

Анализ содержания мод Гаусса-Эрмита в двумерном пучке Эйри

А.А. Старикова

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

М.С. Кириленко

Самарский национальный исследовательский университет им.
академика С.П. Королева
Институт систем обработки изображений – филиал ФНИИ
«Кристаллография и фотоника» РАН
Самара, Россия
areatangent@gmail.com

Аннотация—Исследовано формирование двумерного пучка Эйри, ограниченного на входе, а также изучено содержание мод Гаусса-Эрмита в нем. Рассчитан анализатор, выполняющий разложение пучка по заданным модам.

Ключевые слова— пучок Эйри, моды Гаусса-Эрмита, преобразование Фурье, линзовая система.

1. ВВЕДЕНИЕ

Моды Гаусса-Эрмита обладают очень важным, с научной точки зрения, свойством: распространяясь, они полностью сохраняют свою структуру с точностью до всех характеристик [1, 2]. Этот факт позволяет ученым при работе с микрообъектами управлять потоком частиц (атомы, бактерии, молекулы), изменять их траекторию движения. Благодаря этому, в медицине стало возможно разделение вирусов и изоляция генов в хромосомах [3].

Пучки Эйри применяются в физике, в частности оптике. В начале 70-х годов прошлого века они уже были предметом рассмотрения для некоторых исследований [4]. В настоящее время они представляют большой интерес как волновые объекты, распространяющиеся по изогнутой траектории. Известно, что такой интерес возник благодаря успешной физической генерации «ускоряющихся» лазерных пучков [5].

В настоящее время важным объектом исследований являются многоканальные оптические системы [6-14], способные мультиплексировать и демultipлексировать наборы оптических пучков, таких как оптические вихри [7-9], моды Гаусса-Эрмита [10], моды Гаусса-Лагерра [11] и другие пучки, сохраняющие ортогональность при распространении [2]. Для формирования набора оптических пучков и их детектирования могут использоваться многопорядковые дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [7, 12-14]. Такие ДОЭ могут быть также использованы и для анализа волновых aberrаций [13, 14].

В данной работе производится расчёт многоканального ДОЭ, называемого анализатором, выполняющего разложение пучка Эйри по модам Гаусса-Эрмита и позволяющего получить значения модулей коэффициентов этого разложения.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

В качестве оптической системы рассматривается двумерная линзовая система и описывающее её преобразование Фурье. Пучок Эйри можно сформировать, если во входную область поместить оптический элемент со следующей функцией пропускания:

$$f(x) = \exp[i(\alpha x)^3], \quad (1)$$

где α – масштабный коэффициент. Стоит отметить, что входная область рассматривается ограниченной диапазоном $[-a, a]$, поэтому сформированный пучок можно считать пучком Эйри лишь приближённо. Сформированный пучок Эйри падает на фильтр, играющий роль анализатора по модам Гаусса-Эрмита. На фильтре записана суперпозиция из $N = 8$ заданных мод, при этом каждая мода имеет ведущую пространственную частоту (по обеим осям). Далее полученное распределение проходит через ещё одну линзовую систему, разделяя пучок на N пространственно-независимых распределений – координаты смещения полностью определяются значением ведущих пространственных частот, записанных на фильтре. В центре каждого полученного изображения с помощью камеры можно считать модуль коэффициента разложения как квадратный корень из интенсивности.

Параметры оптической системы задавались безразмерными, при этом $\lambda f_0 = 1$, где λ – длина волны, f_0 – фокусное расстояние. Параметр $\alpha = 0,2$ обеспечивает хорошую ширину пучка Эйри, чтобы он не был слишком «узким». Входная область $[-a, a] = [-5, 5]$. Рассматриваемая область на выходе $[-b, b]$, где $b = 20$. На рис. 1 изображены графики амплитуды входного пучка Эйри и выходной функций. Выходная функция по своему виду напоминает моды Гаусса-Эрмита, расположенные в разных областях. Однако, это не они, поскольку свой вклад в картину вносит и пучок Эйри.

В таблице I приведены сравнения коэффициентов разложения, рассчитанных обычным способом (через скалярное произведение) и с помощью анализатора. Как видно из таблицы, значения коэффициентов не сильно отличаются друг от друга. Отличия могут быть вызваны двумя причинами. Во-первых, это вычислительная ошибка, а, во-вторых, каждая мода может вносить незначительный вклад в области, расположенные по соседству. Это следует из того, что моды Гаусса-Эрмита не являются пространственно-ограниченными (хотя их можно считать таковыми с хорошим приближением).

