

# Моделирование формирования вихревых пучков при дифракции на тонкой апертуре в виде квадратного контура

В.И. Логачев

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
Самара, Россия  
walle.log@yandex.ru

**Аннотация** — В данной работе численно исследуется формирование вихревого пучка при дифракции на тонкой апертуре в виде квадратного контура, в том числе при наличии спиральной фазовой пластинки (СФП).

**Ключевые слова** — преобразование Френеля, оптические вихревые пучки Бесселя, квадратный контур, орбитальный угловой момент, топологический заряд

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия внимание исследователей, работающих в области лазерной физики и когерентной оптики, привлекли световые поля с кольцевой формой распределения интенсивности, получившие название “оптические вихри”. Под данным названием эти световые поля впервые были рассмотрены в 1989 году [1]. Оптические вихри являются основным объектом изучения сингулярной оптики [2, 3].

Одним из самых важных свойств оптических вихрей является наличие орбитального углового момента (ОУМ), существование которого у полей данного типа впервые было показано в [4]. Данное свойство оптических вихрей находит применение в таких областях, как манипуляция микро- и нанообъектами с помощью оптических пинцетов и пучков типа “гаечный ключ” (optical spanner) [5–7], оптические коммуникации [8–11], а также является ключевым для развития таких перспективных направлений, как квантовые вычисления и квантовые коммуникации [11].

В задачах оптического захвата и манипулирования зачастую встает вопрос выбора распределения интенсивности. В данной работе рассматривается квадратный контур и его влияние на формируемые с учётом и без учёта СФП пучки. Численно показано, что пучок, сформированный квадратным контуром без наложения СФП, не обладает ОУМ, однако при наличии СФП дифракция на квадратном контуре оказывает влияние на исходный ОУМ формируемого пучка.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Оптический вихрь обладает винтовой фазой, описываемой в поперечном сечении уравнением  $e^{im\varphi}$ , где  $m$  – топологический заряд,  $\varphi$  – азимутальный угол.

Квадратный контур был выбран для исследований в связи с симметрией и наличием аналитического выражения в полярных координатах:

$$r = \frac{2}{\sqrt{2 + \sqrt{2 + 2 \cos(4\varphi)}}}. \quad (1)$$

Согласно скалярной теории дифракции в приближении Френеля комплексная амплитуда на расстоянии  $z$  может быть выражена с помощью интеграла дифракции [11], записываемого в виде (2):

$$E(x, y, z) = \frac{e^{ikz}}{i\lambda z} \int \int_{-\infty}^{+\infty} T(x', y') e^{\frac{ik[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{2z}} dx' dy', \quad (2)$$

где  $T(x, y)$  – апертура контурной щели.

## 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для моделирования распространения пучка Бесселя используется быстрое преобразование Френеля. На рис. 1 представлен вид квадратного контура при параметрах: сторона квадрата  $a = 7$  мм, толщина контура  $d = 0,1$  мм, радиус апертуры = 10 мм.

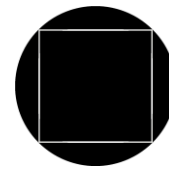


Рис. 1. Поперечное сечение щели в виде квадратного контура ( $a = 7$  мм,  $d = 0,1$  мм, радиус апертуры = 10 мм)

На рис. 2 представлены интенсивность, фаза и распределение плотности ОУМ пучков, образованных квадратным контуром без наложения СФП, представленным на рис. 1, при варьировании расстояния от 10 до 50 метров. Из результатов видно, что квадратный контур сам по себе не порождает вихревые пучки так как орбитальный угловой момент (ОУМ) = 0.

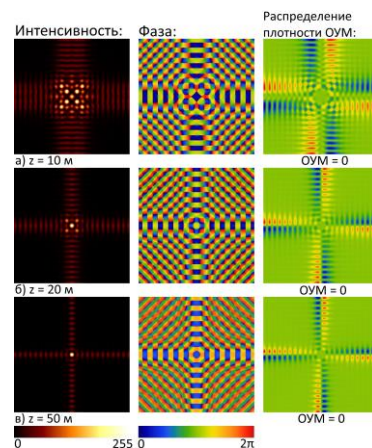


Рис. 2. Распределение интенсивности, фазы и ОУМ пучков без наложения СФП (размер картин 10 мм × 10 мм) для квадратного контура, представленного на рис. 1, на расстояниях от 10 до 50 м

На рис. 3 представлены интенсивность, фаза и распределение плотности ОУМ пучков, сформированных при дифракции на квадратном контуре при наличии дополнительной СФП на входе. На рисунке видно усложнение картины дифракции при увеличении исходного ОУМ пучка. Можем выделить, что на различных расстояниях формируются вихревые пучки,

имеющие ОУМ меньший расчётного на 15-20%, при этом влияние квадратного контура не зависит от расстояния и слабо зависит от топологического заряда СФП.

