

Исследование смещения вихревых лазерных пучков относительно оптического элемента с использованием высокопроизводительных компьютерных систем

Д.А. Савельев^{1,2}

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

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе проведено исследование влияния на пространственное распределение пучков Гаусса-Лагерра с круговой поляризацией числовой апертуры аксикона и порядка вихревой фазы с учетом положения пучка относительно оптического элемента в трехмерной модели. Численное моделирование дифракции рассматриваемых пучков проводилось методом конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием высокопроизводительных компьютерных систем.

1. Введение

Оптические устройства, позволяющие регулировать поляризационно-фазовое состояние лазерного пучка, изучаются для практического применения [1-5]. Интерес представляет преобразование вихревых лазерных лучей. В работе [6] была рассмотрена трансформация лазерного луча под воздействием астигматизма и найдено интегральное преобразование пучков Гаусса-Эрмита в пучки Гаусса-Лагерра. В работе [7] использовалась астигматическая линза, в работе [8] рассматривался метод определения топологического заряда полихроматических оптических вихрей, основанный на астигматической трансформации сингулярных оптических пучков, где картина интенсивности вихревого луча приобретала форму темных полос в фокальной плоскости цилиндрической линзы. В работе [9] теоретически и экспериментально исследовались астигматические преобразования пучков Бесселя при распространении в одноосном кристалле. Интерес вызывает показанная аналогия между данным преобразованием и астигматическим искажением плоской волны наклонным аксиконом. В работе [10] в качестве астигматических преобразователей рассматривались цилиндрическая и наклонная сферическая линзы, проведено сравнительное экспериментальное исследование различных астигматических преобразований. В работе [11] теоретически и экспериментально исследован поляризационно-зависимый эффект астигматического преобразования вихревых лучей, ориентированных перпендикулярно оси одноосного кристалла.

Измерение состояния орбитального углового момента вихревых пучков имеет большое значение в различных применениях. В работе [12] приводится эффективная схема измерения состояний орбитального углового момента (топологических значений заряда) вихревых пучков с кольцевыми решетками. Величина значения топологического заряда определяется

количеством темных полос после дифракции, а знак топологического значения заряда отличается ориентацией дифракционной картины.

Аксикон – оптический элемент, формирующий бесселевый пучок нулевого порядка, диаметр центрального пятна которого по полуспаду интенсивности (FWHM) равен $0,36$ длины волны, деленную на числовую апертуру [13]. Это на 37% меньше, чем размер диска Эйри, формируемого линзой с той же числовой апертурой (NA). В работе [14] исследовались особенности острой фокусировки пучков Гаусса-Лагерра и было показано, что наибольшее влияние состояние поляризации оказывает на продольную компоненту электрического вектора светового поля.

В данной работе проведены численные исследования распространения мод Гаусса-Лагерра до третьего порядка включительно в ближней зоне при изменении числовой апертуры аксикона и смещении лазерного пучка относительно оптического элемента. Моделирование дифракции проводится при использовании метода конечных разностей во временной области (FDTD) с использованием высокопроизводительных компьютерных систем [15]. Расчеты проводились на вычислительном кластере мощностью 850 ГФлоп.

2. Преобразование вихревого пучка дифракционным аксиконом с различной числовой апертурой

Параметры моделирования: длина волны $\lambda = 0.532$ мкм, размер вычислительной ячейки $x, y, z \in [-3.8\lambda; 3.8\lambda]$. Толщина поглощающего слоя PML $\sim 1.3\lambda$, шаг выборки по пространству – $\lambda/21$, шаг по времени – $\lambda/(42c)$, где c скорость света. В качестве входного лазерного излучения рассматривались пучки Гаусса-Лагерра с круговой поляризацией. Порядок вихревой фазы m изменялся от 1 до 3. Направление вихря в лазерном пучке было противоположно направлению круговой поляризации. Показатель преломления аксикона и подложки равен $n = 1.5$. Числовая апертура (NA) фокусирующего бинарного аксикона составляла 0.95 и 0.5. Вид элемента показан на рисунке 1.

