

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛН В РЕЖИМЕ ОСТРОЙ ФОКУСИРОВКИ

Н.С. Фидирко¹

¹Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национально исследовательский университет)

В работе рассматривается моделирование генерации псевдобездифракционных пучков, имеющих в поперечном сечении мозаичные структуры. Для формирования распределений такого типа предложено использование суперпозиции сферических волн в режиме острой фокусировки. Выполнено моделирование для различного количества сферических волн, генерируемых когерентными точечными источниками, расположенными на кольце определенного радиуса. Показано, что в зависимости от конфигурации входного поля можно получать распределения в виде световых пятен, находящихся в узлах решеток (при малом количестве волн). При использовании большего количества волн в результате получаются пучки Бесселевого типа.

Под бездифракционными пучками подразумеваются пучки, поперечное сечение которых остается неизменным при распространении в свободном пространстве. В 1987 году Durnin предположил, что бездифракционные пучки являются точным решением однородного уравнения Гельмгольца [1]. Эти решения могут быть описаны как функции Бесселя и называются бездифракционными пучками Бесселя. Реализуемые физически пучки имеют конечную энергию и распространяются со достаточно небольшим углом расхождения, и называются псевдобездифракционными пучками. Durnin с соавторами впервые реализовали псевдобездифракционный пучок Бесселя в цилиндрических координатах [2]. После этого бездифракционные пучки начали активно изучаться и применяться в различных областях, таких как оптический захват и манипуляция микрочастицами, оптическая когерентная томография [3-7].

В последние годы внимание математиков и физиков было обращено к двумерным калейдоскопическим бездифракционным структурам [8]. Причем реализация таких распределений, относящихся к кристаллам, квазикристаллам и другим периодическим структурам, стали изучать достаточно активно [9-12].

Двумерное распределение в виде суперпозиции более простых решеток, повернутых под различными углами относительно друг друга, были названы супер-решетками [8,12]. В данной работе рассматривается способ получения аналогичных распределений на основе интерференции острофокусированных сферических волн.

Поле в фокальной области при острой фокусировке для декартовых проекций имеет следующий вид:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}(\rho, \varphi, z) \\ \mathbf{H}(\rho, \varphi, z) \end{pmatrix} = -\frac{if}{\lambda} \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} B(\theta, \phi) T(\theta) \begin{pmatrix} \mathbf{P}_E(\theta, \phi) \\ \frac{1}{\mu} \mathbf{P}_H(\theta, \phi) \end{pmatrix} \times \\ \times \exp[ik(\rho \sin \theta \cos(\phi - \varphi) + z \cos \theta)] \sin \theta d\theta d\phi, \quad (13)$$

где (ρ, φ, z) – цилиндрические координаты в фокальной области, (θ, ϕ) – сферические угловые координаты выходного зрачка фокусирующей системы, α – максимальное значение азимутального угла, связанное с числовой апертурой системы, $B(\theta, \phi)$ – функция пропускания, $T(\theta)$ – функция аподизации зрачка (для апланатических систем $T(\theta) = \sqrt{\cos \theta}$), $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число, λ – длина волны, f – фокусное расстояние. $\mathbf{P}_E(\theta, \phi)$ и $\mathbf{P}_H(\theta, \phi)$ – поляризационные матрицы для электрического и магнитного векторов, соответственно:

$$\mathbf{P}_E(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} 1 + \cos^2 \phi (\cos \theta - 1) & \sin \phi \cos \phi (\cos \theta - 1) \\ \sin \phi \cos \phi (\cos \theta - 1) & 1 + \sin^2 \phi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_x(\phi) \\ c_y(\phi) \end{pmatrix}; \quad (14)$$

$$\mathbf{P}_H(\theta, \phi) = \begin{bmatrix} \sin \phi \cos \phi (\cos \theta - 1) & -(1 + \cos^2 \phi (\cos \theta - 1)) \\ 1 + \sin^2 \phi (\cos \theta - 1) & -\sin \phi \cos \phi (\cos \theta - 1) \\ -\sin \theta \sin \phi & \sin \theta \cos \phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_x(\phi) \\ c_y(\phi) \end{pmatrix}. \quad (15)$$

где $c_x(\phi)$, $c_y(\phi)$ - поляризационные коэффициенты падающего излучения.

