

Расчет дифракционных оптических элементов для формирования освещающих пучков в плоскостной микроскопии

П.А. Хорин¹, С.Н. Хонина^{1,2}

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Институт систем обработки изображений РАН - филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Молодогвардейская 151, Самара, Россия, 443001

Аннотация. В работе выполнен расчет и исследование дифракционных оптических элементов (ДОЭ) для формирования бездифракционного пучка в виде тонкого светового листа, который может быть использован в плоскостной микроскопии. Расчет фазовых ДОЭ выполнен на основе итерационного алгоритма с учетом квантования фазовой функции.

1. Введение

Термин "бездифракционные пучки" был введен для обозначения лазерных пучков, распространяющихся вдоль оптической оси без изменения поперечного распределения, т.е. без влияния дифракционных эффектов. Самыми известными среди бездифракционных пучков являются моды Бесселя [1-3], которые являются решением уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах. Кроме того, известны пучки Матье [4] для эллиптической системы координат и параболические пучки [5] в параболической системе координат, а также различные обобщенные пучки [6-8].

Одним из способов формирования бездифракционных пучков является использование узкой кольцевой диафрагмы, наложенной на линзу [3, 9, 10]. Однако такая схема является малоэффективной, т.к. через узкую кольцевую щель проходит лишь незначительная часть энергии падающего пучка. Формирование бесселевых пучков с помощью аксиконов [11] или дифракционных оптических элементов (ДОЭ) [12, 13] энергетически значительно выгоднее. В работах [14, 15] был рассмотрен простой способ энергетически эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков с помощью частичного диафрагмирования кольцевого пространственного спектра.

Повышенный интерес к разработке и формированию новых типов бездифракционных пучков связан с их огромным успехом в различных приложениях [16-22], включая оптическое манипулирование, кодирование информации, метрологию, микроскопию. Особую роль бездифракционные пучки играют в флуоресцентной микроскопии, основанной на световых листах (плоскостная микроскопия) [23-26]. Такой тип микроскопии обеспечивает исключительно высокую скорость обработки изображения, хорошее отношение сигнал-шум, низкий уровень фото-отбеливания и хорошую оптическую глубину проникновения. Это

уникальное сочетание позволяет успешно применять данную технологию для исследования живых микроорганизмов в режиме реального времени.

Для получения качественного изображения важны такие характеристики «светового листа» как его протяженность, равномерная интенсивность, минимальная толщина и отсутствие боковых лепестков. Некоторые требования являются взаимоисключающими, а некоторые труднодостижимыми. Поэтому с целью достичь некоторого компромисса, рассматриваются различные типы бездифракционных пучков и их суперпозиции [27].

В данной работе для этих целей при расчете фазовых (энергетически эффективных) ДОЭ, формирующих бездифракционные пучки в виде тонкого светового листа, мы используем итерационный алгоритм, аналогичный ранее рассмотренным [28-29]. При этом рассмотрены модификации алгоритмов, предусматривающие как оптимизацию свойств бездифракционных пучков, так и учет технологических возможностей изготовления ДОЭ.

2. Теоретические основы

Поставленная задача заключается в формировании протяженного светового листа с равномерной интенсивностью, который будет пригоден для просвечивания живых организмов большего размера, т.е. задача сводится к расчету тонкого оптического листа с бездифракционными свойствами в средней и дальней зоне распространения.

Для этого был модифицирован рассмотренный ранее итерационный алгоритм [28, 29] следующим образом: на первой итерации фаза волнового фронта задана случайным образом в диапазоне от 0 до 2π , затем волновой фронт был обрезан кольцом с радиусом Δ и распространён через линзу с помощью преобразования Фурье, далее в фокальной плоскости распределение было усечено узкой щелью размером Δ ; на последующих итерациях алгоритм итеративно воспроизводился, за исключением первого пункта – фаза задавалась не случайным образом, а была задана, как распределение в конце предыдущей итерации. Таким образом был получен дифракционный рельеф ДОЭ для формирования «тонкого оптического листа». Ниже приведен рисунок, демонстрирующий действие алгоритма.

