

Моделирование распространения вихревых пучков Эрмита-Гаусса в параболическом волокне

Е.О. Монин^а

^а Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Московское шоссе, 34, Самара, Россия

Аннотация

В данной работе проводится моделирование распространения вихревых лазерных пучков, согласованных с модами Эрмита-Гаусса, через волновод с параболической зависимостью показателя преломления на основе дробного преобразования Фурье. Были рассмотрены разные порядки мод и вихревых фазовых особенностей. Обнаружено различное поведение вихревых пучков Эрмита-Гаусса при прохождении через параболический волновод в зависимости от порядков мод, в частности, может происходить нивелирование вихревой фазовой особенности.

Ключевые слова: вихревые лазерные пучки; вихревые фазовые особенности; моды Эрмита-Гаусса; параболический волновод; дробное преобразование Фурье

1. Введение

Исследование поведения разных типов вихревых лазерных пучков в параболических средах расширяет спектр оптических сигналов используемых для телекоммуникации. Дробное преобразование Фурье [1] используется для описания волокон с параболическим показателем преломления [2-5]. Для неограниченного идеального градиентного волокна моды Эрмита-Гаусса [6] являются собственными [1]. Для ограниченного волокна могут быть найдены собственные функции, ограниченные как в объектной, так и спектральной областях [5]. Особенностью пучков Эрмита-Гаусса является инвариантность при распространении не только в градиентной среде, но и в свободном пространстве (с точностью до масштаба) [7, 8]. Универсальным методом генерации поперечных мод Эрмита-Гаусса, в том числе вихревых, является модуляция фазы исходного гауссова пучка. Для этого может использоваться пространственный модулятор света (spatial light modulator, SLM) [9] или дифракционные оптические элементы (ДОЭ) [10].

В данной работе рассмотрены вихревые моды Эрмита-Гаусса, комплексная амплитуда которых пропорциональна многочленам Эрмита с индексами (n, m) и имеет фазовую вихревую сингулярность порядка q .

2. Вихревые пучки Эрмита-Гаусса

Моды Эрмита-Гаусса (1) известны в оптике с 1966 года [6] и могут быть факторизованы:

$$H_{n,m}(x, y) = e^{-(x^2+y^2)} H_n(\sqrt{2}x) H_m(\sqrt{2}y) \quad (n, m = 0, 1, \dots) \quad (1)$$

В данной работе рассмотрены вихревые моды Эрмита-Гаусса, комплексная амплитуда которых пропорциональна многочленам Эрмита с индексами (n, m) и имеет фазовую вихревую сингулярность порядка q .

Вихревые лазерные пучки, обладающие орбитальным угловым моментом [11], в последнее десятилетие активно используются в системах оптической связи для уплотнения каналов передачи информации [12-14]. Такой способ уплотнения каналов нашел применение не только в волоконных системах связи, но и в свободном пространстве [15].

Для обеспечения орбитального углового момента в пучках Эрмита-Гаусса может использоваться эллиптическая зависимость от аргументов [16]. В данной работе мы используем другой подход, и применяется формула:

$$\Psi_{n,m,q}(x, y) = H_{n,m}(x, y) \cdot (x + iy)^q \quad (2)$$

3. Дробное преобразование Фурье

Для описания прохождения оптического сигнала через волокно с параболическим показателем (рис. 1) преломления используется дробное преобразование Фурье (3).

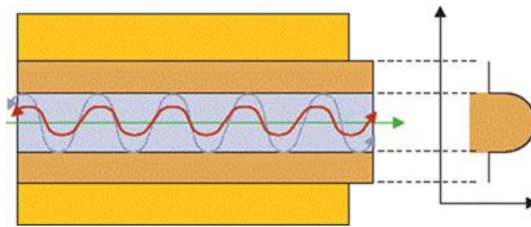


Рис.1. Параболическое волокно.

$$F(u, v, z) = -\frac{ik}{2\pi f \sin \tau} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp \left[\frac{ik}{2f \sin \tau} \left\{ \cos \tau (u^2 + v^2) - 2(xu + yv) + \cos \tau (x^2 + y^2) \right\} \right] dx dy \quad (3)$$

где $\tau = \frac{z}{f} \cdot \frac{\pi}{2}$;

f - фокусное расстояние, мм;

z - расстояние, мм.

