

Моделирование влияния aberrаций на формирование вихревых пучков при использовании спиральной фазовой пластинки

А.Т. Блашбанова¹

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

Аннотация

В данной работе исследуется влияние различных типов aberrаций на формирование вихревых пучков при использовании спиральной фазовой пластинки. Рассмотрены aberrации, связанные с изменением структуры оптического элемента, а также искажения освещающего пучка. Результаты моделирования могут быть полезны для анализа aberrаций оптических систем.

Ключевые слова

Аберрации, функции Цернике, вихревой пучок, спиральная фазовая пластинка

1. Введение

Аберрации оптической системы [1] могут быть связаны как с неидельностью оптических элементов, так и погрешностью их юстировки. Кроме того, искажения в формируемом поле могут возникать из-за aberrаций освещающего пучка. Наличие aberrаций приводит к искажению функции рассеяния точки (ФРТ) и ухудшению формируемого изображения. Известны различные способы детектирования и компенсации aberrаций [2], причем одним из подходов в случае малых искажений является детектирование по внефокальной ФРТ [3]. В этом случае вместо яркой световой точки формируется кольцевое распределение, искажения которого более заметны. В данной работе предлагается анализировать aberrации по искажению кольцевой структуры вихревого пучка. Так как вихревые пучки часто формируются с использованием спиральной фазовой пластинки (СФП) [4], то в работе исследуется влияние на картину в фокальной плоскости как искажений, связанных с изменением структуры СФП [5], так и aberrаций освещающего пучка. Во втором случае aberrации описываются с использованием функций Цернике [1].

Результаты моделирования могут быть полезны для анализа aberrаций оптических систем, в том числе системы человеческого глаза [6].

2. Результаты моделирования

Для моделирования искажений ФРТ вихревого пучка в фокальной плоскости использовалось преобразование Фурье:

$$F(u, v) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{\exp(-(x^2 + y^2))}{2\sigma^2} \right] f(x, y) \exp[-2\pi i(xu + yv)] dx dy \quad (1)$$

Искажения в структуре СФП моделировались внесением эллиптичности (a - коэффициент эллиптичности) и отклонения δ порядка вихревой сингулярности от целого числа m :

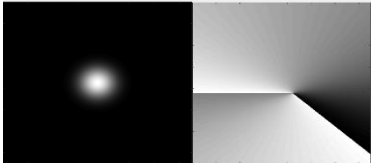
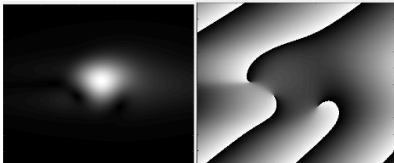
$$f_{Au}(x, y) = \exp \left[i(m \pm \delta) t g^{-1} \left(\frac{a * (y - y_0)}{x - x_0} \right) \right], \quad (2)$$

где a - коэффициент эллиптичности, $0 < \delta < 1$ – действительное число.

Результаты моделирования приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты моделирования искажений в структуре СФП(размер рис. 2 мм х 2 мм.)

	Вход (амплитуда и фаза)	Выход (амплитуда и фаза)
$(x_0, y_0) = (0.5, 0.5)$ $a = 2;$ $\delta = 0.5;$		

Влияние aberrаций, связанных с освещающим пучком, моделировалось с использованием функций Цернике. Имеется полный набор ортогональных функций с угловыми гармониками в окружности радиуса r_0 . Это круговые многочлены Цернике [1]:

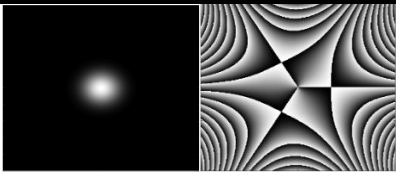
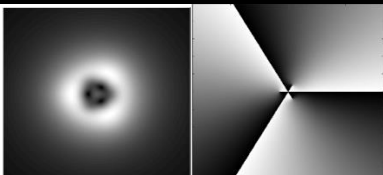
$$\Psi_{nm}(r, \varphi) = \sqrt{\frac{n+1}{\pi r_0^2}} R_n^m(r) \begin{cases} \cos(m\varphi) \\ \sin(m\varphi) \end{cases}, \quad (3)$$

где $R_n^m(r) = \sum_{p=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^p (n-p)!}{p! (\frac{n+m}{2}-p)! (\frac{n-m}{2}-p)!} \left(\frac{r}{r_0}\right)^{n-2p}$ - радиальные полиномы Цернике.

При моделировании использовалось искажение вихревого пучка за счет aberrаций волнового фронта: $f_z(x, y) = \exp\left[imtg^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)\right] \exp(2\pi ib\psi)_{nm}(x, y)$, где коэффициент $0 < b < 1$.

Таблица 2

Результаты моделирования aberrаций освещающего пучка(размер рис. 2 мм х 2 мм.)

(n,m)	Вход (амплитуда и фаза)	Выход (амплитуда и фаза)
(3,-3)		

3. Заключение

В данной работе выполнено исследование влияния на картину ФРТ вихревого пучка при наличии aberrаций, связанных с изменением структуры СФП, а также освещающего пучка. Результаты моделирования могут быть полезны для анализа aberrаций оптических систем.

4. Литература

- [1] Born, M. Principles of Optics / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1968.
- [2] Welford, W.T. Aberrations of optical systems / W.T Welford. – Bristol, Philadelphia: Adam Hilger Press, 1986.
- [3] Tokovinin, A. DONUT: measuring optical aberrations from a single extrafocal image / A. Tokovinin, S. Heathcote // Publ. Astron. Soc. Pac. – 2006. – Vol. 118(846). – P. 1165-1175.
- [4] Kotlyar, V.V. Simple optical vortices formed by a spiral phase plate / V.V. Kotlyar, A.A. Kovalev, R.V. Skidanov, S.N. Khonina, O.Yu. Moiseev, V.A. Soifer // J. Opt. Technol. – 2007. – Vol. 74(10). – P. 686-693.
- [5] Wang, J. Study of Characteristics of Vortex Beam Produced by Fabricated Spiral Phase Plates / J. Wang, A. Cao, M. Zhang, H. Pang, S. Hu, Y. Fu, L. Shi, Q. Deng // IEEE J. Phot. – 2016. – Vol. 8. DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2540362.
- [6] Lombardo, M. Wave aberration of human eyes and new descriptors of image optical quality and visual performance / M. Lombardo, G. Lombardo // Journal of Cataract & Refractive Surgery. – 2010. – Vol. 36(2). – P. 313-331. DOI: 10.1016/j.jcrs.2009.09.026.