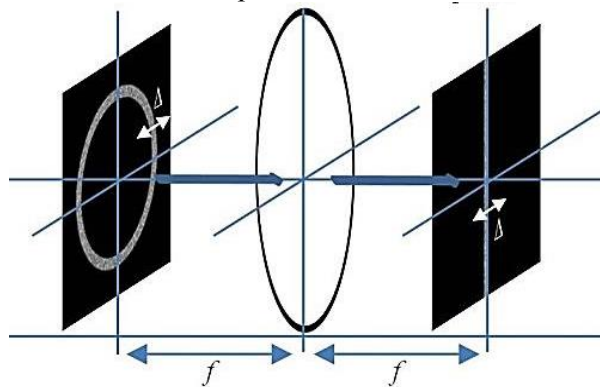


Рисунок 1. i -ая итерация алгоритма формирования «тонкого оптического листа».

Было предложено рассмотреть несколько модификаций алгоритма, в которых маска накладывалась на распределение интенсивности на каждой итерации, как кольцо с варьируемым радиусом Δ . Критерием качества бездифракционного пучка является инвариантность к распространению в свободном пространстве. Для анализа сформированного изображения следует сравнить поперечные срезы распределения интенсивности на некоторых расстояниях.

3. Форматирование текста

Проведем численное моделирование для следующего итерационного алгоритма:

Таблица 1. Алгоритм для синтеза предложенного ДОЭ.

Первая итерация	Последующие N-1 итерации
$\varphi_1(x) = rand(0..2\pi)$ $\psi_1(x) = \begin{cases} \exp[\varphi_1(x)], & r < \delta/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ $\Psi_1(u) = F\{\psi_1(x)\}$ $\hat{\Psi}_1(u) = \begin{cases} \Psi_1(u), & u < \delta/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$	<p style="text-align: center;">for $n=2..N$</p> $\varphi_n(x) = F^{-1}\{\hat{\Psi}_{n-1}(u)\}$ $\hat{\varphi}_n(x) = \begin{cases} \varphi_n(x), & r < \delta/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ $\psi_n(x) = \varphi_n(x)$ $\Psi_n(u) = F\{\psi_n(x)\}$ $\hat{\Psi}_n(u) = \begin{cases} \Psi_n(u), & u < \delta/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">endfor.</p>

В таблице 2 показаны распределения амплитуды и фазы для каждого шага из 1, 4 и 16 итераций. В ряде экспериментов было выявлено, что 4 итераций достаточно для синтеза амплитудно-фазового ДОЭ.

Для физически реализуемого ДОЭ необходимо рассчитать фазовый элемент. Для этого в конце каждой итерации разделим полученный комплексный массив на ненулевые значения амплитуды. В результате был получен дифракционный рисунок для фазового физического реализуемого дифракционного элемента.

Таблица 2. Иллюстрация шагов алгоритма для синтеза ДОЭ (1,4 и 16 итерации).

	n=1	n=4	n=16
$\varphi_n(x)$			
Случайная фаза (n=1) Фурье прообраз (n≠1)			
$\psi_n(x)$			
Волновой фронт			
$\Psi_n(u)$			
Фурье образ			
$\hat{\Psi}_n(u)$			
Фурье образ (усечённый)			
$\varphi_{n+1}(x)$			
Фурье прообраз			

Распространение волнового фронта через линзу можно моделировать при помощи оптического преобразование Фурье (F), которые выглядят следующим образом в 2D представлении:

$$F(u, v) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} (ux + vy)\right] dx dy, \tag{1}$$

где $f(x, y)$ - Фурье прообраз, λ - длина волны; f - фокусное расстояние линзы; $F(u, v)$ - Фурье образ.

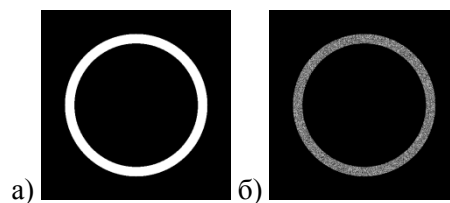


Рисунок 2. Амплитуда (а) и фаза (б) фазового ДОЭ для формирования «тонкого оптического листа».