Результаты численного моделирования на расстоянии 2λ от элемента в плоскости xu показаны в таблицах 1-3, Δ – смещение лазерного пучка относительно центра оптического элемента.

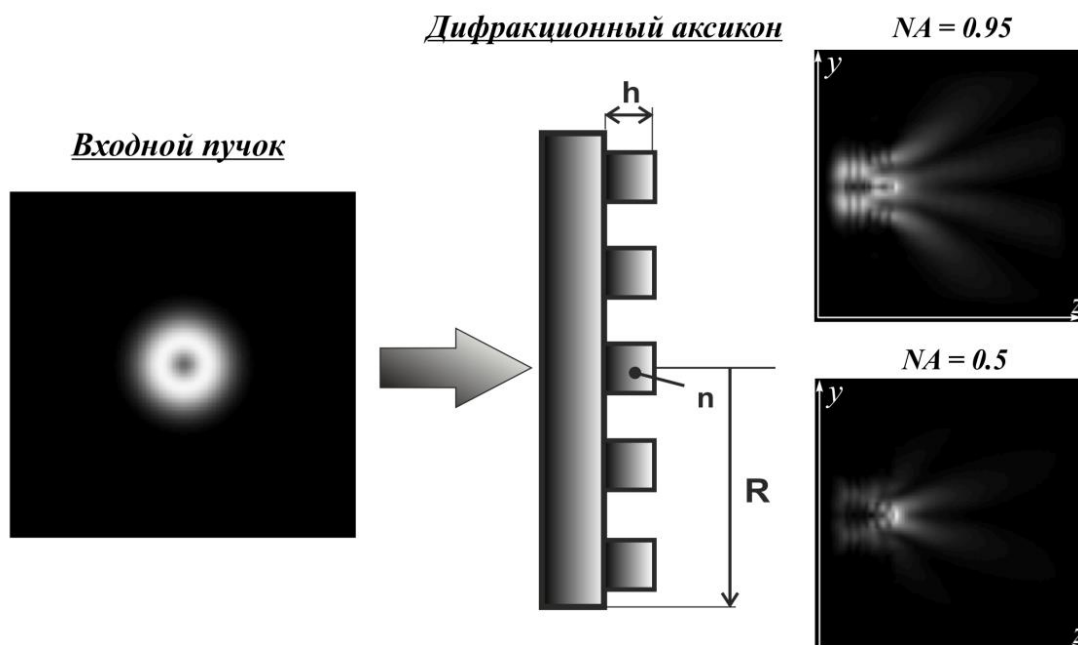


Рисунок 1. Рассматриваемый оптический элемент и сечения распространения в области yz для аксиконов с $NA = 0.95$ и $NA = 0.5$.

Таблица 1. Результат численного моделирования при $m = 1$ при изменении ориентации пучка относительно оптического элемента, плоскость xu .

