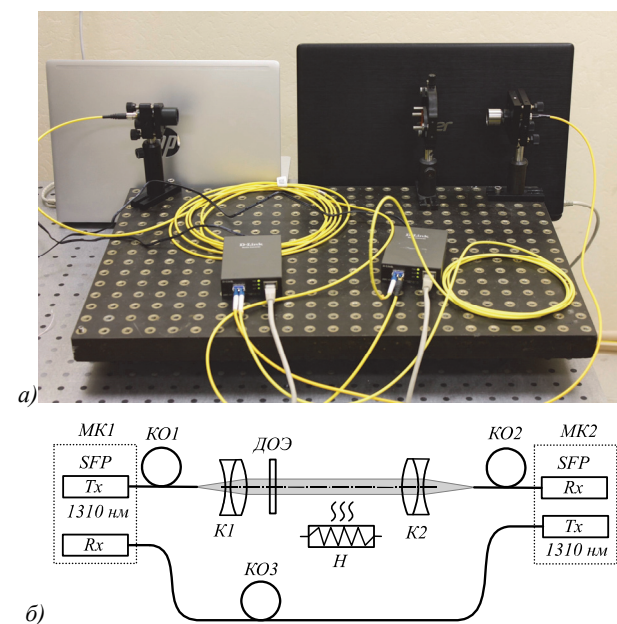


Рис. 1. Экспериментальный стенд: а) внешний вид установки, б) схема экспериментальной установки

Медиаконвертеры обозначены на схеме экспериментальной установки МК1 и МК2 с SFP-трансиверами (SFP).

Один приемо-передающий тракт формировался путем соединения передатчика одного трансивера с приемником второго стандартным одномодовым кабелем Corning Optical Fiber SM 9/125мкм с разъемами типа LC-LC (KO3). Передатчик второго тракта подключался к коллиматору лазерного пучка F810SMA-1550 (K1) с помощью кабеля оптоволоконного (KO1) типа LC-FC 9/125мкм. Гауссов пучок на выходе коллиматора преобразуется в вихревой пучок первого порядка при помощи спиральной фазовой пластинки (ДОЭ). Прошедший через атмосферу пучок заводится в приемник SFP-трансивера вторым коллиматором (K2), соединенным с оптоволоконным кабелем (KO2) типа Corning Fan-Out tubing FTB900SN с разъемами типа FC-FC, доработанными для подключения к трансиверу с соединением LC, как было описано ранее в предыдущем параграфе. Нагреватель (H) использовался для моделирования условий турбулентности при передаче оптического сигнала через атмосферу.

Для наблюдения за пучками и проверки расходимости после коллиматора 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 высокую чувствительность. Для согласования меняющейся в широких пределах интенсивности пучка с динамическим диапазоном камеры, для ослабления пучка удобнее всего использовать поляризатор LPMIR050-MP2, имеющий поляризацион-

ный контраст не хуже 1:2000 в диапазоне длин волн 1500–5000 нм.

В первой строке табл. 1 приведены зарегистрированные распределения интенсивности указанных пучков вплотную и на расстоянии 1 м от коллиматора, а также при смещении пучка от оси пластинки.

Табл. 1. Распределения интенсивности вихревого пучка оптического канала передачи данных через атмосферу (негативные изображения)

| Вихревой пучок вплотную | На расстоянии 1 м | Со смещенным центром |
|---|---|---|
|  |  |  |

Измерения диаметра пучка после прохождения расстояния 1 м показывают расхожимость на уровне 0,016 град, что соответствует заявленному в описании коллиматора.

Атмосферная турбулентность, возникающая из-за тепловых потоков, – один из основных искажающих факторов на атмосферных трассах. Поэтому дальнейшие эксперименты проводились с целью установить влияние атмосферной турбулентности на скорость передачи информации. Эксперимент проводился в помещении, а для воспроизведения тепловых потоков [19] 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.

