

# Моделирование изображения, получаемого системой вихревых гармонических линз

А.С. Хохлов<sup>1</sup>, Р.В. Скиданов<sup>1,2</sup>

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

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

**Аннотация.** Рассмотрена возможность получения изображений с использованием объектива на основе вихревых дифракционных линз. Была смоделирована система на основе двух вихревых гармонических линз, в которой распределение полной интенсивности было рассчитано с использованием преобразования Френеля. Получена ширина точечной дисперсионной функции равная 66 мкм.

## 1. Введение

Вихревые линзы представляют собой оптический прибор, формирующий вихревые световые пучки. Такие линзы трансформируют плоский фронт волны в винтообразный непрерывный волновой фронт. Расстояние между двумя соседними витками такого фронта будет равно длине волны, а сама линза представляет из себя спиралевидную структуру с уменьшающимся периодом, которая в фокальной плоскости их плоской волны формирует распределение интенсивности в форме кольца. В [1] рассмотрены вихревые дифракционные линзы, с помощью которых в фокальной плоскости формировались вихревые пучки. Также, как это было описано в [2] и [3], в которых рассматривалось формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами. В данной работе будет рассмотрена система из двух таких оптических элементов с одинаковыми по величине, но разными по знаку топологическими зарядами расположенными на двойном фокусном расстоянии друг от друга. Т.е. фактически это похоже на классическую афокальную системы с заменой обычных линз на вихревые. На выходе такой системы должно получиться довольно качественное изображение, что и проверяется в нашем исследовании.

## 2. Моделирование вихревых линз

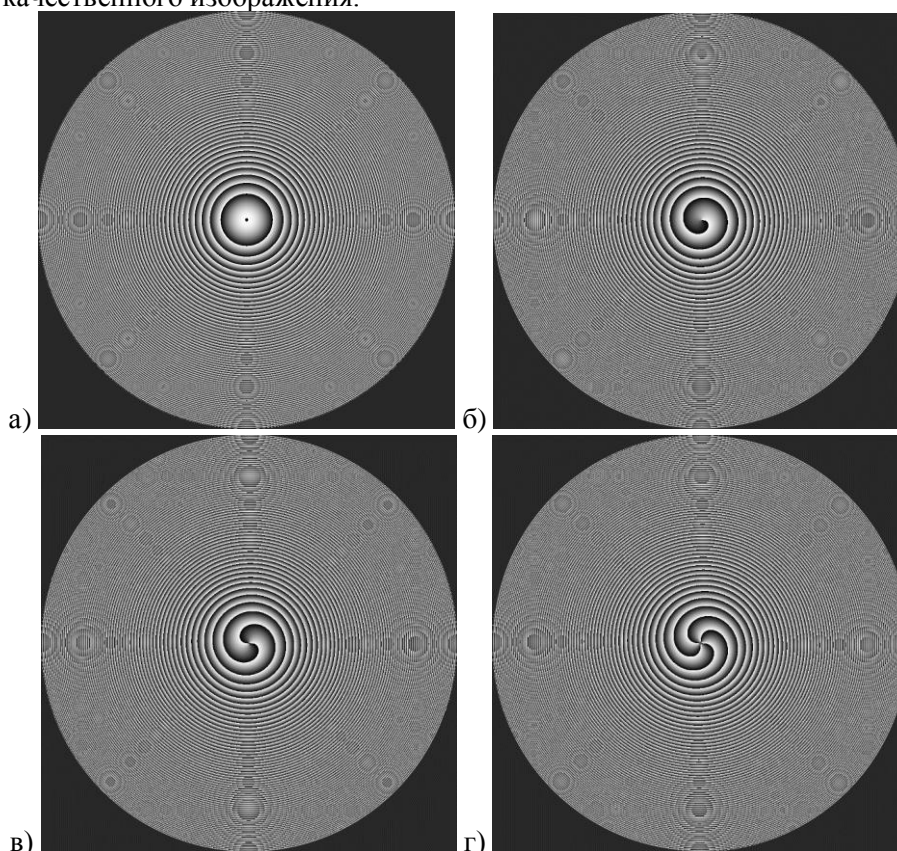
Фаза вихревой гармонической линзы соответствует формуле:

$$t(r, \lambda_0, \phi) = \frac{1}{\Delta N} \text{MOD}_{m\lambda_0} \left( \frac{r^2}{2f} - n\phi \right), \quad m = 1, 2, 3 \dots,$$

где  $n$  – топологический заряд, а  $r, \phi$  – полярные координаты,  $f$  – фокусное расстояние линзы. Полученные фазовые функции таких вихревых линз показаны на рисунке 1. На рис. 1а для сравнения приведена фазовая функция обычной дифракционной линзы.