Данная оптическая система эквивалентна данной линзоподобной системе (рис. 2).

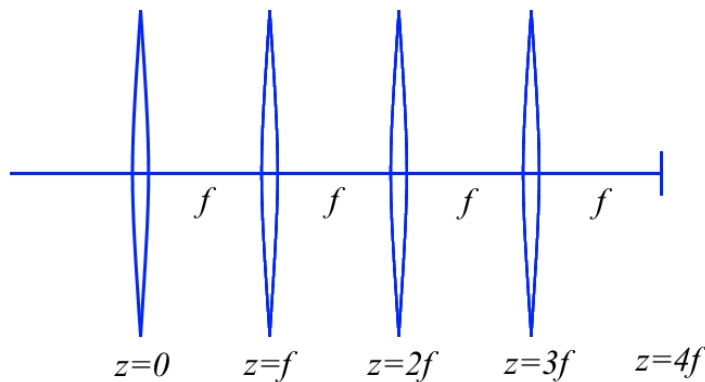


Рис.2. Линзоподобная система.

Оптический сигнал при прохождении системы, изображенной на рис. 2, на выходе должен принять тот же вид, что и на входе. На расстоянии фокуса – оптически сигнал примет вид спектральной функции от входного сигнала, на расстоянии двойного фокуса – перевернутый входной сигнал, на тройном фокусе – перевернутый спектр входного сигнала.

4. Результаты

Было реализовано в среде Matlab генерация вихревых пучков Эрмита-Гаусса, а также описание поведения данных пучков в параболическом волокне. В таблице 1 приведены рассматриваемые лазерные пучки.

Было совершено моделирование поведения заданных лазерных пучков, описываемые модой Эрмита-Гаусса с наличием орбитального углового момента, в среде с параболической зависимостью показателя преломления. В таблицах 2-5 приведены результаты моделирования.

Ранее в работах [17, 18] было показано, что вихревые пучки распространяются в параболическом волокне с сохранением вихревой фазовой особенности. Однако результаты, приведенные ниже, показывают различное поведение вихревых пучков Эрмита-Гаусса при прохождении через параболический волновод в зависимости от порядков мод, в частности, может происходить нивелирование вихревой фазовой особенности.

Таблица 1. Пучки Эрмита-Гаусса с разными входными параметрами n, m, k

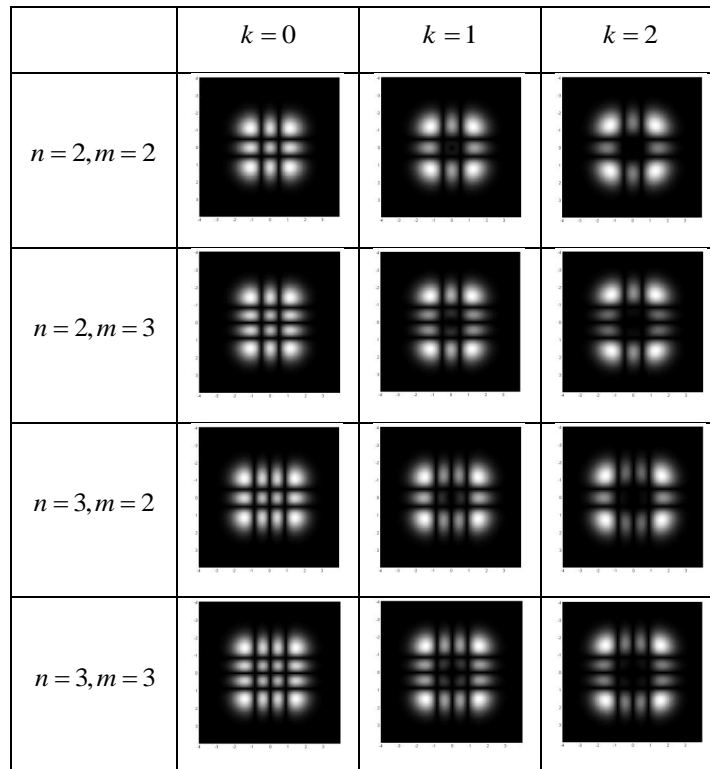
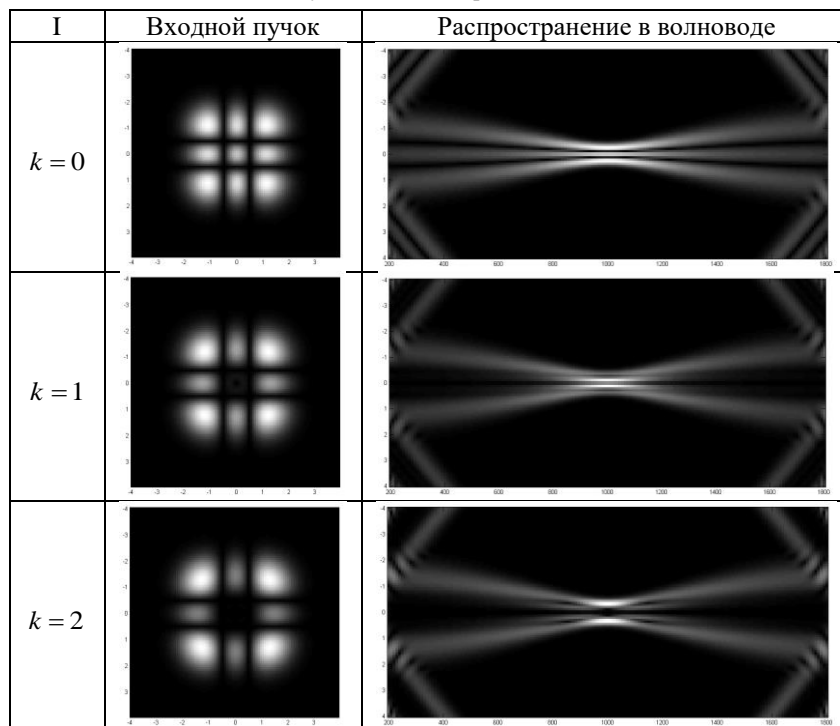


