

УДК 681.586.5

Б.А. Кузяков¹, А.С. Тимошенко², В.С. Соловьёв²¹Российский технологический университет МИРЭА,
Москва, Российская Федерация²Национальный исследовательский университет МИЭТ,
Москва, Российская Федерация

АКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ОРБИТАЛЬНЫХ УГЛОВЫХ МОМЕНТОВ ФОТОНОВ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье рассматриваются несколько высокоэффективных методов реализации орбитальных угловых моментов фотонов в лазерных пучках, включая использование фазовых пластин, метаповерхностей и инжекцию в световод. Приведенные методы обеспечивают эффективную компенсацию aberrаций турбулентности атмосферы в беспроводных системах телекоммуникаций.

Ключевые слова: фотоны, орбитальный угловой момент, винтовой фазовый фронт, методы реализации, фазовая пластина, световод, инжекция, метаповерхности, компенсация, aberrации, турбулентность, беспроводные, системы телекоммуникаций, области применения.

B.A. Kuzyakov¹, A.S. Timoshenkov², V.S. Solovjev²¹Laser Association RF; RTU MIREA, Moscow, Russian Federation²National Research University MIET, Moscow, Russian Federation

ACTUAL METHODS OF REALIZATION OF ORBITAL ANGULAR MOMENTS OF PHOTONS IN SCIENTIFIC AND TECHNICAL SYSTEMS

The article discusses several highly effective methods for realizing the orbital angular momentum of photons in laser beams, including the use of phase plates, metasurfaces and injection into a fiber. These methods provide effective compensation for turbulence aberrations in wireless telecommunications systems.

Keywords: photons, orbital angular momentum, helical phase front, implementation methods, phase plate, light guide, injection, metasurfaces, compensation, aberrations, turbulence, wireless, telecommunications systems.

Введение

Предположение о том, что электромагнитная волна может обладать угловым моментом впервые была высказана русским физиком А.И. Садовским в конце XIX в. [1]. В середине 30-х гг. XX в. эта идея была экспериментально подтверждена [2, 3]. Векторные вихревые пучки (ВВП), обладающие неразделимыми состояниями света, в

которых поляризация и орбитальный угловой момент (ОАМ) связаны, привлекают все больше внимания в науке и технике [4, 5], благодаря уникальной природе винтового фазового фронта лазерного пучка при разных азимутальных фазовых числах.

1. Виды спиральных пучков. Базовые виды спиральных пучков с малым параметром m приведены на рис. 1, на котором видно, что при параметре $m \neq 0$ в центре пучков имеется область с нулевой интенсивностью. В наше время пучки Лагерра–Гаусса широко используются в телекоммуникации и ряде других областей.

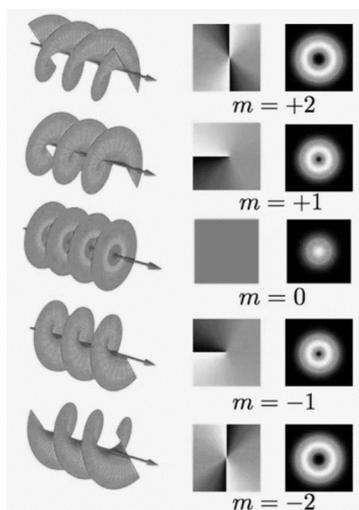


Рис. 1. Основные виды спиральных пучков с малым параметром m , слева – спиральные структуры пучка, справа – фазовые фронты и распределения интенсивности

Анализу спиральных пучков хорошо помогают математические соотношения. Выражение для полного углового момента поля в вакууме получается при выводе уравнений Максвелла и отыскании интегралов движения. Запишем квазиплоскую параксиальную квазимонохроматическую волну в виде:

$$E(\rho, \varphi, z, t) = E_0(\rho, \varphi, z, t) \exp\{ik_0 z - i\omega_0 t\} + \text{с.с.}, \quad (1)$$

