

Моделирование распространения лазерных пучков, искаженных случайным шумом с заданной корреляционной функцией

А.А. Артюкова^а, М.С. Кириленко^{а,б}

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

^б Институт систем обработки изображений – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, ул. Молодогвардейская, 151, Самара, Россия

Аннотация

Реализована математическая модель внесения искажений с помощью случайного шума с заданной корреляционной функцией. Рассмотрено распространение двумерных пучков. Распространение пучков смоделировано с помощью преобразования Френеля. Для эффективной реализации преобразования Френеля использовалось быстрое преобразование Фурье. Получены графические результаты распространения различных лазерных пучков в свободном пространстве и в пространстве со случайными искажениями.

Ключевые слова: турбулентная среда; распространение лазерных пучков; случайное поле; преобразование Фурье; преобразование Френеля; моды Гаусса-Лагерра

1. Введение

Распространение оптического сигнала в свободном пространстве может быть подвержено искажениям, связанным с турбулентностью среды [1, 2]. Из-за свойств турбулентности случайные изменения атмосферного показателя преломления могут стать причиной искажения интенсивности лазерного излучения. Классические методы описания распространения волны через турбулентную атмосферу основаны на применениях метода Рытова [3] и метода параболических уравнений [4], связь между которыми была продемонстрирована ранее [5].

С помощью этих методов было исследовано распространение оптических сигналов от частично-когерентного источника [6, 7], а также изучены особенности распространения в турбулентной среде различных лазерных пучков, включая Гауссовых пучков высоких порядков [8], полых пучков [9], бездифракционных пучков, типа пучков Гаусса-Бесселя и Эйри [10, 11], а также косинусоидальных пучков [12]. При этом было обнаружено, что Гауссовы пучки высших порядков, в том числе вихревые пучки [13-15], а также различные пространственно структурированные пучки уширяются под воздействием турбулентности в меньшей степени, чем фундаментальный Гауссов пучок. Кроме того, исследовалось распространение в турбулентной среде пучков с неоднородной поляризацией [16, 17].

Наиболее удобным и эффективным средством формирования произвольных пучков с заданными свойствами являются методы дифракционной оптики [18-22].

В данной работе рассматривается моделирование прохождения пучков Гаусса-Эрмита через случайную среду с заданной корреляционной функцией в виде функции Гаусса. Прохождение пучков описывается с помощью расширенного принципа Гюйгенса-Френеля [23], а преобразование Френеля может быть вычислено методом быстрого преобразования Фурье. Метод генерации случайного поля описан в работах [15, 24].

2. Теоретические сведения

Распространение лазерного пучка в случайной среде можно описать на основе интеграла, выражающего расширенный принцип Гюйгенса-Френеля [8, 23]:

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

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 часть в операторе распространения, связанная с турбулентностью атмосферы, ω - частота колебаний лазерного излучения, t - время.

Не теряя общности, будем рассматривать для упрощения одномерный случай. Пусть корреляционная функция случайного поля имеет форму Гауссовой функции:

$$\langle \exp[\psi(x_1, u_1, 0)], \exp[\psi(x_2, u_2, z)] \rangle = \exp\left[-\frac{1}{R^2} (x_1 - x_2)^2 \right]. \quad (2)$$

Отметим, что данная корреляционная функция зависит от модуля разности между координатами x_1 и x_2 , а не от каждой из них по отдельности. Более того, она не зависит от координат в выходной плоскости u_1 и u_2 , а зависит лишь от расстояния z до неё.

Будем рассматривать случайное поле $U(x)$ как случайное поле вида (2) с нулевым математическим ожиданием. Моделирование случайного поля может быть реализовано по следующей формуле с применением алгоритма быстрого преобразования Фурье \mathfrak{F} :

$$U(x) = \mathfrak{F}^{-1} \left[\mathfrak{F}[h(x')] \mathfrak{F}[\xi(x')] \right] = \mathfrak{F}^{-1} \left[\sqrt{\mathfrak{F}[R_v(x')] \mathfrak{F}[\xi(x')] \right]. \quad (3)$$

Отметим, что преобразование Фурье от белого шума $\xi(x)$ также будет являться белым шумом.