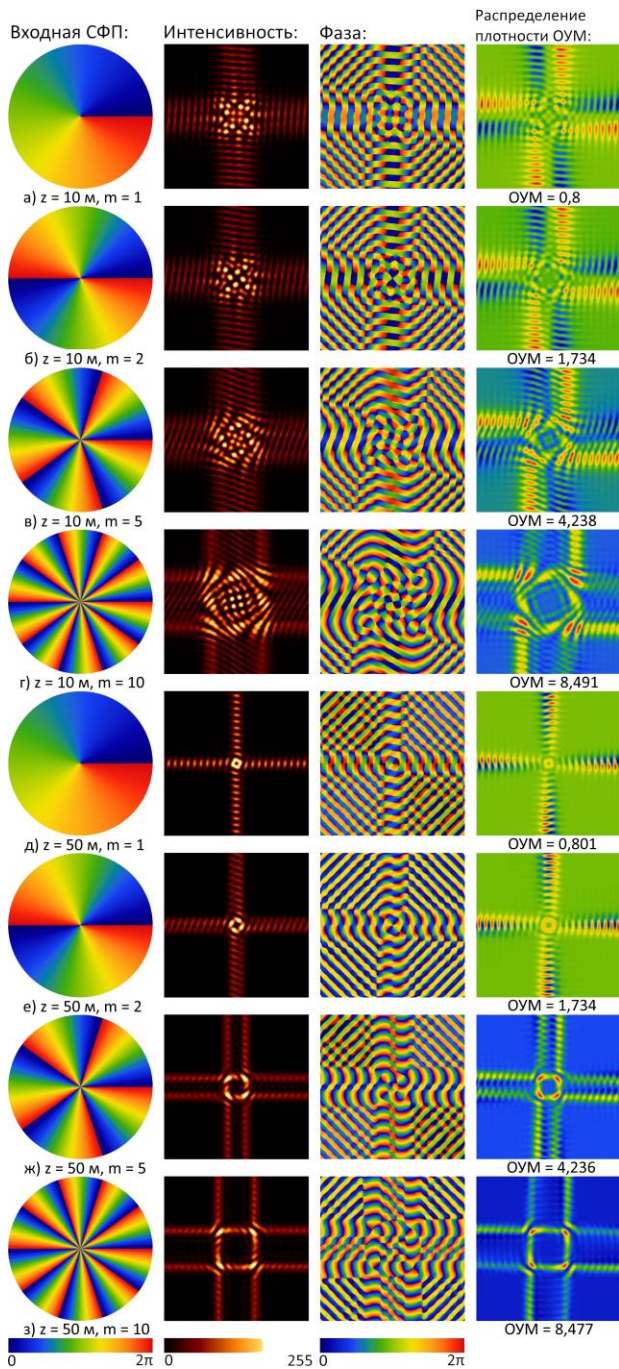


Рис. 3. Распределение интенсивности, фазы и ОУМ вихревых пучков при наличии СФП на входе (размер картин 10 мм × 10 мм) для квадратного контура на расстоянии 10 метров (сверху) и 50 метров (снизу)

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе численно показано, что пучок, сформированный квадратным контуром без наложения СФП, не обладает ОУМ, однако при наличии СФП, дифракция на квадратном контуре приводит к уменьшению исходного ОУМ на 15-20%. При этом влияние квадратного контура не зависит от расстояния и слабо зависит от топологического заряда СФП. Полученные результаты могут быть полезны в области оптического захвата и манипулирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Couillet, P. Optical vortices / P. Couillet, L. Gil, F. Rocca. // *Optics Communications*. – November 1989. – Vol. 73(5). – P. 403-408.
- [2] Soskin, M. Singular optics / M. Soskin, M. Vasnetsov. // *Progress in Optics*. – 2001. – Vol. 42. – P. 219-276.
- [3] Fatkhiev, D.M. Recent advances in generation and detection of orbital angular momentum optical beams—a review. / D.M. Fatkhiev, M.A. Butt, E.P. Grakhova, R.V. Kutlyarov, I.V. Stepanov, N.L. Kazanskiy, S.N. Khonina, V.S. Lyubopytov, A.K. Sultanov // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21(15) – P. 4988.
- [4] Allen, L. Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes / L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw, J. P. Woerdman. // *Physical Review A*. – June 1992. – Vol. 45(11). – P. 8185–8189.
- [5] He, H. Direct observation of transfer of angular momentum to absorptive particles from a laser beam with a phase singularity / H. He, M. E. J. Friese, N. R. Heckenberg, H. Rubinsztein-Dunlop. // *Physical Review Letters*. – July 1995. – Vol. 75(5). – P. 826-829.
- [6] Simpson, N. B. Mechanical equivalence of spin and orbital angular momentum of light: an optical spanner / N. B. Simpson, K. Dholakia, L. Allen, M. J. Padgett. // *Optical Letters*. – 1997. – Vol. 22(1). – P. 52-54.
- [7] Khonina, S.N. DOE-generated laser beams with given orbital angular moment: application for micromanipulation / S.N. Khonina, R.V. Skidanov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer, J. Turunen // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – Vol. 5962. – P. 59622W.
- [8] Willner, A.E. Optical communications using orbital angular momentum beams / A. E. Willner, H. Huang, Y. Yan, Y. Ren, N. Ahmed, G. Xie, C. Bao, L. Li, Y. Cao, Z. Zhao, J. Wang, M. P. J. Lavery, M. Tur, S. Ramachandran, A. F. Molisch, N. Ashrafi, S. Ashrafi // *Advances in Optics and Photonics*. – 2015. – Vol. 7(1). – P. 66-106.
- [9] Wang, J. Terabit free-space data transmission employing orbital angular momentum multiplexing / J. Wang, J.-Y. Yang, I. M, N. Ahmed, Y. Yan, H. Huang, Y. Ren, Y. Yue, M. Tur, A. E. Willner // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6(7). – P. 488-496.
- [10] Khonina, S.N. Spatial-light-modulator-based multichannel data transmission by vortex beams of various orders / S.N. Khonina, S.V. Karpeev, M.A. Butt // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 2988.
- [11] Rubinsztein-Dunlop, H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N. M. Litchinitser, N. P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J. P. Torres, T. W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A. B. Stilgoe, J. Romero, A. G. White, R. Fickler, A. E. Willner, G. Xie, B. McMorrin, A. M. Weiner // *Journal of Optics*. – 2016. – Vol. 19(1). – P. 5.