

Моделирование вращающихся пучков Гаусса-Лагерра в изображающей системе с препятствием

Д.А. Горелых

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
Shalan7890@mail.ru

Аннотация — Рассмотрена изображающая система с линзой, содержащая препятствие в передней фокальной области линзы. Через систему распространяется вращающийся пучок Гаусса-Лагерра, структура которого преобразуется после столкновения с препятствием. Моделирование осуществлялось с использованием последовательного применения преобразований Френеля, Фурье и Френеля. Результаты моделирования показали, насколько сильно пучок искажается на выходе изображающей системе в зависимости от размера препятствия и его удалённости от оси распространения.

Ключевые слова — моды Гаусса-Лагерра, преобразование Френеля, преобразование Фурье, изображающая система

1. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что световые пучки имеют обширную область применения, например, пучками Гаусса-Лагерра (ГЛ) можно захватывать, вращать микрочастицы, манипулировать микрочастицами [1, 2], осуществлять лазерную обработку [3] и повышать плотность передачи оптической информации [4, 5]. Моды ГЛ интересны тем, что имеют осевую симметрию вдоль оси распространения, а их суперпозиции со специально выбранными номерами мод позволяют формировать стабильные и вращающиеся при распространении распределения [6, 7]. Отметим, что сохранение структуры пучков обеспечивается, даже если на пути пучка встречается некоторое препятствие [8]. Таким образом, пучки ГЛ демонстрируют свойство самовосстановления, аналогично модам Бесселя [9].

В работе [10] было выяснено, что суперпозиция мод ГЛ может использоваться в оптической системе при детектировании флуоресцентной частицы. Два лепестка вращаются вокруг оси распространения в виде двойной спирали, когда местоположение точки объекта изменяется в боковом направлении, распределение интенсивности смещается, а когда местоположение изменяется в осевом направлении, тогда распределение интенсивности вращается либо по часовой стрелке, либо против часовой стрелки в зависимости от направления осевого сдвига. При преобразовании каждого точечного изображения в двойную спираль глубина поля увеличивается, и местоположение частицы можно определить по углу поворота двух точек [11]. Также вращающиеся пучки используются для восстановления изображений 3D объектов [12].

В данной работе рассматривается изображающая система с линзой. Входной пучок проходит расстояние z_1 до входной фокальной плоскости линзы, затем через линзу, и после выходной фокальной плоскости продолжает распространяться на расстояние z_2 в свободном пространстве. Моделирование через такую систему описывается с помощью последовательного применения преобразований Френеля, Фурье и снова

М.С. Кириленко

Самарский национальный исследовательский университет
им. академика С.П. Королева
Самара, Россия
areatangent@gmail.com

Френеля. Также во входную фокальную плоскость помещается небольшое препятствие, влияние которого и изучается в данной работе.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

При моделировании распространения пучков в свободном пространстве использовались следующие значения параметров: число отсчетов 1024×1024 , радиус входного поля $0,5$ мм, радиус перетяжки $\sigma_0 = 0,1$ мм, длина волны $\lambda = 0,63$ мкм, $z_1 = 50$ мм, $z_2 = 85$ мм. На рис. 1 приведены результаты моделирования для суперпозиции мод ГЛ с порядками $(5, -1)$ и $(1, 1)$ без препятствия. Поворот светового поля связан с набором определенных мод, в частности, для выбранных коэффициентов световое поле повернулось приблизительно на 90 градусов на расстоянии z_2 . Видно, что присутствует устойчивое сохранение фазы и сохранение поперечной интенсивности при распространении вдоль оси.

