

Моделирование распространения полигональных пучков

А.Р. Скиданова

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия

Skidanovaanna253@gmail.com

Аннотация—Пучки, обладающие несколькими максимумами интенсивности, которые распространяются по изогнутой траектории, имеют множество интересных применений. В данной работе рассмотрено несколько фазовых масок, каждая из которых позволяет получать полигональные пучки с различным количеством пиков интенсивности.

Ключевые слова— преобразование Френеля, полигональные пучки, манипулирование микрочастицами.

1. ВВЕДЕНИЕ

Самоускоряющиеся пучки в последние годы привлекают большое внимание. Интерес к пучкам подобного рода появился, когда учёными М.В. Берри и Н.Л. Бланж был представлен волновой пакет Эйри в качестве решения уравнения Шредингера [1]. Оказалось, что лучи Эйри обладают рядом полезных свойств. Одно из них заключается в том, что лепесток луча Эйри имеет тенденцию к поперечному ускорению по параболической траектории во время распространения, что может использоваться, например, в оптических ловушках [2-4]. Другое свойство – самовосстановление, т.е. форма пучка возрождается с увеличением проходимого расстояния.

С тех пор было проведено большое количество исследований, предложены различные типы ускоряющих пучков, такие как непараксиальные пучки Матвея и Вебера, ускоряющие пучки произвольной поперечной формы и нелинейные изогнутые пучки.

Наконец, в 2010 году было представлено ещё одно семейство ускоряющих пучков конечной энергии – правильные полигональные пучки, которые, хотя и не свободны от дифракции, имеют тенденцию сохранять свои свойства при линейной дифракции на больших расстояниях [5]. Эти лучи демонстрируют множественные максимумы высокой интенсивности, которые равномерно распределены по окружности и следуют изогнутым ускоряющим траекториям во время распространения, при этом центр масс всего пучка распространяется по прямой линии вдоль оптической оси. То есть каждое острие пучка, распространяется аналогично основному лепестку луча Эйри.

Были проведено несколько значимых исследований в этом направлении [6-8]. Такие пучки благодаря своим свойствам могут использоваться в оптическом захвате и многофункциональном манипулировании микро- и нано объектами, аналогично пучкам Эйри [9, 10]. Так же они

находят своё применение в микроскопии [11] и биомедицине [12, 13].

В данной работе происходит подбор и моделирование распространения нескольких полигональных пучков, которые позволяют получать разное количество пиков интенсивности, что позволяет расширить возможности по транспортировке микрочастиц.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Интегральное представление правильных полигональных пучков может быть записано как:

$$E(x, y, z) = A \int_{-\infty}^{+\infty} d\xi \int_{-\infty}^{+\infty} d\eta \exp[ik\psi(\xi, \eta, x, y, z)], \quad (1)$$

где (x, y) – координаты в пространстве изображения, (ξ, η) – соответствующие спектральные координаты, $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, $z = u/2f(f+u)$ – сила расфокусировки.

Сам множитель $\psi(\xi, \eta, x, y, z)$ задаётся как сумма $\varphi(\xi, \eta) - z(\xi^2 + \eta^2) - (x\xi + y\eta)$, где основной является полином $\varphi(\xi, \eta)$, от которого и будет зависеть форма будущего пучка.

Так как наиболее важным в работе с данными пучками является наблюдение за их распространением, то для моделирования параксиального распространения в пространстве используется преобразование Френеля:

$$U(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} U_0(\xi, \eta) * \exp\left[\frac{ik}{2z}((x-\xi)^2 + (y-\eta)^2)\right] d\xi d\eta.$$

Так как расчёт преобразования Френеля занимает довольно много времени. Чтобы это исправить целесообразно переписать его через преобразования Фурье, которое работает значительно быстрее за счёт использования алгоритма быстрого преобразования Фурье:

$$U(x, y, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] * \mathfrak{F}\left\{U_0(\xi, \eta) \exp\left[\frac{ik}{2z}(\xi^2 + \eta^2)\right]\right\}.$$

Можно заметить, что множители стоящие до преобразования Фурье будут влиять только на фазу пучка. Так как в работе будет наблюдаться только интенсивность, то эти множители могут быть отброшены. Следовательно, для расчёта преобразования

Френеля достаточно воспользоваться следующей формулой:

$$U(x, y, z) = \Im \left\{ U_0(\xi, \eta) \exp \left[\frac{ik}{2z} (\xi^2 + \eta^2) \right] \right\}.$$

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования распространения полигональных пучков использовалась линза с радиусом 5 мм. Длина волны $\lambda = 0.000565$ мм.

Рассмотрим полином из формулы (1) следующего вида:

$$\varphi(\xi, \eta) = \xi^p + \eta^q - \xi^n \eta^m. \quad (2)$$

Данная формула позволяет при конкретных значениях степеней получать различные пучки с 4 пиками интенсивности (рис. 1).

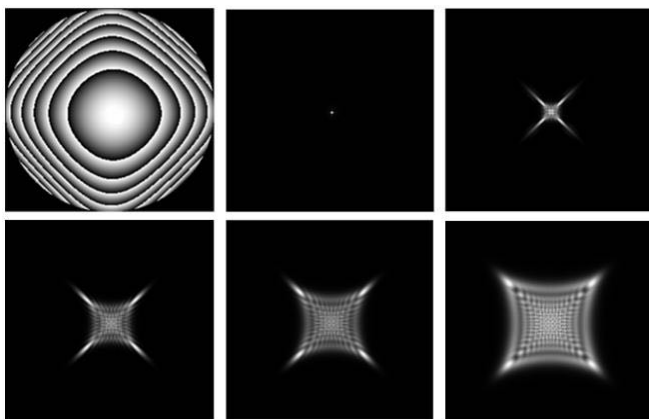


Рис. 1. Распространение в пространстве полигонального пучка с четырьмя пиками интенсивности при $p = 1, q = 1, n = 2, m = 2$

На рис. 1 представлен первый вариант комбинации параметров. В таком случае максимумы интенсивности имеют структуру острия, но при распространении в пространстве они становятся менее выраженными, а количество шума увеличивается.

