

Анализ влияния мод Гаусса-Лагерра различных порядков на картину интенсивности при наличии абберрационных искажений

М.И. Помещиков
Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
m.pomeshchikov@mail.ru

Аннотация — Определение порядка вихревого пучка является важной задачей в оптике. Одним из способов является внесение астигматического искажения. Однако и другие типы абберраций, например, кома, может быть полезной для определения топологического заряда вихревого пучка. Детально исследуется влияние типа и величины абберраций на искажение картины интенсивности вихревых пучков, заданных с помощью мод Гаусса-Лагерра разных порядков.

Ключевые слова — абберрации, моды Гаусса-Лагерра, вихревой пучок, топологический заряд

I. ВВЕДЕНИЕ

Оптические вихревые пучки – лазерные пучки особой структуры, специальные свойства которых активно изучаются несколько десятилетий [1-3]. Вихревые пучки эффективно применяются в различных областях, таких как оптическая передача информации [4], оптические ловушки и манипулирование [5], лазерное структурирование [6-7] и другие. Таким образом, разработка простых и удобных методов для определения характеристик вихревых пучков является актуальной задачей.

Одним из способов определения порядка вихревого пучка является внесение астигматического искажения [8]. В работе [9] было показано, что и другие типы абберраций, например, кома, может быть полезной для определения топологического заряда вихревого пучка.

Отметим, что обычно рассматриваются вихревые гауссовы пучки (моды Гаусса-Лагерра с нулевым радиальным индексом). В данной работе детально исследуется влияние типа и величины абберраций на искажение картины интенсивности вихревых пучков, заданных с помощью мод Гаусса-Лагерра разных порядков, и анализируются параметры абберраций для наилучшего определения величины топологического заряда.

II. ИССЛЕДОВАНИЕ

Моды Гаусса-Лагерра разных порядков задаются формулой [10]:

$$\Psi(\rho, \varphi) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{\sigma^2}\right) \rho^{|l|} L_q^{|l|}\left(\frac{2\rho^2}{\sigma^2}\right) \exp(il\varphi), \quad (1)$$

где l – порядок вихря, σ – радиус Гауссова пучка, $L_q^{|l|}$ – обобщенный многочлен Лагерра, q – радиальный порядок моды, зависимость от которого при

абберационном искажении мы наиболее детально исследуем.

Воздействие различных абберраций на вихревой пучок может быть смоделировано умножением формулы (1) на выражение вида $\exp(i\alpha Z_n^m(\rho, \varphi))$:

$$f(\rho, \varphi) = \Psi(\rho, \varphi) \exp(i\alpha Z_n^m(\rho, \varphi))$$

где α – уровень абберрации, а $Z_n^m(\rho, \varphi)$ – функции Цернике [11].

В рамках данной работы была написана программа с использованием языка MATLAB для моделирования воздействия абберраций на вихревые пучки, заданные с помощью мод Гаусса-Лагерра различных порядков, и визуализации результатов. Были построены графики сечений интенсивности вдоль наиболее характерных направлений результирующих картин (рис. 1). В случае абберрации типа астигматизм – это линия, проходящая через центр картины распределения и наклоненная на 45° против часовой стрелки (рис. 1а). В случае абберрации типа кома – это вертикальная линия (рис. 1б). На рис. 1 приведены примеры получаемых картин распределения интенсивности для вихревого пучка с топологическим зарядом $l=5$ при внесении различных абберраций. Линии, вдоль которых строился график изменения интенсивности, выделены красным.

В таблицах I-II приведены полученные графики для вихревых пучков с топологическим зарядом $l=5$ и $l=11$, заданных с использованием мод Гаусса-Лагерра порядка $q=1$ и 2 , и при воздействии абберрации типа астигматизм уровня α от $0,9$ до $2,1$.

