

Чисто вырожденные массивы оптических вихрей и измерение амплитуд и фаз парциальных мод

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

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

Аннотация. В работе рассмотрены процесс формирования и детектирования основных характеристик (квадрата амплитуды и начальной фазы) чисто вырожденных массивов оптических вихрей при помощи моментов интенсивности. Под чисто вырожденными массивами подразумевается комплексный пучок, в котором модуль квадрата амплитуды противоположных по знаку заряда вихрей равны, а фазы принимают лишь два значения 0 и π . Меняя частотный параметр сотом знаке после запятой, можно значительно изменять внутреннюю структуру комплексного пучка, что хорошо отображает полученные результаты.

1. Введение

Проблема разделения комбинированных параксиальных пучков, включающих в себя оптические вихри различных порядков, привлекает в последнее время повышенное внимание исследователей и инженеров из различных областей физики и техники в связи с открывшимися перспективами их применения в линиях уплотненной передачи оптической информации [1-3], в узлах квантовых компьютеров [4,5], в оптической криптографии [6] и т.д. Ключевым элементом большинства оптических узлов в указанных системах являются устройства формирования комбинированных пучков и их разделения на элементарные параксиальные пучки, переносящие оптические вихри высших порядков. Эта проблема, впервые поднятая В.А. Сойфером и М.А. Голубом еще в середине 80 годов 20 века (см., например, [7] и список литературы), получила продолжение в знаковых статьях Е. Абрамочкина и В. Волостникова [8,9], поставивших задачу восстановления изображений посредством голографического формирования скелета оптических вихрей в комбинированных сингулярных пучках, а также в работах В. Котляра, С. Хониной и соавторов [10-13] разработавших комплекс высококачественных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и голографических фильтров для генерации комбинированных сингулярных пучков и их разложения в пространственный спектр стандартных вихревых пучков различных порядков подобно тому, как призма раскладывает белый свет.

В то же время широкое техническое применение комбинированных пучков, переносящих оптические вихри, должно опираться на надёжные методы измерения и анализа структуры парциальных пучков.

2. Теоретическая модель пучка и метод измерения

Так авторами работы [14] предложен новый метод измерения квадрата амплитуд парциальных пучков в массиве вихрей. Этот метод основан на регистрации моментов интенсивности высших порядков светового пучка в целом без разрушения его внутренней структуры. Важно отметить, что общее выражение для моментов интенсивности позволяет упростить анализ распространения парааксиальных пучков в оптической системе (см., например [15] и списки литературы). Например, моменты $J_{0,1}$ и $J_{1,0}$ характеризует положение «центра тяжести» пучка в поперечном сечении, моменты $J_{2,0}$ и $J_{0,2}$ задают радиусы перетяжки пучка вдоль осей x и y , соответственно, а комбинация моментов $J_{3,0}/\sqrt{J_{2,0}^3}$ и $J_{0,3}/\sqrt{J_{0,2}^3}$ задает скручивание пучка вдоль осей x и y , соответственно. Составляя систему линейных уравнений, основанных на комбинации моментов интенсивности, можно померять основные характеристики массива комбинированных сингулярных пучков, где в левой части уравнений стоят моменты интенсивности $J_{p,q}$, которые измеряются на эксперименте, а в правой части – искомые величины $|C_m|^2$. Но данный подход имеет ограничение, связанное с тем, что моменты интенсивности вырождены относительно знака топологического заряда оптических вихрей. Отсюда следует, что данный метод нельзя использовать для вырожденных массивов вихрей. Однако имеется исключение, которое мы назвали чисто вырожденным состоянием, когда $|C_m|^2 = |C_{-m}|^2$ и начальная фаза принимает два значения $\beta_m = 0, \pi$. В этом случае данный метод применим. За основу комбинированного пучка с массивом оптических вихрей выбрана модель лазерного пучка Лагерра-Гаусса ($LG_{n=0}^m$) в плоскости перетяжки $z=0$. Комплексная амплитуда данного пучка описывается выражением

$$\Psi(r, \varphi, z=0) = \sum_{m=-N}^N C_m LG_{n=0}^m = \sum_{m=-N}^N \frac{C_m r^{|m|} e^{i(m\varphi + \beta_m)} G(r)}{N_m}, \quad (1)$$

где $G = \exp(-r^2)$ – функция Гаусса, φ – азимутальный угол, $r = \sqrt{x^2 + y^2} / w_0$ – нормированная радиальная координата, $N_m = \sqrt{2^{-m-1} m! \pi}$ – нормировочный множитель, C_m и β_m – амплитуды и начальные фазы парциальных пучков

3. Эксперимент

Экспериментальные измерения квадрата амплитуд в чисто вырожденных массивах вихрей проводились на экспериментальной установке, подробно рассмотренной в работе [14].