Для вихревых полей $B(\theta, \phi) = R(\theta) \exp(im\phi)$ выражение (1) можно свести к выражению с одинарным интегрированием:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{E}(\rho, \varphi, z) \\ \mathbf{H}(\rho, \varphi, z) \end{pmatrix} = -ikf \int_0^\alpha R(\theta) T(\theta) \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_E(\rho, \varphi, \theta) \\ \frac{1}{\mu} \mathbf{Q}_H(\rho, \varphi, \theta) \end{pmatrix} \sin \theta \exp(ikz \cos \theta) d\theta. \quad (16)$$

где матрицы $\mathbf{Q}_{E,H}(\rho, \varphi, \theta)$ имеют конкретный вид для определенных типов поляризаций и представляют собой суперпозиции функций Бесселя различных порядков [13-14].

Если пучки сформированы различными зонами оптического элемента, дополняющего высокоапертурный объектив, то результирующее поле в районе фокуса будет представлять собой сумму полей, получаемых различными зонами оптического элемента:

$$\mathbf{E}(\rho, \varphi, z) = \sum_i \mathbf{E}_i(\rho, \varphi, z). \quad (17)$$

Рассмотрим непрозрачную диафрагму, наложенную на зрачок высокоапертурной фокусирующей системы. Пусть в диафрагме есть различное количество небольших отверстий, расположенных равномерно на некотором радиусе от центра диафрагмы.

Таким образом, мы получаем системы точечных источников света. Каждый точечный источник производит сферическую волны, которая потом фокусируется и интерферирует с волнами от других источников. При этом можно варьировать количество точечных источников и их удаленность от центра апертуры.

На рисунке 1 представлен внешний вид диаграмм для генерации различного количества волн. В таблицах 1-4 приведены результаты моделирования при различных параметрах.

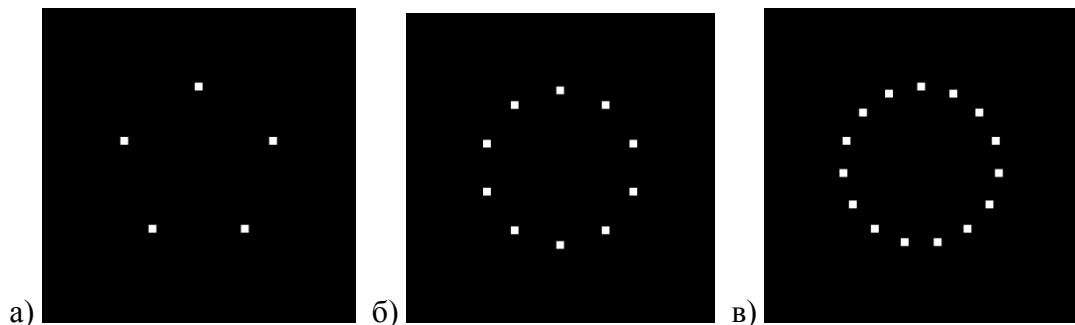


Рисунок 1 – Вид диаграмм для а) 5 точек, б) 10 точек, в) 15 точек с центральным радиусом $r_c = 50\lambda$, радиус каждой точки - $r_d = 2\lambda$

Таблица 1 – Результирующее электрическое поле для центрального радиуса $r_c = 25\lambda$

