

DOI: 10.58168/OpEq2025_103-112

УДК 51-73

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНЫХ ПУЧКОВ РАЗЛИЧНОГО ВИДА
В СЛАБОТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ**

**PROPAGATION OF VARIOUS TYPES OF LASER BEAMS
IN A LOW-TURBULENT ATMOSPHERE**

Лукинских Сергей Павлович

магистрант 2-го года обучения, ВГУ, Россия, г. Воронеж

Королев Никита Викторович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры оптики и
спектроскопии ВГУ, г. Воронеж, Россия

Lukinskikh Sergey Pavlovich

master's student, Voronezh State University, Voronezh, Russia

Korolev Nikita Victorovich

Cand. Sc. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Optics and Spectroscopy,
Voronezh State University, Voronezh, Russia

Аннотация. В работе выполнено моделирование распространения лазерных лучей с различным поперечным распределением интенсивности в слаботурбулентной атмосфере. Турбулентная атмосфера моделировалась с помощью фазовых экранов, рассчитываемых на основе алгоритма быстрого преобразования Фурье с учетом модифицированного спектра фон Кармана. Численно показано преимущество гауссовых пучков для задач, требующих высокой стабильности распределения интенсивности и минимальных флуктуаций, а также эффективность «top-hat» пучков по сохранению пиковой яркости.

Abstract. In this work, we simulated the propagation of laser beams with various transverse intensity distributions in a low-turbulent atmosphere. The turbulent atmosphere was simulated using phase screens calculated based on the fast Fourier transform algorithm taking into account the modified von Karman spectrum. The advantage of Gaussian beams for problems requiring high stability of the intensity distribution and minimal fluctuations, as well as the effectiveness of «top-hat» beams in maintaining peak brightness, are shown numerically.

Ключевые слова: Фурье преобразование, лазерный луч, турбулентность.

Keywords: Fourier transform, laser beam, turbulence.

В настоящее время большое внимание уделяется исследованиям в области распространения лазерного излучения в атмосфере применительно к задачам оптической связи, адаптивной оптики, дистанционного зондирования, систем наведения, LIDAR и многих других. В каждом из этих приложений лазерному пучку необходимо проделать значительный путь через земную атмосферу, которая не является оптически однородной средой – имеются турбулентные неоднородности показателя преломления, что приводит к существенным искажениям параметров лазерного излучения.

Искажения проявляются в виде уширения пучка, блуждания центра интенсивности, флуктуации интенсивности. Совокупность данных эффектов ограничивает эффективность и условия применимости оптических систем. Понимание механизмов распространения лазерного излучения в турбулентной среде и количественная оценка вызываемых ими искажений являются ключевыми проблемами, в частности, при проектировании и разработке комплексов «источник излучения – приемник».

В данной работе проводится сравнительный анализ распространения различных профилей лазерных пучков: гауссова пучка (фундаментальная мода TEM_{00}), пучка с профилем «top-hat» (равномерной интенсивности) и пучка Бесселя (рис. 1), – в условиях слабой атмосферной турбулентности.

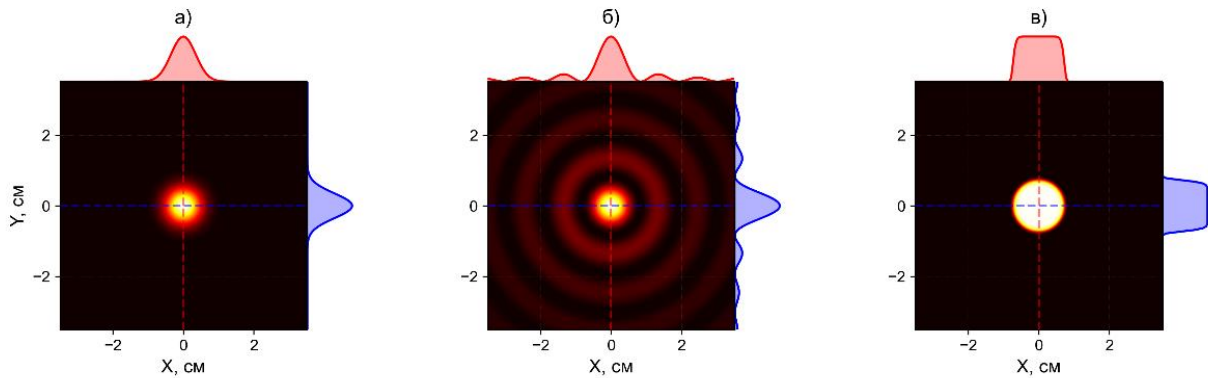
Сравнительная оценка различных профилей оптических пучков в условиях слаботурбулентной атмосферы позволяет выявить как преимущества, так и ограничения каждого типа, что особенно важно для целенаправленного выбора оптимальных решений в конкретных приложениях.

