



# 3D-Моделирование распространения мод Гаусса-Эрмита

SAMARA UNIVERSITY

М.М.Карпова  
Самарский национальный исследовательский  
университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
lamarricane@gmail.com

М.С.Кириленко  
Самарский национальный исследовательский  
университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
areatangent@gmail.com

**Аннотация** — Для моделирования распространения параксиальных оптических пучков в свободном пространстве используется преобразование Френеля и, как правило, результаты отображаются в двухмерном виде. В данной работе была построена трёхмерная модель прохождения мод Гаусса-Эрмита на заданном интервале распространения.

## ВВЕДЕНИЕ

Модой называется световое поле, демонстрирующее инвариантность при распространении в соответствующей среде. Так, гауссовы функции, например, Гаусса-Эрмита (ГЭ) являются модами резонаторов [1], а также оптического волокна с квадратичной зависимостью показателя преломления [2]. Моды высокого порядка, а также многомодовые пучки позиционируются как структурированное лазерное излучение [3], которое востребовано в различных приложениях, включая оптический захват и манипулирование микрочастицами [4, 5], кодирование и уплотнение каналов передачи информации [6], лазерное взаимодействие с веществом [7].

Для детального анализа особенностей распространения сложных структурированных пучков удобным средством являются возможности 3D моделирования и визуализации [8].

В данной работе рассматриваются моды Гаусса-Эрмита:

$$\psi_{n,m}(x, y, z = 0) = \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_0^2}\right] H_n\left(\frac{x}{\sigma_0}\right) H_m\left(\frac{y}{\sigma_0}\right) \quad (1)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для моделирования будем рассматривать моду Гаусса-Эрмита порядка (2, 3). На рисунке 1 представлен вид моды во входной области.

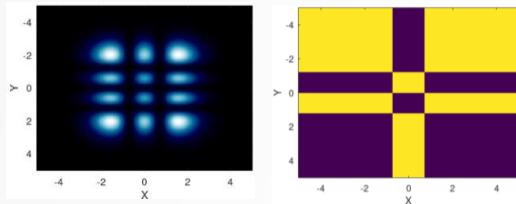


Рис. 1. Изображение амплитуды и фазы моды Гаусса-Эрмита соответственно в изначальном виде

Далее мода проходит через преобразование Френеля (рис.2):

$$E(\xi, \eta, z) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} \iint f(x, y) e^{i\frac{k}{2z}[(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2]} dx dy \quad (2)$$

Численная реализация такого преобразования может быть сведена к использованию быстрого преобразования Фурье (БПФ).

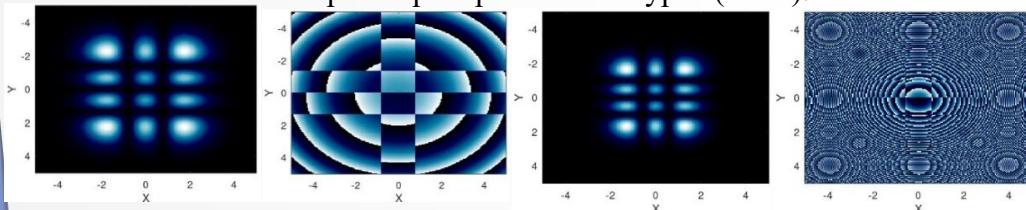


Рис. 2. Изображение амплитуды и фазы моды Гаусса-Эрмита после прохождения через преобразование Френеля. Изменения изображений происходит с увеличением дальности распространения z. На первой строке z = 2 м, на второй z = 20 м

Для последующего трехмерного построения результаты преобразования Френеля фиксируются на разных участках оптической оси с определенным шагом в диапазоне от 2 до 20 метров и записываются в матрицу, изображение которой можно наблюдать далее на рис. 3. и на рис. 4. Также в таблице приведено сравнение времени, затраченного на моделирование, в зависимости от числа слоев.