где ρ, φ, z – цилиндрические координаты; k_0 – волновое число, соответствующее несущей частоте ω_0 . При этом медленную огибающую $E_0(\rho, \varphi, z, t)$ такой волны можно разложить по полному ортонормированному набору лаггерр-гауссовых функций $U_{pl}^{LG}(\rho, \varphi, z)$:

$$E_0(\rho, \varphi, z, t) = \sum_{p,l} \alpha_{p,l}(t) U_{pl}^{LG}(\rho, \varphi, z), \quad (2)$$

$$U_{pl}^{LG}(\rho, \varphi, z) = \left\{ \frac{C_{pl}^{LG}}{1 + \frac{z^2}{z_R^2}} \right\} \left[\rho \sqrt{\frac{2}{w(z)}} \right]^{|l|} L_p^{|l|} \left[\frac{2\rho^2}{w(z)} \right] \times \exp \left\{ -i(p + |l| + 1) \text{tg}^{-1} \left(\frac{z}{z_R} \right) \right\}. \quad (3)$$

Здесь $\alpha_{p,l}$ – коэффициенты разложения, $C_{p,l}^{LG}$ – нормированная константа, z_R – радиус Рэлея, w_0 – перетяжка пучка в плоскости $z = 0$, $w(z) = w_0[\sqrt{1 + z^2/z_R^2}]$ – радиус перетяжки пучка в плоскости z , $L_p^{|l|}[2\rho^2/w^2(z)]$ – присоединённые полиномы Лагерра.

Целые числа p и l отвечают за поперечный пространственный профиль пучка. Он представляет собой набор $p + 1$ концентрических светлых колец с набегом фазы $2\pi l$ при обходе вокруг оси распространения по замкнутой траектории. В пространстве волновой фронт лаггерр-гауссового пучка перпендикулярен локальному направлению волнового вектора и закручен по спирали (рис. 2).

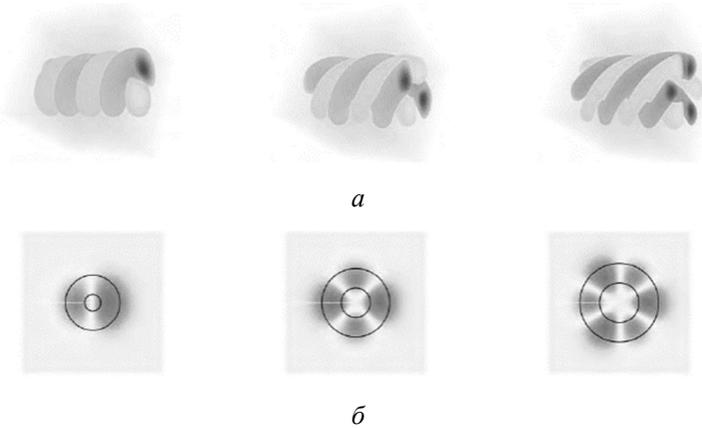


Рис. 2. Поверхности (а) постоянной фазы лаггерр-гауссовых пучков U_{pl}^{LG} с индексом $p = 0$ и $l = 1, 2, 3$ (слева направо); б – пространственное распределение интенсивности пучков с моментами $l = 1, 2, 3$ (слева направо) и индексом $p = 0$ в поперечной плоскости

Число l отвечает за ОУМ светового пучка, на каждый фотон лаггерр-гауссовой моды приходится момент $\hbar l$. Наряду с этим l задаёт

число скачков фазы от 0 до 2π при круговом обходе вокруг оси распространения. Фаза является строго определённой во всех точках поперечной плоскости, кроме точки $p = 0$. В центре пучка находится сингулярная точка с нулевой напряжённостью поля.

2. Схема с уголковыми отражателями. Уголковые отражатели со специальным фазосдвигающим покрытием (рис. 3) создают пространственную поляризационную структуру, в которой плоскость колебаний вектора E вращается с изменением азимута в поперечной плоскости.