Распространение двумерного профиля вдоль выделенного направления z в свободной от источников зарядов, немагнитной, слабонеоднородной среде, в которой неоднородность аппроксимируется фазовыми экранами, описывается параксиальным волновым уравнением [1]:

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{i}{2k} \nabla_{\perp}^2 A + i\varphi A, \quad (1)$$

$$A \equiv A(x, y, z), \quad \varphi \equiv \varphi(x, y, z), \quad \nabla_{\perp}^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

где $A(x, y, z)$ – комплексная амплитуда поля, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, $\varphi(x, y, z)$ – фазовый набег, вносимый фазовыми экранами.



а – гауссов тип; б – бesselев тип; в – «top-hat»

Рис. 1. Двумерные профили интенсивности пучков

Турбулентная атмосфера моделируется численно с помощью фазовых экранов – тонких слоёв, расположенных на пути распространения поля. Фазовые экраны вычисляются методом преобразования Фурье. Для численного счёта используется алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) на основе

модифицированного спектра фон Кармана [1, 2]. Их энергетический спектр определяется выражением:

$$\Phi(\mathbf{\kappa}) = 0,033 \cdot C_n^2 \cdot \frac{\exp(-\kappa^2/\kappa_m^2)}{(\kappa^2 + \kappa_0^2)^{11/6}}, \quad (2)$$

$$\mathbf{\kappa} \equiv 2\pi(\mathbf{f}_x + \mathbf{f}_y), \quad \kappa_m \equiv 5,92/l_0, \quad \kappa_0 \equiv 2\pi/L_0,$$

где C_n^2 – структурный параметр показателя преломления (имеет размерность $[L^{-2/3}]$), $\mathbf{f}_x, \mathbf{f}_y$ – пространственные (Фурье) частоты (волновые числа вдоль x, y соответственно); $\mathbf{\kappa}$ – вектор угловых волновых чисел, l_0 – характерный размер малых вихрей, L_0 – характерный размер крупных вихрей. Типичный фазовый экран представлен на рис. 2.

Для ограниченной по размеру расчетной сетки набегающая в связи с турбулентностью оптическая фаза определяется рядом Фурье [1]:

$$\varphi(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} c_{n,m} \exp[2\pi i(f_{x_n}x + f_{y_m}y)], \quad (3)$$

где f_{x_n}, f_{y_m} – дискретные x - и y -направленные пространственные частоты (далее в работе $f_{x_n} = f_{y_m}$ – равноотстоящие узлы сетки), $c_{n,m}$ – коэффициенты разложения в ряд Фурье.

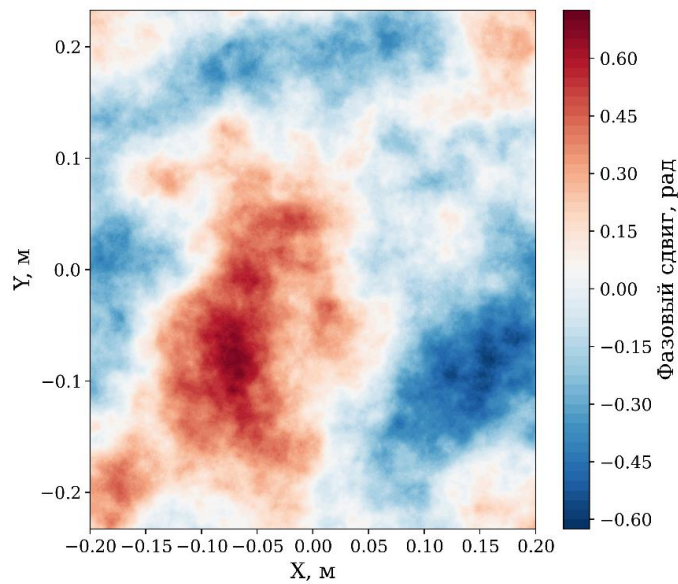


Рис. 2. Типичный фазовый экран

В связи с тем, что вариация оптической фазы при распространении в атмосферном канале связана с многократным прохождением через независимые случайные неоднородности среды, то согласно центральной предельной теореме коэффициенты в разложении (3) должны подчиняться нормальному распределению. Отметим, что коэффициенты ряда Фурье в общем случае комплексны. Вещественная и мнимая части обладают нулевыми первыми теоретическими моментами и равными дисперсиями, взаимный корреляционный момент вещественных и мнимых частей равен нулю [1, 3]. Следовательно, коэффициенты подчиняются общему комплексному нормальному распределению с дисперсией, задаваемой как