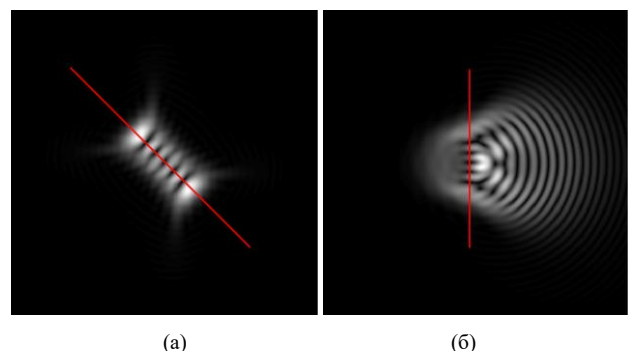


Рис. 1. Примеры получаемых картин распределения интенсивности для вихревого пучка с топологическим зарядом $l=5$ при внесении абберрации типа астигматизм (а) и кома (б)

Таблица I. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБЕРРАЦИИ Z_2^2 (АСТИГМАТИЗМ) НА ВИХРЕВОЙ ПУЧОК ПОРЯДКА $L = 5$ ДЛЯ РАЗНЫХ ПОРЯДКОВ МНОГОЧЛЕНА ЛАГЕРРА n И УРОВНЕЙ АБЕРРАЦИИ α

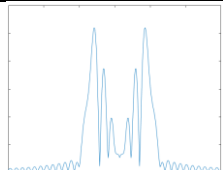
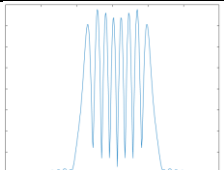
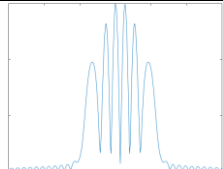
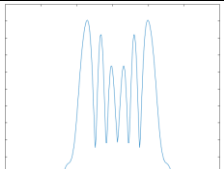
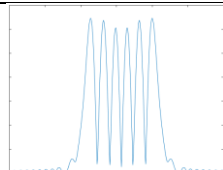
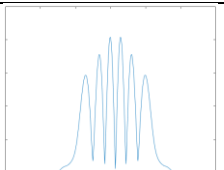
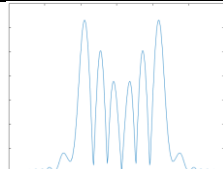
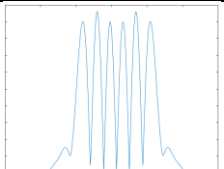
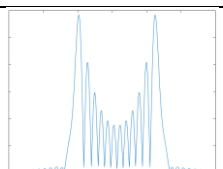
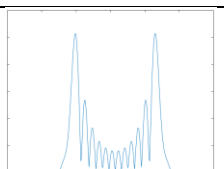
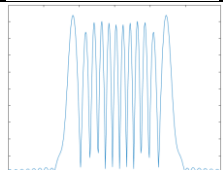
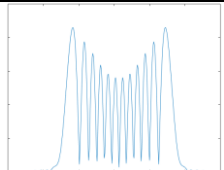
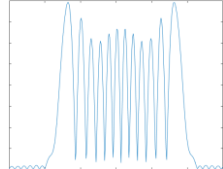
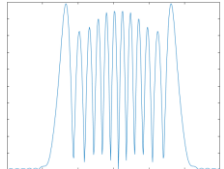
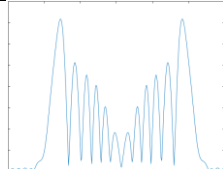
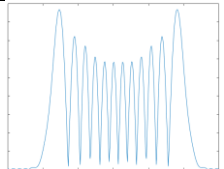
Уровень аберрации	$L_1^{[5]}$	$L_2^{[5]}$
$\alpha = 0,9$		
$\alpha = 1,3$		
$\alpha = 1,7$		
$\alpha = 2,1$		

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБЕРРАЦИИ Z_2^2 (АСТИГМАТИЗМ) НА ВИХРЕВОЙ ПУЧОК ПОРЯДКА $L = 11$ ДЛЯ РАЗНЫХ ПОРЯДКОВ МНОГОЧЛЕНА ЛАГЕРРА n И УРОВНЕЙ АБЕРРАЦИИ α

Уровень аберрации	$L_1^{[11]}$	$L_2^{[11]}$
$\alpha = 0,9$		
$\alpha = 1,3$		
$\alpha = 1,7$		
$\alpha = 2,1$		

При повышении радиального порядка q мод Гаусса-Лагерра требуется более высокий уровень aberrации для корректного определения значения топологического заряда вихревого пучка. Например, это видно по таблице

I: при уровне aberrации $\alpha = 0,9$ $L_2^{[5]}$ дает 7 локальных минимумов, что не соответствует реальному порядку пучка 5. Но уже при уровне aberrации $\alpha=1,3$ получается верный результат.

