

Моделирование распространения мод Лагерра-Гаусса через случайную среду на основе аналитического разложения Карунена-Лоэва

М.С. Кириленко¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Для анализа способности тех или иных пучков сохранять информационную стабильность при воздействии случайных флуктуаций оптической среды используется численное моделирование с имитаторами турбулентности, таких как диффузоры, рассеивающие экраны и ячейки турбулентности. Эти имитаторы турбулентности могут быть сгенерированы на основе разложения Карунена-Лоэва, представляющего собой базис собственных функций корреляционного оператора. Имитатор случайной среды, сформированный для гауссовой корреляционной функции, был использован для исследования способности однокольцевых вихревых пучков Лагерра-Гаусса сохранять свою структуру. Результаты показали, что увеличение порядка оптического вихря приводит к меньшей стабильности фазовой сингулярности пучков к случайным оптическим флуктуациям.

1. Введение

Атмосферная оптическая связь даёт возможность передавать данные различного рода между объектами непосредственно в атмосфере без использования какого-либо оптического волокна и не занимая частоты в радио-эфире [1-4]. Такая беспроводная технология широко используется для создания каналов связи между многоэтажными домами и бизнес-центрами на так называемых участках последней мили, для соединения узлов связи от оператора до базовых станций сетей сотовой связи при больших объёмах передаваемого цифрового трафика, а также для связи объектов, когда прокладка кабеля невозможна или её стоимость велика [5, 6]. Современные атмосферные оптические линии связи могут обеспечить передачу данных на расстоянии до 4 км и скорость передачи до 10 Гбит/с.

Хорошо известно, что с ухудшением погоды и повышением турбулентности в существующих системах оптической связи экспоненциально уменьшаются скорость передачи и предельное расстояние [7-9]. Поэтому множество усилий направлено на поиск возможности преодоления негативного влияния турбулентности среды. На сегодняшний день предлагаются несколько способов: лазерных пучков со специальной пространственной структурой [10-18], а также одновременно массивов пучков [19, 20], векторных пучков с неоднородной поляризацией [21- 25] и частично когерентных пучков [26, 27].

Для анализа способности тех или иных пучков сохранять информационную стабильность при воздействии случайных флуктуаций оптической среды используется численное

моделирование с имитаторами турбулентности, таких как диффузоры, рассеивающие экраны и ячейки турбулентности [28, 29].

При анализе и компенсации атмосферных искажений частот используется разложение Карунена-Лозва [30, 31], обеспечивающее некоррелированность коэффициентов разложения [32, 33]. При этом оптимальные свойства функций Карунена-Лозва очень близки к свойствам вытянутых сфероидальных волновых функций [34, 35]. Оба типа функций в общем случае не являются аналитическими, поэтому требуют решения задачи на собственные значения [36-38]. Однако для некоторых типов корреляционного оператора собственные функции имеют аналитический вид, в частности, для гауссова распределения [39] и косинусно-гауссова распределения [40].

В данной работе рассмотрен метод генерации случайного оптического поля (имитатора турбулентности) с помощью разложения Карунена-Лозва для гауссова корреляционного оператора. Через сформированный имитатор случайной среды были распространены однокольцевые пучки Лагерра-Гаусса с целью исследования способности оптических вихрей сохранять свою структуру. Результаты показали, что увеличение порядка оптического вихря приводит к меньшей стабильности фазовой сингулярности пучков к случайным оптическим флуктуациям.

2. Теоретические сведения

Для описания распространения лазерного пучка в среде со случайными искажениями используется расширенный принцип Гюйгенса – Френеля [41, 42]:

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

где $E_0(x, y)$ – поле во входной плоскости (при $z = 0$); $E(u, v, z, t)$ – поле на расстоянии z от входной плоскости; $\Psi(x, y, u, v, z)$ – случайная комплексная фаза, связанная с турбулентностью атмосферы.

Выражение (1) соответствует методу Рытова [9], а функция описывает случайные отклонения фазовой функции сферической волны, распространяющейся от исходной плоскости к выходной.