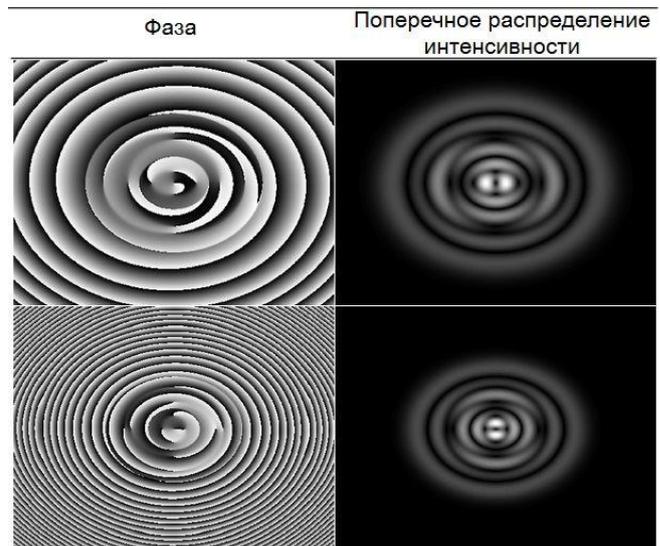


Рис. 1. Распространение пучка вдоль оси распространения. Первая строка рисунка изображает пучок до преобразования, вторая строка изображает пучок после последовательного преобразования Френеля-Фурье-Френеля

На рис. 2 показано поперечное распределение интенсивности суперпозиции мод ГЛ с индексами $(5, -1)$ и $(1, 1)$ при добавлении препятствия в фокальную плоскость линзы. Препятствие центрировано, то есть расположено на оси распространения. Для анализа искажений интенсивности мы воспользовались формулой среднеквадратичного отклонения (СКО):

$$\sigma(I, I_a) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (I(i, j) - I_a(i, j))^2}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n I_a^2(i, j)}}, \quad (1)$$

где I – интенсивность пучка без препятствия, I_a – интенсивность пучка с препятствием.

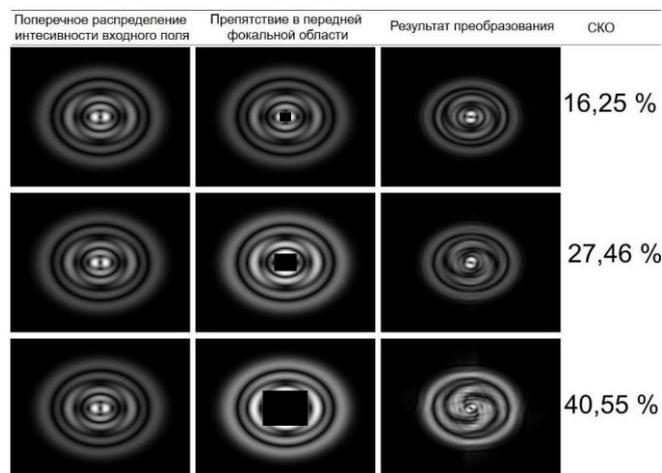


Рис. 2. Распределение поперечной интенсивности при прохождении пучка через препятствие в центре

Как можно заметить, с увеличением препятствия в центре, изображение искажается по всему сечению, теряется частично энергия вращающегося пучка, но тенденция восстановления структуры светового поля сохраняется. В четвертой строке рисунка видим огромное препятствие, но пучок после преобразования восстановился в центре — это связано с главным свойством мод Гаусса-Лагерра – свойство самовоспроизведения.

На рис. 3 можем заметить, что при смещении препятствия, изображение мощно искажается лишь в одной области, но также тенденция самовоспроизведения пучка сохраняется.

Заметим очевидную зависимость, что при увеличении размера препятствия изображение искажается сильнее. Если сравнить значимость расположения препятствий, то изображение искажается слабее, если препятствие смещено относительно центра и искажается сильнее, если расположено в самом центре.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты моделирования показали, что при незначительных размерах препятствия (менее $0,0025 \text{ мм}^2$) пучок на выходе изображающей системы самовоспроизводится с незначительными отклонениями (не более 5,33%). Если препятствие слишком велико, то структура пучка разрушается. При этом препятствие в центре изображения оказывает большее влияние на размеры искажения в результирующем изображении. К примеру, препятствие размером $0,2 \text{ мм} \times 0,2 \text{ мм}$ приводит к СКО = 45%, если оно расположено в центре, и к СКО = 30%, если оно смещено от центра.

