САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY
ИСОИ IPSI

Detection enhancement of the optical medium spatial anisotropy using the lens supplemented with a diffractive axicon

P.A. Khorin
S.N. Khonina (supervisor)

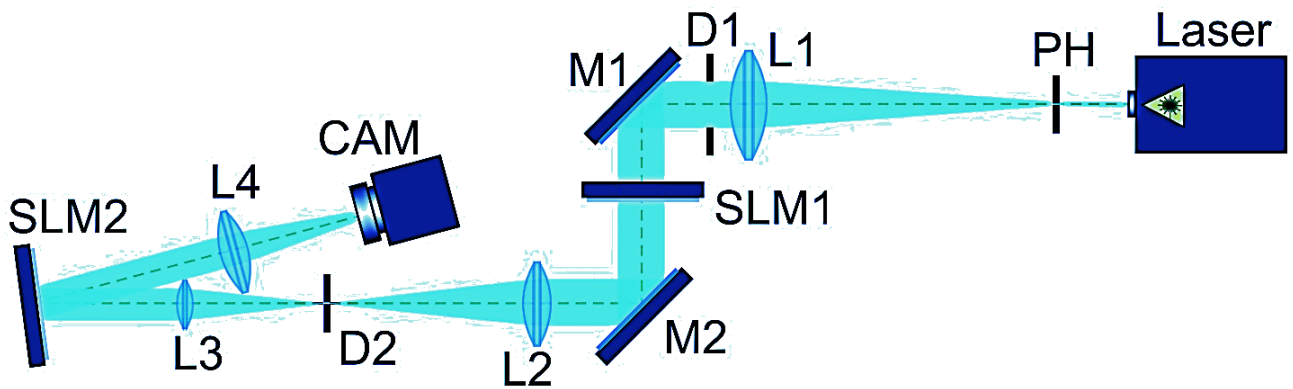
Samara National Research University

IPSI RAS - branch of the FSRC
«Crystallography and Photonics» RAS

Russia, Samara, 2021

Abstract

This article investigates the possibility of detecting spatial anisotropy and visualizing weak wave aberrations when the lens is supplemented with a diffractive axicon. Fresnel transforms are used to simulate the formation of intensity distributions at different distances from the input plane. The results of numerical simulation of diffraction by a composite element (lens+axicon) under illumination by an aberrated wavefront are presented. A significant increase in the efficiency of visualization of weak wave aberrations is shown when using the proposed method based on the deviation of the intensity pattern for an aberrated and ideal wavefront



Introduction

Известно, что астигматические искажения в оптических системах и анизотропия оптической среды заметно сказываются на структуре Бесселева пучка, распространяющего в такой системе [1, 2]. Также известно, что Бесселев пучок формируется аксиконом, в том числе дифракционным [3]. Таким образом, дополнение оптической системы аксиконом позволит визуализировать имеющиеся аберрации.

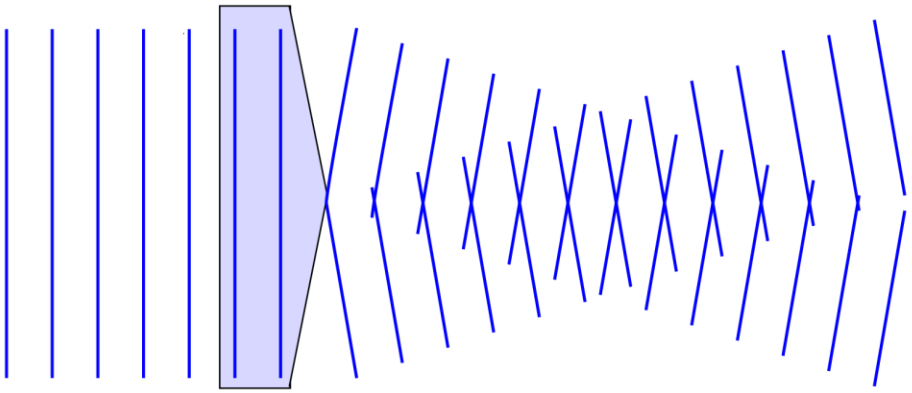


диаграмма аксиконической линзы и получаемого луча Бесселя

1. Khonina S.N., Paranin V.D., Ustinov A.V., Krasnov A.P., Astigmatic transformation of Bessel beams in a uniaxial crystal, Optica Applicata, Vol. 46(XLVI), No. 1, p. 5-18 (2016) https://doi.org/10.5277/oa160101
2. Ustinov A. V., Khonina S. N., Analysis of the amplitude on optical axis at the incidence of the conical wave on an astigmatic lens, Proceedings SPIE V. 11146, 111460H-(9p) (2019); https://doi.org/ 10.1117/12.2527241
3. Vasara, A.; Turunen, J.; Friberg, A. Realization of general nondiffracting beams with computer generated holograms. J. Opt. Soc. Am. A 1989, 6, 1748–1754

Results and discussion

В данной работе исследуется возможность детектирования пространственной анизотропии и визуализации слабых волновых аберраций при дополнении линзы дифракционным аксиконом. Для моделирования формирования распределений интенсивности на различных расстояниях от входной плоскости используется преобразования Френеля:

$$U(u,v,z)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\exp\left[{}^{ik}\!/_{2z}(x^2+y^2)\right]\exp\left[-2\pi i(xu+yv)\right]dxdy=\Im\left\{f(x,y)\exp\left[{}^{ik}\!/_{2z}(x^2+y^2)\right]\right\}$$

$$F(u,v)=\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(x,y)\exp\left[-2\pi i(xu+yv)\right]dxdy=\Im\left\{f(x,y)\right\}$$