В эксперименте при передаче сигнала через атмосферу в условиях турбулентности, создаваемой нагревателем, измерялась потеря мощности информационного канала, которая составила величину около 3,5 %. При измерении проводилась отдельная оценка мощности ИК-излучения, непосредственно вносимая нагревателем в оптический канал, и мощность излучения при одновременной работе канала передачи данных с нагревателем. Наличие дополнительного ИК-излучения вызвано излучением молекул воздуха от конвективно переносимых от нагревателя и попадающих в угловое поле работы линии передачи в атмосфере. Измеренная вносимая дополнительная ИК-мощность от нагревателя в диапазоне длин волн 700–1800 нм колебалась в диапазоне 15–20 мкВт. В результате воздействия нагревателя снижается скорость передачи данных на величину около 2%, которая при отсутствии помех составляет более 420 Мбит/с. Такое малое снижение мощности и скорости передачи объяснимо небольшими отклонениями центра масс пучка относительно входного зрачка приемного тракта, описано подробно в [19]. При этом измеренный диаметр пучка составлял порядка 5 мм по полуспаду, а диаметр входного зрачка имеет размер порядка

16 мм. При используемом в условиях эксперимента волокне FAN-OUT TUBING FTB900 SN-Y4 такие отклонения не приводят к существенной потере мощности, как это могло бы быть при использовании одномодового волокна стандарта 9/125 мкм.

Как видно, оно сравнимо со случайными изменениями скорости, всегда присутствующими в Интернете.

Заключение

Экспериментально исследовано применение стандартного телекоммуникационного оборудования для связи в свободном пространстве. Проведена адаптация коннекторной части для использования совместно с волоконно-оптическим коллиматором. В схему дополнительно установлена спиральная фазовая пластинка с возможностью точной юстировки для формирования вихревого пучка. Проведены измерения потерь мощности при воздействии на пучок тепловых потоков, имитирующих атмосферную турбулентность. Потери мощности составляют не более 3,5 %, а снижение скорости передачи – не более 2%. Эксперименты показали применимость модифицированных трансиверов для связи в атмосфере и возможность устойчивой связи даже в условиях турбулентности, вызванной 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 ДОО и гранта РФФИ (№18-29-20045 мк) в части экспериментальных исследований.

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. – DOI: 10.1080/09500349514551071.
12. **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.
13. **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. 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.
14. **Soifer, V.A.** Vortex beams in turbulent media: Review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepa-kina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. – DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
15. **Gavrilov, A.V.** Selective excitation of step-index fiber modes / A.V. Gavrilov, S.V. Karpeev, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, M. Duparré, B. Luedge, S. Schroeter // *Proceedings of SPIE*. – 2006. – Vol. 6605. – 660508. – DOI: 10.1117/12.728461.
16. **Karpeev, S.V.** DOE-aided analysis and generation of transverse coherent light modes in a stepped-index optical fiber / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, M. Duparre, B. Luedge, C. Rockstuhl, S. Schroeter // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2003. – Vol. 12, Issue 1. – P. 27-34.
17. **Karpeev, S.V.** Steplike fiber modes excitement with binary phase DOEs / S.V. Karpeev, V.S. Pavelyev, N.L. Kazanskiy // *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)*. – 2005. – Vol. 14, Issue 4. – P. 223-228.
18. **Khonina, S.N.** Spectral control of the orbital angular momentum of a laser beam based on 3D properties of spiral phase plates fabricated for an infrared wavelength / S.N. Khonina, V.V. Podlipnov, S.V. Karpeev, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy, S.V. Ganchevskaya // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28, Issue 12. – P. 18407-18417. – DOI: 10.1364/OE.396199.
19. **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.

Сведения об авторах

Карпеев Сергей Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва; ведущий научный сотрудник Института систем обработки изображений РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, модовые и поляризационные преобразования, волоконная оптика, оптическая обработка изображений. E-mail: karp@smr.ru.

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.

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.

Хонина Светлана Николаевна, доктор физико-математических наук, профессор Самарского университета; главный научный сотрудник ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Область научных интересов: дифракционная оптика, сингулярная оптика, модовые и поляризационные преобразования, оптическое манипулирование, оптическая и цифровая обработка изображений. E-mail: khonina@ipsiras.ru.