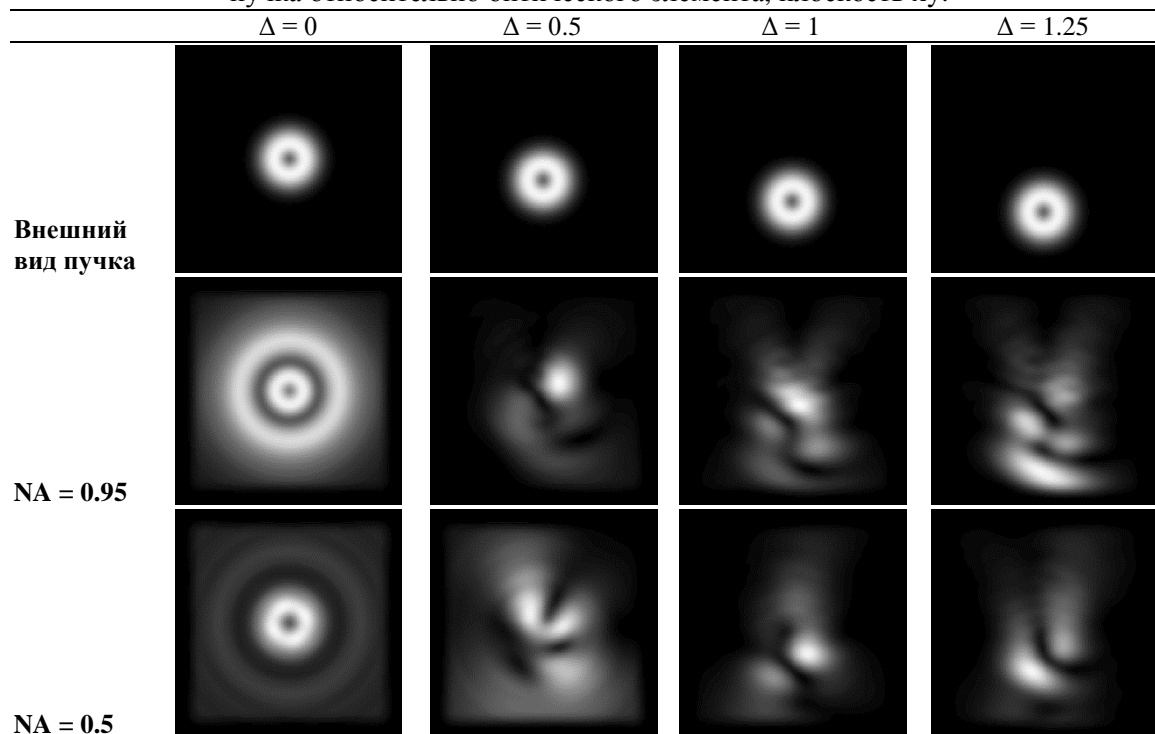


Таблица 2. Результат численного моделирования при $m = 2$ при изменении ориентации пучка относительно оптического элемента, плоскость xu .

