

ФОРМИРОВАНИЕ “ИДЕАЛЬНОГО” ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕССЕЛЬ-ГАУССОВА ПУЧКА

Лукин И.П.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

e-mail: lukin_ip@iao.ru

В данной работе представлены результаты теоретического исследования формирования “идеального” оптического вихря частично когерентным источником оптического излучения при помощи собирающей линзы. В параксиальном приближении рассмотрено пространственное распределение средней интенсивности частично когерентного бессель-гауссова оптического пучка в задней фокальной плоскости собирающей сферической тонкой линзы в зависимости от геометрических параметров пучка, его когерентности и условий распространения. Проанализированы случаи полностью когерентного, частично когерентного типа Гаусса-Шелла и полностью некогерентного источников оптического излучения. Полученные результаты показали, что максимальное значение средней интенсивности “идеального” оптического вихря убывает по мере увеличения величины топологического заряда вихря, а положение максимума средней интенсивности смещается в сторону от оптической оси вихря.

Вихревой оптический пучок, у которого радиус светового кольца сохраняется при изменении величины топологического заряда, называется “идеальным” оптическим вихрем (а “perfect” optical vortex) [1]. Для формирования “идеального” оптического вихря используют разнообразные методы и различные оптические устройства [2–6], что позволяет сформировать световые кольца с радиусом, который слабо зависит от топологического заряда вихря. В данной работе излагаются результаты теоретического рассмотрения формирования “идеального” оптического вихря при помощи частично когерентного бессель-гауссова пучка оптического излучения: проводится анализ пространственной структуры средней интенсивности “идеального” оптического вихря, усреднённой по флуктуациям частично когерентного источника оптического излучения.

Пусть для формирования “идеального” оптического вихря используется частично когерентный вихревой бессель-гауссов оптический пучок [7]. Функцию взаимной когерентности второго порядка поля $U_0(\mathbf{r})$ в передней фокальной плоскости ($x = -F_0$) собирающей сферической тонкой линзы зададим моделью Гаусса-Шелла частично когерентного источника, т.е. в виде произведения полей в точках наблюдения ($\mathbf{r}_1$ и $\mathbf{r}_2$) на коррелятор гауссова типа, зависящий только от вектора разности этих точек наблюдения, [7–9]:

$$\Gamma_2^{(0)}(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \overline{U_0(\mathbf{r}_1)U_0^*(\mathbf{r}_2)} = E_0^2 g_g(\mathbf{r}_1) g_g^*(\mathbf{r}_2) g_b(\mathbf{r}_1) g_b^*(\mathbf{r}_2) \exp \left[- \frac{(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)^2}{4\rho_k^2} \right], \quad (1)$$

где черта сверху обозначает усреднение по ансамблю реализаций флуктуаций источника оптического излучения; E_0 – начальная амплитуда поля; $g_g(\cdot) = g_g(\rho, \varphi_\rho) = \exp[-\rho^2/(2a_0^2)]$ – гауссов фактор бessel-гауссова пучка; a_0 – начальный радиус гауссова фактора поля пучка; $[y, z] = [\rho, \varphi_\rho]$ – пространственная координата в плоскости, перпендикулярной направлению распространения оптического излучения; $\rho = \sqrt{y^2 + z^2}$, $\varphi_\rho = \arctan(z/y)$ – модуль и аргумент этой координаты; $g_b(\cdot) = g_b(\rho, \varphi_\rho) = J_m(\beta\rho) \exp(im\varphi_\rho)$ – бesselов фактор бessel-гауссова пучка; β – параметр бesselова фактора пучка; m – топологический заряд пучка (целое число); $J_m(\cdot)$ – функция Бесселя первого рода m -го порядка; ρ_k – радиус корреляции поля источника [7–9].

Если поперечный размер нормально падающего монохроматического частично когерентного пучка (1), распространяющегося по оптической оси собирающей сферической тонкой линзы, много меньше размера апертуры этой линзы, то в задней фокальной плоскости линзы ($x = F_0$) для средней интенсивности сформированного “идеального” оптического вихря можно записать в параксиальном приближении следующее выражение [9, 10]:

$$\overline{I}(\cdot) \equiv \overline{I(F_0, \cdot)} = \frac{k^2}{4\pi^2 F_0^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \overline{T_2^{(0)}(\cdot, \cdot)} \exp\left[-\frac{ik}{F_0}(\cdot - \cdot)\right], \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число оптического излучения; λ – длина волны оптического излучения в вакууме; F_0 – фокусное расстояние собирающей сферической тонкой линзы ($F_0 > 0$).