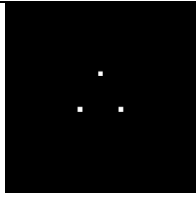
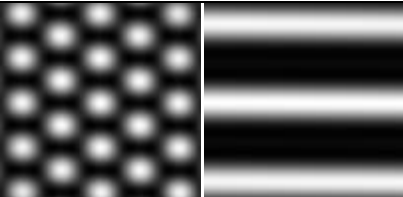
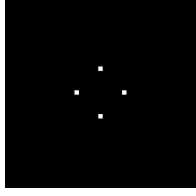
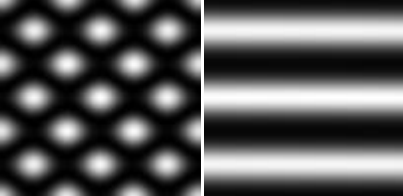
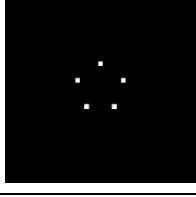
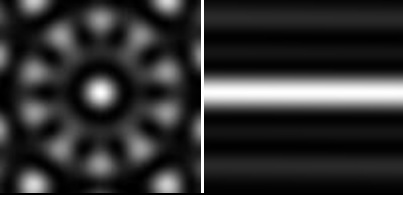
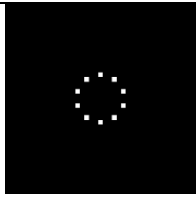
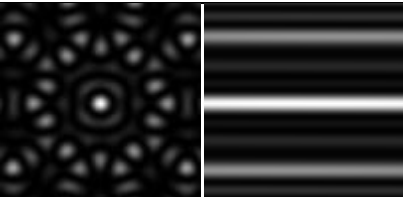
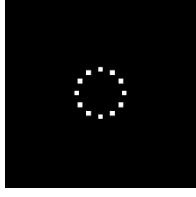
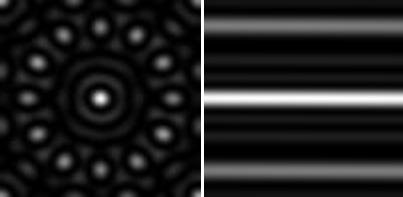
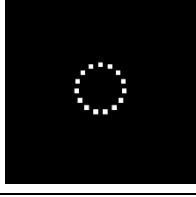
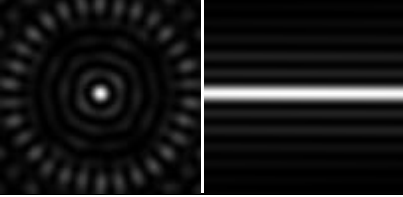
N	Исходное поле	$ \mathbf{E} ^2$ (поперечное и продольное сечения)
3		
4		
5		

Таблица 2 – Результирующее электрическое поле для центрального радиуса $r_c = 25\lambda$

N	Исходное поле	$ \mathbf{E} ^2$ (поперечное и продольное сечения)
10		
12		
15		

Из таблиц видно, что при интерференции 3-х и 4-х сферических волн, получается картина в виде ярких световых пятен, расположенных в узлах решеток различной конфигурации. При этом в продольной плоскости формируются протяженные световые каналы. Бездифракционный характер пучков, спектр которых локализован на кольце, известен давно и успешно используется для формирования различных структур, сохраняющихся в продольном направлении [16-18]. Получаемые распределения могут быть использованы для создания фотонных кристаллов и каналов в плазме.

При интерференции 5-ти волн и более, формируется интерференционная картина с калейдоскопическим узором. При увеличении радиуса кольца (для сравнения таблицы 2 и 3) центральное пятно начинает уменьшаться, что соответствует увеличению числовой апертуры. С увеличением числовой апертуры (радиуса кольца) усложняется интерференционная картина, проявляется симметрия различного типа.

При плотном заполнении кольцевой апертуры точечными источниками получаемые поперечные распределения начинают напоминать пучки Бесселя. При этом размер центрального пятна пучка Бесселя зависит от радиуса кольцевой апертуры. Заметим, что такой способ формирования пучка Бесселя удобнее в реализации, чем создание кольцевой апертуры.

