

Моделирование распространения абберационных вихревых лазерных пучков

В.В. Атапина
Самарский национальный
исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
valeria.atapina@mail.ru

Аннотация — Исследуется распространение абберационных лазерных пучков при наличии вихревой фазовой составляющей. Абберационным назван пучок, волновой фронт которого (или фаза) описывается некоторой функцией абберации. Рассмотрены абберации типа кома, астигматизм и расфокусировка. Моделирование распространения рассматриваемых пучков выполнено с использованием преобразования Френеля, реализованного через быстрое преобразование Фурье.

Ключевые слова – вихревые оптические пучки, абберации, преобразования Френеля.

I. ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] были рассмотрены абберационные лазерные пучки, обладающие свойствами автофокусировки. Для генерации таких пучков используются дифракционные оптические элементы с фазовой функцией, имеющей степенную радиальную зависимость и периодическую угловую зависимость в виде синуса или косинуса. Такое распределение фазы близко к полиномам Цернике [2], описывающим абберации волнового фронта, но является более общим. В работе [1] основное внимание уделялось свойствам автофокусировки. Однако абберации волнового фронта могут использоваться для анализа вихревых оптических пучков [3-5]. В данной работе исследуется распространение абберационных лазерных пучков при наличии вихревой фазовой составляющей.

II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В данной работе рассматриваются абберационные вихревые пучки следующего вида:

$$g(x, y) = A(x, y) \exp(iaZnm(x, y)), \quad (1)$$

где $Znm(x, y)$ – полиномы Цернике [2], а – действительный коэффициент, $A(x, y)$ – вихревой пучок.

Рассмотрены абберации типа кома, астигматизм и расфокусировка в декартовых координатах:

$$\text{– астигматизм:} \quad c_{22} \cdot (x^2 - y^2) \quad (2)$$

$$\text{– кома 3-го порядка:} \quad c_{31} \cdot (3x^3 + 3y^3 - 2x) \quad (3)$$

$$\text{– расфокусировка:} \quad c_{20} \cdot (2x^2 + 2y^2 - 1) \quad (4)$$

В качестве вихревого пучка использовались моды Лагерра-Гаусса (ЛГ) [6] с нулевым радиальным индексом:

$$A(x, y) = \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) (x + i \operatorname{sign}(m)y)^{|m|} \quad (5)$$

Для моделирования распространения рассматриваемых пучков вида (1) использовалось преобразование Френеля, реализованное через быстрое преобразование Фурье. Причем в качестве вихревых пучков рассматривались как отдельные моды ЛГ (5), так и суперпозиции.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим исследование на абберации типа кома 3-го порядка.

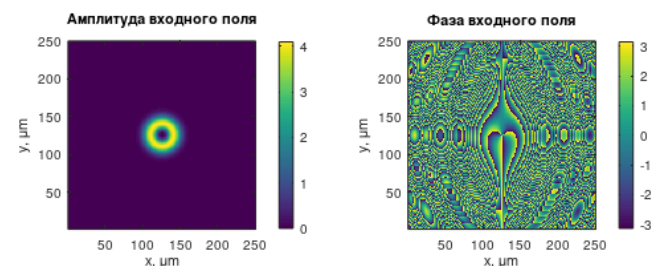


Рис. 1. Амплитуда и фаза входного поля с комой 3-го порядка, при $m_p = 3$

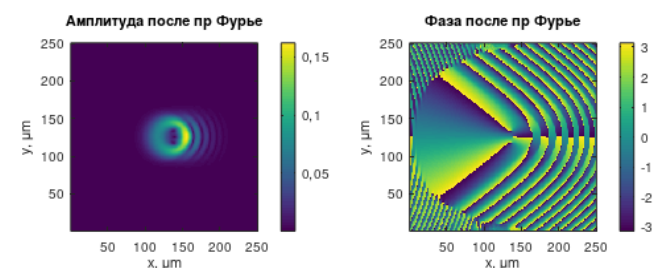


Рис. 2. Амплитуда и фаза поля с комой 3-го порядка после преобразования Фурье, при $m_p = 3$

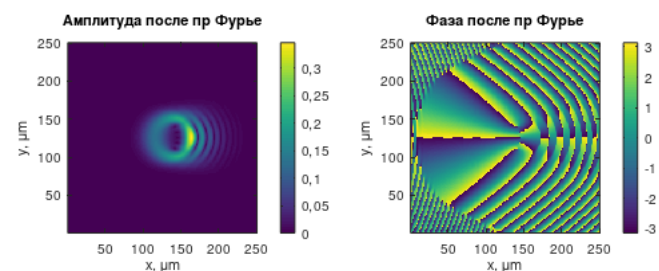


Рис. 3. Амплитуда и фаза поля с комой 3-го порядка после преобразования Фурье, при $m_p = 5$

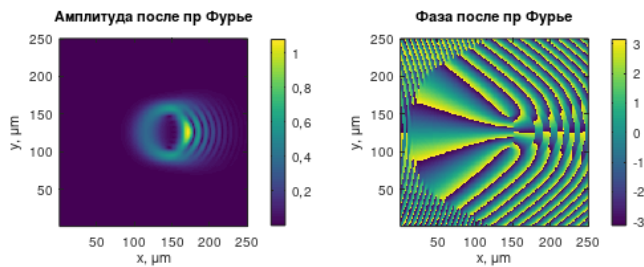


Рис. 4. Амплитуда и фаза поля с комой 3-го порядка после преобразования Фурье, при $m_p = 7$

В этом случае на изображении амплитуды после преобразования Фурье мы наблюдаем 7 темных пятен, соответственно гауссов пучок имеет 7 порядок.