При формировании “идеального” оптического вихря когерентным ($\rho_k \rightarrow \infty$) бessel-гауссовым пучком (1) для распределения интенсивности в задней фокальной плоскости ($x = F_0$) собирающей линзы (2) получается следующее аналитическое выражение:

$$I(\rho) = I_v \exp\left\{- (\beta a_0)^2 \left[1 + \left(\frac{\rho}{\rho_v}\right)^2\right]\right\} I_m^2\left[(\beta a_0)^2 \left(\frac{\rho}{\rho_v}\right)\right], \quad (3)$$

где $I_m(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода m -го порядка; $I_v = E_0^2 \left(\frac{ka_0^2}{F_0}\right)^2$ – коэффициент в выражении для интенсивности “идеального” оптического вихря с размерностью Вт/м²; $\rho_v = (F_0/k)\beta$ – радиус светового кольца “идеального” оптического вихря.

Распределение нормированной интенсивности $I(\rho)/I_v$ когерентного ($\rho_k \rightarrow \infty$) бessel-гауссова пучка в задней фокальной плоскости ($x = F_0$) собирающей линзы (3) как функции нормированного расстояния от оптической оси линзы ρ/ρ_v и топологического заряда

оптического пучка m при различных значениях произведения радиуса гауссова фактора пучка на параметр Бесселя фактора пучка βa_0 представлены на рис. 1, а–в: $\beta a_0 = 2,5$ – рис. 1, а, $\beta a_0 = 5,0$ – рис. 1, б и $\beta a_0 = 10,0$ – рис. 1, в.

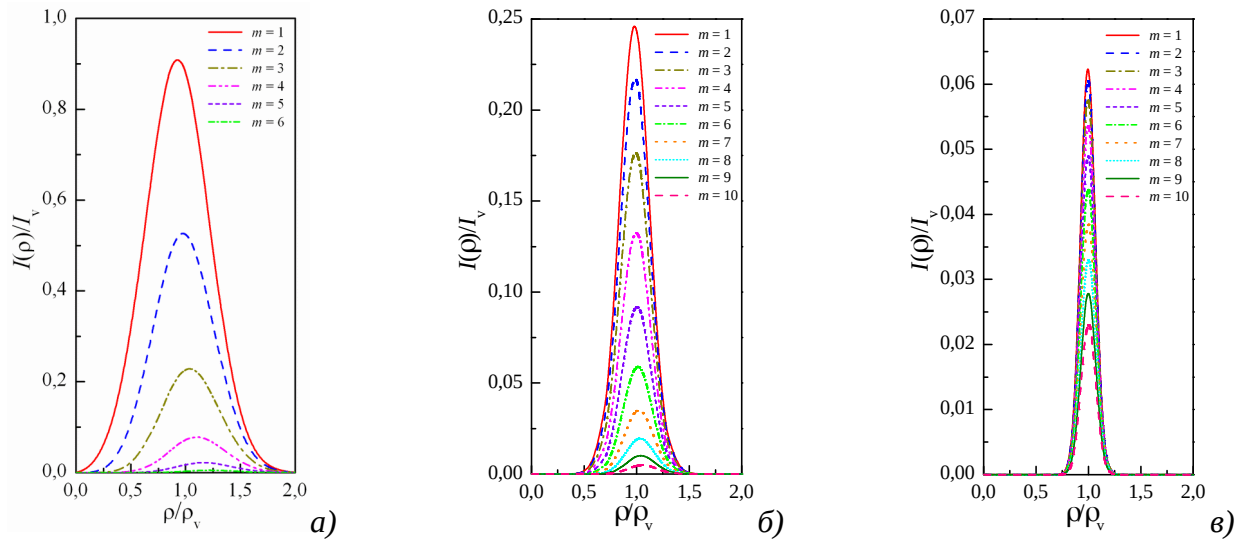


Рисунок 1 — Распределение интенсивности изображения когерентного Бессель-гауссова пучка при разных значениях параметра βa_0 : $\beta a_0 = 2,5$ (а), $\beta a_0 = 5,0$ (б) и $\beta a_0 = 10,0$ (в)

Вычисления средней интенсивности изображения частично когерентного ($\rho_k < \infty$) Бессель-гауссова пучка в задней фокальной плоскости ($x = F_0$) собирающей линзы (2) показывают, что при распространении частично когерентного оптического излучения влияние данного искажающего фактора приводит к “размыванию” “идеального” оптического вихря. В частности, можно проследить формирование и исчезновение в области $0,5 \leq \rho/\rho_v \leq 1,5$ “идеального” оптического вихря. При использовании источника низкой когерентности $\rho_k \leq a_0/4$ сформировать “идеальный” оптический вихрь становится уже невозможным.