Также можно заметить, что для мод Гаусса-Лагерра с более высокими радиальными порядками q определение топологического заряда более высоких порядков l происходит более четко. Для вихревого пучка 5-го порядка многочлен Лагерра с радиальным индексом $q=2$ при уровне астигматизма $\alpha=0,9$ дает неверный результат, но для вихревого пучка 11-го порядка $q=2$ дает верный результат при том же уровне aberrации (Таблица II).

В целом, для мод Гаусса-Лагерра с более высокими радиальными порядками q наблюдаются более контрастные и четкие результаты, но при этом требуются более высокие уровни aberrаций.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе исследована возможность определения топологического заряда пучков, заданных модами Гаусса-Лагерра с помощью внесения aberrационных искажений. Показано, что более высокие порядки обобщенного многочлена Лагерра могут быть более эффективны при определении более высоких порядков вихревых пучков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bazhenov, V.Y. Screw Dislocations in Light Wavefronts / V.Y. Bazhenov, M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov // J. Mod. Opt. – 1992. – Vol. 39(5). – P. 985–990.
- [2] Порфирьев, А.П. Фазовые сингулярности и оптические вихри в фотонике / А.П. Порфирьев, А.А. Кучмижак, С.О. Гурбатов, С. Йодказис, С.Н. Хонина, Ю.Н. Кульчин // Успехи физических наук. – 2022. – Т. 192, № 8. – С. 841–866.
- [3] Yao, A.M. Orbital Angular Momentum: Origins, Behavior and Applications / A.M. Yao, M.J. Padgett // Adv. Opt. Photonics. – 2011. – Vol. 3(2). – P. 161–204.
- [4] Khonina, S.N. Spatial-Light-Modulator-Based Multichannel Data Transmission by Vortex Beams of Various Orders / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, M.A. Butt // Sensors. – 2021. – Vol. 21(9). – id. 2988.
- [5] Paez-Lopez, R. Optical manipulation using optimal annular vortices / R. Paez-Lopez, U. Ruiz, V. Arrizon, R. Ramos-Garcia // Opt. Lett. – 2016. – Vol. 41(17). – P. 4138–4141.
- [6] Toyoda, K. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu // Nano Lett. – 2012. – Vol. 12(7). – P. 3645–3649.
- [7] Khonina, S.N. Influence of optical forces induced by paraxial vortex Gaussian beams on the formation of a microrelief on carbazole-containing azopolymer films / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S.G. Volotovskiy, N.A. Ivliev, V.V. Podlipnov // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59(29). – P. 9185–9194.
- [8] Beijersbergen, M.W. Astigmatic Laser Mode Converters and Transfer of Orbital Angular Momentum / M.W. Beijersbergen, L. Allen, H.E.L.O. van der Veen, J.P. Woerdman // Opt. Commun. – 1993. – Vol. 96. – P. 123–132.
- [9] Pomeshchikov, M. I. Investigation of the Possibility to Determining the Topological Charge of a Vortex Beam at Various Aberrational Distortions / M.I. Pomeshchikov, S.N. Khonina // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2023. – Vol. 32(1). – P. 167–179. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050168>.
- [10] Abramowitz, M. Handbook on Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables / M. Abramowitz, I.A. Stegun – National Bureau of Standards: Gaithersburg, Maryland, USA, 1964. – 1046 p.
- [11] Lakshminarayanan, V. Zemike Polynomials: A Guide / V. Lakshminarayanan, A. Fleck // J. Mod. Opt. – 2011. – Vol. 58. – P. 545–561.