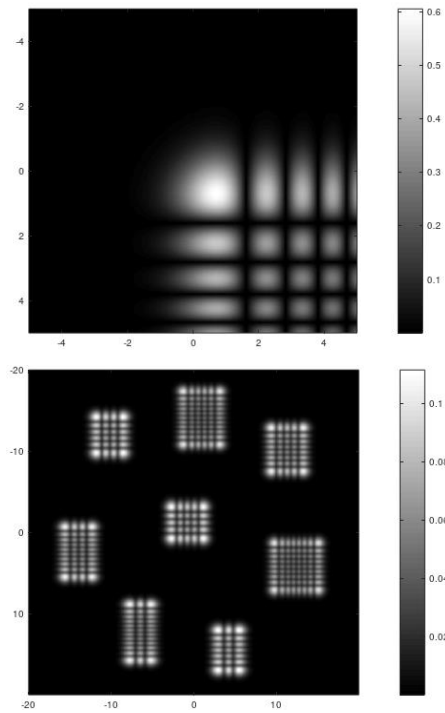


Рис. 1. Графики амплитуды входной функции (сверху) и выходной функции (снизу)

Таблица I. СРАВНЕНИЕ МОДУЛЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ РАЗЛОЖЕНИЯ, РАССЧИТАННЫХ КАК СКАЛЯРНОЕ ПРОИЗВЕДЕНИЕ (А) И ВЗЯТЫХ С ИЗОБРАЖЕНИЯ АНАЛИЗАТОРА (Б)

№ моды	(А)	(Б)
1	0,019484	0,019369
2	0,068729	0,068806
3	0,035510	0,035328
4	0,027750	0,027805
5	0,018039	0,018027
6	0,025310	0,025427
7	0,037106	0,037005
8	0,065974	0,066077

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование показало, что анализатор, основанный на модах Гаусса-Эрмита, показывает хорошие результаты для разложения пучка Эйри. В качестве мод, записанных на фильтр, можно использовать и другие ортогональные функции как из этого набора, так и из любого другого, например, моды Гаусса-Лагерра, полиномы Цернике или сфероидальные функции [2].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 21-79-20075 мк).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Хонина, С.Н. Исследование распространения мод Гаусса-Эрмита в непараксиальной области свободного пространства / С.Н. Хонина, М.А. Дроздов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2004. – Т. 6, № 1. – С. 45-52.
- [2] Andreev, V. Optimal orthogonal bases in optical applications / V. Andreev, A. Bourdine, V. Burdin // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2667. – P. 323-327.
- [3] Шевин, А.О. Исследование влияния искажений на свойства модовых лазерных полей / А.О. Шевин, С.Н. Хонина // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2008. – Т. 7, № 2. – С. 101-111.
- [4] Berry, M.V. Nonspreiding wave packets / M.V. Berry, N.L. Balazs // Am. J. Phys. – 1979. – Vol. 47(3). – P. 264-267.
- [5] Siviloglou, G.A. Accelerating finite energy Airy beams / G.A. Siviloglou, D.N. Christodoulides // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(8). – P. 979-981.
- [6] Uematsu, T. Design of a compact two-mode multi/demultiplexer consisting of multimode interference waveguides and a wavelength-insensitive phase shifter for mode-division multiplexing transmission / T. Uematsu, Y. Ishizaka, Y. Kawaguchi, K. Saitoh, M. Koshiba // Journal of Lightwave Technology. – 2012. – Vol. 30(15). – P. 2421-2426.
- [7] Khonina, S.N. Binary multi-order diffraction optical elements with variable fill factor for the formation and detection of optical vortices of arbitrary order / S.N. Khonina, A.V. Ustinov // Applied Optics. – 2019. – Vol. 58(30). – P. 8227-8236.
- [8] 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.
- [9] Wen, Y. Spiral transformation for high-resolution and efficient sorting of optical vortex modes / Y. Wen, I. Chremmos, Y. Chen, J. Zhu, Y. Zhang, S. Yu // Physical Review Letters. – 2018. – Vol. 120(19). – P. 193904.
- [10] Amphawan, A. Multidiameter optical ring and Hermite-Gaussian vortices for wavelength division multiplexing-mode division multiplexing / A. Amphawan, Y. Fazea // Optical Engineering. – 2016. – Vol. 55(10). – P. 106109.
- [11] Khonina, S.N. A technique for simultaneous detection of individual vortex states of Laguerre-Gaussian beams transmitted through an aqueous suspension of microparticles / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, V.D. Parani // Optics and Lasers in Engineering. – 2018. – Vol. 105. – P. 68-74.
- [12] Kazanskiy, N.L. Diffractive optical elements for multiplexing structured laser beams / N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50(7). – P. 629.
- [13] Khonina, S.N. Wavefront aberration sensor based on a multichannel diffractive optical element / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, A.P. Porfirev // Sensors. – 2020. – Vol. 20(14). – P. 3850.
- [14] Хорин, П.А. Оптическое детектирование величины отдельных aberrаций при помощи многоканального фильтра, согласованного с фазовыми функциями Цернике / П.А. Хорин, С.Г. Волотовский, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 4. – С. 525-533. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-906.