

# Моделирование криволинейных дифракционных решеток для генерации оптических вихрей

А.Б. Дубман

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

Самара, Россия

anna.dubman11@gmail.com

**Аннотация**—В данной работе продемонстрированы результаты моделирования генерации вихревых конических пучков с использованием бинарной криволинейной решетки.

**Ключевые слова**— конический вихревой пучок, функция Бесселя, бинарная криволинейная решетка.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Оптические вихревые (ОВ) пучки использовались в захвате и манипулировании частицами [1], взаимодействии лазера с веществом [2]. Это лишь небольшая часть того, где ОВ пучки нашли свое применение. Для генерации ОВ пучков вдоль оптической оси можно использовать спиральные фазовые пластинки [3], спиральные аксиконы [4], спиральные линзы [5] и астигматические преобразователи [6]. В некоторых приложениях необходимо одновременно формировать несколько ОВ пучков разного порядка. Для этого используются дифракционные оптические элементы [7], поскольку они генерируют различные ОВ пучки в разных порядках дифракции.

В решетках «изогнутой вилки» [8, 9] фаза вихря согласуется не только с линейной несущей компонентой, отклоняющей пучок под углом к оптической оси, но также и с коническим волновым фронтом. Такие решетки использовались для формирования вихревых пучков Бесселя.

В данной работе была поставлена задача моделирования генерации вихревых конических пучков с использованием бинарной криволинейной решетки.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Функция Бесселя  $j_m$  определяется формулой [10]

$$j_m(x) = 2^m \Gamma(m+1) x^{-m} J_m(x), \quad (1)$$

где  $J_m(\cdot)$  – функция Бесселя первого рода с индексом  $m$

$$J_m(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k! \Gamma(m+k+1)} \left(\frac{x}{2}\right)^{m+2k}. \quad (2)$$

На рис. 1 представлены амплитуда и фаза функции Бесселя  $J_m(ar)$  при  $a = 7$  и  $m = 1$ , а также показано преобразование Фурье от функции Бесселя.

Возьмем одномодовый Бесселевский пучок, сформированный ДОО [11]:

$$U(r, \varphi) = C_{m,a} J_m(ar) e^{im\varphi}, \quad (3)$$

где  $a = 7$  и  $m = 1$ ,  $C_{m,a} = 1$ . Амплитудно-фазовая картина входного распределения и ПФ от одномодового пучка Бесселя изображено на рис. 2.

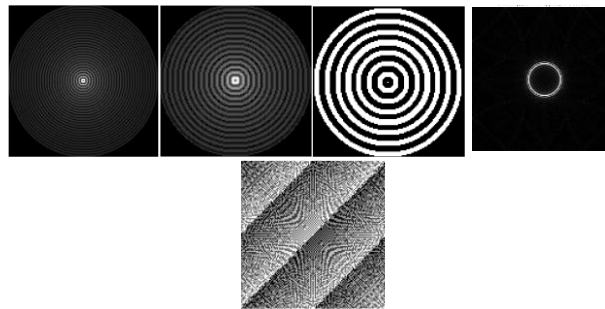


Рис. 1. Амплитуда и фаза функции Бесселя  $J_m(ar)$ , а также ПФ функции Бесселя

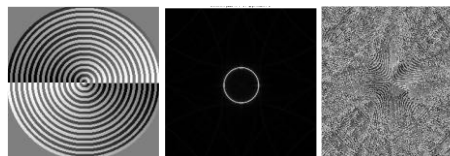


Рис. 2. Амплитуда и фаза моды Бесселя, а также ПФ от одномодового пучка Бесселя

При умножении функции  $U(r, \varphi)$  на несущую в виде  $e^{icx}$  ( $c$  – действительное число) будет происходить смещение кольцевого пространственного спектра пучка Бесселя (см. Таблицу I).

Таблица I. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ ОТ  $U_c(r, \varphi)$

	c = 25	c = 50	c = 75
Амплитуда			

При варьировании параметра  $c$  наблюдаем сдвиг кольца в фокальной плоскости после преобразования Фурье.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Рассмотрим фазово-оптический элемент с передаточной функцией следующего типа [12]:

$$\tau(r, \varphi) = e^{iar+im\varphi} e^{i\beta r \cos(\varphi)}, \quad r < R, \quad (4)$$

где  $e^{iar+im\varphi}$  – спиральный аксикон, образующий  $m$ -порядок вихревого пучка Бесселя;  $e^{i\beta r \cos(\varphi)} = e^{i\beta x}$  – призматическая составляющая, соответствующая линейной несущей, отклоняющей пучок от оптической оси.

Далее для моделирования будем использовать бинарный аналог дифракционного элемента, определяемого (5):

$$\tau(r, \varphi) = e^{i\frac{\pi}{2}(\text{sgn}[\cos(\alpha r + \beta r \cos(\varphi) + m\varphi)] - 1)}, r < R. \quad (5)$$

Создадим набор вихревых конических пучков. При моделировании элемент с передаточной функцией, определяемой (4) и дополненной линзой с фокусом  $f = 800$  мм, освещался плоским лазерным пучком с длиной волны  $\lambda = 532$  нм. Радиус элемента был взят 1 мм.

Уравнение (5) умножим на  $e^{im_0\varphi}$

$$\tau_*(r, \varphi) = \tau(r, \varphi) \cdot e^{im_0\varphi}, \quad (6)$$

где  $m_0$  примем равным 3.

Показаны результаты моделирования генерации вихревых конических пучков с использованием бинарной криволинейной решетки, определяемой (5) с параметрами:  $m = 0$  и  $m = 1$ ,  $b = 30$  мм<sup>-1</sup>,  $a = 10$  мм<sup>-1</sup> (см. Таблицу II), а также  $a = 20$  мм<sup>-1</sup> (см. Таблицу III). Количество разбиений было взято 512.