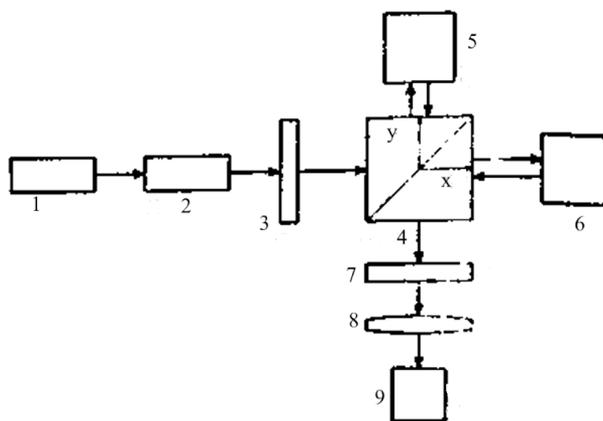


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – He-Ne-лазер; 2 – коллиматор; 3, 7 – линейные поляризаторы; 4 – светоделительный куб; 5, 6 – уголковые отражатели; 8 – объектив; 9 – камера-экран

3. Фазовая пластинка. В модуль 4 (см. рис. 3) наряду с лазером входит спиральная фазовая (СФП) пластинка (рис. 4). Применение СФП позволяет преобразовать обычный лазерный пучок с поперечным распределением по Гауссу в вихревой пучок.

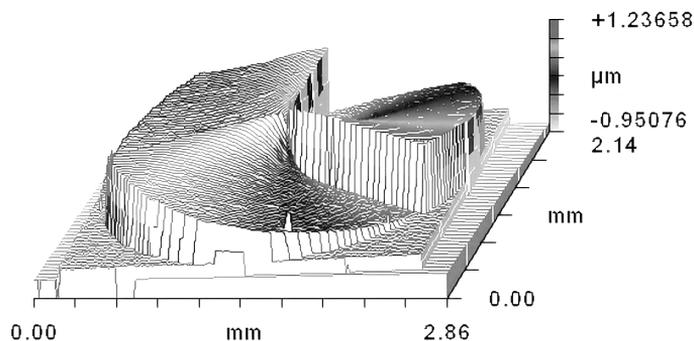


Рис. 4. Вариант выполнения спиральной фазовой пластинки

После прохождения спиральной фазовой пластинки лазерное излучение приобретает вихревую структуру (рис. 5) и характерный вид полого в середине пучка (рис. 6) в виде «пончика» (doughnut).

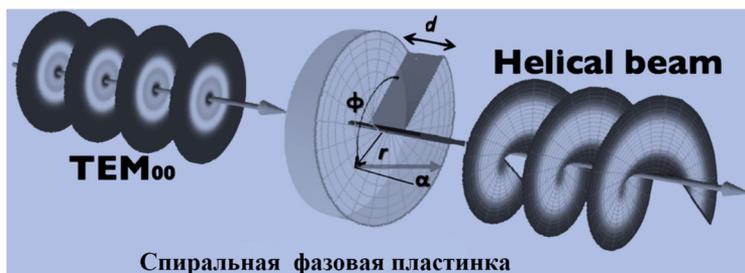


Рис. 5. Лазерное излучение приобретает вихревую структуру после прохождения спиральной пластины

Характерный вид полого в середине пучка приведён на рис. 6.

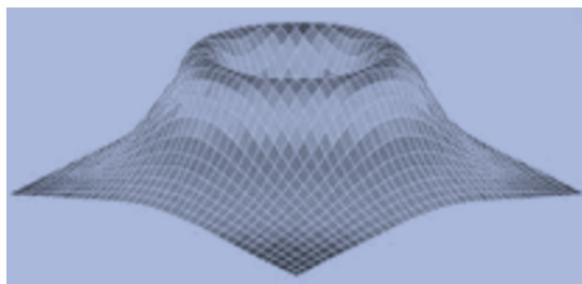


Рис. 6. Характерный вид полого в середине пучка

4. Применение голограммы. Преобразование пучка фотонов на голограмме [14] показано на рис. 7.

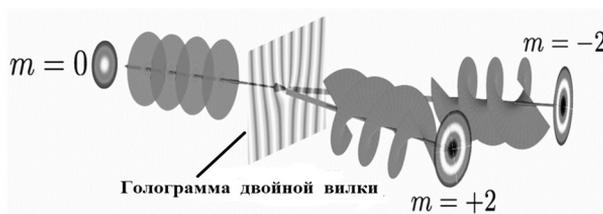


Рис. 7. Преобразование пучка фотонов на голограмме двойной вилки

После прохождения через голограмму двойной вилки образуются два вихревых пучка с разной величиной $m = (+/-)2$, которые чётко разделены в пространстве.

