

Секция: Физико-математические науки

ХОРОШУН АННА НИКОЛАЕВНА

к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики

КИРИЧЕНКО ЮЛИЯ АНАТОЛЬЕВНА

аспирант кафедры прикладной физики

ЧЕРНЫХ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

аспирант кафедры прикладной физики

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

г. Северодонецк, Луганская область, Украина

ДИСЛОКАЦИИ ВОЛНОВОГО ФРОНТА В ПОЛЕ СИНГУЛЯРНОГО ПУЧКА И ЛИНЕЙНОГО ГРАДИЕНТА ФАЗЫ

Введение. Фазовые сингулярности или дислокации волнового фронта – основные объекты исследования сингулярной оптики скалярного светового поля. Непрерывные дислокационные линии в световом поле характеризуются нулевой амплитудой, неопределенной фазой и циркуляцией энергии вокруг них. Траектория дислокационной линии определяется характером асимметрии амплитуды и фазы в плоскости источников. При сечении плоскостью вместо линии зачастую наблюдаются две точки – это оптические вихри единичного заряда с противоположным знаком, именуемые диполем оптических вихрей (ОВ). В данной работе особое внимание уделяется параметрам образования диполя ОВ в зависимости от линейного градиента фазы.

Простым примером пучка с осевым ОВ является Лагерр-Гауссова мода LG_0^m с ненулевым азимутальным индексом m , указывающим топологический заряд вихря. Структура ОВ с единичным зарядом очень устойчива к флуктуациям интенсивности и фазы, что позволяет использовать их для передачи информации через турбулентную атмосферу

в качестве сверхчувствительных детекторов изменения термодинамических параметров системы, устройств сортировки объектов субдлинноволнового размера, а также для захвата и манипулирования микрочастицами, не повреждая их.

Лагерр-Гауссова мода с азимутальным индексом больше единицы нестабильна, т.е. в поле один вихрь с топологическим зарядом m , как правило, распадается на m единичных оптических вихрей.

Многозарядовые ОВ перспективны в метрологии и являются базовыми в задачах сингулярометрии. Термин сингулярометрия впервые ввели Марк Деннис и Йорг Готте. Суть его заключается в том, что, анализируя результирующую конфигурацию траекторий оптических вихрей в возмущенном световом поле, можно восстановить информацию о параметрах возмущения.

Цель данной работы состоит в том, чтобы исследовать амплитудно-фазовые характеристики пучка и воссоздать конфигурацию сингулярного скелетона поля, полученного после прохождения сингулярного пучка, как моды LG_0^m , $m \geq 1$ через линейную фазовую маску в виде двух клиньев.

Теоретическая модель.

Лагерр-Гауссова мода LG_0^m в безразмерных координатах может быть записана в виде:

$$LG_0^m(\rho, \varphi, z) = \frac{A_0}{\sqrt{1+z^2}} \left(\frac{\sqrt{2}\rho}{\sqrt{1+z^2}} \right)^{|m|} \exp\left(-\frac{\rho}{1+z^2}\right) \exp\left[i\left[\frac{\rho^2 z}{1+z^2} + m\varphi - (|m|+1)\arctg z + kz \cdot z_R\right]\right], \quad (1)$$

где A_0 – это амплитудный параметр, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$, φ, z – цилиндрические безразмерные координаты, m – это топологический заряд. Знак заряда дислокации указывает направление циркуляции энергии в пучке, а его величина определяет изменение фазы Φ вокруг

дислокационной линии в виде $m = \int \frac{d\Phi}{2\pi}$. Поперечные размеры указаны в радиусах перетяжки r_0 , а продольные – в длинах Рэлея $z_R = kr_0^2/2$.

Метод синтеза пучка с осевым ОВ из пучка с гладким волновым фронтом посредством фазовой маски в виде двух клиньев изучался различными исследовательскими группами [1-4]. Нами для данной задачи представлен сценарий образования осевого ОВ из диполя, а также проведена экспериментальная работа, подтверждающая хорошее согласование теории и эксперимента для параметров сердцевины синтезированного ОВ [5,6] с помощью пространственного модулятора света.

Фазовую маску с линейным градиентом K зададим в плоскости источников XU в виде:

$$\Phi(x, y, 0) = \begin{cases} 2\pi - K \cdot x, & y > 0 \\ \pi + K \cdot x, & y \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Фазовой маске в виде двух клиньев (2) соответствует рост фазы против часовой стрелки вокруг начала координат, как и у сингулярного пучка с положительным зарядом. Следовательно, направление циркуляции фазы совпадает, и маска увеличивает число ОВ на один, по сравнению с зарядом исходного сингулярного пучка и мы называем её прямым конвертером. Для отрицательного знака заряда сингулярного пучка данная система клиньев уменьшает число приосевых ОВ на один, следовательно, является обратным конвертером. Заметим, что в поле возможно образование дополнительных диполей ОВ, природа которых рассматривается ниже.