$$\langle |c_{n,m}|^2 \rangle = \Phi(f_{x_n}, f_{y_n}) \Delta f_{x_n} \Delta f_{y_n} = \Phi(f_{x_n}, f_{y_n}) \Delta f_n^2. \quad (4)$$

Решение уравнения (1) выполняется согласно следующей схеме:

$$A(x, y, z + \Delta z) = \hat{N} \mathcal{F}^{-1} \{ \hat{D} \mathcal{F} \{ \hat{N} A(x, y, z) \} \},$$

$$\hat{D} = \exp \left[-\frac{i \Delta z (k_x^2 + k_y^2)}{2k} \right], \quad \hat{N} = \exp \left[i \varphi(x, y) \cdot \frac{\Delta z}{2} \right], \quad (5)$$

где $\hat{N}$ – оператор турбулентности, $\hat{D}$ – оператор дифракции, $\mathcal{F}^{-1}$ и $\mathcal{F}$ – обратное и прямое преобразования Фурье соответственно.

Для анализа профилей пучков в конце трассы используют следующие основные параметры [1, 4–6].

Эффективный радиус пучка в конце атмосферного пути (w). Вычисляется как второй теоретический момент распределения:

$$w = \sqrt{\frac{\int \int (x^2 + y^2) I(x, y, z_{fin}) dx dy}{\int \int I(x, y, z_{fin}) dx dy}},$$

$$I(x, y, z_{fin}) = |A(x, y, z_{fin})|^2, \quad (6)$$

где $I(x, y, z_{fin})$ – интенсивность лазерного излучения в конце атмосферного пути. Интегрирование производится по всей плоскости.

Среднеквадратическое отклонение положения центра интенсивности (блуждание):

$$\sigma_r = \sqrt{\langle (x_c - \langle x_c \rangle)^2 + (y_c - \langle y_c \rangle)^2 \rangle},$$

$$x_c = \frac{\int \int x I(x, y, z_{fin}) dx dy}{\int \int I(x, y, z_{fin}) dx dy}, y_c = \frac{\int \int y I(x, y, z_{fin}) dx dy}{\int \int I(x, y, z_{fin}) dx dy}. \quad (7)$$

Сцинтилляционный индекс:

$$\sigma_I^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2}. \quad (8)$$

Коэффициент Штреля – отношение максимальной интенсивности в турбулентном распространении $I(x, y, z_f)$ к максимальной интенсивности при распространении в вакууме $I_{id}(x, y, z_f)$