При увеличении коэффициента a при полиноме Цернике (выражение (1)) амплитуда после преобразования Фурье становится больше похожей на кольцо с размытым левым краем, при уменьшении этого параметра темные пятна становятся видны отчетливее.

Теперь же рассмотрим исследования с использованием преобразования Френеля и влияния увеличения/уменьшения расстояния на распространение входного поля.

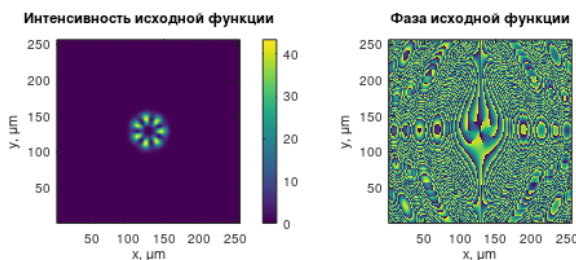


Рис. 5. Фаза и интенсивность исходной суперпозиции двух вихревых функций с комой 3-го порядка, при $z = 50$ мм, $m_1 = 2$, $m_2 = -5$

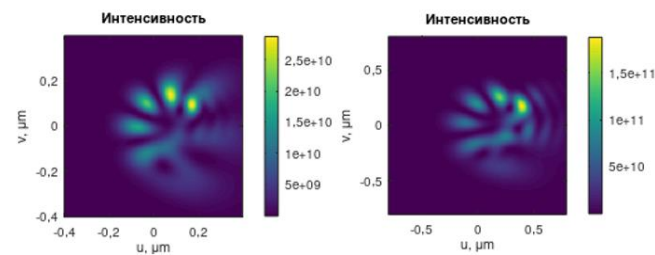


Рис. 6. Интенсивность суперпозиции двух вихревых функций после преобразования Френеля с комой 3-го порядка, при $z = 50$ мм и $z = 100$ мм, $m_1 = 2$, $m_2 = -5$

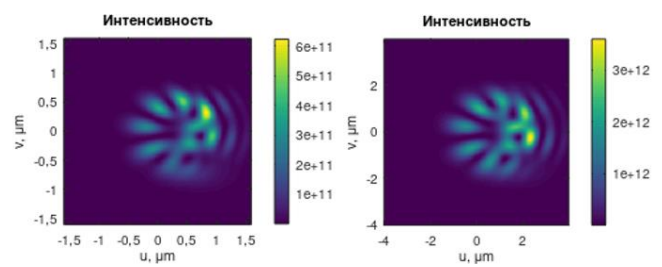


Рис. 7. Интенсивность суперпозиции двух вихревых функций после преобразования Френеля с комой 3-го порядка, при $z = 200$ мм и $z = 500$ мм, $m_1 = 2$, $m_2 = -5$

В этом случае, при уменьшении расстояния фаза становится похожей на закручивающуюся спираль.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проделанной работы были изучены различные aberrации, а также их влияние на искажение картины вихревого пучка. Показано, что не только величина (коэффициент) aberrации позволяет варьировать преобразование вихревого пучка, но также изменения расстояния распространения. Аналогичный результат был отмечен в работе [8]. Было выяснено, что при увеличении расстояния влияние aberrаций на пучки уменьшалось. Полученные результаты могут быть полезны для анализа вихревых пучков.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Khonina, S. N. Aberration laser beams with autofocusing properties / S. N. Khonina, A. V. Ustinov, A. P. Porfirev // *Applied Optics*. – 2028. – Vol. 57(6). – P. 1410–1416.
- [2] Lakshminarayanan, V. Zernike Polynomials: A Guide. J. Mod. / V. Lakshminarayanan, A. Fleck // *Opt.* – 2011. – P. 58–545.
- [3] 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. – P. 96–123.
- [4] Воляр, А.В. Гигантские всплески и провалы орбитального углового момента в устойчивых к простому астигматизму в структурированных Лагерр-Гауссовых пучках / А. В. Воляр, Е. Г. Абрамочкин, Я. Е. Акимов, М. В. Брецко // *Компьютерная оптика*. – 2023. – Т. 47, № 3. – С. 350–360.
- [5] 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*. – 2023 – Vol. 32(1). – P. S167–S179. <https://doi.org/10.3103/S1060992X23050168> (15.10.2023)
- [6] Abramowitz, M. Handbook on Mathematical Functions with Formulas, Graphs and Mathematical Tables, / M. Abramowitz, I.A. Stegun // Gaithersburg, Maryland: National Bureau of Standards, 1964.
- [7] Kelly, D. P. Numerical calculation of the Fresnel transform / D. P. Kelly // *J. Opt. Soc. Am.* – 2014. – Vol. 31. – P. 755–764.
- [8] 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 / S.N. Khonina, A.P. Porfirev, N.L. Kazanskiy // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22. – P. 7365.