При формировании изображения некогерентного Бессель-гауссова пучка [8, 9] для средней интенсивности в задней фокальной плоскости $x = F_0$ собирающей линзы (2) можно получить следующее выражение:

$$I \equiv \bar{I} \equiv \overline{I(\cdot)} \cong E_0^2 \frac{a_0^2}{F_0^2} \exp \left[-\frac{1}{2} (\beta a_0)^2 \right] I_m \left[\frac{1}{2} (\beta a_0)^2 \right]. \quad (4)$$

Следовательно, как видно из соотношения (4), в случае некогерентного оптического излучения в задней фокальной плоскости ($x = F_0$) собирающей линзы вблизи оптической оси создаётся равномерная засветка, независимая от точки наблюдения.

Полученные результаты для интенсивности и средней интенсивности “идеального” оптического вихря, формируемого частично когерентным бessel-гауссовым пучком, показывают, что: 1) при увеличении топологического заряда пучка максимальная интенсивность оптического вихря монотонно уменьшается; 2) координата максимального значения интенсивности “идеального” оптического вихря при увеличении значения топологического заряда вихря смещается в сторону от оптической оси вихря; 3) форма оптического вихря приближается к идеальной форме по мере возрастания произведения радиуса гауссова фактора пучка на параметр бесселева фактора пучка; 4) при значении этого параметра больше десяти формируется уже почти “идеальный” оптический вихрь, т.к. координата максимального значения интенсивности, внутренний и внешний радиусы, а также ширина кольца “идеального” оптического вихря в этом случае практически не зависят от значения топологического заряда вихря; 5) в случае частично когерентного оптического излучения влияние этого искажающего фактора приводит к “размыванию” “идеального” оптического вихря; 6) при низком уровне исходной когерентности оптического излучения сформировать “идеальный” оптический вихрь невозможно.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

1. Котляр В.В., Ковалёв А.А. Ускоряющиеся и вихревые лазерные пучки. М: Физматлит, 2019. 256 с.
2. Ostrovsky A.S., Rickenstorff-Parrao C., Arrizon V. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator // Opt. Lett. 2013. V. 38. N 4. P. 534–536. DOI: 10.1364/OL.38.000534.
3. Chen M., Mazilu M., Arita Y., Wright E.M., Dholakia K. Dynamics of microparticles trapped in a perfect vortex beam // Opt. Lett. 2013. V. 38. N 22. P. 4919–4922. DOI: 10.1364/OL.38.004919.
4. Vaity P., Rusch L. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam // Opt. Lett. 2015. V. 40. N 4. P. 597–600. DOI: 10.1364/OL.40.000597.
5. Jabir M.V., Apurv Chaitanya N., Aadhi A., Samanta G.K. Generation of “perfect” vortex of variable size and its effect in angular spectrum of the down-converted photons // Scientific Reports. 2016. V. 6. 21877. DOI: 10.1038/srep21877.
6. Garcia-Garcia J., Rickenstorff-Parrao C., Ramos-Garcia R., Arrizon V., Ostrovsky A. Simple technique for generating the perfect optical vortex // Opt. Lett. 2014. V. 39. N 18. P. 5305–5308. DOI: 10.1364/OL.39.005305.
7. Lukin I.P., Lukin V.P. Propagation of a partially coherent Bessel-Gaussian beam in a uniform medium and turbulent atmosphere // Photonics. 2024. V. 11. N 6. 562. DOI: 10.3390/photonics11060562.
8. Beran M.J., Parrent G.B. Theory of partial coherence. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1964. 193 p. DOI: 10.1119/1.1972119.
9. Andrews L.C., Phillips R.L. Laser beam propagation through random media. 2nd ed. Bellingham, Washington: SPIE Press, 2005. 782 p.
10. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.