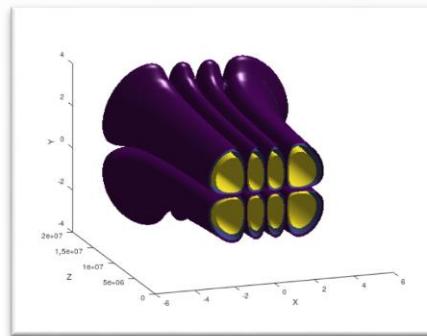


Рис. 3. - 3D модель распространения моды Гаусса-Эрмита (1,3)

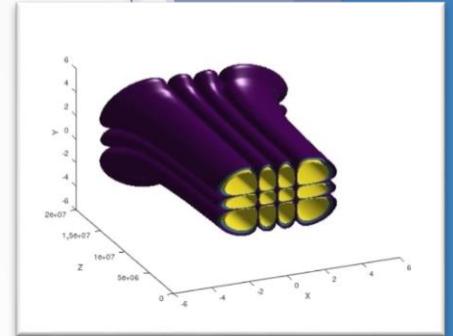


Рис. 4. - 3D модель распространения моды Гаусса-Эрмита (2,3)

Моделирование многослойных изоповерхностей	Номер моды	Кол-во слоев	Время
(1,3)		1	5,291
		2	8,958
		3	9,188
		4	11,148
		5	12,732
		6	15,265
(2,3)		1	7,591
		2	7,924
		3	10,813
		4	14,383
		5	15,633
		6	16,930

Был выбран оптимальный шаг дискретизации вдоль оптической оси Z равный 0,9 м, так как при сильном увеличении качество получаемой изоповерхности не будет сильно меняться. При этом вычисления будут проходить быстрее. Если уменьшить шаг дискретизации, модель будет рассчитываться гораздо быстрее, но с куда меньшей точностью. Также не менее важно выбирать оптимальный шаг дискретизации при моделировании двумерного преобразования Френеля, так как из этих двумерных матриц в дальнейшем собирается изоповерхность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было успешно проведено моделирование прохождения моды Гаусса – Эрмита, а также построено трёхмерное изображение её распространения на основе использования изоповерхностей. Представленный подход может быть использован не только для построения мод Гаусса-Эрмита, но и других пучков, включая как моды, так и произвольные параксиальные пучки. Если пучок не является параксиальным, то преобразование Френеля потребует замены на более общее (например, основанное на разложении по плоским волнам), при этом для 3D-моделирования также можно будет использовать изоповерхности. Однако, скорость моделирования будет существенно ниже, если преобразование не может быть реализовано через алгоритм БПФ.

## ЛИТЕРАТУРА

- Li, S. Adaptive free-space optical communications through turbulence using self-healing Bessel beams / S. Li, J. Wang // Sci. Rep. – 2017. – V. 7. – 43233p.
- Forbes, A. Structured light / A. Forbes, M. de Oliveira, M. R. Dennis // Nat. Photonics. – 2021. – V. 15. – P. 253–262.
- Khonina, S. N. Recognition of polarization and phase states of light based on the interaction of nonuniformly polarized laser beams with singular phase structures / S. N. Khonina, A. P. Porfirev, S.V. Karpeev // Optics Express. – 2019. – Vol. 27(13). – P. 18484 – 18492.
- Chen, Y. F. Laser transverse modes of spherical resonators: a review / Y. F. Chen, C. C. Lee, C. H. Wang, M. X. Hsieh // Chinese Optics Letters. – 2020. – Vol. 18(9). – 91404p.
- Khonina, S.N. Mirror and circular symmetry of autofocusing beams / S.N. Khonina // Symmetry. – 2021. – V. 13. – 1794p.
- Khonina, S.N. Bessel beam: Significance and applications – A progressive review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, S.V. Karpeev, M.A. Butt // Micromachines. – 2020. – V. 11. – 997p. DOI: 10.3390/mi11110997.
- Khonina, S.N. Modern Types of Axicons: New Functions and Applications / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, P.A. Khorin, M.A. Butt // Sensors. – 2021. – V. 21. – 6690p.
- Khonina, S.N. Harnessing of inhomogeneously polarized Hermite–Gaussian vector beams to manage the 3D spin angular momentum density distribution / S.N. Khonina, A.P. Porfirev // Nanophotonics. – 2022. – Vol. 11(4). – P. 697–712.