В связи с тем, что теоретические и экспериментальные параметры турбулентных сред рассматриваются в статистическом аспекте, расширенный принцип Гюйгенса-Френеля используется только для анализа усредненных характеристик световых пучков, таких как средняя интенсивность [9-11, 43-46].

Однако, чтобы исследовать сохранение состояние орбитального углового момента, в данной работе мы моделируем распространение вихревых пучков и их суперпозиций через случайную среду на основе отдельных статистических реализаций.

Чтобы проиллюстрировать используемый подход, запишем частный случай расширенного принципа Гюйгенса – Френеля (1) для одномерной входной функции, так же отбросив зависимость от времени:

$$E(u, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \int_{-\infty}^{\infty} E_0(x) \exp\left\{\frac{ik}{2z}(x-u)^2 + \Psi(x, u, z)\right\} dx. \quad (2)$$

Будем считать, что корреляционная функция случайного поля не зависит от конкретных координат x_1 и x_2 а лишь от их разности. Более того, она не зависит от координат в выходной плоскости, а зависит лишь от расстояния z до неё [42, 47]:

$$R_U\{\exp[\Psi(x_1, u_1, 0)], \exp[\Psi(x_2, u_2, z)]\} = \exp\left[-\frac{(x_1 - x_2)^2}{\rho_0^2}\right], \quad (3)$$

где $\rho_0(z) = (0,545 C_n^2 k^2 z)^{-3/5}$ – длина когерентности распространения сферической волны через турбулентную атмосферу, C_n^2 – структурная постоянная среды, U – случайное поле.

Для определения состояния орбитального углового момента пучка используется скалярное произведение пучка и оптических вихрей:

$$c_m = \int_0^{2\pi} \int_0^R E(r, \varphi, z) \exp(-im\varphi) r d\varphi dr, \quad (4)$$

где $E(r, \varphi, z)$ – анализируемый пучок; $\exp(im\varphi)$ – оптический вихрь p -го порядка (угловая гармоника); c_m – значение весового коэффициента m -го порядка.

Содержание оптического вихря порядка l в пучке определяется по следующей формуле [48, 49]:

$$\beta_l = |c_l|^2 \left(\sum_{m=-M}^M |c_m|^2 \right)^{-1}, \quad (5)$$

где $2M + 1$ – число учитываемых оптических вихрей.

Для моделирования случайного поля будет использоваться разложение Карунена-Лозва:

$$U(x) = \gamma(x) + \sum_{l=0}^N a_l \psi_l(x), \quad (6)$$

где $\gamma(x)$ – математическое ожидание случайного поля (принимается его тождественно равным 1), N – количество рассматриваемых ортогональных функций разложения, $\psi_l(x)$ – собственные функции корреляционной матрицы. Коэффициенты разложения a_l являются независимыми комплексными случайными величинами, имеющими нулевое математическое ожидание и дисперсию μ_l , равную собственному значению соответствующей собственной функции.

Для рассматриваемой корреляционной функции собственные значения и функции известны [39]:

$$\mu_l = \alpha \varepsilon^{2l} \left(\frac{\alpha^2}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\alpha} \right)^2} \right) + \varepsilon^2 \right)^{-l - \frac{1}{2}}, \quad (7)$$

$$\psi_l(x) = \frac{\sqrt[8]{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\alpha} \right)^2}}{\sqrt{2^l l!}} \exp \left\{ - \left(\sqrt{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\alpha} \right)^2} - 1 \right) \frac{\alpha^2 x^2}{2} \right\} H_l \left(\sqrt[4]{1 + \left(\frac{2\varepsilon}{\alpha} \right)^2} \alpha x \right), \quad (8)$$

где α – коэффициент масштабирования, $\varepsilon = 1/\rho$. Результаты моделирования легко обобщаются на двумерный случай.