ГРНТИ: 29.31.15.

Поступила в редакцию 29 июня 2020 г. Окончательный вариант – 08 июля 2020 г.

High-speed format 100BASE-SX/LX transmission through the atmosphere by vortex beams near IR range with help modified SFP-transmitters DEM-310GT

S.V. Karpeev^{1,2}, V.V. Podlipnov^{1,2}, N.A. Ivliev^{1,2}, S.N. Khonina^{1,2}

¹ Samara National Research University, Moskovskoye Shosse 34, 443086, Samara, Russia;

² IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS,

Molodogvardeyskaya 151, 443001, Samara, Russia

Abstract

The possibility of constructing a near-infrared atmospheric optical communication system based on a pair of media converters of a signal format 100Base-TX / 1000BASE-T to format 1000BASE-SX / LX with SFP transceivers DEM-310GT was experimentally investigated. The FAN-OUT TUBING FTB900 SN-Y4 fiber cable connector, coming from the receiving radiation collimator for matching with the DEM-310GT transceiver, was modified. The transmitting radiation collimator is supplemented by a spiral phase plate to form a vortex beam. The influence of atmospheric influence on the data rate is analyzed.

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

Citation: Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Khonina SN. High-speed format 1000BASE-SX/LX transmission through the atmosphere by vortex beams near IR range with help modified SFP-transmitters DEM-310GT. *Computer Optics* 2020; 44(4): 578-581. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-772.

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).

References

- [1] Wang F, Liu X, Cai Y. Propagation of partially coherent beam in turbulent atmosphere: a review (invited review). *Prog Electromagn Res* 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. *Prog 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] Parinin 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. DOI: 10.1080/09500349514551071.
 - [12] 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 Photon* 2012; 6: 488-496. DOI: 10.1038/nphoton.2012.138.
 - [13] Khonina SN. Vortex laser beams and their application [In Russian]. In Book: Soifer VA, ed. Nanophotonics and its application in remote sensing systems. Chap 4. Samara: "Novaya Technika" Publisher; 2016: 275-351. ISBN: 978-5-88940-140-7.
 - [14] 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.
 - [15] Gavrilov AV, Karpeev SV, Kazanskiy NL, Pavelyev VS, Duparré M, Luedge B, Schroeter S. Selective excitation of step-index fiber modes. *Proc SPIE* 2006; 6605: 660508. DOI: 10.1117/12.728461.
 - [16] Karpeev SV, Pavelyev VS, Duparre M, Luedge B, Rockstuhl C, Schroeter S. DOE-aided analysis and generation of transverse coherent light modes in a stepped-index optical fiber. *Optical Memory and Neural Networks* 2003; 12(1): 27-34.
 - [17] Karpeev SV, Pavelyev, Kazanskiy NL Step-like fiber modes excitation with binary phase DOEs. *Optical Memory & Neural Networks (Information Optics)* 2005; 14(4): 223-228.
 - [18] Khonina SN, Podlipnov VV, Karpeev SV, Ustinov AV, Volotovskiy SG, Ganchevskaya SV. Spectral control of the
-

orbital angular momentum of a laser beam based on 3D properties of spiral phase plates fabricated for an infrared wavelength. *Opt Express* 2020; 28(12): 18407-18417. DOI: 10.1364/OE.396199.

[19] Karpeev SV, Podlipnov VV, Ivliev NA, Paragin 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

Authors' information

Sergei Vladimirovich Karpeev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research 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 .

Vladimir Vladimirovich Podlipnov, an engineer at Samara National Research University's Lab-35, an engineer of the laboratory of Micro- and Nanotechnology of the 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 .

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 .

Svetlana Nikolaevna Khonina, Doctor of Physical and Mathematical Sciences; Professor of Samara National Research University. Main researcher of the IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. Research interests: diffractive optics, singular optics, mode and polarization transformations, optical manipulating, optical and digital image processing. E-mail: khonina@ipsiras.ru .

Received June 29, 2020. The final version – July 08, 2020.