Используя тот же полином (2), есть возможность получить пучок, у которого пики интенсивности являются точечными, а рассеяние происходит в гораздо меньшей степени (рис. 2).

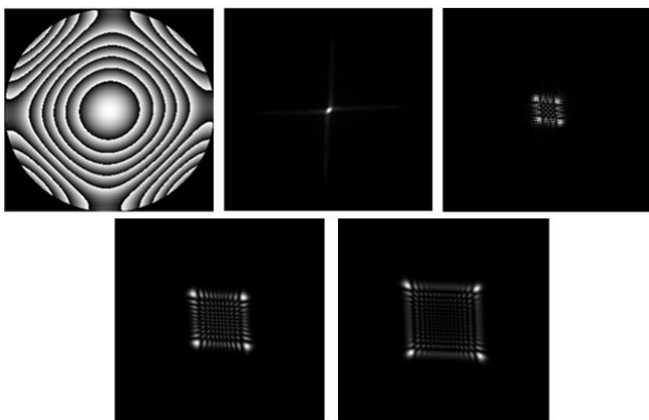


Рис. 2. Распространение в пространстве полигонального пучка с четырьмя пиками интенсивности при $p = 4, q = 4, n = 1, m = 1$

Следующий рассмотренный полином имеет более общий вид:

$$\varphi(\xi, \eta) = \xi^p + \eta^q - l(\xi^n \eta + \eta^m \xi).$$

Общим он является так как с его помощью можно получить и два (рис. 3) и три, и четыре пика интенсивности. За счёт использования параметра l можно вращать, растягивать или сжимать получаемый пучок, правда только в определённом диапазоне, иначе он начинает терять свою форму.

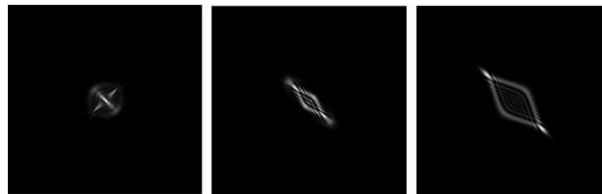


Рис. 3. Распространение в пространстве полигонального пучка с двумя пиками интенсивности при $p = 4, q = 4, n = 1, m = 1, l = 4$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены полигональные пучки, позволяющие получать различное количество пиков интенсивности, которые двигаются по изогнутой траектории. Для полного изучения свойств необходимы экспериментальные исследования. На основании проведенной работы можно предположить, что данные пучки могут быть использованы для расширения средств оптического захвата и манипулирования микрообъектами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Berry, M.V. Nonspreading wave packets / M.V. Berry, N.L. Balazs // Am. J. Phys. – 1979. – Vol. 47. – P. 264-267.
- [2] Baumgartl, J. Optically mediated particle clearing using Airy wavepackets / J. Baumgartl, M. Mazilu, K. Dholakia // Nat. Photonics. – 2008. – Vol. 2(11). – P. 675-678.
- [3] Kaganovsky, Y. Nonparaxial wave analysis of three-dimensional Airy beams / Y. Kaganovsky, E. Heyman // J. Opt. Soc. Am. – 2021. – Vol. 29(5). – P. 671-688.
- [4] Chremmos, I. Pre-engineered abruptly autofocusing beams / I. Chremmos, N.K. Efremidis, D.N. Christodoulides // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36(10). – P. 1890-1892. DOI: 10.1364/OL.36.001890.
- [5] Barwick, S. Accelerating regular polygon beams / S. Barwick // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35(24). – P. 4118-4120.
- [6] Zhijun, R. Generation of optical accelerating regular triple-cusp beams and their topological structures / R. Zhijun, L. Dong, Ch. Ying, Ch. Fan // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20(28). – P. 29276-29283.
- [7] Zhijun, R. Generation of Optical Accelerating Quinary-Cusp Beams and Their Optical Characteristics / R. Zhijun // Chinese Physics Letters. – 2013. – Vol. 30. – P. 114208-114212.
- [8] Zhijun, R. Production of accelerating quad Airy beams and their optical characteristics / R. Zhijun // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22(12). – P. 15154-15164. DOI: 10.1364/OE.22.015154.
- [9] Christodoulides, D.N. Optical trapping riding along an Airy beam / D.N. Christodoulides // Nat. Photonics. – 2008. – Vol. 2(11). – P. 652-653.
- [10] Baumgartl, J. Optically Mediated Particle Clearing Using Airy Wavepackets / J. Baumgartl, M. Mazilu, K. Dholakia // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 2. – P. 675-678.
- [11] Liu, F. Photophoretic trapping of multiple particles in tapered-ring optical field / F. Liu // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22(19). – P. 23716-23723.
- [12] Liu, F. Manipulation of aerosols revolving in tapering optical traps / F. Liu // Opt. Lett. – 2014. – Vol. 39(1). – P. 100-103.
- [13] Liu, F. Photophoretic trapping of multiple particles in tapered-ring optical field / F. Liu // Opt. Express. – 2014. – Vol. 22(19). – P. 23716-23723.