5. Подход на основе использования метаповерхностей. Применение метаповерхностей позволяет создавать световые поля с неизученными ранее свойствами, в том числе уникальные лазерные пучки [6–8] с меньшими aberrациями в сложных атмосферных условиях. Предлагаемые метаповерхности объединяют преобразователь поляризации в виде подполупериодных решеток с изменяющимся периодом и фокусирующий элемент в виде дополнительной структуры. Такая комбинация повышает эффективность преобразования поляризации и уменьшает количество оптических элементов в устройстве. Показано, что преобразование поляризации более высокого порядка обеспечивает больший интегральный обратный поток энергии [10–13]. На рис. 8 приведены примеры преобразования линейно поляризованных пучков в радиально поляризованные пучки порядка m .

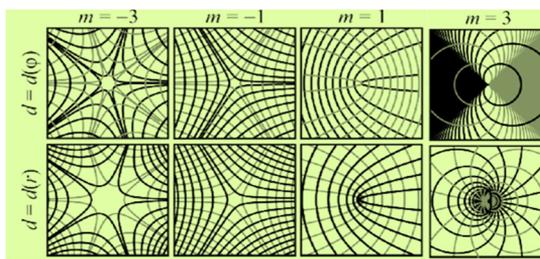


Рис. 8. Примеры преобразования линейно поляризованных пучков в радиально поляризованные пучки порядка m : -3 ; -1 $+1$; $+3$ (слева направо); верхний ряд – вариации только по азимутальному углу φ ; нижний ряд – вариации по радиусу r

6. Инжекция лазерного излучения в световод под малым углом к оси. Для создания мод ОАМ гауссовый пучок инжектировался в торец световода под углом θ на расстоянии y_0 от центра оси. При этом топологический порядок $\langle m \rangle$ внутри волоконного световода задается несложным выражением:

$$\langle m \rangle_{r,\theta} = 2\pi \frac{y_0 \sin\theta}{\lambda}. \quad (4)$$

Для оценки величины m по формуле (1) удобно использовать значение λ в диапазоне 1,5 мкм. Эти длины волн наиболее часто используются в системах телекоммуникации на базе волоконно-оптических линий (ВОЛС). Тогда величина $m = 2$, например, реализуется при $y_0 = 3,2$ мкм и $\sin\theta = 0,15$; а величина $m = -2$ может реализоваться, например, при $y_0 = 6$ мкм в многомодовом волокне при $\sin\theta = -0,08$. При этом параметры лазерных пучков с приведёнными топологическими порядками $m = (+/-)2$ наглядно представлены на рис. 1.

На рис. 9 показаны меридиональные и косые лучи.

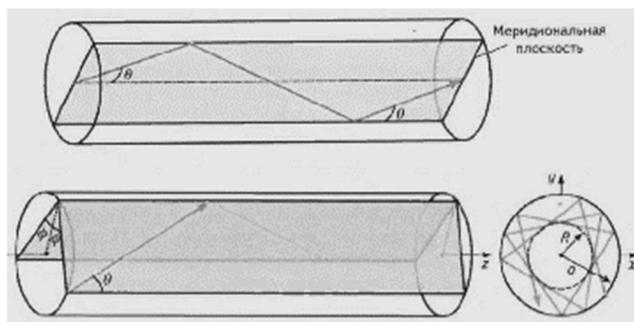


Рис. 9. Меридиональные и косые лучи

Меридиональные лучи лежат в плоскости, проходящей через ось волокна. Косой луч характеризуется плоскостью, содержащей его в параллельной оси волокна. Он определяется углами θ , φ и расстоянием R от содержащей луч плоскости до оси волокна. Траектория меридионального луча лежит в плоскости, проходящей через ось волокна. Траектория косого луча представляет собой винтовую ломаную линию, лежащую внутри цилиндрического слоя с внутренним радиусом R и внешним радиусом a .