В качестве входных пучков будем рассматривать моды Лагерра-Гаусса с радиальным числом $n = 0$ и порядком оптических вихрей m :

$$G L_{nm}(r, \varphi) = \exp \left(- \frac{r^2}{2\sigma^2} \right) \left(\frac{r}{\sigma} \right)^{|m|} L_n^{|m|} \left(\frac{r^2}{\sigma^2} \right) \exp(im\varphi), \quad (9)$$

где σ – радиус перетяжки Гауссова пучка, $L_n^{|m|}(\cdot)$ – обобщённые полиномы Лагерра [50, 51].

3. Моделирование распространения

При моделировании случайного поля использовались следующие параметры: $\rho = 0,3$ мм, $\alpha = 16$. Количество собственных функций, участвующих в разложении $N = 20$. Сравнение теоретической и выборочной корреляционных функций для случайного поля приведено на рисунке 1. На рисунке 2 изображены амплитуда и фаза одномерного случайного поля. На рисунке 3 также изображено случайное поле, но уже двумерное.

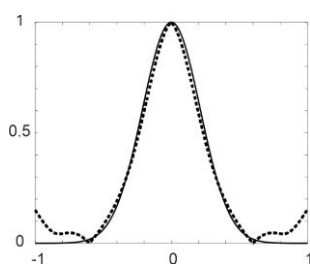


Рисунок 1. Теоретическая и выборочная корреляционные функции.

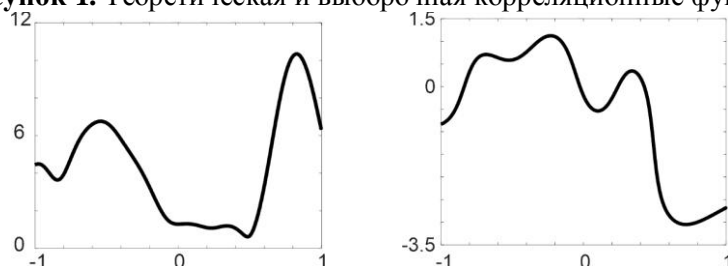


Рисунок 2. Амплитуда и фаза одномерного случайного комплексного поля.

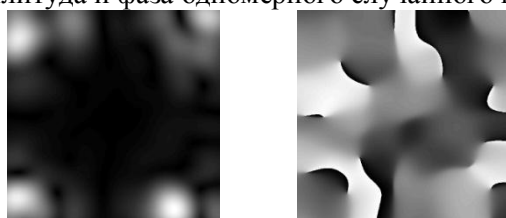


Рисунок 3. Амплитуда и фаза двумерного случайного комплексного поля.



До прохождения через случайную среду После прохождения через случайную среду
Рисунок 4. Интенсивность и фаза оптического поля, соответствующего моде однокольцевой моде Лагерра-Гаусса с порядком оптического вихря, равным 3.

При моделировании распространения моды Лагерра-Гаусса через случайную среду будем варьировать порядок оптического вихря m , а остальные параметры зафиксируем следующим образом: $\sigma = 0,2\text{мм}$, $z = 100\text{мм}$, $\lambda = 532\text{нм}$. На рисунке 4 представлены изображения пучка до и после прохождения среды со случайными искажениями. В качестве примера рассмотрена мода с порядком оптического вихря, равным 3. После распространения пучка на заданное расстояние z требуется рассчитать содержание оптических вихрей (5). Результаты расчётов собраны в таблицу 1.

Таблица 1. Содержание оптических вихрей p в пучке Лагерра-Гаусса (с порядком вихря m) после прохождения случайной среды.

	$m = 0$	$m = 1$	$m = 2$	$m = 3$	$m = 4$	$m = 5$
$p = 0$	0,9822	0,0085	0,0382	0,0024	0,009	0,074
$p = 1$	0,0023	0,9493	0,0293	0,0523	0,0061	0,0123
$p = 2$	0,0059	0,0042	0,8875	0,0667	0,0627	0,015
$p = 3$	0,0038	0,0126	0,0064	0,805	0,1151	0,0733
$p = 4$	0,0003	0,0067	0,0222	0,0094	0,6981	0,1617
$p = 5$	0	0,0005	0,0085	0,0332	0,013	0,5743

Как видно из таблицы 1, при увеличении порядка оптического вихря энергия сильнее перетекает в другие порядки, что сочетается с результатами, полученными ранее. Тем не менее, следует дополнительно изучить, что будет происходить с пучком при распространении дальше, как в случайной среде, так и в среде без искажений.

