

Расчет и моделирование оптических элементов для формирования полигональных пучков.

М.В.Бамбурова

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева

Самара, Россия

maria2001bamburova@gmail.com

Аннотация — В работе исследуется зависимость картин интенсивности формируемых полигональных пучков от параметров фазы в виде бинома Ньютона нечетной степени. Показана возможность вращения полигонального пучка, а также формирования их суперпозиции.

Ключевые слова — быстрое преобразование Фурье, преобразование Френеля, бином Ньютона, бифуракция.

1. ВВЕДЕНИЕ

Световые пучки со свойством ускорения [1-4] также могут проявлять свойство автофокусировки [5, 6], что привлекает интерес исследователей и обеспечивает их востребованность в области оптического манипулирования [7] и лазерной обработки [8].

Семейство полигональных пучков имеет несколько выраженных пиков интенсивности, которые перемещаются по нелинейным траекториям с ускорением при распространении [2].

В данной работе исследуется зависимость картин интенсивности формируемых полигональных пучков от параметров фазы в виде бинома Ньютона нечетной степени. Показана возможность вращения полигонального пучка за счет изменения параметров. Также продемонстрирован способ генерации суперпозиции таких пучков.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

В работе рассмотрено формирование полигональных пучков на основе дифракционных оптических элементов (ДОО), фазовая функция которых представлена в виде бинома Ньютона [1]:

$$f_n(x, y) = w \left(\sum_{k=0}^{(n-1)/2} c_k (x^{n-k} y^k + x^k y^{n-k}) \right), \quad (1)$$

где w - регулируемая модуляция.

Будем рассматривать только нечетные значения порядка многочлена $n \geq 3$. Отметим, что многочлен вида (1) обладает инвариантностью при замене $x \leftrightarrow y$, а также обеспечивает нечетность при инверсии координат: $f_n(x, y) = f_n(y, x)$ и $f_n(-x, -y) = -f_n(x, y)$.

Бифуракции состоят из n взаимосвязанных полукубических парабол с острями в вершинах правильного многоугольника [1], что обеспечивает формирование в распределении интенсивности полигонального пучка n выраженных пиков, сохраняющихся при распространении.

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Численное моделирование формирования и распространения полигональных пучков при использовании ДОО с фазой (1) выполнялось на основе преобразования Френеля:

$$F(u, v, z) = -\frac{ik}{2\pi z} \exp(ikz) \times \int \int_{-\infty}^{\infty} f_n(x, y) \exp \left[\frac{ik}{2z} ((x-u)^2 + (y-v)^2) dx dy \right], \quad (2)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, λ - длина волны излучения, z - расстояние от входной плоскости.

Преобразование (2) может быть реализовано с использованием преобразования Фурье:

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

$$\mathfrak{F} \left\{ f_n(x, y) \exp \left[\frac{ik}{2z} (x^2 + y^2) \right] \right\},$$

где \mathfrak{F} - быстрое преобразование Фурье.

На рис. 1 показаны результаты моделирования для $n = 3, 5, 7$. Окружностями отмечены фазовые особенности сформированных пучков.

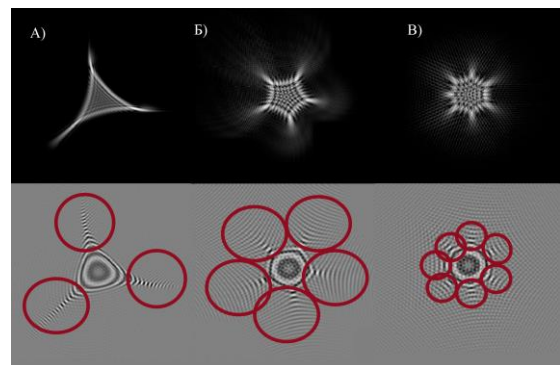


Рис.1. Картина интенсивности и фазы бинома Ньютона (А) третьей степени, (Б) пятой степени и (В) седьмой степени

Низкочастотная фаза в области высокой интенсивности является ключевым элементом для сохранения многоугольной формы пучков и пиков интенсивности в вершинах [3]. Отметим, что полигональные автофокусирующиеся пучки можно также формировать за счет абберационного типа фазы

[9, 10], однако в этом случае не гарантируется сохранение пиков интенсивности в вершинах.

Свойства автофокусировки полигональных пучков показаны на рис. 2: полигональная структура фокусируется в единичный пик ($z = 200$ мм), а затем снова разделяется на n ярких точек. Это свойство полигональных пучков может быть использовано для оптической сортировки частиц [4].