Величины амплитуд задавались выражением $C_m = (-1)^m \sin^n(am)$, где a – частотный параметр, $n=1, 2, 3, \dots$. Знак $(-)$ указывает на скачок фазы на π . Результаты теоретического расчета и эксперимента массива с $N=21$ представлены на рисунках 1-9: рисунки 1-3 – иллюстрируют теоретическое распределение интенсивности $\mathfrak{I}(x, y)$ при изменении частотного параметра a в сотом знаке после запятой и $n=7$. Рисунки 4-6 иллюстрируют $\mathfrak{I}(x, y)$, восстановленные после модулятора SLM, а рисунки 7-9 задают экспериментальный и теоретический спектр вихрей парциальных пучков, отрицательным значениям квадратов модуля амплитуды C_m^2 соответствует скачок фазы на π . Заметим, что даже очень малые изменения параметра a регистрируются экспериментально в спектре вихрей.

Для оценки погрешности измерений мы использовали функцию корреляции между исходным распределением интенсивности $\mathfrak{I}_{th}(x, y)$ и экспериментальными значениями $\mathfrak{I}_{ex}(x, y)$ со спектром вихрем, полученным на эксперименте, согласно соотношению

$$\eta = \frac{\iint_S \mathfrak{I}_{th}(x, y) \mathfrak{I}_{exp}(x, y) dS}{J_{00}^{th} J_{00}^{exp}}. \tag{2}$$

Полученные результаты степени корреляции располагаются в интервале $\eta = 0.83 \div 0.91$, что указывает на хорошее согласование теории и эксперимента.

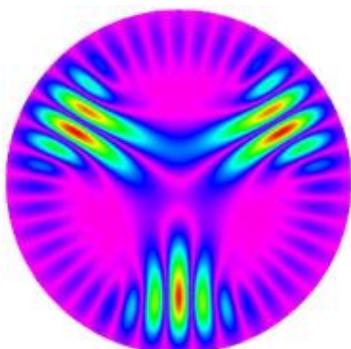


Рисунок 1. Теоретическое распределение интенсивности для $a = 6.3$.

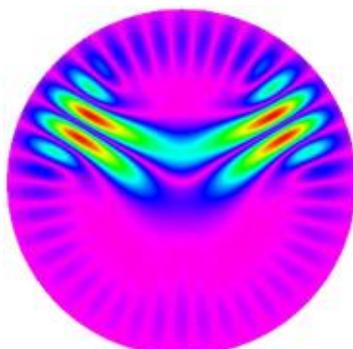


Рисунок 2. Теоретическое распределение интенсивности для $a = 6.33$.

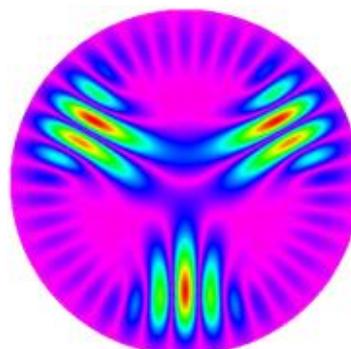


Рисунок 3. Теоретическое распределение интенсивности для $a = 6.37$.



Рисунок 4. Распределение интенсивности после модулятора для $a = 6.3$.



Рисунок 5. Распределение интенсивности после модулятора для $a = 6.33$.



Рисунок 6. Распределение интенсивности после модулятора для $a = 6.37$.

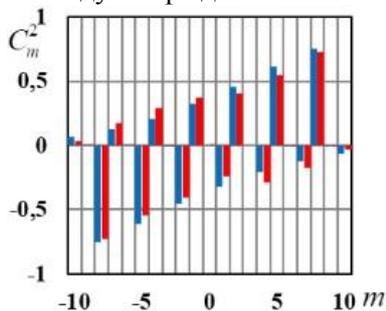


Рисунок 7. Совмещенный спектр квадратов амплитуд и фаз для $a = 6.3$.

Отрицательным значениям соответствует скачок фазы π .

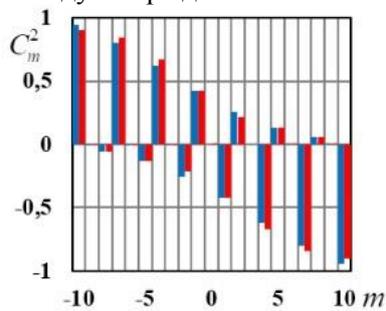


Рисунок 8. Совмещенный спектр квадратов амплитуд и фаз для $a = 6.33$.