Таблица 2. Результаты моделирования для $n = 2, m = 2$



На некоторых изображениях видны «хвосты» в начале и в конце моделирования. Как видно из формулы (3), при $\sin \tau$ близким к нулю, повышается погрешность вычислений. И чем ближе происходит моделирование к данным «опасным», тем заметнее и более выраженными выглядят эти «хвосты».

Таблица 3. Результаты моделирования для $n = 2, m = 3$

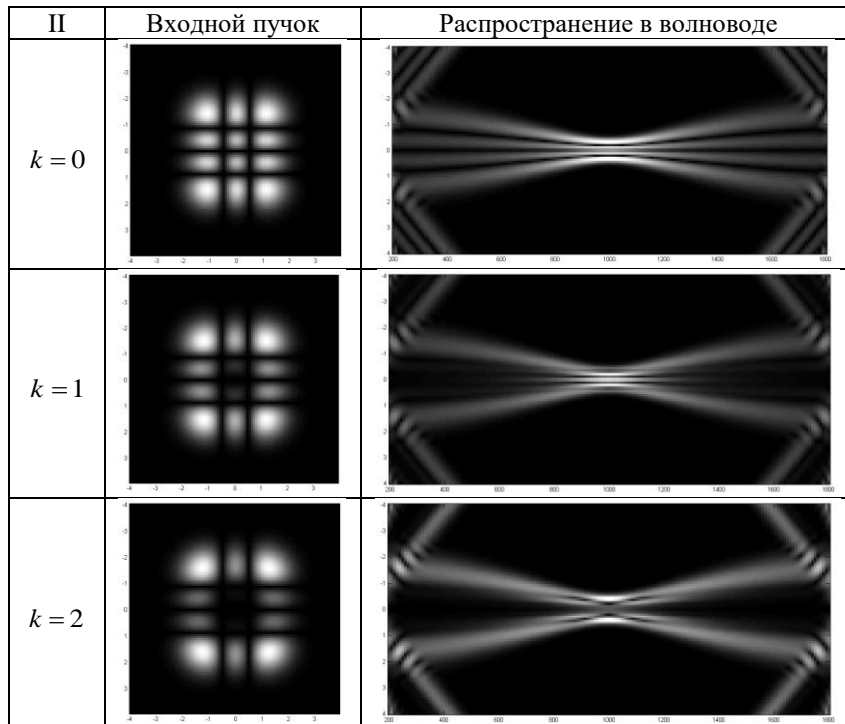
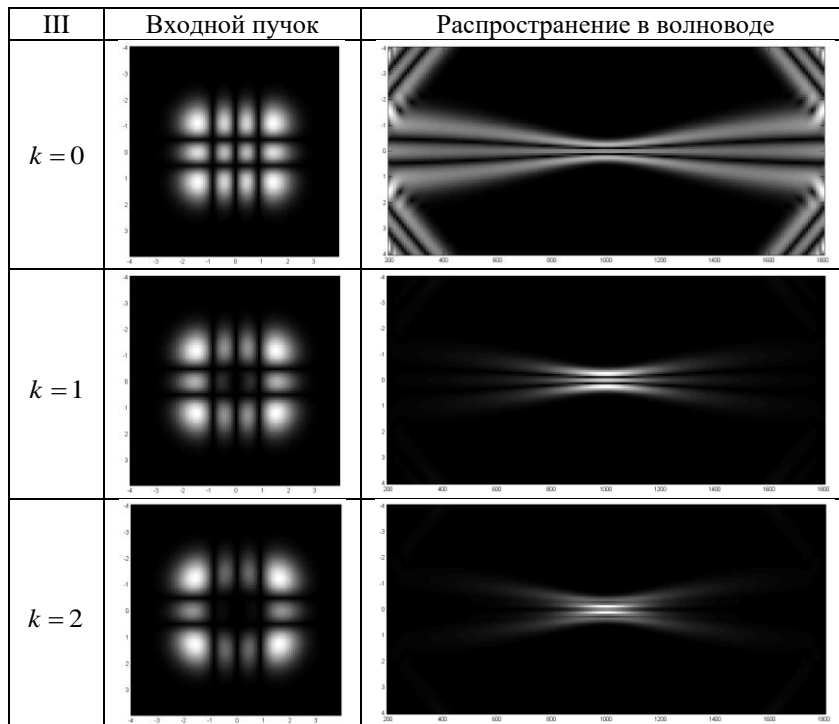