7. Бинарная фазовая пластинка. Действие бинарной фазовой пластинки на пучки в ТГц-диапазоне [15] наглядно проиллюстрировано на рис. 10.

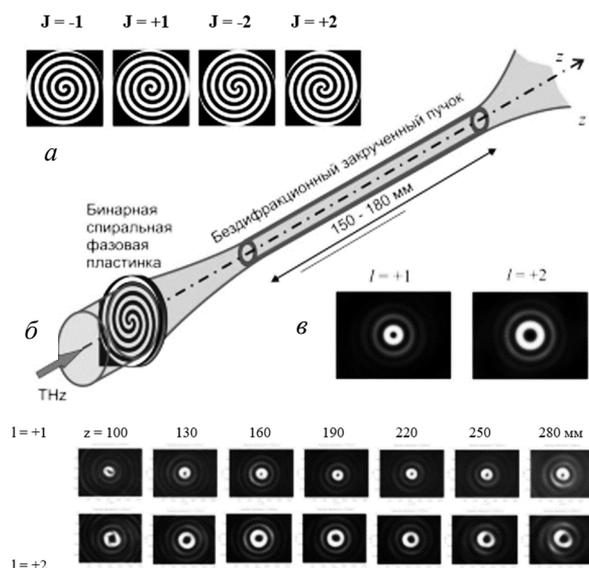


Рис. 10. Воздействие бинарной фазовой пластинки

Вверху (а) – виды пучков с разными величинами j ; в середине (б) – вид закрученного бездифракционного пучка; в середине (в) справа – виды пучков с разными l ; внизу – 2 ряда пучков в поперечном сечении с разными $l = + (1, 2)$ и изменяющимися значениями z (продольное расстояние по оси, начиная от плоскости фазовой пластины) – от 100 до 280 мм.

8. Q-пластина. Q-пластина – это оптическое устройство, которое может формировать световой луч с орбитальным угловым моментом (ОАМ) из луча с четко определенным спиновым угловым моментом (САМ). Q-пластины основаны на связи SAME-OAM, которая может возникать в средах, которые являются как анизотропными, так и неоднородными, в таких, как неоднородная анизотропная двулучепреломляющая волновая пластина. В настоящее время Q-пластины [16] так же реализуются с использованием устройств полного внутреннего отражения, жидких кристаллов, метаповерхностей на основе полимеров и дифракционных решеток. Знак ОАМ контролируется поляризацией входного луча. На рис. 11 показано преобразование лазерного пучка после прохождения q-пластины.

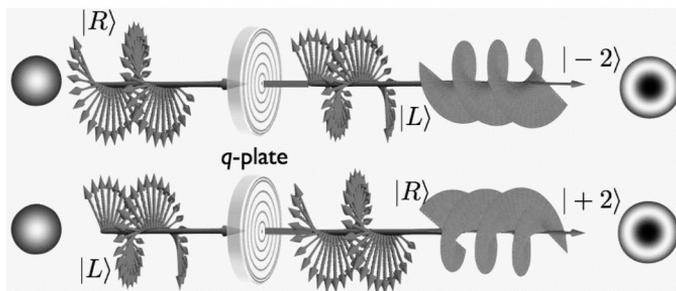


Рис. 11. Вихревая структура лазерного излучения после прохождения через q-пластину

Справа на рис. 11 показаны распределения интенсивности пучка в поперечном сечении. В их центрах видны круговые затемнённые области с нулевой интенсивностью.

9. Использование векторных вихревых пучков. Разработана модель сверточной нейронной сети [8] с генерацией первых 20 мод Цернике, приводящая к коррекции турбулентных aberrаций (ТАССNN). На рис. 12 видно, что в варианте без компенсации (сплошная линия) величины средней квадратичной ошибки (СКО) в максимумах достигают значительных величин: 53 (в 1-й реализации); 32 (в 6-й реализации); 20 (в 9-й реализации). В варианте с эффективной компенсацией aberrаций

турбулентности (пунктирная линия) все величины СКО – менее 5, во всем диапазоне реализаций [9] турбулентности от 1 до 10.