Известно [8], что для простоты и точности изготовления фазового ДОЭ можно провести квантования фазы. В рамках данной работы было проведено квантование по 2 и 4 значениям, равномерно распределенным на отрезке от 0 до 2π .

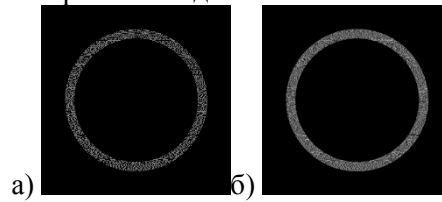


Рисунок 3. Фаза квантованного фазового ДОЭ для формирования «тонкого оптического листа»: (а) – 0 и π ; (б) – 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$, 2π .

Для визуализации бездифракционных свойств в дальней зоне проведем тест Френеля для рассчитанного «тонкого оптического листа», т.е. пропустим плоский волновой фронт через рассчитанный ДОЭ и зафиксируем Френель образ в плоскостях на некоторых расстояниях. Преобразование Френеля представляет собой разложение по параболическим волнам:

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

при условии, что $\sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2} \ll z$, где $k = 2\pi/\lambda$, λ – длина волны, z – расстояние, на которое распространён волновой фронт.

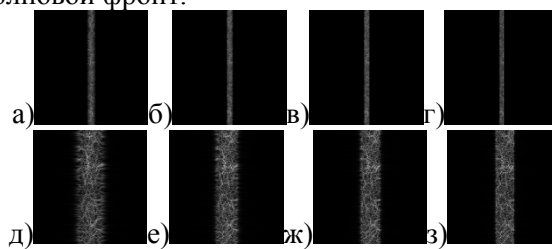


Рисунок 4. Френель образ «тонкого оптического листа» на расстояниях 150, 300, 600, 1200 мм – (а) и (д), (б) и (е), (в) и (ж), (г) и (з) соответственно в увеличении $\times 1$ и $\times 4$.

В рамках данной работы преобразование Френеля реализовано через преобразование Фурье (F) следующим образом:

$$\begin{aligned} U(u, v, z) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \exp[-2\pi i(xu + yv)] dx dy = \\ &= F \left\{ f(x, y) \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

В ряде экспериментов было выявлено, что изменение параметра Δ приводит к изменению толщины оптического листа. Таким образом представленный алгоритм синтеза ДОЭ позволяет создать такой фазовый элемент, при помощи которого можно воспроизвести пучок любой физически возможной толщины. Причем наблюдается явная зависимость между параметром Δ и сфокусированностью энергии – чем меньше параметр Δ , тем больше энергии сфокусировано на рабочей зоне оптического листа.

Кроме того, в рамках данной работы был проведен тест с линзой для рассчитанного «тонкого оптического листа». Проведено моделирование Френель образа вблизи фокальной плоскости. Оказалось, что предложенный бездифракционный пучок до прохождения фокальной плоскости линзы и после нее ведет себя одинаково, т.е. сохраняет свою структуру. В таблице 3 представлены результаты численного моделирования распространения оптического листа до прохождения фокальной плоскости линзы и после нее.

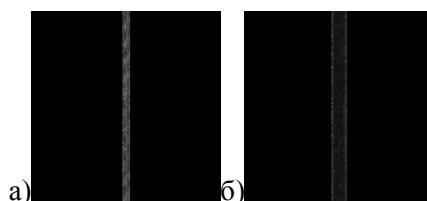


Рисунок 5. Френель образ «тонкого оптического листа» с параметром Δ равным 1 мм (а) и 2 мм (б).

Таблица 3. Френель образ с увеличением x_1 и x_4 для тонкого «оптического листа» на расстоянии 200, 300 (фокальная плоскость) и 400 мм от ДОЭ.

z	x1	x4
200		
300=f		
400		

4. Заключение

В работе был показан алгоритм расчета дифракционных оптических элементов, для формирования бездифракционного изображения – «оптический лист». Был проведен анализ возможность формирования квантованных фазовых ДОЭ. Кроме того, выявлено, что величина радиуса кольца не значительно влияет на бездифракционные свойства пучка, но при этом влияет на сфокусированность энергии в рабочей области оптического листа. В результате была рассчитан дифракционный рельеф для фазового физического реализуемого дифракционного элемента, показано бездифракционных свойств рассчитанного «тонкого оптического листа» в дальней зоне.