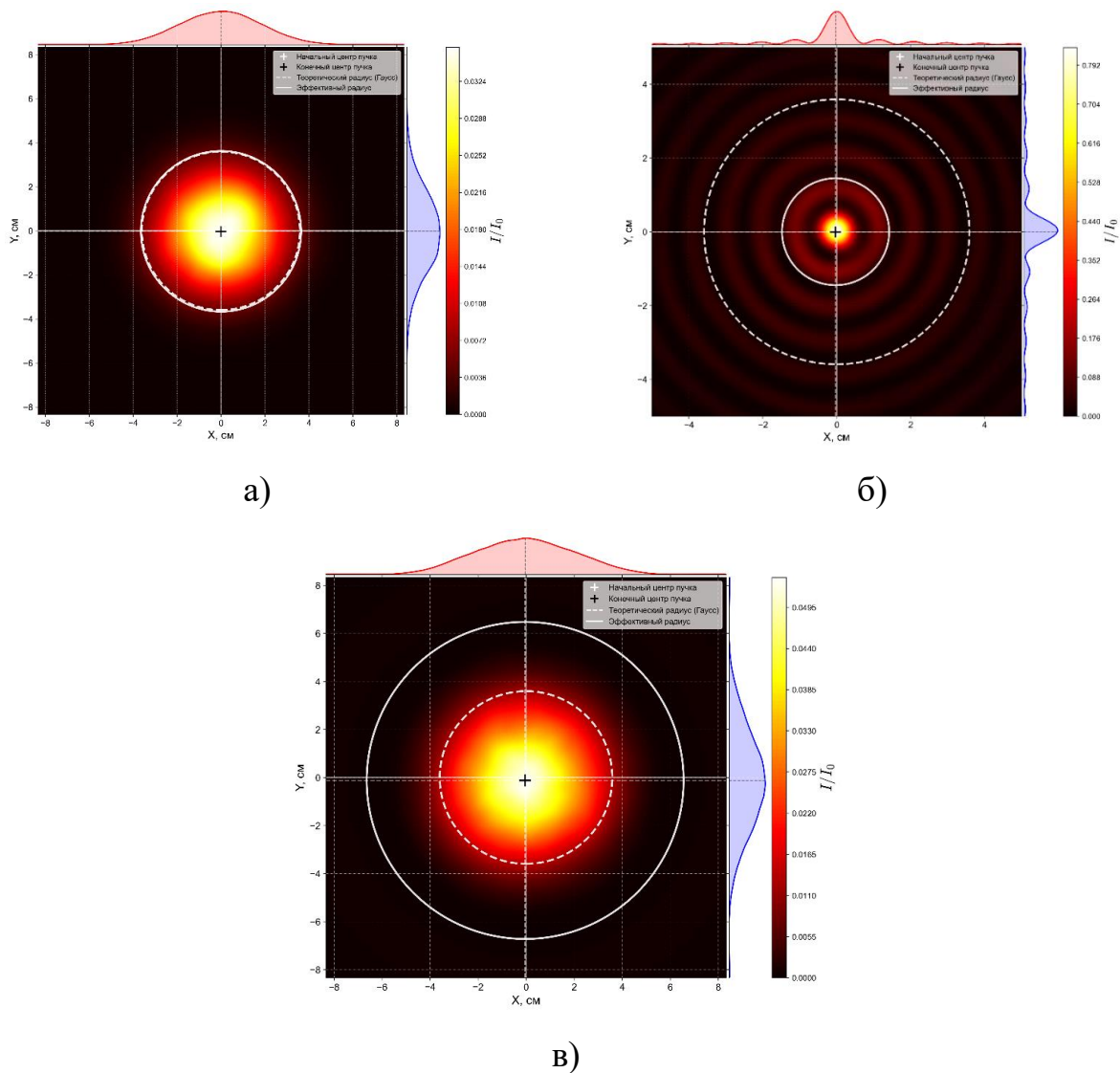
$$S = \frac{\max\{I(x, y, z_f)\}}{\max\{I_{id}(x, y, z_f)\}}. \quad (9)$$

Для сравнительного анализа было проведено моделирование вышеописанным методом распространения лазерных пучков трёх различных профилей, приведенных на рис. 1. Первоначальные радиусы пучков 7 мм, $C_n^2 = 10^{-15} \text{ м}^{-2/3}$; $l_0 = 1 \text{ мм}$, $L_0 = 30 \text{ м}$. Размер вычислительной области (фазовых экранов) $L = 50 \text{ см}$; длина волны излучения $\lambda = 1550 \text{ нм}$. Результаты моделирования показаны на рис. 3.

Таблица 1. Начальные и рассчитанные характеристики лазерных пучков различных профилей, прошедших через атмосферу

Тип пучка:	Гауссов	Бесселев	«top-hat»
Первоначальный характерный размер, мм	7	12	7
Эффективный радиус, мм	36.5	14.5	83.5
Блуждание, мм	2	3	2
Сцинтилляционный индекс	0.1253	0.5484	0.2722
Коэффициент Штреля	0.9758	0.9746	0.9980

Из данных таблицы 1 и результатов моделирования видно, что гауссов пучок демонстрирует наименьший уровень флуктуаций интенсивности, что согласуется с его локализованной пространственной структурой и устойчивостью к мелкомасштабным возмущениям. Сцинтилляционный индекс для гауссова пучка составляет ~ 0.125 , что существенно ниже, чем у других исследуемых профилей. При этом блуждание центра пучка составляет порядка 2 мм, а коэффициент Штреля сохраняется на уровне 0.976, указывая на незначительные потери когерентности при распространении в турбулентной атмосфере.