Прохождение пучка через фазовую маску в виде двух клиньев можно рассматривать как дифракционную задачу. Комплексная амплитуда синтезируемого пучка рассчитывается численно в плоскости

наблюдения X_1Y_1 , расположенной на расстоянии $z \geq z_R$ посредством интеграла Кирхгофа:

$$A(x_1, y_1) = \frac{z_R}{i} \iint A_0(x, y) \cdot \frac{\exp(2i\sqrt{z^2 + ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) \cdot r_0^2 / z_R^2} \cdot z_R^2 / r_0^2)}{\sqrt{z^2 + ((x-x_1)^2 + (y-y_1)^2) \cdot r_0^2 / z_R^2}} dx dy \quad (3)$$

Характеристики синтезированного пучка.

Область значений линейного градиента $K \in [0,2;2,6]$ выбрана таким образом, чтобы выявить особенности фазовых и амплитудных характеристик в возмущенном поле.

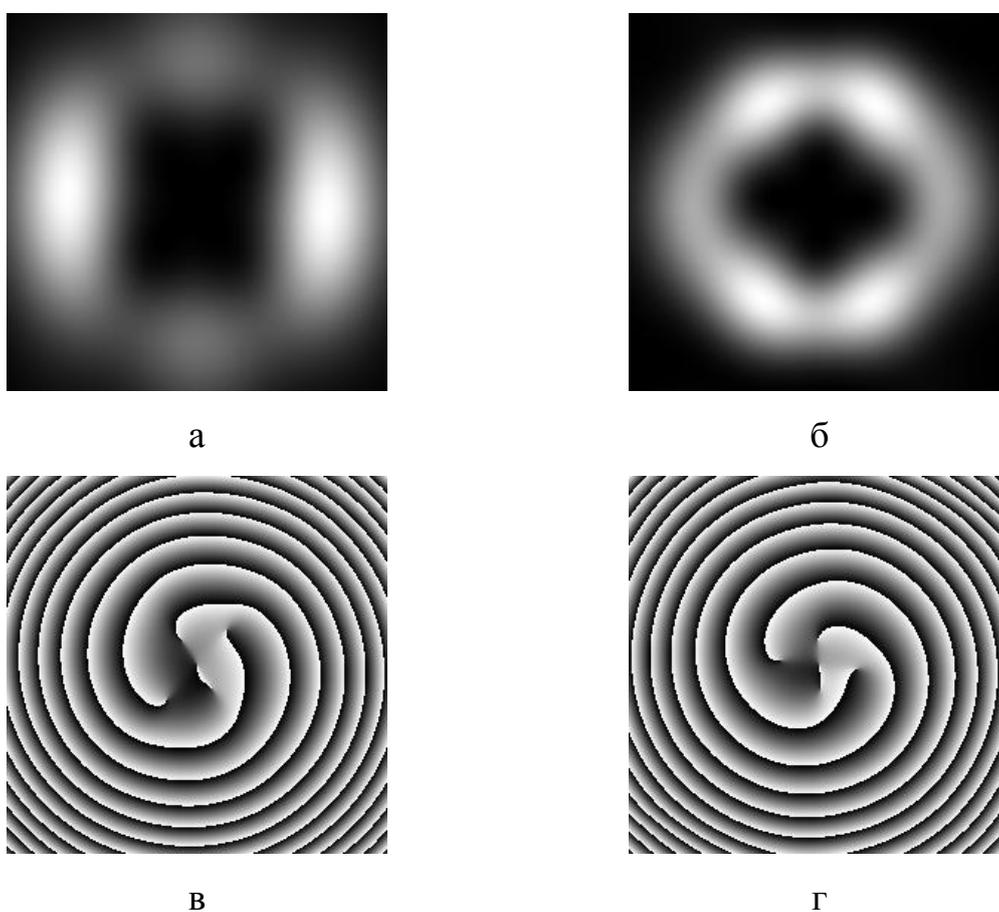


Рис. 1. Распределение интенсивности (а,б) и фазы (в,г) синтезированного пучка с зарядами $m=2$ (а,в), $m=4$ (б,г) и угловыми коэффициентами клина $K=0,6$ (а,в), $K=0,8$ (б,г) на расстоянии $z=10$ при использовании прямого конвертера (а, в) и обратного (б, г)

Полученный пучок содержит $m+1$ приосевых вихрей для прямого конвертера и $m-1$ приосевых вихрей для обратного конвертера. Отметим, что в результирующем поле на периферии пучка возникают дополнительные симметричные скачки фазы на π вдоль линии раздела

клиньев и вследствие этого образуется диполи ОВ. Для прямого конвертера диполи образуются при значении выше некоторого порогового K , а для обратного конвертера – при малых K и больших K .

Распределения интенсивности и фазы (рис. 1) для синтезированных пучков из прямого и обратного клиньев существенно отличаются расположением экстремумов поля и координатами ОВ.

Ещё одной особенностью возмущенного пучка является появление между приосевыми ОВ диполя, который возникает с участием центрального оптического вихря, изменяя его знак на противоположный.