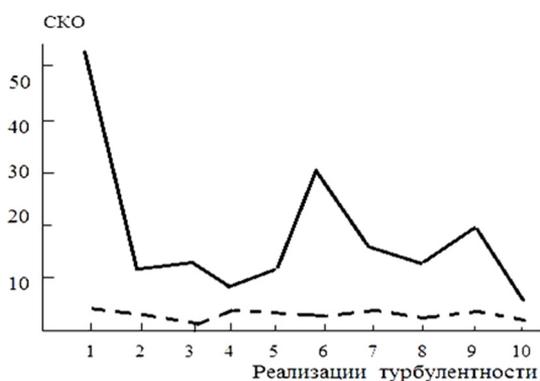


Рис. 12. Варианты эффективной компенсации aberrаций турбулентности для ВВБ

Полученные результаты показывают, что благодаря коррекции чистота моды искаженного ВВБ повышается с 19 до 70 %, при силе турбулентности $D/r_0 = 5,28$ со временем коррекции до 100 мс, без итераций, по сравнению с традиционными алгоритмами. Наряду с этим в ряде работ, включая наши [9], показано, что использование ОАМ приводит к повышению эффективности атмосферных оптических линий связи (АОЛС), включая снижение флуктуаций интенсивности лазерных пучков [9, 17] в турбулентной атмосфере.

Краткие комментарии. Рассматриваемые методы по пп. 2–3 подразумевают использование дополнительных прецизионных оптических элементов. В методе п. 3 необходим жесткий каркас из термостабильных элементов для размещения всей схемы. В методе п. 4 необходима тщательная фокусировка лазерного пучка на выбранное место торца световода с точностью 2–8 мкм в зависимости от типа применяемого световода.

Краткие выводы. Разнообразие приведенных методов показывает возможность выбора наиболее эффективного способа использования ОАМ-фотонов для конкретного решения поставленных задач в весьма широких областях науки и техники. При рассмотрении частотного диапазона от рентгена до радиодиапазона среди множества современных научно-технических областей выделяются лазерные системы телекоммуникаций как проводных, так и в открытом пространстве.

Список литературы

1. Садовский, А.И. Угловой момент в световом пучке с круговой поляризацией / А.И. Садовский // Русское физико-химическое общество. – 1987. – Т. 29, № 2. – С. 82–87.
2. Beth, R.A. Direct detection of the angular momentum of light / R.A. Beth // Phys. Rev. – 1935. – Vol. 48, № 5. – P. 471–472.
3. Holborn, A.N.S. Angular momentum of synchrotron radiation / A.N.S. Holborn // Nature. – 1936. – Vol. 31. – P. 137–142.
4. Поляризационный интерферометр и структурированный свет / В.Ю. Венедиктов, К.Н. Гаврилова, Ю.С. Гудин [и др.] // Фотоника. – 2022. – № 3. – С. 226–234.
5. Thermalization of orbital momentum beams in multimode optical fibers / E.V. Podivilov [et al.] // Physical Review Letters. – 2022. – Vol. 128. – P. 243901.
6. Оптические свойства. Поляризация плоской электромагнитной волны [Электронный ресурс]. – URL: https://present5.com/presentation/3/96346759_396394176.pdf-img/96346759_396394176.pdf-2.jpg (дата обращения: 28.12.2023).
7. Metasurfaces with continuous ridges for invers energy flux generation / S. Degtyarev, D. Savelyev, S. Khonina, N. Kazanskiy // Optics Express. – 2019. – Vol. 27, № 11. – P. 15129–15135.
8. Turbulence aberration correction for vector vortex beams using deep neural networks on experimental data / Y. Zhai, S. Fu, J. Zhang, X. Liu, H. Zhou, C. Gao // Optics Express. – 2020. – Vol. 28, № 5. – P. 7515–7525.
9. Совершенствование оптической телекоммуникационной системы с атмосферными сегментами на основе использования орбитальных угловых моментов фотонов / Б.А. Кузяков, А.Е. Плоскирев, С.И. Шелюфастова, Ф.А. Шереметьев // Интерматик – 2016: материалы МНТК (МИРЭА). – М., 2016. – Ч. 5. – 5 с.
10. Franke-Arnold, S. Advances in optical angular momentum / S. Franke-Arnold, L. Allen, M. Padgett // Laser Photonics Rev. – 2008. – Vol. 2. – P. 299–313.
11. Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A.E. Willner, H. Huang, Y. Yan // Adv. Opt. Photonics. – 2015. – Vol. 7, № 1. – P. 66–72.
12. Закрученные пучки: от рентгена до радиодиапазона [Электронный ресурс] / Б.А. Князев [и др.]. – URL: https://physics-evolution.ru/_files/ugd/4b2514_5766e364c20a4bf4bfcd7f2d25d4aba2.pdf (дата обращения: 28.12.2023).