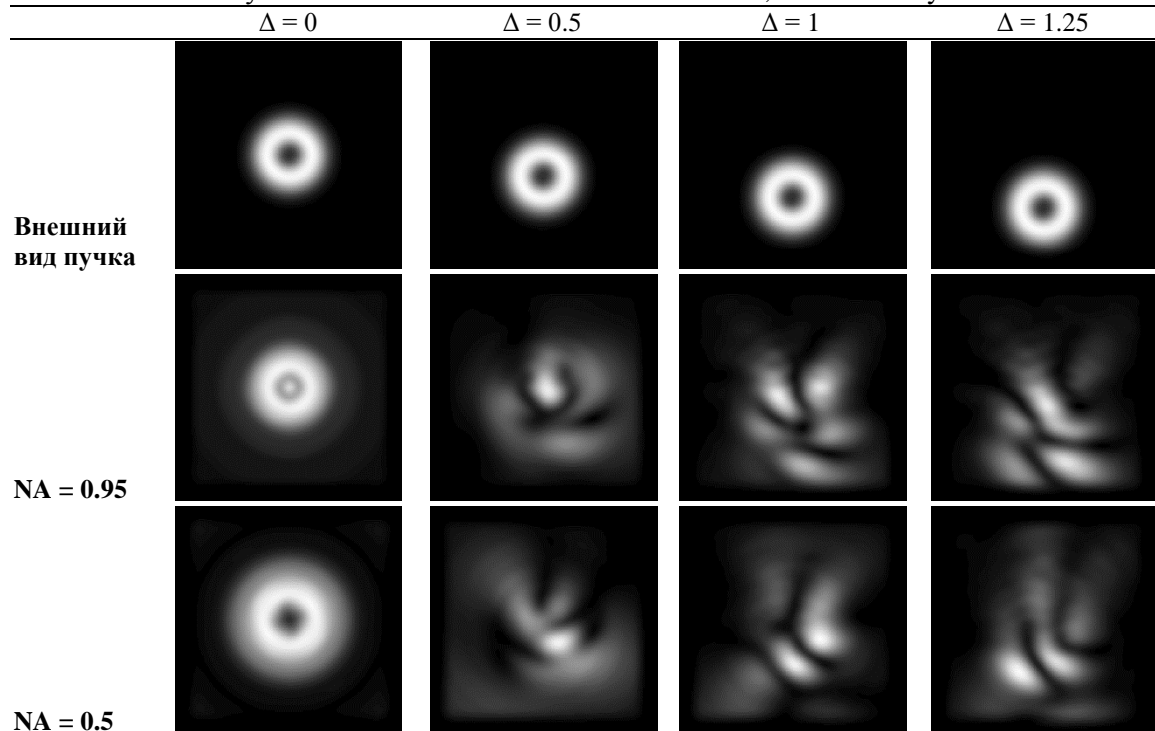
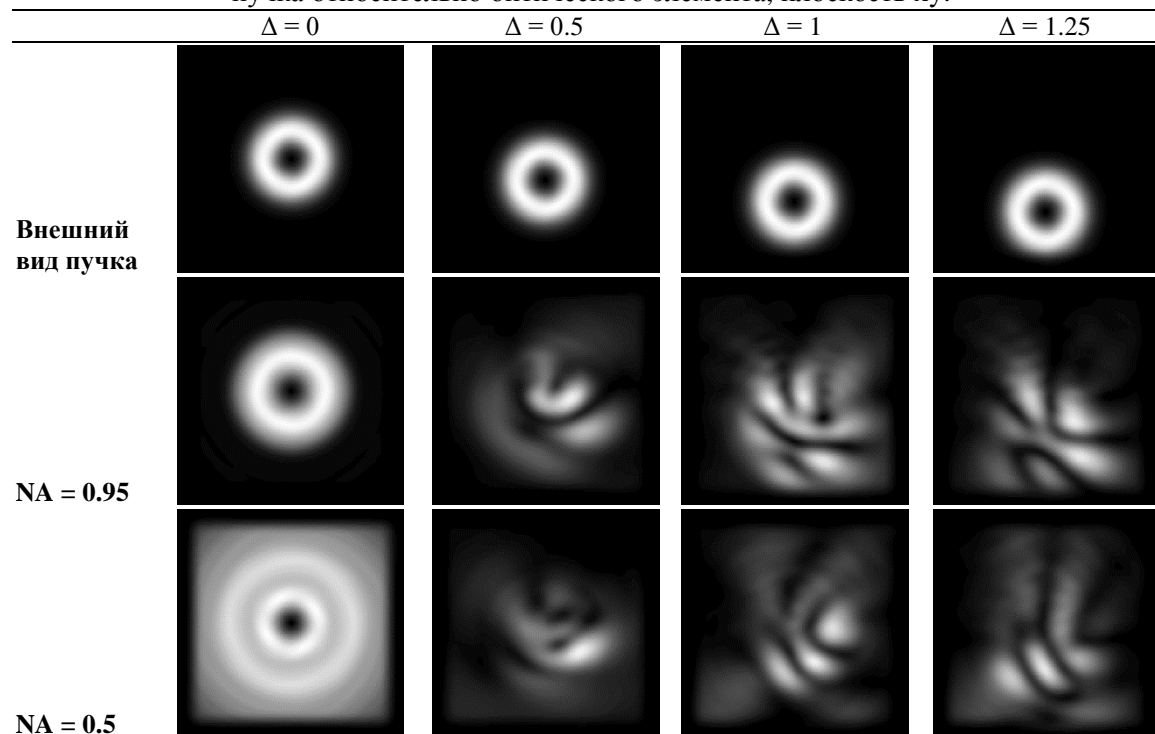


Таблица 3. Результат численного моделирования при $m = 3$ при изменении ориентации пучка относительно оптического элемента, плоскость $xу$.



3. Заключение

В данной работе численно с помощью метода FDTD выполнено сравнительное исследование дифракции мод Гаусса – Лагерра с круговой поляризацией на аксиконе с субволновым периодом при различной числовой апертуре. Направление вихря в лазерном пучке было противоположно направлению круговой поляризации. Проведено исследование влияния увеличения порядка вихревой фазы на вид дифракционных картин при смещении лазерного пучка относительно оптического элемента.

Показано, что с помощью дифракционного аксикона можно проводить поляризационные преобразования в ближней зоне, что, в частности, выражается в том, что число темных полос соответствует номеру вихревого лазерного пучка.

