

Разложение сформированного пучка Эйри по модам Гаусса-Эрмита

А.А. Старикова¹, М.С. Кириленко^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация

Исследовано формирование пучка Эйри, ограниченного на входе, а также изучена возможность аппроксимации пучка модами Гаусса-Эрмита. Показано, как количество мод влияет на качество аппроксимации. Аппроксимация пучка в центре графика осуществляется заметно лучше, чем на границе.

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]. 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 [2].

Пучки Эйри применяются в физике, в частности оптике. В начале 70-х годов прошлого века они уже были предметом рассмотрения для некоторых исследований [3]. 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 [4]. К свойствам пучков Эйри относятся: бездифракционность, самофокусировка, бесконечная протяженность, а также они не обладают конечной энергией [5].

В данной работе рассматривается возможность приближения пучков Эйри модами Гаусса-Эрмита. Поскольку моды Гаусса-Эрмита сохраняют свой вид при распространении в свободном пространстве, аппроксимацию пучка Эйри можно будет сформировать на любом расстоянии от входной плоскости.

2. Моделирование

В качестве оптической системы рассматривается одномерная линзовая система и описывающее её преобразование Фурье, поскольку моды Гаусса-Эрмита инвариантны к нему. 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. Моды Гаусса-Эрмита будем рассматривать в выходной области:

$$GH_n(\xi/\sigma) = H_n(\xi/\sigma) \exp[-\xi^2/2\sigma^2], \quad (2)$$

где σ – масштабный коэффициент.

Разложение осуществлялось по разному числу мод N . Параметры оптической системы задавались безразмерными, при этом $\lambda f_0 = 1$, где λ – длина волны, f_0 – фокусное расстояние.

Параметры $\alpha = 3$ и $\sigma = 0,4$ обеспечивают хорошую аппроксимацию по модам (первый обеспечивает, чтобы пучок Эйри не был слишком «узким», а второй – чтобы можно было взять как можно больше мод на ограниченном участке). Область $[-a, a]$, где $a = 5$. Рассматриваемая область на выходе идентичная. Рисунок 1 показывает сравнение аппроксимации по различному числу мод.

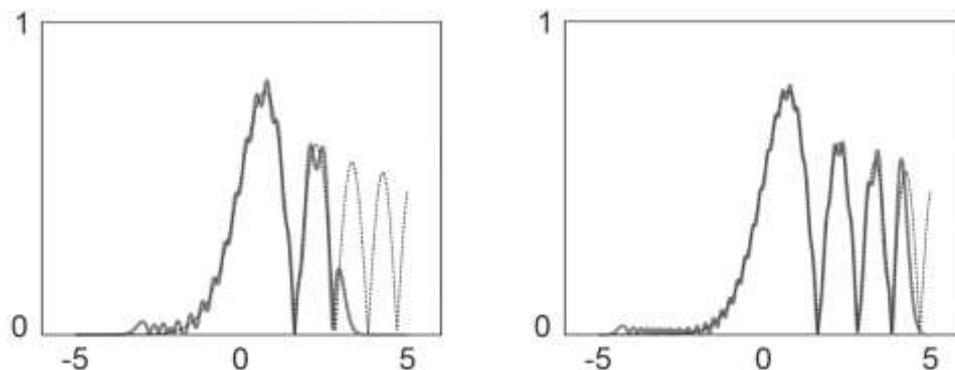


Рисунок 1: Сравнение амплитуд аппроксимации пучка Эйри по $N = 30$ (слева) и $N = 60$ (справа) модам

3. Заключение

Моделирование показало, что пучок Эйри можно аппроксимировать модами Гаусса-Эрмита с хорошей точностью. Однако, как видно из рисунка 1, даже при большом числе мод на ограниченном участке сложно аппроксимировать функцию на границе справа. Это связано с тем, что моды Гаусса-Эрмита на этом участке очень близки к нулю. Если же взять больше мод, они начнут терять ортогональность из-за ограниченности участка рассмотрения. Для решения этой проблемы можно использовать другие функции, которые были бы ортогональны на заданном участке и обладали модовыми свойствами, например, сфероидальные функции [6].

4. Благодарности

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-20045 мк).

5. 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] 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.
- [3] Berry, M.V. Nonspreiding wave packets / M.V. Berry, N.L. Balazs // Am. J. Phys. – 1979. – Vol. 47(3). – P. 264-267.
- [4] Siviloglou, G.A. Accelerating finite energy Airy beams / G.A. Siviloglou, D.N. Christodoulides // Opt. Letters. – 2007. – Vol. 32(8). – P. 979-981.
- [5] Устинов А.В. Аналитические свойства расширенных пучков Эйри / А.В. Устинов // Материалы Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2018). – Самара: Самарский Научный Центр РАН, 2018. – С. 8-18.
- [6] Andreev, V. Optimal orthogonal bases in optical applications / V. Andreev, A. Bourdine, V. Burdin // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2667. – P. 323-327.