13. Горохов, А.В. Орбитальный и спиновый угловые моменты фотонов, классический и квантовый подходы / А.В. Горохов // Волны 2016: тр. школы-сем. Когерентная и нелинейная оптика. – 2016. – С. 46–52.

14. [Электронный ресурс]. – URL: [lk.mxi.ru; attachment_1711_1586950139.pdf](http://lk.mxi.ru/attachment_1711_1586950139.pdf) (дата обращения: 28.12.2023).

15. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: I. Review of materials and components / N.V. Petrov, N.V. Sokolenko, B. Kulya, M.S. Goridetsky, A.V. Chernykh // *Light: Advanced Manufacturing*. – 2022. – Vol. 3, № 47. – P. 1–16.

16. Efficient generation and sorting of orbital angular momentum eigenmodes of light by thermally tuned q-plates / E. Karimi, B. Piccirillo, E. Nagali, L. Marrucci, E. Saltamato // *Applied Physics Letters*. – 2009. – Vol. 94, № 23. – P. 231134–231139.

17. Orbital angular momentum beams for high-capacity communications / A.E. Willner, H. Song, K. Zou, H. Zhou // *Journal of Lightwave Technology*. – 2023. – Vol. 41. – P. 1918–1933.

References

1. Sadovskii A.I. Uglovoi moment v svetovom puchke s krugovoi poliarizatsiei [Angular momentum in a light beam with circular polarization]. *Russkoe fiziko-khimicheskoe obshchestvo*, 1987, vol. 29, no. 2, pp. 82–87.

2. Beth R.A. Direct detection of the angular momentum of light. *Phys. Rev.*, 1935, vol. 48, no. 5, p. 471–472.

3. Holborn A.N.S. Angular momentum of synchrotron radiation. *Nature*, 1936, vol. 31, pp. 137–142.

4. Venediktov V.Iu., Gavrilova K.N., Gudim Iu.S. et al. Poliarizatsionnyi interferometr i strukturirovannyi svet [Polarization interferometer and structured light]. *Photonics Russia*, 2022, no. 3, pp. 226–234.

5. Podivilov E.V. et al. Thermalization of orbital momentum beams in multimode optical fibers. *Physical Review Letters*, 2022, vol. 128, p. 243901.

6. Opticheskie svoistva. Poliarizatsiia ploskoi elektromagnitnoi volny, available at: https://present5.com/presentation/3/96346759_396394176.pdf-img/96346759_396394176.pdf-2.jpg (accessed 28 December 2023).

7. Degtyarev S., Savelyev D., Khonina S., Kazanskiy N. Metasurfaces with continuous ridges for inverse energy flux generation. *Optics Express*, 2019, vol. 27, no. 11, pp. 15129–15135.

8. Zhai Y., Fu S., Zhang J., Liu X., Zhou H., Gao C. Turbulence aberration correction for vector vortex beams using deep neural networks on experimental data. *Optics Express*, 2020, vol. 28, no. 5, pp. 7515–7525.

9. Kuziakov B.A., Ploskirev A.E., Shelofastova S.I., Sheremet'ev F.A. Sovershenstvovanie opticheskoi telekommunikatsionnoi sistemy s atmosferynymi segmentami na osnove ispol'zovaniia orbital'nykh uglovykh momentov fotonov [Improvement of optical telecommunication system with atmospheric segments on the basis of using orbital angular momenta of photons]. *Proceedings of the Moscow Scientific and Technical Conference Intermatik. MIREA*, 2016, part 5, 5 p.