Таблица 4. Результаты моделирования для $n = 3, m = 2$

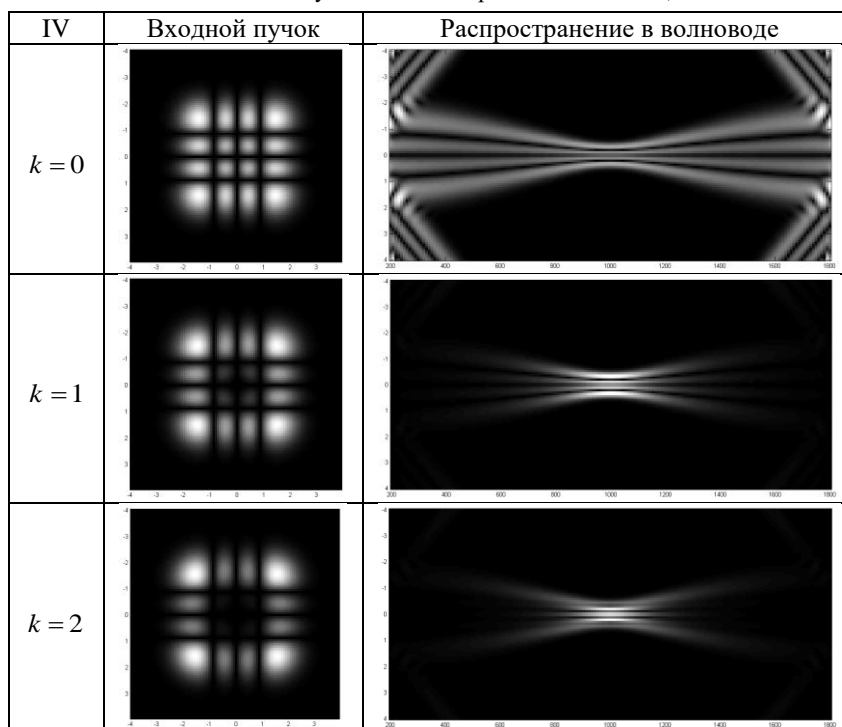


5. Заключение

В результате моделирования были получены изображения поведения лазерных пучков, которые описываются вихревыми модами Эрмита-Гаусса, через волновод с параболической зависимостью показателя преломления.

Было замечено, что при малых значениях n и m , в четверти периода распространения, наблюдается сохранения вихря в центре. Но при более высоком порядке, данное сохранение не наблюдается. В центре имеется концентрированный не нулевой пучок.