4. Заключение

В данной работе был рассмотрен метод генерации случайного оптического поля с помощью разложения Карунена-Лоэва. Через полученную случайную среду были распространены однокольцевые пучки Лагерра-Гаусса, чтобы на основании моделирования определить способность оптических вихрей сохранять свою структуру. Результаты показали, что при увеличении порядка оптического вихря энергия сильнее переходит в другие порядки после распространения пучка через случайную среду.

5. Благодарности

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-20045 мк) и ведущей научной школы НШ-6307.2018.8.

6. Литература

- [1] Ramirez-Iniguez, R. Optical Wireless Communications: IR for Wireless Connectivity / R. Ramirez-Iniguez, S.M. Idrus, Z. Sun – London: Taylor & Francis Group, Book, CRC Press, 2007. – 376 p.
- [2] 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.
- [3] Henniger, H. An Introduction to Free-space Optical Communications / H. Henniger, O. Wilfer // Radioengineering. – 2010. – Vol. 19(2). – P. 203-212.
- [4] Willner, A.E. Recent advances in high-capacity free-space optical and radio-frequency communications using orbital angular momentum multiplexing / A.E. Willner, Y. Ren, G. Xie, Y. Yan, L. Li, Z. Zhao, J. Wang, M. Tur, A.F. Molish, S. Ashrafi // Philos. Trans. A Math Phys. Eng. Sci. – 2017. – Vol. 375. – P. 20150439.
- [5] Krenn, M. Communication with spatially modulated light through turbulent air across Vienna / M. Krenn, R. Fickler, M. Fink, J. Handsteiner, M. Malik, T. Scheidl, R. Ursin, A. Zeilinger // New J. Phys. – 2014. – Vol. 16. – P. 113028.
- [6] Ren, Y. Experimental characterization of a 400 Gbit/s orbital angular momentum multiplexed free-space optical link over 120 m / Y. Ren, Z. Wang, P. Liao, L. Li, G. Xie, H. Huang, Z. Zhao, Y. Yan, N. Ahmed, A. Willner, M. P. J. Lavery, N. Ashrafi, S. Ashrafi, R. Bock, M. Tur, I. B. Djordjevic, M. A. Neifeld, A. E. Willner // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41. – P. 622.
- [7] Isumaru, A. Wave Propagation and Scattering in Random media / A. Isumaru – New York: John Wiley & Sons, 1999. – 272 p.
- [8] Mishchenko, M.I. Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles / M.I. Mishchenko, L.D. Travis, A.A. Lacis – Cambridge: Cambridge University Press, 2002. – 462 p.
- [9] Andrews, L.C. Laser beam propagation in random media / L.C. Andrews – Bellingham, WA: SPIE Optical Engineering Press, 2005. – 808 p.
- [10] Eyyuboglu, H.T. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence / H.T. Eyyuboglu // Applied Physics B. – 2007. – Vol. 88(2). – P. 259-265. DOI: 10.1007/s00340-007-2707-6.
- [11] Gbur, G. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation / G. Gbur, R.K. Tyson // J. Opt. Soc. Am. A. – 2008. – Vol. 25. – P. 225-230. DOI: 10.1364/JOSAA.25.000225.
- [12] Кириленко, М.С. Передача информации с использованием оптических вихрей / М.С. Кириленко, С.Н. Хонина // Известия Самарского научного центра РАН. – 2012. – Т. 14, № 6. – С. 292-299.