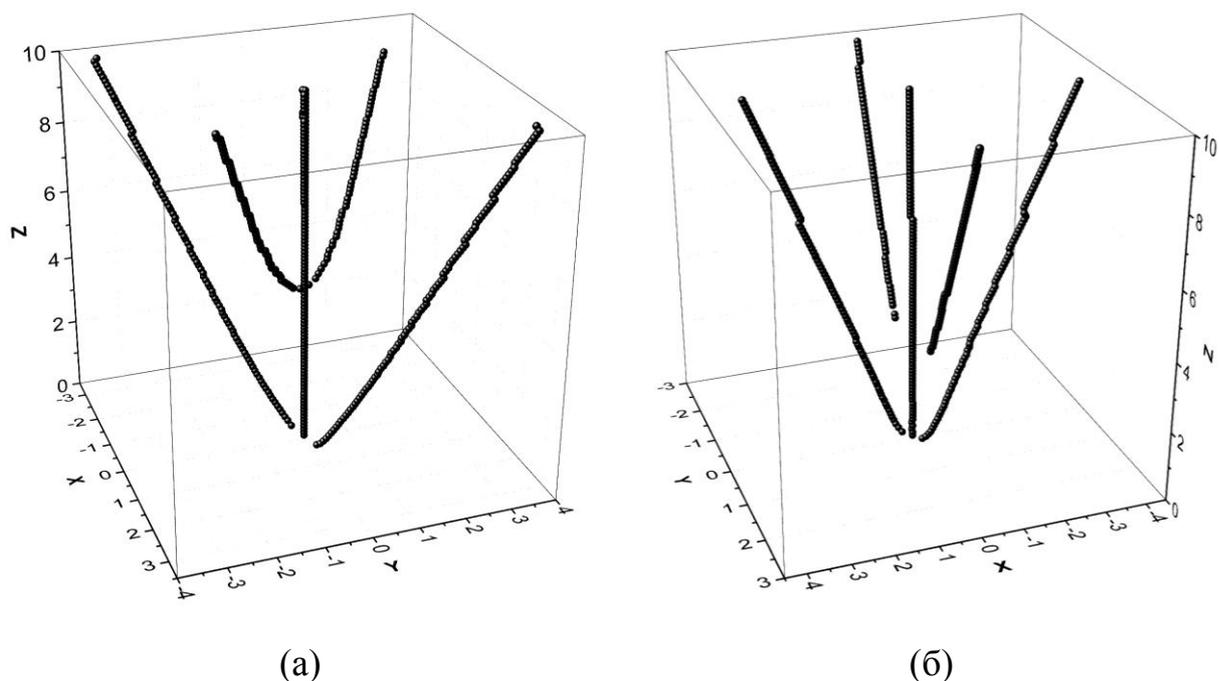


Рис. 2. Траектории распространения вихрей синтезированных пучков с зарядом $m=2$ и угловым коэффициентом клина $K=0.8$ для прямого конвертера (а), с зарядом $m=4$ и угловым коэффициентом клина $K=0.6$ для обратного конвертера (б).

В случае синтеза пучка с помощью прямого конвертера $m=2$ и $K=0.8$ неразрывной остается траектория правого верхнего и левого нижнего ОВ, а диполь образуется на расстоянии $z=4.8$. Для синтеза пучка с помощью обратного конвертера $m=4$ и $K=0.6$ неразрывной остается траектория верхнего и нижнего ОВ, а диполь образуется на расстоянии $z=3.3$. Общий топологический заряд этих пучков остается равным трем на всем пути распространения.

Выводы. Исследованы амплитудно-фазовые характеристики пучка полученного после прохождения сингулярного пучка через фазовую маску в виде двух клиньев с различным коэффициентом наклона клина, а также расстоянием наблюдения. Обнаружено образование дополнительного диполя в центре пучка и представлена его траектория для прямого и обратного клина. Координаты данного диполя являются метками в пучке и представляют дополнительную информацию об исходном распределении поля при решении обратных задач оптики и в оптической метрологии.

Литература:

1. V. N. Gorshkov, A. N. Khoroshun, M. S. Soskin, "The theory of formation of optical vortices by the technique of a phase wedge," *Ukr. J. Phys.* 47 (1), 15–23 (2002).
2. Ya. Izdebskaya, V. Shvedov, D. Kurabtzev, A. Alexeyev, A. Volyar, *Proc. SPIE* 4607, 78 (2001).
3. S. Vyas, P. Senthilkumaran, "Vortices from wavefront tilts," *Opt. and Lasers Eng.* 48, 834–840 (2010).
4. A. N. Khoroshun, "Optimal linear phase mask for the singular beam synthesis from a Gaussian beam and the scheme of its experimental realisation," *J. of Mod. Opt.* 57, 1542–1549 (2010).
5. A. N. Khoroshun, A. V. Chernykh, A. N. Tsimbaluk, J. A. Kirichenko, P. V. Yezhov, Eds. "Experimental realization of an axial optical vortex beam synthesis using a Gaussian beam and two ramps from a spatial light modulator ," *Proc. SPIE* 9066 (2013).
6. A. N. Khoroshun, A. V. Chernykh, A. N. Tsimbaluk, J. A. Kirichenko, P. V. Yezhov, A. V. Kuzmenko, J. T. Kim, "Properties of an Axial Optical Vortex Generated with the use of a Gaussian Beam and Two Ramps," *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 16 (2), 2105-2107(2016).