

Цифровой метод измерения амплитуд и фаз пучков Эрмита-Гаусса в составе возмущенных пучков Лагерра-Гаусса

М.В. Брецько¹, Я.Е. Акимова¹, А.В. Воляр¹, Ю.А. Егоров¹

¹КФУ им. В.И. Вернадского, Физико-технический институт, проспект Академика Вернадского, 4, Симферополь, Россия, 295007

Аннотация

Экспериментально продемонстрирован метод измерения спектров амплитуд и начальных фаз пучков Лагерра-Гаусса с различными радиальными и азимутальными индексами в базисе мод Эрмита – Гаусса. Показано, что измеренные спектры мод Эрмита-Гаусса позволяют осуществить цифровую сортировку мод Эрмита-Гаусса с последующим восстановлением исходного сингулярного пучка.

Ключевые слова

Пучки Лагерра-Гаусса, пучки Эрмита-Гаусса, моменты интенсивности, спектр вихрей

1. Введение

Основные исследования в области сингулярной оптики отводятся экспериментальному анализу вихревой структуры лазерных пучков и их устойчивости к внешним возмущениям. Наиболее простым и надёжным подходом являются голографические дифракционные решетки, предложенные Сойфером и Голубом [1] ещё в середине 80-х. С другой стороны, в недавних исследованиях [2] был предложен альтернативный метод измерения спектров мод Лагерра-Гаусса (ЛГ) на основе анализа моментов интенсивности. Однако спектр ЛГ-мод не может охватить слабые локальные возмущения в окрестности сердцевины оптических вихрей, которые могут вызвать обвалы орбитального момента [3]. Расширить возможности анализа сложных вихревых пучков позволяют измерения вихревых спектров в терминах мод Эрмита-Гаусса (ЭГ). Таким образом, целью данной работы является анализ процесса измерения амплитуд и начальных фаз ЭГ-мод, в составе возмущенных пучков ЛГ с помощью моментов интенсивности.

2. Теоретическая модель пучка и метод измерения

Малые возмущения, например, голографической решётки, или неточная юстировка лазерного пучка на голографическом элементе могут вызвать существенные изменения структуры вихревых пучков высших порядков, хотя их топологический заряд не изменяется. Простой моделью таких возмущений может служить вариация амплитуд ЭГ мод в спектре ЛГ пучка. В [4] было показано, что амплитуду пучка ЛГ можно представить в виде суммы ЭГ-мод.

$$\text{LG}_{n,\pm l}(\mathbf{r}) = \frac{(-1)^n}{2^{2n+3l/2} n!} \times \sum_{k=0}^{2n+l} (\pm 2i)^k P_k^{(n+l-k, n-k)}(0) \text{HG}_{2n+l-k, k}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

где $P_k^{(n+l-k, n-k)}(0)$ - многочлен Якоби с нулевым аргументом. Будем рассматривать только такие возмущения ЛГ пучка, которые оставляют постоянными состав ЭГ мод в суперпозициях.

Модель возмущения мы можем записать как

$$\begin{aligned}
 \text{LG}_{\text{возм.}}(\mathbf{r}) = & \frac{(-1)^n}{2^{2n+3/2} n!} \times \\
 & \times \sum_{k=0}^{2n+l} \left(1 - \varepsilon(-1)^k \sin \frac{k\pi}{2} \right) \cdot (\pm 2i)^k P_k^{(n+l-k, n-k)}(0) \text{HG}_{2n+l-k, k}(\mathbf{r})
 \end{aligned}
 \quad (2)$$

где ε - масштабный параметр возмущения. Удобно выделить три области возмущения: 1) $\varepsilon \ll 1$, когда возмущение расщепляет осевой вихрь высшего порядка на единичные вихри, 2) $\varepsilon = 1$, когда рождаются топологические диполи, 3) $\varepsilon \gg 1$, когда в (2) в возмущении $(1 - \varepsilon(-1)^k \sin k\pi/2)$ основной вклад вносит второе слагаемое. Характерное распределение интенсивности возмущенного пучка показано на рисунке 1а. Для формирования такого пучка мы использовали голографическую решетку, представленную на рисунке 1б. После анализа распределения интенсивности пучка были получены спектры квадратов амплитуд ЭГ пучков (рисунок 1в) и спектр начальных фаз ЭГ (рисунок 1г).

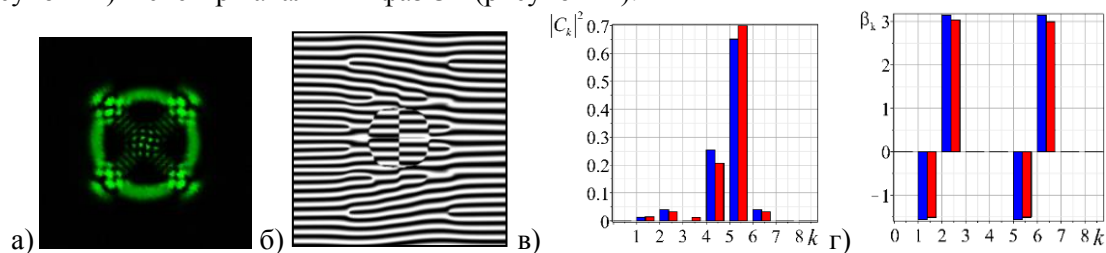


Рисунок 1: (а) - распределение интенсивности возмущенного LG пучка с топологическими зарядами : $l = 8$ и $\varepsilon = 1$; (б) – голографическая решетка для формирования пучка; (в) – спектр квадратов амплитуд и (г) – спектр фаз ЭГ-пучков, входящих в состав возмущённой ЛГ моды (синим цветом – теория, красным – эксперимент)

3. Заключение

Показана возможность измерения амплитуд и фаз возмущенных пучков Лагерра-Гаусса в базисе мод Эрмита-Гаусса. Измерение спектра амплитуд и начальных фаз дает полную информацию о волновом состоянии пучка и, фактически, позволяет осуществлять цифровую сортировку ЭГ мод с последующим восстановлением пучка в реальном режиме.

4. Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 20-37-90068, № 20-47-910002 - теоретические результаты, грант № 19-29-01233 - результаты моделирования, грант № 20-37-90066 - эксперимент).

5. Литература

- [1] Soifer, V.A. Laser beam mode selection by computer-generated holograms / V.A. Soifer, M.A. Golub. – Boca Ra-ton: CRC Press, 1994. – 215 p.
- [2] Volyar, A.V. Measurement of the vortex spectrum in a vor-tex-beam array without cuts and gluing of the wavefront / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43(22). – P. 5635-5638.
- [3] Volyar, A.V. Measurement of the vortex and orbital angular momentum spectra with a single cylindrical lens / A. Volyar, M. Bretsko, Ya. Akimova, Yu. Egorov // Appl. Opt. – 2019. – Vol. 58(21). – P. 5748-5755.
- [4] Abramochkin, E. General astigmatic transform of Hermite-Laguerre-Gaussian beams / E. Abramochkin, E. Razueva, V. Volostnikov // Journal of the Optical Society of America A. – 2010. – Vol. 27(11). – P. 2506-2513.