3. Моделирование

На вход случайной среды будем подавать моды Гаусса-Лагерра GL_{nm} [25-27] и будем моделировать менять параметр R в корреляционной функции (2). Результаты расчётов приведены на рисунках 1 и 2

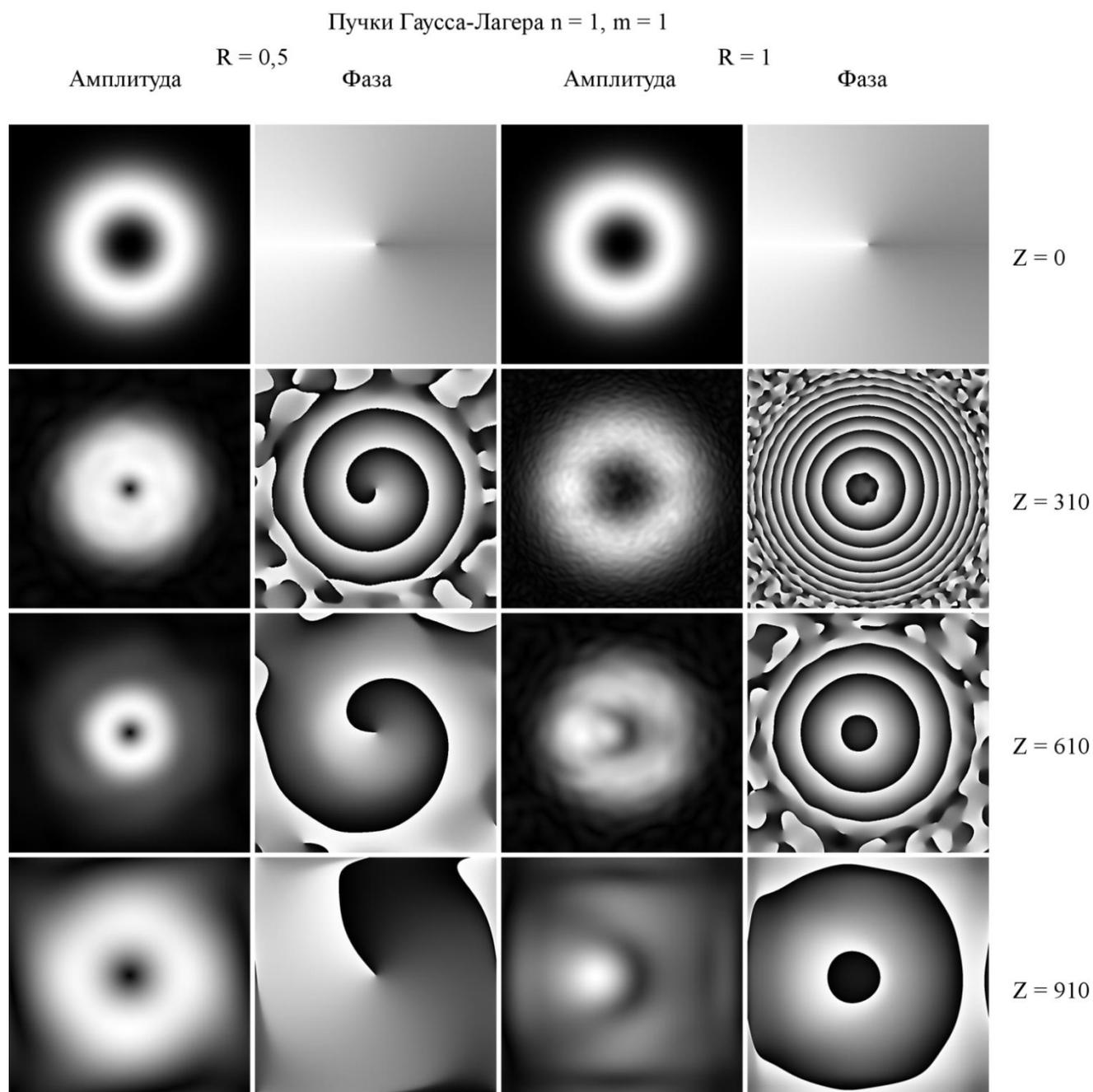


Рис. 1. Прохождение пучка Гаусса-Лагерра GL_{11} .