- [13] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shchepakina // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.
- [14] 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(11). – P. E5-15. DOI: 10.1364/AO.56.0000E8.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Кириленко, М.С. Исследование устойчивости топологического заряда многокольцевых вихревых пучков Лагерра–Гаусса к случайным искажениям / М.С. Кириленко, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, № 4. – С. 567-576.
- [19] Polynkin, P. Optimized multiemitter beams for free-space optical communications through turbulent atmosphere / P. Polynkin, A. Peleg, L. Klein, T. Rhoadarmer, J.V. Moloney // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(8). – P. 885-887. DOI:10.1364/OL.32.000885.
- [20] Chen, C. Propagation of radial Airy array beams through atmospheric turbulence / C. Chen, H. Yang, M. Kavehrad, Z. Zhou // *Optics and Lasers in Engineering*. – 2014. – Vol. 52. – P. 106-114. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.07.003.
- [21] Gu, Y. Scintillation of nonuniformly polarized beams in atmospheric turbulence / Y. Gu, O. Korotkova, G. Gbur // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34(15). – P. 2261-2263. DOI: 10.1364/OL.34.002261.
- [22] Zhou, P. Propagation property of a nonuniformly polarized beam array in turbulent atmosphere / P. Zhou, X. Wang, Y. Ma, H. Ma, X. Xu, Z. Liu // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50(9). – P. 1234-1239. DOI: 10.1364/AO.50.001234.
- [23] Milione, G. Using the nonseparability of vector beams to encode information for optical communication / G. Milione, T.A. Nguyen, J. Leach, D.A. Nolan, R.R. Alfano // *Opt. Lett.* – 2015. – Vol. 40. – P. 4887.
- [24] Moreno, I. Vector beam polarization state spectrum analyzer / I. Moreno, J.A. Davis, K. Badham, M.M. Sánchez-López, J.E. Holland, D.M. Cottrell // *Sci. Rep.* – 2017. – Vol. 7. – P. 2216.
- [25] Khonina, S.N. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, S.V. Karpeev // *Optics Express*. – 2019. – Vol. 27(13). – P. 18484-18492. DOI: 10.1364/OE.27.018484.
- [26] Gbur, G. Angular spectrum representation for the propagation of arbitrary coherent and partially coherent beams through atmospheric turbulence / G. Gbur, O. Korotkova // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 2007. – Vol. 24. – P. 745-752. DOI: 10.1364/JOSAA.24.000745.
- [27] Chen, R. Statistical properties of a cylindrical vector partially coherent beam in turbulent atmosphere / R. Chen, Y. Dong, F. Wang, Y. Cai // *Appl. Phys. B*. – 2013. – Vol. 112. – P. 247-259.
- [28] Thomas, S. A simple turbulence simulator for adaptive optics // *Proceedings of SPIE*. – 2004. – Vol. 5490. – P. 766-773. DOI: 10.1117/12.549858.