5. Литература

- [1] Bereznyi, A.E. Bessel optics / A.E. Bereznyi, A.M. Prokhorov, I.N. Sisakyan, V.A. Soifer // DAN USSR. – 1984. – Vol. 274(4). – P. 802-805.
- [2] Durnin, J. Diffraction-free beams / J. Durnin, J.J. Miceli, J.H. Eberly // Phys. Rev. Lett. – 1987. – Vol. 58(15). – P. 1499-1501.
- [3] Ziolkowski, R.W. Aperture realizations of exact solutions to homogeneous-wave equations / R.W. Ziolkowski, I.M. Besieris, A.M. Shaarawi // J. Opt. Soc. Am. A. – 1993. – Vol. 10(1). – P. 75-87.
- [4] Gutierrez-Vega, J.C. Alternative formulation for invariant optical fields: Mathieu beams / J.C. Gutierrez-Vega, M.D. Iturbe-Castillo, S. Chavez-Cerda // Opt. Lett. – 2000. – Vol. 25(20). – P. 1493-1495.
- [5] Bandres, M.A. Parabolic nondiffracting optical wave fields / M.A. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, S. Chavez-Cerda // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29(1). – P. 44-46.
- [6] Gutierrez-Vega, J.C. Focusing evolution of generalized propagation invariant optical fields / J.C. Gutierrez-Vega, R. Rodriguez-Masegosa, S. Chavez-Cerda // J. Opt. A. – 2003. – Vol. 5. – P. 276-282.
- [7] Gutierrez-Vega, J.C. Helmholtz– Gauss waves / J.C. Gutierrez-Vega, M.A. Bandres // J. Opt. Soc. Am. A. – 2005. – Vol. 22(2). – P. 289-298.