Пучки Гаусса-Лагерра $n = 3, m = 5$

$R = 0,5$

$R = 1$

Амплитуда

Фаза

Амплитуда

Фаза

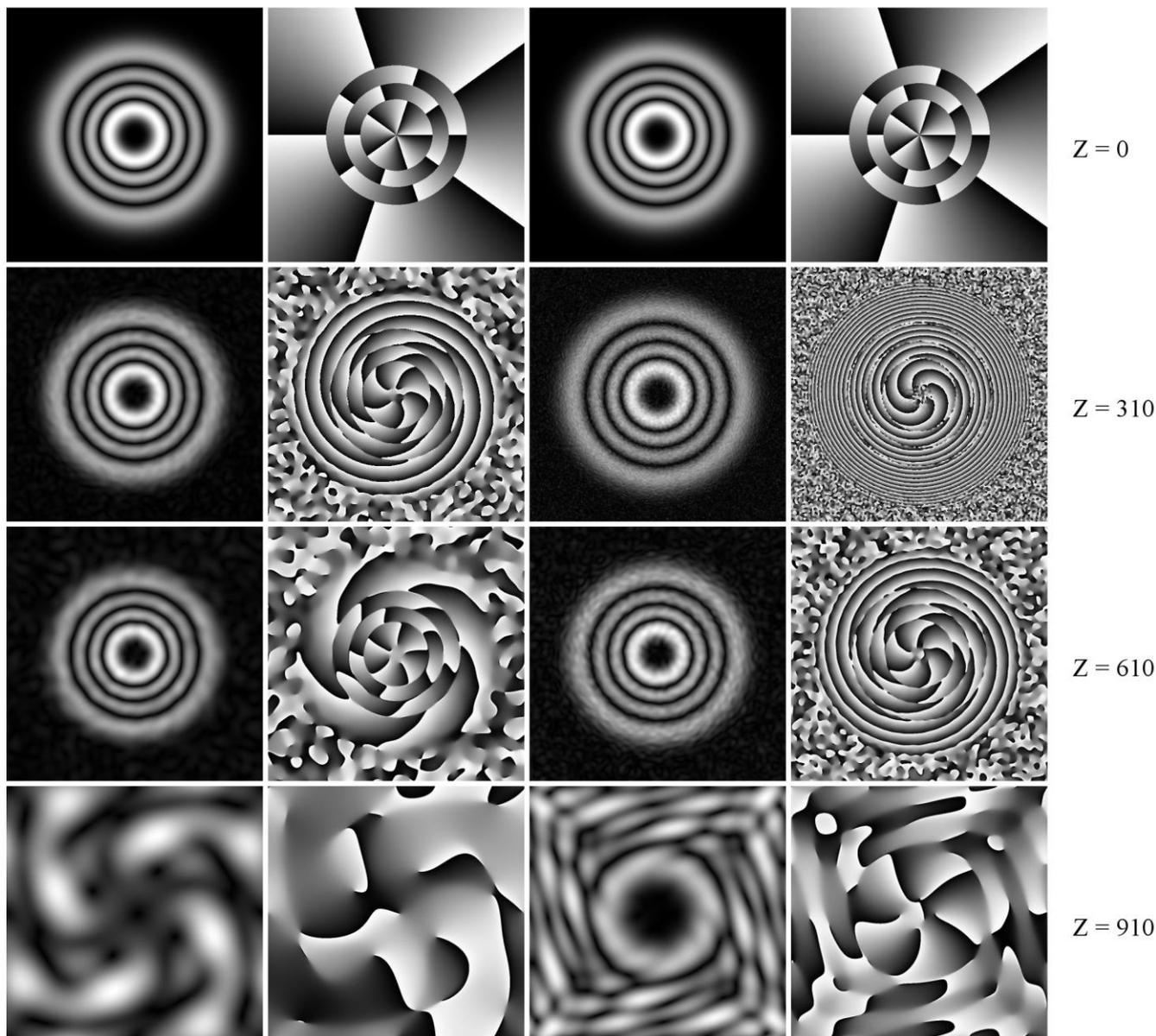


Рис. 2. Прохождение пучка Гаусса-Лагерра GL_{35} .