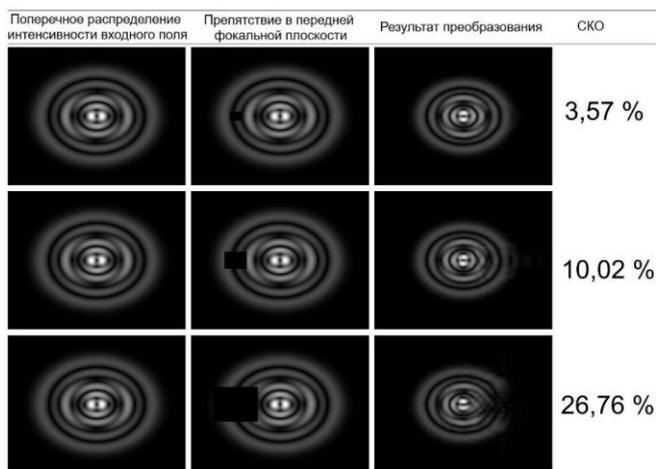


Рис. 3. Распределение поперечной интенсивности при прохождении пучка через смещенное препятствие

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Simpson, N. B. Optical Tweezers and Optical Spanners with Laguerre–Gaussian Modes / N. B. Simpson, L. Allen, M. J. Padgett // *Journal of Modern Optics*. – 1996. – Vol. 43. – P. 2485–2491.
- [2] Wright, E. M. Toroidal Optical Dipole Traps for Atomic Bose–Einstein Condensates Using Laguerre–Gaussian Beams / E. M. Wright, J. Arlt, K. Dholakia // *Physical Review Journals*. – 2000. Vol. – 63. – P. 013 – 608.
- [3] Busleev, N.I. Symmetric nanostructuring and plasmonic excitation of gold nanostructures by femtosecond Laguerre – Gaussian laser beams / N.I. Busleev, S.I. Kudryashov, P.A. Danilov, A.P. Porfir'ev, I.N. Saraeva, A.A. Rudenko, S.F. Umanskaya, D.A. Zayarnyi, A.A. Ionin, S.N. Khonina // *Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 49 – P. 666 – 671.
- [4] Zhou, Y. Propagation properties of Laguerre-Gaussian correlated Schell-model beam in non-Kolmogorov turbulence / Y. Zhou, Y. Yuan, J. Qu, W. Huang // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24. – P. 10682-10693.
- [5] Кириленко, М.С. Исследование устойчивости топологического заряда многокольцевых вихревых пучков Лагерра–Гаусса к случайным искажениям / М.С. Кириленко, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2019. – Т. 43, №4. – С. 567-576. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-4-567-576.
- [6] Котляр, В.В. Вращение световых много-модовых пучков Гаусса-Лагерра в свободном пространстве / В.В. Котляр, В.А. Соيفер, С.Н. Хонина // *Письма в ЖТФ*. – 1997. – Т. 23, №17. – С. 1-6.
- [7] Хонина, С.Н. Формирование и передача на расстояние изображений с помощью мод Гаусса-Лагерра / С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 1998. – Т. 18. – С. 71-82.
- [8] Алмазов, А.А. Восстановление после препятствий лазерных пучков, содержащих угловые гармоники / А.А. Алмазов, С.Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2005. – Т. 27 – С. 72-83.
- [9] Aiello, A. Wave-optics description of self-healing mechanism in Bessel beams / A. Aiello, G.S. Agarwal // *Opt. Lett.* – 2014. – Vol. 39. – P. 6819–6822.
- [10] Wang, Z. Single shot, three-dimensional fluorescence microscopy with a spatially rotating point spread function. / Z. Wang, Y. Cai, Y. Liang, X. Zhou, S. Yan, D. Dan, PR. Bianco, M. Lei, B. Yao // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 8 – P. 5493-506.
- [11] Yang, J. Optimization of Spot Efficiency of Double-Helix Point Spread Function and Its Application in Intracellular Imaging / J. Yang, H. Du, Z. Chai, L. Zhang, B. Q. Li, J. Cui, X. Mei // *Journal Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12. DOI: 10.3390/app12041778.
- [12] Anand, V. Three-dimensional incoherent imaging using spiral rotating point spread functions created by double-helix beams / S. Khonina, R. Kumar, N. Dubey, A.N.K. Reddy, J. Rosen, S. Juodkazis // *Nanoscale Research Letters*. – 2022. – Vol. 17. – P. 37.