а – гауссов; б – бesselев; в – «top-hat»

Рис. 3. Двумерные профили распределения интенсивности прошедших через атмосферный канал пучков

Бесселев пучок, несмотря на известные свойства самовосстановления, в данной конфигурации продемонстрировал наибольшее блуждание центра – порядка 3 мм, а также самый высокий уровень флуктуаций интенсивности с индексом сцинтилляции около 0.548. Это связано с выраженной кольцевой структурой и особенностями распределения энергии, при которых пучок взаимодействует с большей областью турбулентной среды. При этом коэффициент Штреля остаётся высоким (около 0.975), что свидетельствует о сохранении пиковой интенсивности. Важно отметить, что для бесселевого пучка начальный и конечный размеры оценивались по положению первого минимума и первого кольца, то есть с учётом всей центральной структуры. Такой подход отражает тот факт, что бесселев пучок в представленных условиях эффективно занимает всю апертуру численного окна. Эффективный радиус в финальной точке также был рассчитан аналогично и составляет порядка 1.45 см, что сопоставимо с половиной размера расчетной сетки. Тем не менее, из-за природы бесселевых пучков параметр эффективного радиуса имеет ограниченную интерпретацию, и в задачах пространственной локализации могут быть более уместны альтернативные метрики, например, FWHM центрального максимума.

Профиль типа «top-hat» продемонстрировал наилучшее сохранение пикового значения интенсивности, что подтверждается коэффициентом Штреля, почти равным единице, и малым блужданием центра (~2 мм). При этом уровень флуктуаций интенсивности оказался промежуточным – около 0.272, что объясняется резкой фронтальной границей пучка и более высокой чувствительностью к дифракционному расширению. Эффективный радиус «top-hat» пучка в конце распространения значительно превышает таковой у других профилей, что также видно на графиках интенсивности (рис. 3).

Таким образом, полученные результаты указывают на преимущества гауссовых пучков в задачах, требующих высокой стабильности распределения интенсивности и минимальных флуктуаций, а также неэффективность «top-hat» пучков в условиях, где критично сохранение пиковой яркости. Бесселевы пучки,

несмотря на сохранение центра интенсивности, показали чувствительность к турбулентным возмущениям, что ограничивает их применимость в системах с выраженными требованиями к однородности распределения в условиях атмосферной турбулентности.

Список литературы

1. Schmidt J. D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB / J. D. Schmidt. – Bellingham: SPIE Press, 2010. – 195 p.
2. Charnotskii M. Comparison of four techniques for turbulent phase screens simulation / M. Charnotskii // Journal of the optical Society of America A. 2020. Vol. 37. P. 738-747.
3. Zhang D. Atmospheric turbulence phase screen modeling method based on sub-bands division and multirate sampling / D. Zhang [et al.] // Optik. 2018. V. 163. P. 72-80.
4. Khan A. N. Atmospheric propagation of space-fractional Gaussian-beam waves in a FSO communication system / A. N. Khan, U. Younis // Optics Express. 2022. V. 30. No2/17. P. 1570-1573.
5. Васильев В. С. Распространение пучков Бесселя и суперпозиций вихревых пучков в атмосфере / В. С. Васильев [и др.] // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43 (3). С. 376-384.
6. Горбунов М. Е. Метод сферических фазовых экранов для моделирования расходящихся волновых пучков в неоднородных средах / М. Е. Горбунов, О. А. Коваль, А. Е. Мамонтов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56 (1). С. 66-75.

References

1. Schmidt J. D. Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB / J. D. Schmidt. – Bellingham: SPIE Press, 2010. – 195 p.
2. Charnotskii M. Comparison of four techniques for turbulent phase screens simulation / M. Charnotskii // Journal of the optical Society of America A. 2020. Vol. 37. P. 738-747.
3. Zhang D. Atmospheric turbulence phase screen modeling method based on sub-bands division and multirate sampling / D. Zhang [et al.] // Optik. 2018. V. 163. P. 72-80.
4. Khan A. N. Atmospheric propagation of space-fractional Gaussian-beam waves in a FSO communication system / A. N. Khan, U. Younis // Optics Express. 2022. V. 30. No2/17. P. 1570-1573.
5. Vasiliev V. S. Propagation of Bessel beams and superpositions of vortex beams in the atmosphere / V. S. Vasiliev [et al.] // Computer Optics. 2019. V. 43. No 3. P. 376-384.
6. Gorbunov M. E. Method of spherical phase screens for modeling diverging wave beams in inhomogeneous media / M. E. Gorbunov, O. A. Koval, A. E. Mamontov // Izvestiya RAS. Physics of the Atmosphere and Ocean. 2020. V. 56. No 1. P. 66-75.