Таблица 3 – Результирующее электрическое поле для центрального радиуса $r_c = 50\lambda$

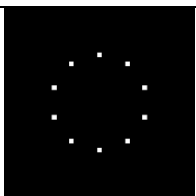
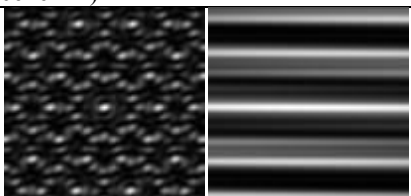
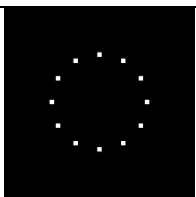
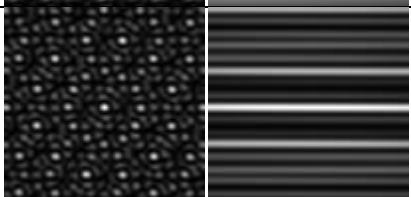
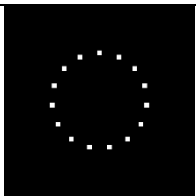
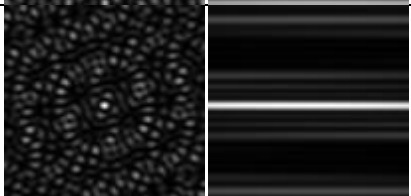
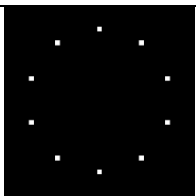
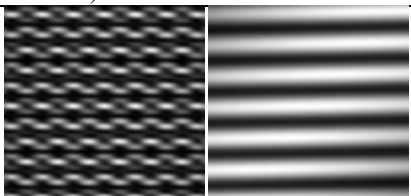
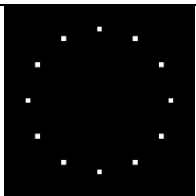
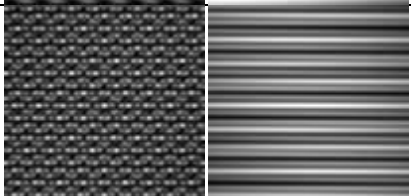
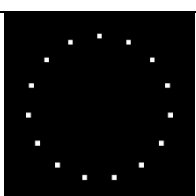
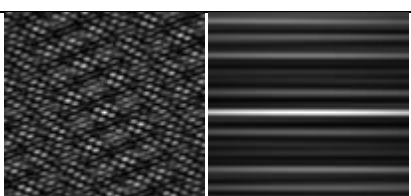
N	Исходное поле	$ \mathbf{E} ^2$ (поперечное и продольное сечения)
10		
12		
15		

Таблица 4 – Результирующее электрическое поле для центрального радиуса $r_c = 75\lambda$

N	Исходное поле	$ \mathbf{E} ^2$ (поперечное и продольное сечения)
10		
12		
15		

Таким образом, меняя количество волн и расстояние между ними можно получить широкий спектр мозаичных поперечных распределений, которые будут сохранять свою структуру на достаточно протяженном расстоянии. Протяженность в этом случае определяется размерами отверстий в экране и радиусом кольца. Увеличение размера точек и радиуса кольцевой апертуры приводит к сокращению глубины фокуса.

Дополнительной степенью усложнения мозаичных картин могут служить фазы точечных источников, которые вносятся специальными фазовыми элементами, а также поляризация фокусируемого излучения [13, 19-21].