10. Franke-Arnold S., Allen L., Padgett M. Advances in optical angular momentum. *Laser Photonics Rev.*, 2008, vol. 2, pp. 299-313.

11. Willner A.E., Huang H., Yan Y. Optical communications using orbital angular momentum beams. *Adv. Opt. Photonics*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 66-72.

12. Kniazev B.A. et al. Zakruchennyye puchki: ot rentgena do radiodiyapazona, available at: https://physics-evolution.ru/_files/ugd/4b2514_5766e364c20a4bf4bfcd7f2d25d4aba2.pdf (accessed 28 December 2023).

13. Gorokhov A.V. Orbital'nyi i spinovyy uglovyye momenty fotonov, klassicheskii i kvantovyy podkhody [Orbital and spin angular momenta of photons, classical and quantum approaches]. *Proceedings of the school-seminar Volny 2016. Coherent and nonlinear optics*, 2016, pp. 46-52.

14. Available at: [lk.mxu.ru; attachment_1711_1586950139.pdf](http://lk.mxu.ru/attachment_1711_1586950139.pdf) (accessed 28 December 2023).

15. Petrov N.V., Sokolenko N.V., Kulya B., Goridetsky M.S., Chernykh A.V. Design of broadband terahertz vector and vortex beams: I. Review of materials and components. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, vol. 3, no. 47, pp. 1-16.

16. Karimi E., Piccirillo B., Nagali E., Marrucci L., Saltamato E. Efficient generation and sorting of orbital angular momentum eigenmodes of light by thermally tuned q-plates. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, no. 23, pp. 231134-231139.

17. Willner A.E., Song H., Zou K., Zhou H. Orbital angular momentum beams for high-capacity communications. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, vol. 41, pp. 1918-1933.

Сведения об авторах

КУЗЯКОВ Б.А.

e-mail: boris.kuzyakov@yandex.ru

кандидат физико-математических наук, член Лазерной ассоциации РФ, доцент, Российский технологический университет МИРЭА, г. Москва, Российская Федерация.

About the authors

B.A. KUZYAKOV

e-mail: boris.kuzyakov@yandex.ru

PhD, Associate Professor, member of Laser Association RF, docent Russian Technology University MIREA, Moscow, Russian Federation.

ТИМОШЕНКОВ А.С.

e-mail: *spt@mieee.ru*

Доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет МИЭТ, г. Москва, Российская Федерация.

A.S. TIMOSHENKOV

e-mail: *spt@mieee.ru*

Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russian Federation.

СОЛОВЬЁВ В.С.

e-mail: *solovjev@polly.phys.msu.ru*

Кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института нано- и микросистемной техники (НМСТ) в составе Московского национального исследовательского университета электронной техники (МИЭТ), г. Москва, Российская Федерация.

V.S. SOLOVJEV

e-mail: *solovjev@polly.phys.msu.ru*

Ph.D., senior researcher at the Institute of Nano- and Microsystem Technology (NMST) as part of the Moscow National Research University of Electronic Technology (MIET), Moscow, Russian Federation

Финансирование. Работа не имела спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Получена: 17.02.2024

Одобрена: 18.02.2024

Принята к публикации: 21.02.2024

Financing. The work was not sponsored.

Conflict of Interest. The authors declare no conflict of interest.

The authors' contribution is equal.

Received: 17/02/2024

Approved: 18/02/2024

Accepted for publication: 21/02/2024

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Кузяков, Б.А. Актуальные методы реализации орбитальных угловых моментов фотонов в научно-технических системах / Б.А. Кузяков, А.С. Тимошенко, В.С. Соловьёв // Прикладная фотоника. – 2024. – Т. 11, № 1. – С. 110–122.

Please cite this article in English as: Kuzyakov B.A., Timoshenkov A.S., Solovjev V.S. Actual methods of realization of orbital angular moments of photons in scientific and technical systems. *Applied photonics*, 2024, vol. 11, no. 1, pp. 110-122.