Таблица II. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ КОНИЧЕСКИХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ ПРИ  $\alpha = 10$  мм<sup>-1</sup>


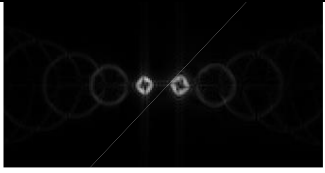
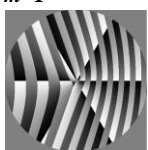
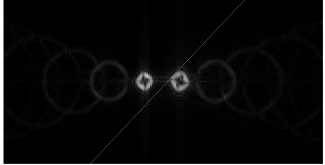

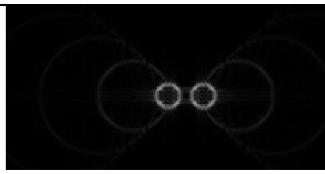

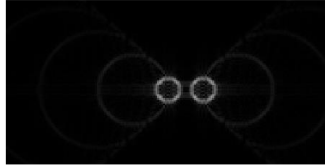
Фаза входного поля $\tau(r, \varphi)$	Амплитуда ПФ
$m=0$ 	
$m=1$ 	

Таблица III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕНЕРАЦИИ ВИХРЕВЫХ КОНИЧЕСКИХ ПУЧКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИНАРНОЙ КРИВОЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКИ ПРИ  $\alpha = 20$  мм<sup>-1</sup>

Фаза входного поля $\tau(r, \varphi)$	Амплитуда ПФ
$m=0$ 	
$m=1$ 	

Приведенные результаты моделирования демонстрируют возможность формирования пары идеальных оптических вихрей [13, 14], радиус которых не зависит от порядка вихревого пучка  $m$ . Радиус формируемых пучков определяется параметром  $\alpha$ , а расстояние между ними регулируется параметром  $\beta$  призматической составляющей.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы результаты моделирования генерации вихревых конических пучков с использованием бинарной криволинейной решетки. Показана возможность формирования пары идеальных оптических вихрей с варьруемыми параметрами.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Paterson, L. Controlled rotation of optically trapped microscopic particles / L. Paterson, M.P. MacDonald, J. Arlt, W. Sibbett, P.E. Bryant, K. Dholakia // Science. – 2001. – Vol. 292. – P. 912-914.
- [2] Toyoda, K. Using optical vortex to control the chirality of twisted metal nanostructures / K. Toyoda, K. Miyamoto, N. Aoki, R. Morita, T. Omatsu // Nano Lett. – 2012. – Vol. 12. – P. 3645-3649.
- [3] Beijersbergen, M.W. Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phase plate / M.W. Beijersbergen, R.P.C. Coerwinkel, M. Kristensen, J.P. Woerdman // Opt. Commun. – 1994. – Vol. 112. – P. 321-327.
- [4] Kotlyar, V.V. Diffraction of a finite-radius plane wave and a Gaussian beam by a helical axicon and a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, O.Y. Moiseev, V.A. Soifer // J. Opt. Soc. Am. – 2007. – Vol. A 24. – P. 1955-1964.
- [5] Heckenberg, N.R. Generation of optical phase singularities by computer-generated holograms / N.R. Heckenberg, R. McDuff, C.P. Smith, A.G. White // Opt. Lett. – 1992. – Vol. 17. – P. 221-223.
- [6] Beijersbergen, M.W. Astigmatic laser mode converters and transfer of orbital angular momentum / M.W. Beijersbergen, L. Allen, H.E.L.O. van der Veen, J.P. Woerdman // Opt. Commun. – 1993. – Vol. 96. – P. 123-132.
- [7] Khonina, S.N. Generation and selection of laser beams represented by a superposition of two angular harmonics / S.N. Khonina, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, K. Jefimovs, J. Turunen // J. Mod. Opt. – 2004. – Vol. 51. – P. 761-773.
- [8] Topuzoski, S. Generation of optical vortices with curved fork-shaped holograms / S. Topuzoski // Opt. Quantum Electron. – 2016. – Vol. 48. – P. 1-6.
- [9] Alda, J. Laser and Gaussian beam propagation and transformation / J. Alda // Encyclopedia of Optical Engineering. – New York: “Marcel Dekker”, 2003.
- [10] Abreu, L.D. A q-linear analogue of the plane wave expansion / L.D. Abreu, O. Ciaurri, J.L. Varona // Advances in Applied Mathematics. – 2013. – Vol. 50. – P. 415-428.
- [11] Балалаев, С.А. Реализация быстрого алгоритма преобразования Кирхгофа на примере бесселевых пучков / С.А. Балалаев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2006. – Т. 30. – С. 69-73.
- [12] Khonina, S.N. Application of binary curved fork grating for the generation and detection of optical vortices outside the focal plane / S.N. Khonina, A.V. Usinov, M.S. Kirilenko, A.A. Kuchmizhak, A.P. Porfirev // J. Opt. Soc. Am. B. – 2020. – Vol. 37(6). – P. 1714-1721.
- [13] Ostrovsky, A.S. Generation of the “perfect” optical vortex using a liquid-crystal spatial light modulator / A.S. Ostrovsky, C. Rickenstorff, V. Arrizón // Opt. Lett. – 2013. – Vol. 38. – P. 534-536.
- [14] Khonina, S.N. Caustics of non-paraxial perfect optical vortices generated by toroidal vortex lenses / S.N. Khonina, S.I. Kharitonov, S.G. Volotovskiy, V.A. Soifer // Photonics. – 2021. – Vol. 8. – P. 259.