Литература

1. Durnin, J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory / J. Durnin // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1987. – Vol. 4. – No. 4. – P. 651-654.
2. Durnin, J. Diffraction-free beams / J. Durnin, J. J. Miceli, Jr., J. H. Eberly // *Physical Review Letters*. – 1987. – Vol. 58. – No. 15. – P. 1499-1501.
3. Garcés-Chávez, V. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam / V. Garcés-Chávez, D. McGloin, H. Melville, W. Sibbett, K. Dholakia // *Nature*. – 2002. – Vol. 419. – No. 6903. – P. 145-147.
4. McGloin, D. Interfering Bessel beams for optical micromanipulation / D. McGloin, V. Garcés-Chávez, K. Dholakia // *Optics Letter*. – 2003. – Vol. 28. – No. 8. – P. 657-659.
5. Arlt, J. Optical micromanipulation using a Bessel light beam / J. Arlt, V. Garcés-Chávez, W. Sibbett, K. Dholakia // *Optics Communications*. – 2001. – Vol. 197. – No. 4-6. – P. 239-245.
6. Ding, Z. High-resolution optical coherence tomography over a large depth range with an axicon lens / Z. Ding, H. Ren, Y. Zhao, J. S. Nelson, Z. Chen // *Optics Letter*. – 2002. – Vol. 27. – No. 4. – P. 243-245.
7. Yu, C. High-density non-diffracting beam array for optical interconnection / C. Yu, M. R. Wang, A. J. Varella, B. Chen // *Optics Letter*. – 2000. – Vol. 177. – No. 1-6. – P. 369-376.
8. Bouchal, Z. Nondiffracting optical beams: physical properties, experiments, and applications // *Czechoslovak Journal Of Physics*. – 2003. – V. 53, No. 7. – P. 537-624.
9. Boguslawski, M. Increasing the structural variety of discrete nondiffracting wave fields / M. Boguslawski, P. Rose, C. Denz // *Physical Review A*. – 2011. – V. 84, No. 1. – 013832.
10. Boguslawski, M. Nondiffracting Kagome lattice / M. Boguslawski, P. Rose, C. Denz // *Applied Physics Letters*. – 2011. – V. 98, No. 6. – 061111.
11. Chen, Y.F. Generation of optical crystals and quasicrystal beams: Kaleidoscopic patterns and phase singularity / Y. F. Chen, H. C. Liang, Y. C. Lin, Y. S. Tzeng, K. W. Su, K. F. Huang // *Physical Review A*. – 2011. – V. 83, No. 5. – 053813.
12. Tsou, C.H. Generation of pseudonondiffracting optical beams with superlattice structures / T. W. Wu, J. C. Tung, H. C. Liang, P. H. Tuan, and Y. F. Chen // *Optics Express*. – 2013. – V. 21, No. 20. – P. 23441-23449.
13. Хонина, С.Н. Управление вкладом компонент векторного электрического поля в фокусе высокоапертурной линзы с помощью бинарных фазовых структур / Хонина С.Н., Волотовский С.Г. // *Компьютерная оптика*. – 2010. – Т. 34, № 1. – С. 58-68.
14. Khonina, S. N. Vortex phase transmission function as a factor to reduce the focal spot of high-aperture focusing system / Khonina S. N., Kazanskiy N. L., Volotovskiy S. G // *Journal of Modern Optics*. – 2011. – Vol. 58, No.9. – P. 748–760.
15. Khonina, S. N. Influence of vortex transmission phase function on intensity distribution in the focal area of high-aperture focusing system / Khonina S.N., Kazanskiy N.L. and Volotovskiy S.G. // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, Allerton Press. – 2011. – Vol. 20, No. 1. – P. 23-42.
16. Ziolkowski, R.W. Aperture realizations of exact solutions to homogeneous-wave equations, / R. W. Ziolkowski, I. M. Besieris A. M. Shaarawi // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1993. – Vol.10, No 1. – P. 75-87.
17. Gutierrez-Vega, J.C. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams / J. C. Gutierrez-Vega, M. D. Iturbe-Castillo S. Chavez-Cerda // *Optics Letter*. – 2000. – Vol.25, No 20. – P. 1493–1495.
18. Хонина, С.Н. Простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 70-78.
19. Gao, X. Focusing properties of concentric piecewise cylindrical vector beam / X. Gao, J. Wang, H. Gu, W. Xu // *Optik*. – 2007. – Vol. 118. – P. 257-265.
20. Khonina, S. N. Optimization of focusing of linearly polarized light / Khonina S. N. Golub I. // *Optics Letter*. – 2011. – Vol. 36, No. 3. – P. 352-354.
21. Хонина, С.Н. Исследование встречной интерференции остророфокусированных пучков с различной поляризацией / Хонина С.Н., Фидирко Н.С. // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2014. – Т.16, № 4. – С. 27-33.