- [8] Khonina, S.N. Generalized parabolic nondiffracting beams of two orders / S.N. Khonina, A.V. Ustinov, S. Chávez-Cerda // *Journal of the Optical Society of America A*. – 2018. – Vol. 35(9). – P. 1511-1517. DOI: 10.1364/JOSAA.35.001511.
- [9] Durnin, J. Exact solutions for nondiffracting beams. I. The scalar theory // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1987. – Vol. 4(4). – P. 651-654.
- [10] Lopez-Mariscal, C. Observation of parabolic nondiffracting optical fields / C. Lopez-Mariscal, M.A. Bandres, J.C. Gutierrez-Vega, S. Chavez-Cerda // *Opt. Express*. – 2005. – Vol. 13. – P. 2364-2369.
- [11] McLeod, J.H. The axicon: a new type of optical element / J.H. McLeod // *J. Opt. Soc. Am.* – 1954. – Vol. 44. – P. 592-597.
- [12] Vasara, A. Realization of general nondiffracting beams with computer generated holograms / A. Vasara, J. Turunen, A.T. Friberg // *J. Opt. Soc. Am. A*. – 1989. – Vol. 6. – P. 1748-1754.
- [13] Kotlyar, V.V. Calculation of phase formers of non-diffracting images and a set of concentric rings / V.V. Kotlyar, S.N. Khonina, V.A. Soifer // *Optik*. – 1996. – Vol. 102(2). – P. 45-50.
- [14] Anguiano-Morales, M. Different field distributions obtained with an axicon and an amplitude mask / M. Anguiano-Morales, A. Martinez, M.D. Iturbe-Castillo, S. Chavez-Cerda // *Optics Communications*. – 2008. – Vol. 281. – P. 401-407.
- [15] Хонина, С.Н. Простой способ эффективного формирования различных бездифракционных лазерных пучков // *Компьютерная оптика*. – 2009. – Т. 33, № 1. – С. 70-78.
- [16] Lu, J. Diffraction-limited beams and their applications for ultrasonic imaging and tissue characterization / J. Lu, J.F. Greenleaf // *Proc. SPIE*. – 1992. – Vol. 1733. – P. 92-119.
- [17] Garces-Chavez, V. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam / V. Garces-Chavez, D. McGloin, H. Melville, W. Sibbett, K. Dholakia // *Nature*. – 2002. – Vol. 419. – P. 145-147.
- [18] Wang, K. Influence of the incident wave-front on intensity distribution of the nondiffracting beam used in large-scale measurement / K. Wang, L. Zeng, Ch. Yin // *Opt. Commun.* – 2003. – Vol. 216. – P. 99-103.
- [19] Fortin, M. Optical tests with Bessel beam interferometry / M. Fortin, M. Piché, E.F. Borra // *Optics Express*. – 2004. – Vol. 2(24). – P. 5887-5895.
- [20] Leitgeb, R.A. Extended focus depth for Fourier domain optical coherence microscopy / R.A. Leitgeb, M. Villiger, A.H. Bachmann, L. Steinmann, T. Lasser // *Opt. Lett.* – 2006. – Vol. 31(16). – P. 2450-2452.
- [21] Cizmar, T. Generation of multiple Bessel beams for a biophotonics workstation / T. Cizmar, V. Kollarov, X. Tsampoula, F. Gunn-Moore, W. Sibbett, Z. Bouchal, K. Dholakia // *Optics Express*. – 2008. – Vol. 16(18). – P. 14024-14035.
- [22] Khonina, S.N. Creating order with the help of randomness: generating transversely random, longitudinally invariant vector optical fields / S.N. Khonina, I. Golub // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40(17). – P. 4070-4073. DOI: 10.1364/OL.40.004070.
- [23] Huisken, J. Optical sectioning deep inside live embryos by selective plane microscopy / J. Huisken, J. Swoger, F.D. Bene, J. Wittbrodt, E.H.K. Stelzer // *Science*. – 2004. – Vol. 305. – P. 1007-1009.
- [24] Tomer, R. Shedding light on the system: Studying embryonic development with light sheet microscopy / R. Tomer, K. Khairy, P.J. Keller // *Current Opinion in Genetics & Development*. – 2011. – Vol. 21(5). – P. 558-565.
- [25] Planchon, T.A. Rapid three-dimensional isotropic imaging of living cells using Bessel beam plane illumination // *Nat. Methods*. – 2011. – Vol. 8. – P. 417-423.
- [26] Bassi, A. Optical tomography complements light sheet microscopy for in toto imaging of zebrafish development / A. Bassi, B. Schmid, Huisken // *Development J*. – 2015. – Vol. 142. – P. 1016-1020.
- [27] Aakhte, M. SSPIM: a beam shaping toolbox for structured selective plane illumination microscopy / M. Aakhte1, E.A. Akhlagh, J. Müller // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – P. 10067. DOI: 10.1038/s41598-018-28389-8.

- [28] Мухаметгалеев, И.В. Итерационный алгоритм расчета изображений, обладающих бездифракционными свойствами, на основе выделения узкого спектрального кольца / И.В. Мухаметгалеев, С.Н. Хонина // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва. – 2010. – Т. 4, № 24. – С. 238-246.
- [29] Агафонов, А.А. Моделирование формирования и распространения устойчивых к дифракции лазерных пучков // Сборник трудов международной конференции «Информационные технологии и нанотехнологии 2016» (ИТНТ-2016). – Самара: Новая техника. – 2016. – С. 210-216.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты: 18-37-00056, 19-02-00551).

Calculation of diffractive optical elements for the formation of illuminating beams in plane microscopy

P.A. Khorin¹, S.N. Khonina^{1,2}

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Image Processing Systems Institute of RAS - Branch of the FSRC "Crystallography and Photonics" RAS, Molodogvardejskaya street 151, Samara, Russia, 443001

Abstract. In this paper the calculation and study of diffractive optical elements (DOE) for the formation of a diffraction-free beam in the form of a thin light sheet are performed. A beam of this type can be used in planar microscopy. The calculation of DOEs is based on an iterative algorithm based on quantization of the phase function.