4. Литература

- [1] Cancula, M. Generation of vector beams with liquid crystal disclination lines / M. Cancula, M. Ravnik, S. Zumer // *Physical Review E*. – 2014. – Vol. 90(2). – P. 022503.
- [2] Khonina, S.N. Polarization converter for higher-order laser beams using a single binary diffractive optical element as beam splitter / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, S.V. Alferov // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37(12). – P. 2385-2387.
- [3] Tidwell, S.C. Generating radially polarized beams interferometrically / S.C. Tidwell, D.H. Ford, W.D. Kimura // *Applied Optics*. – 1990. – Vol. 29(15). – P. 2234-2239.
- [4] Machavariani, G. Efficient extracavity generation of radially and azimuthally polarized beam / G. Machavariani, Y. Lumer, I. Moshe, A. Meir, S. Jackel // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(11). – P. 1468-1470.
- [5] Kawauchi, H. Simultaneous generation of helical beams with linear and radial polarization by use of a segmented half-wave plate / H. Kawauchi, Y. Kozawa, S. Sato, T. Sato, S. Kawakami // *Optics Letters*. – 2008. – Vol. 33(4). – P. 399-401.
- [6] Abramochkin, E.G. Beam transformations and transformed beams / E.G. Abramochkin, V.G. Volostnikov // *Optics Communications*. – 1991. – Vol. 83(1-2). – P. 123-135.

- [7] Bekshaev, A.Y. Transformation of higher-order optical vortices upon focusing by a astigmatic lens / A.Y. Bekshaev, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // *Optics Communications*. – 2004. – Vol. 241(4-6). – P. 237-247.
- [8] Denisenko, V. Determination of topological charges of polychromatic optical vortices / V. Denisenko, V. Shvedov, A.S. Desyatnikov, D.N. Neshev, W. Krolikowski, A. Volar, M. Soskin, Y.S. Kivshar // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(26). – P. 23374-23379.
- [9] Khonina, S.N. Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal / S.N. Khonina, V.D. Pararin, A.V. Ustinov, A.P. Krasnov // *Optica Applicata*. – 2016. – Vol. 46(1).
- [10] Kotlyar, V.V. Astigmatic transforms of an optical vortex for measurement of its topological charge / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, and A.P. Porfirev // *Applied Optics*. – 2017. – Vol. 56(14). – P. 4095-4104.
- [11] Khonina, S.N. Polarisation-dependent transformation of vortex beams when focused perpendicular to the crystal axis / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 428. – P. 63-68.
- [12] Zheng, S. Measuring orbital angular momentum (OAM) states of vortex beams with annular gratings / S. Zheng, J. Wang // *Scientific Reports*. – 2017. – Vol. 7. – P. 40781.
- [13] Kalosha, V.P. Toward the subdiffraction focusing limit of optical superresolution / V.P. Kalosha, I. Golub // *Optics Letters*. – 2007. – Vol. 32(24). – P. 3540-3542.
- [14] Савельев, Д.А. Особенности острой фокусировки вихревых пучков Гаусса–Лягерра / Д.А. Савельев, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2015. – Т. 39, № 5. – С. 654-662. DOI: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-654-662.
- [15] Savelyev, D.A. The calculation of the diffraction of the laser beams with a phase singularity on the micro-axicons with using high-performance computing / D.A. Savelyev, S.N. Khonina // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2014. – Vol. 490(1) – P. 012213

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №16-29-11698) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание 3.3025.2017/4.6, грант Президента Российской Федерации МК-1797.2019.2), а также в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение №007-ГЗ/Ч3363/26).

Investigation of the vortex laser beam shift relative to the optical element using high-performance computer systems

D.A. Savelyev^{1,2}

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

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. The spatial distribution of the Gauss-Laguerre beams with circular polarization is investigated subject to the beam position relative to the element, the axicon numerical aperture and order of the vortex phase in the 3D model. Modeling of diffraction is numerically investigated by the finite difference time domain (FDTD) method using high-performance computing.