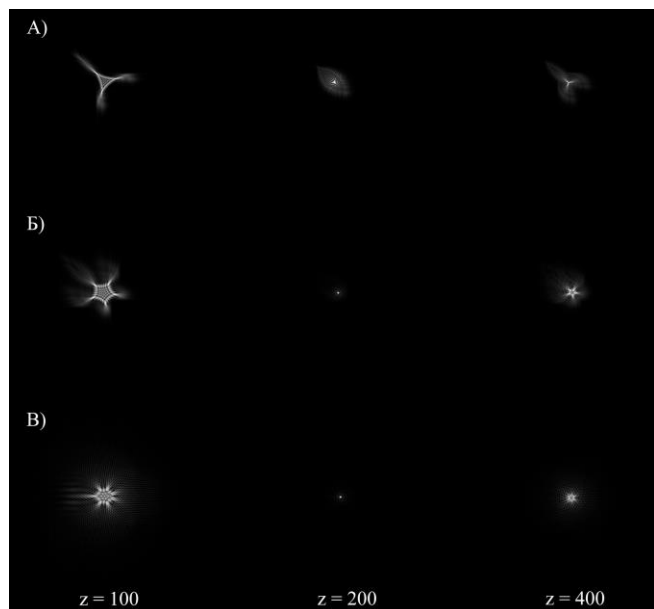


Рис.2. Картины интенсивности полигональных пучков на различных расстояниях для (А) третьей степени, (Б) пятой степени и (В) седьмой степени



Рис.3. Увеличенный масштаб картин интенсивности для рис. 2(Б) и (В) при $z = 200$ мм

Кроме того, за счет вариаций параметров фазовой функции (1) можно реализовывать поворот полигонального пучка (рис. 4).

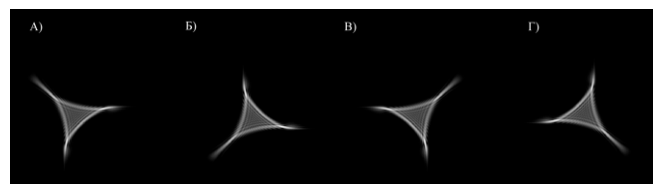


Рис.4. Картины интенсивности полигонального пучка третьей степени при различных коэффициентах перед слагаемыми

Также было проведено исследование формирования полигонального пучка с четной симметрией (за счет внесения операции модуля аргументов) для биннома третьей степени. В этом случае при изменении

коэффициентов происходят определенные преобразования пучка (рис. 5).

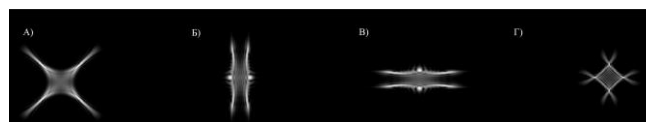


Рис.5. Картины интенсивности полигонального пучка третьей степени с четной симметрией при различных коэффициентах перед слагаемыми

Показанная выше зависимость от параметров фазовой функции позволяет формировать полигональные пучки с отдельными выделенными углами полигона, вращать их и производить их суперпозиции (рис. 6).



Рис.6. Построение отдельных частей для треугольного пучка

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на основе численного моделирования показана возможность формирования и управления полигональным пучком и его отдельными частями. Рассмотренные возможности расширяют инструментарий оптического захвата и манипулирования микрочастицами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Barwick, S. Accelerating regular polygon beams / S. Barwick // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35. – P. 4118-4120
- [2] Fang, Z.X. Accelerating polygon beam with peculiar features / Z.X.Fang, H.Z.Zhao, Y.Chen // Sci. Rep. – 2019. – Vol. 9. – P. 17817
- [3] Zhang, Y. Study on evolving phases of accelerating generalized polygon beams / Y. Zhang, F. Dong, K. Qian, Q. Zhang, W. Chu, X. Ma, X. Wu // Opt. Express. – 2016. – Vol. 24. – P.5300-5310
- [4] Ren, Z. Generation of optical accelerating regular triple-cusp beams and their topological structures / Z.Ren, L.Dong, C.Ying, C.Fan // Opt. Express. – 2012. – Vol. 20. – P. 29276-29283
- [5] Efremidis, N.K. Abruptly autofocusing waves / N.K.Efremidis, D.N.Christodoulides // Opt. Lett. – 2010. – Vol. 35. – P. 4045-4047
- [6] Khonina, S.N. Mirror and circular symmetry of autofocusing beams / S.N.Khonina // Symmetry. – 2021. – Vol. 13. – P. 1794
- [7] Zhang, P. Trapping and guiding microparticles with morphing autofocusing Airy beams / P.Zhang, J.Prakash, Z.Zhang, M.S.Mills, N.K.Efremidis, D.N.Christodoulides, Z.Chen // Opt. Lett. – 2011. – Vol. 36. – P. 2883 – 2885
- [8] Manousidaki, M. Abruptly autofocusing beams enable advanced multiscale photo-polymerization / M.Manousidaki, D.G.Papazoglou, M.Farsari, S.Tzortzakis // Optica. – 2016. – Vol. 3. – P. 525-530
- [9] Khonina, S. N. Aberration laser beams with autofocusing properties / S. N.Khonina, A. V.Ustinov, A. P.Porfirov // Applied Optics. – 2018. – Vol. 57. – No.6. – P.1410-1416
- [10] Dev, V. Autofocusing and self-healing properties of aberration laser beams in a turbulent media / V.Dev, A.N.K. Reddy, A.V.Ustinov, S.N.Khonina, V.Pal // Physical Review Applied. – 2021. – Vol. 16. – P. 014