Таблица 5. Результаты моделирования для $n = 3, m = 3$



Литература

- [1] Alieva, T. Fractional transforms in optical information processing / T. Alieva, M. J. Bastiaans, M.L. Calvo // J. Appl. Signal Processing. – 2005. – Vol. 10. – P. 1-22.
- [2] Ozaktas, H.M. Fourier transforms of fractional order and their optical interpretation / H.M. Ozaktas, D. Mendlovic // Opt Commun. – 1993. – Vol. 101. – P. 163-169.
- [3] Mendlovic, D. Fractional Fourier transforms and their optical implementation / D. Mendlovic, H.M. Ozaktas // I. J Opt. Soc. Am. A. – 1993. – Vol. 10 – P. 1875-1881.
- [4] Стрилец, А.С. Согласование и исследование методов, основанных на дифференциальном и интегральном операторах распространения лазерного излучения в среде с малыми неоднородностями / А.С. Стрилец, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2008. – Т. 32(1) – С. 33-38.
- [5] Кириленко, М.С. Вычисление собственных функций ограниченного дробного преобразования Фурье / М.С. Кириленко, Р.О. Зубцов, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика – 2015. – Т. 39(3) – С. 332-338.
- [6] Kogelnik, H. Laser beams and resonators / H. Kogelnik, T. Li // Proceeding of the IEEE. – 1966. – Vol. 54. – P.1312-1329.
- [7] Kotlyar, V.V. Generalized Hermite beams in free space / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // Optik. – 1998. – Vol. 108(1) – P. 20-26.
- [8] Хонина, С.Н. Саморепродукция многомодовых пучков Гаусса-Эрмита / С.Н. Хонина, В.В. Котляр, В.А. Сойфер // Письма в ЖТФ. – 1999. Т. 25(12) – С. 62-69.
- [9] Rodrigo, J.A. Experimental implementation of the gyrator transform / J.A. Rodrigo, T. Alieva, L.C. María // J. Opt. Soc. Am. A. – 2007. – Vol. 24 – P. 3135-3139.
- [10] Khonina, S.N. Generation of Gauss-Hermite modes using binary DOEs / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Lautanen, M. Honkanen, J. Turunen // Proceedings of SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2000. – Vol. 4016 – P. 234-239.
- [11] Soskin, M.S. Singular optics in Progress in Optics / M.S. Soskin, M.V. Vasnetsov – Amsterdam: Elsevier Science, 2001. – 422 p.
- [12] Khonina, S.N. Optical vortices in a fiber: mode division multiplexing and multimode self-imaging / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy V.A. Soifer – Croatia: INTECH publisher, 2012. – 450 p.
- [13] Bozinovic, N. Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers / N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, S. Ramachandran // Science – 2013. – Vol. 340 – P. 1545-1548.
- [14] Любопытов, В.С. Математическая модель полностью оптической системы детектирования параметров распространения мод в оптическом волокне при маломодовом режиме для адаптивной компенсации смещения мод / В.С. Любопытов, А.З. Тлявлин, А.Х. Султанов, В.Х. Багманов, С.Н. Хонина, С.В. Карпеев, Н.Л. Казанский // Компьютерная оптика – 2013. – Т. 37(3) – С. 352-359.
- [15] Yan, Y. High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing / Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A. F. Molisch, M. Tur, M. J. Padgett, A. E. Willner // Nat. Commun. – 2014. – Vol. 5876 – P. 4876.
- [16] Kotlyar, V.V. Hermite-Gaussian modal laser beams with orbital angular momentum / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev // Journal of the Optical Society of America A. – 2014. – Vol. 31. – P. 274-283.
- [17] Khonina, S. N. Propagation of laser vortex beams in a parabolic optical fiber / S.N. Khonina, A.S. Striletz, A.A. Kovalev, V.V. Kotlyar // Proceedings SPIE – 2010. – Vol. 7523 – P. 1-12.
- [18] Mossoulina, O.A. Simulation of vortex laser beams propagation in parabolic index media based on fractional Fourier transform / O.A. Mossoulina, M.S. Kirilenko, S.N. Khonina // Journal of Physics: Conference Series – 2016. – Vol. 741 – P. 012142. DOI: 10.1088/1742-6596/741/1/012142