Отрицательным значениям соответствует скачок фазы π .

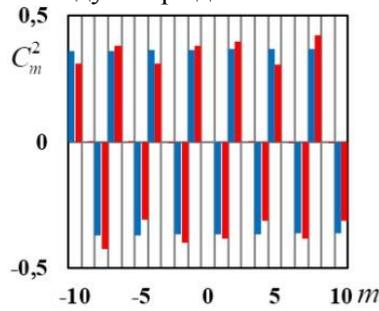


Рисунок 9. Совмещенный спектр квадратов амплитуд и фаз для $a = 6.37$.

Отрицательным значениям соответствует скачок фазы π .

4. Литература

- [1] Gbur, G.J. Singular optics / G.J. Gbur. – New York: CRC Press, 2017. – 564 p.
- [2] Kotlyar, V. Vortex Laser Beams / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, A.P. Porfirev. – Taylor & Francis Group LLC, 2019.
- [3] Allen, L. The Orbital Angular Momentum of Light: An Introduction. Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum / L. Allen, M. Padgett // ed. J. Torres, L. Torner. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011.
- [4] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I.M. Fazal, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y.X. Ren, Y. Yue, S. Dolinar, M. Tur, A. E. Willner // Nat. Photonics. – 2012. – Vol. 6. – P. 488-496.
- [5] Wright, E. Optical Vortex Cat States and their Utility for Creating Macroscopic Superpositions of Persistent Flows. Twisted Photons: Applications of Light with Orbital Angular Momentum / E.M. Wright // ed. J. Torres, L. Torner. – WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2011.
- [6] Mair, A. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons / A. Mair, A. Vaziri, G. Weihs, A. Zeilinger // Nature. – 2001. – Vol. 412(6844). – P. 313.
- [7] Soifer, V. Laser beam mode selection by computer-generated holograms / V. Soifer, M. Golub. – Boca Raton: CRC Press, 1994. – 224 p.
- [8] Abramochkin, E. Beam transformations and non-transformed beam / E. Abramochkin, V. Volostnikov // Optics Communications. – 1991. – Vol. 83(1, 2). – P. 123-135.
- [9] Абрамочкин, Е.Г. Спиральные пучки света / Е.Г. Абрамочкин, В.Г. Волостников // Успехи Физ. Наук. – 2004. – Т. 174. – С. 1273-1300.
- [10] Khonina, S. Generation and selection of laser beams represented by a superposition of two angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // J. Mod. Opt. – 2004. – Vol. 51. – P. 761-773.
- [11] Khonina, S. Optical vortices in a fiber: mode division multiplexing and multimode selfimaging. / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, V.A. Soifer // Chapter in Recent Progress in Optical Fiber Research. – INTECH publisher, Croatia, 2012.
- [12] Khonina, S. Measuring the light field orbital angular momentum using DOE / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, P. Paakkonen, J. Turunen // Optical Memory and Neural Networks. – 2001. – Vol. 10(4). – P. 241-255.
- [13] Kirilenko, M. Information Transmission Using Optical Vortices Optical Memory and Neural Networks / M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // Information Optics. – 2013. – Vol. 22(2). – P. 81-89.
- [14] Воляр, А.В. По ту сторону интенсивности или моменты интенсивности и измерение спектра оптических вихрей сложных пучков / А.В. Воляр, М.В. Брецько, Я.Е. Акимова, Ю.А. Егоров // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 736-743. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-42-5-736-743.
- [15] Bekshaev, A. Optical vortex symmetry breakdown and decomposition of the orbital angular momentum of light beams / A. Bekshaev, M. Soskin, M. Vasnetsov // J. Opt. Soc. Am. A. – 2003. – Vol. 20. – P. 1635-1643.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках поддержанного федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского» гранта № ВГ24/2018.

Purely degenerate arrays of optical vortices and measurement of amplitudes and phases of partial modes

Ya.E. Akimova¹, M.V. Bretsko¹, Yu.A. Egorov¹, A.V. Volyar¹

¹V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Physical Technical Institute, Vernadskogo 4, Simferopol, Russia, 295007

Abstract. The paper considers the process of formation and detection of the main characteristics (square of amplitude and initial phase) of purely degenerate arrays of optical vortices using intensity moments. By purely degenerate arrays we mean a complex beam, in which the magnitude of the square of the amplitude of the vortices opposite in sign of the charge is equal, and the phases take only two values 0 and π . Changing the frequency parameter by the hundredth decimal place, one can significantly change the internal structure of the complex beam, which well reflects the results obtained.