- [29] Mishra, S.K. Design and testing of customized phase plate as atmospheric turbulence simulator / S.K. Mishra, A. Dixit, V. Porwal, D. Mohan // 37th National Symposium of OSI at Pondicherry University. – 2013. – P. 172-174. DOI: 10.13140/2.1.4106.5920.
- [30] Fukunaga, K. Representation of random processes using the finite Karhunen-Loeve expansion / K. Fukunaga, W.L.G. Koontz // Information and Control. – 1970. – Vol. 16(1). – P. 85-101.
- [31] Wang, L. Karhunen-Loeve Expansions and their Application / L. Wang – Ann Arbor: ProQuest, 2008. – 292 p.
- [32] Soifer, V.A. Decorrelated features of images extracted with the aid of optical Karhunen-Loeve expansion / V.A. Soifer, M.A. Golub, S.N. Khonina // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1993. – Vol. 3(3). – P. 289-295.
- [33] Soifer, V.A. Stability of the Karhunen-Loeve expansion in the problem of pattern recognition / V.A. Soifer, S.N. Khonina // Pattern Recognition and Image Analysis. – 1994. – Vol. 4(2). – P. 137-148.
- [34] Fancourt, C.L. On the relationship between the Karhunen-Loeve transform and the prolate spheroidal wave functions / C.L. Fancourt, C. Principe // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. – 2000. – Vol. 1. – P. 261-264.
- [35] Kirilenko, M.S. Coding of an optical signal by a superposition of spheroidal functions for undistorted transmission of information in the lens system / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9146. – P. 91560J. DOI: 10.1117/12.2054214.
- [36] Хонина, С.Н. Метод вычисления собственных значений вытянутых сфероидальных функций нулевого порядка / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, В.А. Сойфер // Доклады Академии наук. – 2001. – Т. 376, № 1. – С. 30-33.
- [37] Кириленко, М.С. Вычисление собственных функций ограниченного дробного преобразования Фурье / М.С. Кириленко, Р.О. Зубцов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39, № 3. – С. 332-338. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-3-332-338.
- [38] Хонина, С.Н. Формирование заданных распределений на основе разложения по вихревым собственным функциям ограниченного непараксиального оператора распространения / С.Н. Хонина, С.Г. Волоотовский, М.С. Кириленко // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 2. – С. 184-192. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-2-184-192.
- [39] Fasshauer, G.E. Positive definite kernels: past, present and future // Dolomite Research Notes on Approximation. – 2011. – Vol. 4. – P. 21-63.
- [40] Голуб, М.А. Разложение Карунена-Лозва при экспоненциально-косинусной корреляционной функции / М.А. Голуб, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 1993. – Т. 13. – С. 49-53.
- [41] Feizulin, Z.I. Broadening of a laser beam in a turbulent medium / Z.I. Feizulin, Y.A. Kravtsov // Radiophysics and Quantum Electronics. – 1967. – Vol. 10(1). – P. 33-35.
- [42] Young, C.Y. Turbulence-induced beam spreading of higher-order mode optical waves / C.Y. Young, Y.V. Gilchrest, B.R. Macon // Optical Engineering. – 2002. – Vol. 41. – P. 1097-1103
- [43] Ishimaru, A. Wave propagation and scattering in random media / A. Ishimaru – New York: Academic Press, 1978. – 272 p.
- [44] Fante, R.L. Wave propagation in random media: a systems approach // Progress in Optics. – 1985. – Vol. 22. – P. 341-398.
- [45] Wang, D. Evolution properties of the complex degree of coherence of a partially coherent Laguerre-Gaussian beam in turbulent atmosphere / D. Wang, F. Wang, Y. Cai, J. Chen // J. Mod. Opt. – 2012. – Vol. 59(4). – P. 372-380.
- [46] Korotkova, O. Random light beams: theory and applications – Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. – 366 p.
- [47] Lutomirski, R.F. Propagation of a Finite Optical Beam in an Inhomogeneous Medium / R.F. Lutomirski, H.T. Yura // Applied Optics. – 1971. – Vol. 10(7). – P. 1652-1658.
- [48] Котляр, В.В. Измерение орбитального углового момента светового поля с помощью дифракционного оптического элемента / В.В. Котляр, С.Н. Хонина, В.А. Сойфер, Я. Ванг // Автметрия. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 33-44.

- [49] Харитонов, С.И. Вычисление момента импульса электромагнитного поля внутри волновода с абсолютно проводящими стенками / С.И. Харитонов, С.Г. Вологовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 4. – С. 588-605. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-4-588-605.
- [50] Adams, M.J. An Introduction to Optical waveguides – Chichester: John Wiley, 1981. – 401 p.
- [51] Котляр, В.В. Вращение световых много-модовых пучков Гаусса-Лагерра в свободном пространстве / В.В. Котляр, В.А. Соффер, С.Н. Хонина // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23, № 17. – С. 1-6.

Modeling the propagation of Laguerre-Gaussian modes through a random medium based on the analytical Karhunen-Loeve expansion

M.S. Kirilenko¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. To analyze the ability of certain beams to maintain information stability under the influence of random fluctuations of the optical medium, numerical calculations are used with the help of turbulence simulators such as diffusers, scattering screens and turbulence cells. These turbulence simulators can be generated via the Karhunen-Loeve decomposition, which is the basis of the eigenfunctions of the correlation function. A random environment simulator formed for a Gaussian correlation function was used to study the ability of single-ring Laguerre-Gaussian vortex beams to retain their structure. The results showed that an increase in the order of the optical vortex leads to less beams phase singularity stability to random optical fluctuations.