

Анализ воздействия абберационных искажений на картину интенсивности вихревых пучков различных порядков

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. Исследуется влияние различных типов аббераций на картину интенсивности вихревых пучков с целью визуализации топологического заряда.

Ключевые слова — абберации, вихревой пучок, топологический заряд

1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические вихревые пучки – лазерные пучки особой структуры, специальные свойства которых активно изучаются несколько десятилетий [1-3]. Самое важное среди их особых свойств – наличие орбитального углового момента [4], который определяется порядком вихревого пучка. Отличительной особенностью вихревых пучков также является наличие вихревой фазовой сингулярности, в которой фаза не определена, а амплитуда равна нулю. Вихревые пучки эффективно применяются в различных областях, таких как оптическая передача информации [5-6], оптические ловушки и манипулирование [7], лазерное структурирование [8-9] и другие. Таким образом, разработка простых и удобных методов для определения характеристик вихревых пучков является актуальной задачей.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ

Одним из способов определения порядка вихревого пучка является астигматическое преобразование [10-11]. В работе [12] было рассмотрено влияние астигматизма различных порядков. В данной работе исследуется влияние различных типов аббераций на искажение интенсивности вихревого пучка с целью визуализации его топологического заряда.

Оптический вихревой пучок задается формулой:

$$f(\rho, \varphi) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{\sigma^2}\right) \rho^{|\ell|} \exp(i\ell\varphi), \quad (1)$$

где ℓ – порядок вихря, а σ – радиус Гауссова пучка.

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

$$f(\rho, \varphi) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{\sigma^2}\right) \rho^{|\ell|} \exp(i\ell\varphi) \exp(i\alpha Z_n^m(\rho, \varphi)),$$

где α – уровень абберации.

В рамках данной работы была написана программа с использованием языка MATLAB для моделирования воздействия различных аббераций на вихревые пучки и

визуализации результатов. В таблице 1 приведены полученные результаты.

Наиболее многообещающими выглядят результаты с абберациями Z_2^2 , Z_3^3 и Z_3^1 , так как в этих случаях наблюдается зависимость между видом получаемого изображения и порядком вихревого пучка. Изучим их воздействие на вихревые пучки более подробно.

Исследуем более подробно воздействие аббераций на картину интенсивности при различных порядках вихревого пучка. В таблице 2 представлены результаты для пучков с зарядом от 1 до 5.

Таблица 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ АББЕРАЦИЙ НА ВИХРЕВОЙ ПУЧОК

Тип абберации	Вихревой пучок порядка 3	Вихревой пучок порядка 5
Z_1^1 , Сдвиг		
Z_2^2 , Астигматизм		
Z_3^3 , Трилистник		
Z_3^1 , Кома		
Z_4^4 , Четырехлистник		
Z_4^2 , Астигматизм 2-го порядка		

Из таблицы видно, что в случае Z_3^3 довольно сложно визуально отличить некоторые порядки пучков друг от друга, например, 1 от 2, или 3 от 5. В то же время, по результату воздействия аббераций Z_2^2 и Z_3^1 можно однозначно определить порядок вихревого пучка. В

случае Z_2^2 – по количеству темных полос, в случае Z_3^1 – по количеству темных пятен в центре распределения.

Рассмотрим теперь применение данных типов aberrаций для определения нецелых зарядов вихревых пучков. Результаты приведены в таблице 3.

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБЕРРАЦИЙ Z_2^2 , Z_3^3 И Z_3^1 НА ВИХРЕВЫЕ ПУЧКИ С m ОТ 1 ДО 5

Тип aberrации	Z_2^2	Z_3^3	Z_3^1
$m = 1$			
$m = 2$			
$m = 3$			
$m = 4$			
$m = 5$			

Таблица III. РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ АБЕРРАЦИЙ Z_2^2 , Z_3^3 И Z_3^1 НА ВИХРЕВЫЕ ПУЧКИ С НЕЦЕЛЫМ m

Тип aberrации	$m = 1,5$	$m = 2,5$	$m = 3,5$
Z_2^2			
Z_3^3			
Z_3^1			

Как видим, лучше всего себя показывает Z_3^1 , так как в этом случае центральная часть распределения интенсивности изменяется не сильно и количество темных пятен в центре все еще соответствует целой

части заряда, но добавляется дополнительное темное пятно сверху или снизу, в зависимости от знака заряда вихревого пучка. Результаты при применении aberrации Z_2^2 тоже могут быть полезны, так как количество темных полос в распределении все еще соответствует целой части заряда пучка.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе было показано, что наиболее полезными при определении порядка вихревого пучка являются aberrации типа кома и астигматизм. В случае, если измерять планируется только целые значения зарядов и при этом важен их знак, лучше применять астигматизм. Если же знак заряда не важен, но есть необходимость в определении нецелых зарядов, лучше применять кому. Так же, в дальнейшем планируется рассмотреть действие многоканальных дифракционных элементов, в которых обе эти aberrации использовались бы одновременно.

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] Shen, Y. Optical vortices 30 years on: OAM manipulation from topological charge to multiple singularities / Y. Shen, X. Wang, Z. Xie, C. Min, X. Fu, Q. Liu, M. Gong, X. Yuan // Light Sci. Appl. – 2019. – Vol. 8. – P. 90.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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). – P. 2988.
- [6] Huang, H. Mode division multiplexing using an orbital angular momentum mode sorter and MIMO-DSP over a graded-index few-mode optical fibre / H. Huang, G. Milione, M. P. J. Lavery, G. Xie, Y. Ren, Y. Cao, N. Ahmed, T. A. Nguyen, D. A. Nolan, M.-J. Li, M. Tur, R. R. Alfano, A. E. Willner // Sci. Rep. – 2015. – Vol. 5 – P. 14931.
- [7] Grier, D.A. Revolution in optical manipulation / D.A. Grier // Nature. – 2003. – Vol. 424. – P. 810–816.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Khonina, S.N. Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal / S.N. Khonina, V.D. Parandin, A.V. Ustinov, A.P. Krasnov // Optica Applicata. – 2016. – Vol. 46(1). – P. 5–18.
- [11] 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.
- [12] Khorin, P.A. Simplifying the experimental detection of the vortex topological charge based on the simultaneous astigmatic transformation of several types and levels in the same focal plane / P.A. Khorin, S.N. Khonina, A.P. Porfirev, N.L. Kazanskiy // Sensors. – 2022. – Vol. 22(19). – P. 7365.