Линзы на рис.1 были рассчитаны для длины волны 488 нм. На рис. 1бвг представлены фазовые функции линз с топологическими зарядами 1,2,3 соответственно. При использовании одной такой линзы, формируемое изображение неминуемо будет хуже, чем изображение,

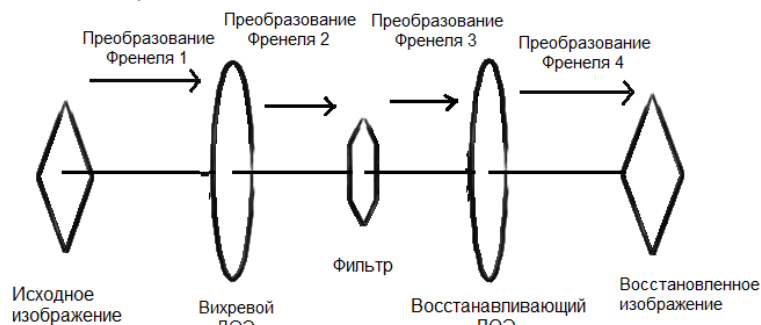
сформированное линзой с фазовой функцией, представленной на рис. 1а. Но, если объединить две такие линзы в систему, параметры которой были указаны выше, вполне возможно получение качественного изображения.



**Рисунок 1.** Фазовая плоскость вихревых линз при параметрах  $\lambda_0 = 488$  нм,  $\Delta N = 11$  мкм и  $n = 0$  (а),  $n = 1$  (б),  $n = 2$  (в),  $n = 4$  (г).

### 3. Моделирование изображения

Система моделировалась при помощи цепочки преобразований Френеля (рис.2). После каждого преобразования Френеля осуществлялось домножение полученного распределения на фазовую функцию соответствующего элемента.



**Рисунок 2.** Схема моделирования.

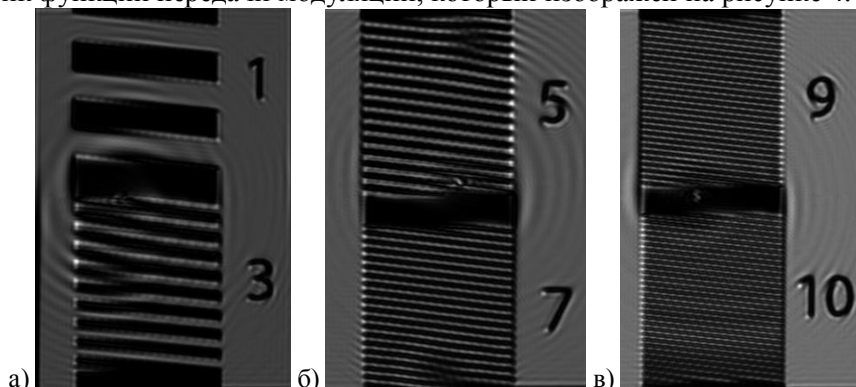
В качестве исходного изображения использовались участки стандартно светотехнической миры для исследования объективов.

Результаты моделирования формирования таких участков представлены на рисунке 3.

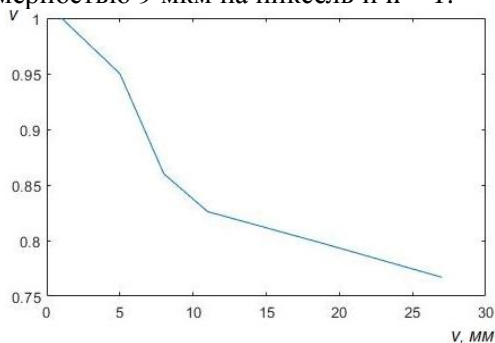
По яркостям смежных линий на полученных изображениях можно определить зависимость частотно-контрастной характеристики объектива от частоты линий по формуле:

$$T = \frac{(E_{max} - E_{min}) / (E_{max} + E_{min})}{(L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})},$$

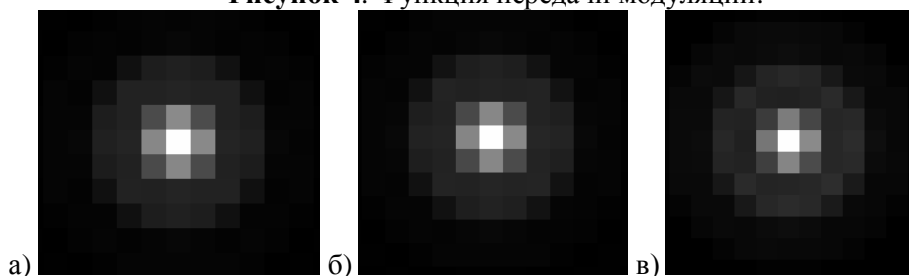
где  $E_{max}$ ,  $E_{min}$  - максимальная и минимальная освещённости результирующего изображения,  $L_{max}$ ,  $L_{min}$  максимальная и минимальная яркость оригинала. На основе этого выражения был получен график функции передачи модуляции, который изображен на рисунке 4.