Литература

- [1] Grabner, M. Measurement of the structure constant of refractivity at optical wavelengths using a Scintillometer / M. Grabner, V. Kvicera // Radioengineering, 2012. – Vol. 21(1). – P. 455-458.
- [2] Majumdar, A.K. Free-space laser communications: principles and advances / A.K. Majumdar, J.C. Ricklin // New York: Springer Science & Business Media, 2008. – Vol. 2. – 418 p.
- [3] Tatarskii, V.I. Wave Propagation in a Turbulent Medium / V. I. Tatarskii – New York: McGraw-Hill, 1961. – 285 p.
- [4] Tatarskii, V.I. The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation / V.I. Tatarskii – Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1971. – 472 p.
- [5] Manning, R. M. The relationship between the solutions of the parabolic equation method and first Rytov approximation in stochastic wave propagation theory / R.M. Mannin // Waves in Random and Complex Media. – 2008. – Vol. 18(4). – P. 615-621.
- [6] Ricklin, J.C. Atmospheric turbulence effects on a partially coherent Gaussian beam: implications for free-space laser communication / J.C. Ricklin, F.M. Davidson // Journal of the Optical Society of America A. – 2002. – Vol. 19(9). – P. 1794-1802.
- [7] Wang, S.C.H. Optical beam propagation for a partially coherent source in the turbulent atmosphere / S.C.H. Wang, M.A. Plonus // Journal of the Optical Society of America A. – 1979. – Vol. 69(9). – P. 1297- 1304.
- [8] Young, C. Y., Turbulence induced beam spreading of higher order mode optical waves / C.Y. Young, Y. V. Gilchrest, B. R. Macon // Opt. Eng. – 2002.– Vol. 41(5). – P.1097–1103.
- [9] Cai, Y. Propagation of various dark hollow beams in a turbulent atmosphere / Y.Cai, S. He // Opt. Express. – 2006. – Vol. 14(4) –P.1353–1367.
- [10] Eyyuboglu, H. T. Propagation of higher order Bessel-Gaussian beams in turbulence / H. T. Eyyuboglu // Appl. Phys. B. –2007. – Vol. 88(2) – P. 259–265.
- [11] Chu, X. Evolution of an Airy beam in turbulence / X. Chu // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36(14). – P. 2701–2703.
- [12] Zhou, G. Propagation of a higher-order cosh-Gaussian beam in turbulent atmosphere / G. Zhou // Optics express. – 2011. – Vol. 19(5). – P. 3945-3951.

- [13] Gbur, G. Vortex beam propagation through atmospheric turbulence and topological charge conservation / G. Gbur, R.K. Tyson // *J. Opt. Soc. Am.* – 2008. – Vol. 25. – 225 p.
- [14] Soifer, V.A. Vortex beams in turbulent media: review / V.A. Soifer, O. Korotkova, S.N. Khonina, E.A. Shechepakina // *Computer Optics.* – 2016. – Vol. 40(5). – P. 605-624.
- [15] 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. E8-E15.
- [16] Gu, Y. Scintillation of nonuniformly polarized beams in atmospheric turbulence / Y. Gu, O. Korotkova, G. Gbur // *Opt. Lett.* – 2009. – Vol. 34(15). – P. 2261–2263.
- [17] Jacks, H.C. Polarization and intensity correlations in stochastic electromagnetic beams upon interaction with devices of polarization optics / H.C. Jacks, O. Korotkova // *Appl Phys B.* – 2011. – Vol. 103. – P. 413–419.
- [18] Golovashkin, D.L. *Computer Design of Diffractive Optics* / D.L. Golovashkin, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, V.S. Pavelyev, S.N. Khonina, R.V. Skidanov / edited by Soifer V.A. – Cambridge Inter. Scien. Pub. Ltd. & Woodhead Pub. Ltd., 2012. – 896 p.
- [19] Khonina, S.N. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, M. Honkanen, J. Lautanen, J. Turunen // *Journal of Modern Optics.* – 1999. – Vol.46(2). – P. 227-238.
- [20] Kotlyar, V.V. Generating hypergeometric laser beams with a diffractive optical element / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, S.N.Khonina, J.Turunen // *Applied Optics.* – 2008. – Vol. 47(32). – P. 6124- 6133.
- [21] Khonina, S.N. Encoded binary diffractive element to form hyper-geometric laser beams / S.N.Khonina, S.A. Balalayev, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, B. Paivanranta, J. Turunen // *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics.* – 2009. – Vol. 11. – 7 p.
- [22] Khonina, S.N. Specular and vortical Airy beams / S.N. Khonina // *Optics Communications.* – 2011. – Vol. 284. – P. 4263–4271.
- [23] Feizulin, Z. I. Broadening of a laser beam in a turbulent medium / Z. I. Feizulin, Y. A. Kravtsov // *Radiophys. Quantum Electron.* – 1967. – Vol. 10(1). – P. 33–35.
- [24] Kirilenko, M.S. Simulation of optical signals propagation in a random media / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // *CEUR Workshop Proceedings.* – 2016. – Vol. 1638. – P.55-65. DOI: 10.18287/1613-0073-2016-1638-55-65.
- [25] Yariv, A. *Optical Electronics* / A. Yariv – New York: Holt, Rinehart and Winston. – 1985.
- [26] Хонина, С.Н. Дифракционные оптические элементы, согласованные с модами Гаусса-Лагерра / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Соифер // *Оптика и спектроскопия.* – 1998. – Т. 85, № 4. – P. 695-703.
- [27] Khonina, S.N. Generation of rotating Gauss-Laguerre modes with binary-phase diffractive optics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A Soifer., M. Honkanen, J. Lautanen, J.Turunen // *Journal of Modern Optics.* – 1999. – Vol. 46(2). – P. 227-238.