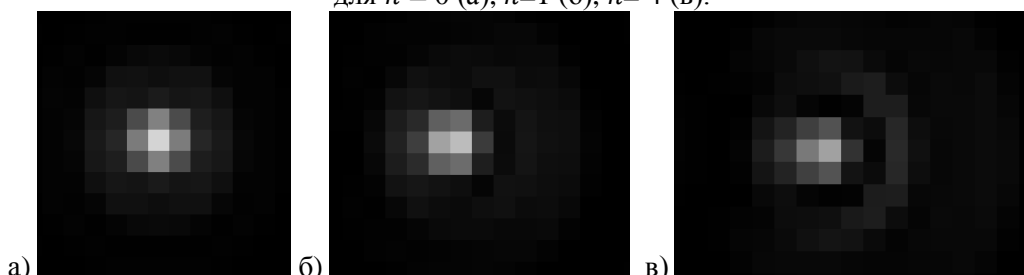
**Рисунок 3.** Результаты моделирования линий для штриховой миры с размерностью 9 мкм на пиксель и  $n = 1$ .



**Рисунок 4.** Функция передачи модуляции.



**Рисунок 5.** Результаты моделирования точки лежащей на оптической оси системы для  $n = 0$  (а),  $n=1$  (б),  $n= 4$  (в).



**Рисунок 6.** Результаты моделирования точки лежащей на расстоянии равном 1мм от оптической оси системы для  $n = 0$  (а),  $n=1$  (б),  $n= 4$  (в).

Кроме этого было осуществлено прямое моделирование формирования изображения точечного источника, расположенного в передней фокальной плоскости первого элемента. На

рисунках 5-6 показаны результаты численного моделирования источника размером 11 микронметров который располагали на оптической оси (рис.5а) и на краю поля зрения (рис.6абв) для систем содержащих линзы с разными топологическими зарядами.

Как видно из полученных результатов, на оптической оси системы функция рассеивания точки вихревой линзы визуально схожа с функцией рассеивания точки обычной линзы. Однако вне оптической оси наблюдаются аберрации, схожие с классической аберрацией типа кома.

#### 4. Заключение

В работе была рассмотрена возможность получения изображений с использованием системы вихревых дифракционных линз. Показано, что качество изображения, получаемого в такой системе сопоставимо с простейшими рефракционными объективами. Получены результаты моделирования системы на основе двух вихревых гармонических линз, в которой распределение полной интенсивности было рассчитано с использованием преобразования Френеля. Получена функция передачи модуляции и функция рассеяния точки такой системы. Также были рассмотрены различия между функциями рассеивания точки с использованием линз с разными вихревыми числами и для различных расстояний от точки до оптической оси.

#### 5. Благодарности

Данная работа была выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-20045-мк).

#### 6. Литература

- [1] Скиданов, Р. В. Вихревые дифракционные линзы для формирования вихревых световых пучков / Р. В. Скиданов, С. В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 39, №5. – С. 674-677.
- [2] Genevet, P. Ultra-thin plasmonic optical vortex plate based on phase discontinuities / P. Genevet, N. Yu, F. Aieta, J. Lin, M.A. Kats, R. Blanchard, M.O. Scully, Z. Gaburro, F. Capasso // Applied Physics Letters. – 2012. – Vol. 100. – P.013101-1.
- [3] Скиданов, Р.В. Формирование пучков Бесселя вихревыми аксиконами / Р.В. Скиданов, С. В. Ганчевская // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 463-468.
- [4] Greisukh, G.I. Aberration properties and performance of a new diffractive-gradient-index high-resolution objective / G.I. Greisukh, E.G. Ezhov, S.A. Stepanov // Applied Optics. – 2001. – Vol. 40(16). – P. 2730-2735.
- [5] Хонина, С.Н. Бинарная линза: Исследование локальных фокусов / С.Н. Хонина, А.В. Устинов, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 339-346.
- [6] Kumar, V. Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power Renewable and Sustainable / V. Kumar, R.L. Shrivastava, S.P. Untawale // Energy Reviews. – 2015. – Vol. 44. – P. 376-390.
- [7] Казанский, Н.Л. Формирование изображений дифракционной многоуровневой линзой / Н.Л. Казанский, С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38, № 3. – С. 425-430.
- [8] Ando, T. Diffraction light analysis method for a diffraction grating imaging lens / T. Ando, T. Korenaga, M. Suzuki, J. Tanida // Applied Optics. – 2014. – Vol. 53. – P. 2532-2538.
- [9] Motogaito, A. Fabrication of Binary Diffractive Lenses and the Application to LED Lighting for Controlling Luminescence Distribution / A. Motogaito, K. Hiramatsu // Optics and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3. – P. 67-73.
- [10] Хонина, С.Н. Экспериментальное формирование различных бездифракционных лазерных пучков на основе диафрагмирования вихревого кольцевого пространственного спектра / С.Н. Хонина, Р.В. Скиданов, А.А. Морозов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Vol. 11(3). – С. 103-110.
- [11] Soifer, V. Vortex beams in turbulent media / V. Soifer, O. Korotkova, S. Khonina, E. Shchepakina // Computer Optics, 2016 – V. 40(5) – P. 605-624. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-605-624.

# Modeling the image obtained by a system of vortex harmonic lenses

A.S. Khokhlov<sup>1</sup>, R.V. Skidanov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

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

**Abstract.** The possibility of obtaining images using a system based on vortex diffraction lenses is considered. A system of two vortex harmonic lenses was simulated. In the system the total intensity distribution was calculated using the Fresnel transform. The width of the point dispersion function, which is 66  $\mu\text{m}$ , is obtained.