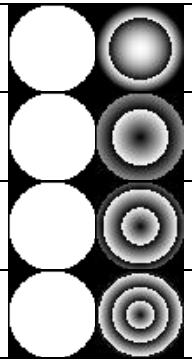
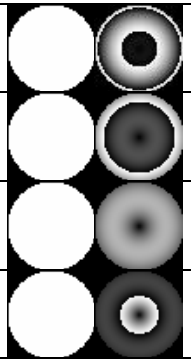
При падении на оптический элемент плоской волны будет формироваться поле, комплексная амплитуда которого вдоль оптической оси в условиях применимости приближения Френеля (параксиальное приближение) может быть вычислена по представленной формуле.

Results and discussion

Приведены результаты численного моделирования дифракции на составном элементе линза+аксикон при освещении аберрированным волновым фронтом. Показано существенное повышение эффективности визуализации слабых волновых аберраций при использовании предложенного метода на основе отклонения картины интенсивности для аберрированного и идеального волнового фронта.

Фактически линзакон представляет собой оптический элемент, состоящий из линзы и аксикона, который можно описать следующим соотношением:

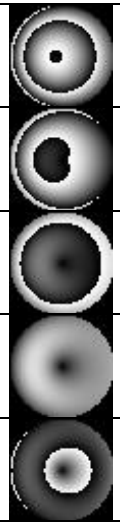
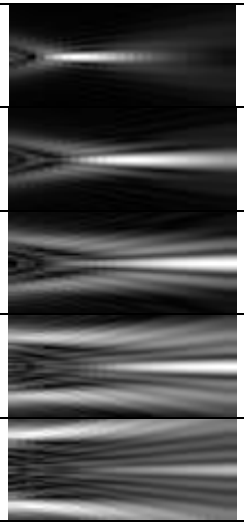
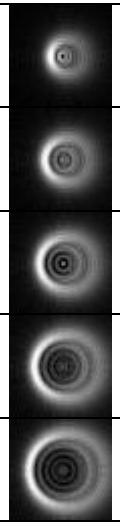
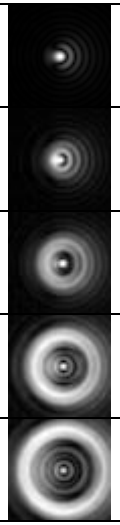
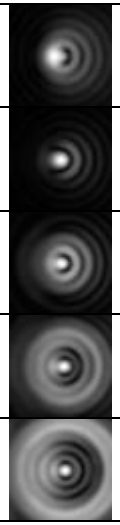
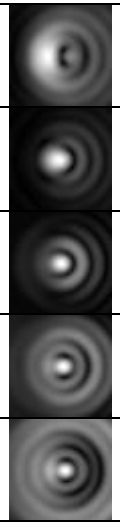
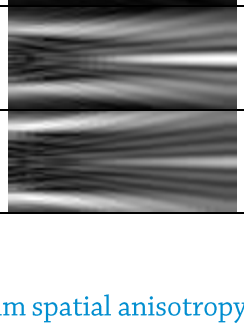
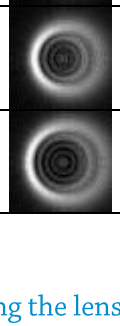
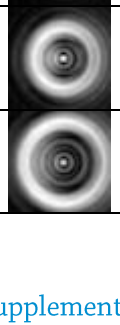
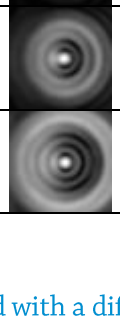
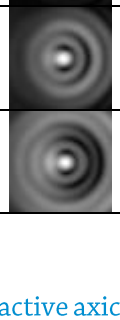
$$E(x,y) = E_1(x,y)E_2(x,y) = \exp\left[-ik\frac{r^2}{2f}\right]\exp\left[ik\beta r\right]$$

Линза E_1, f=500 мм	β	Аксикон E_2	Линзакон E
	5/2π		
	10/2π		
	15/2π		
	20/2π		

Results and discussion

Рассмотрим действие линзакона при помощи преобразования Френеля для f=500мм на примере аберрации W типа кома (в терминах функций Цернике n=3, m=1) с уровнем α=0,25 длин волн:

Амплитуда и фаза: а – полином Цернике Z_{31}, б – волновая аберрация, в – ФРТ

β	*E*W*	z				
		250-1000	250	500	750	1000
0						
5/2π						
10/2π						
15/2π						
20/2π						

Results and discussion

Были исследованы различные типы аберраций волнового фронта в терминах полиномов Цернике до 4 порядка. В результате дифракции аберрированного волнового фронта на составном элементе линзаконе на различных расстояниях от входной плоскости (в том числе, и в фокальной) формируются более сложные картины распределения интенсивности, чем при использовании отдельной линзы.

Предлагается рассчитать среднею квадратичную ошибку (MSE) полученных распределений интенсивности (I_p – ФРТ плоской волны, I_q - ФРТ аберрированного волнового фронта):

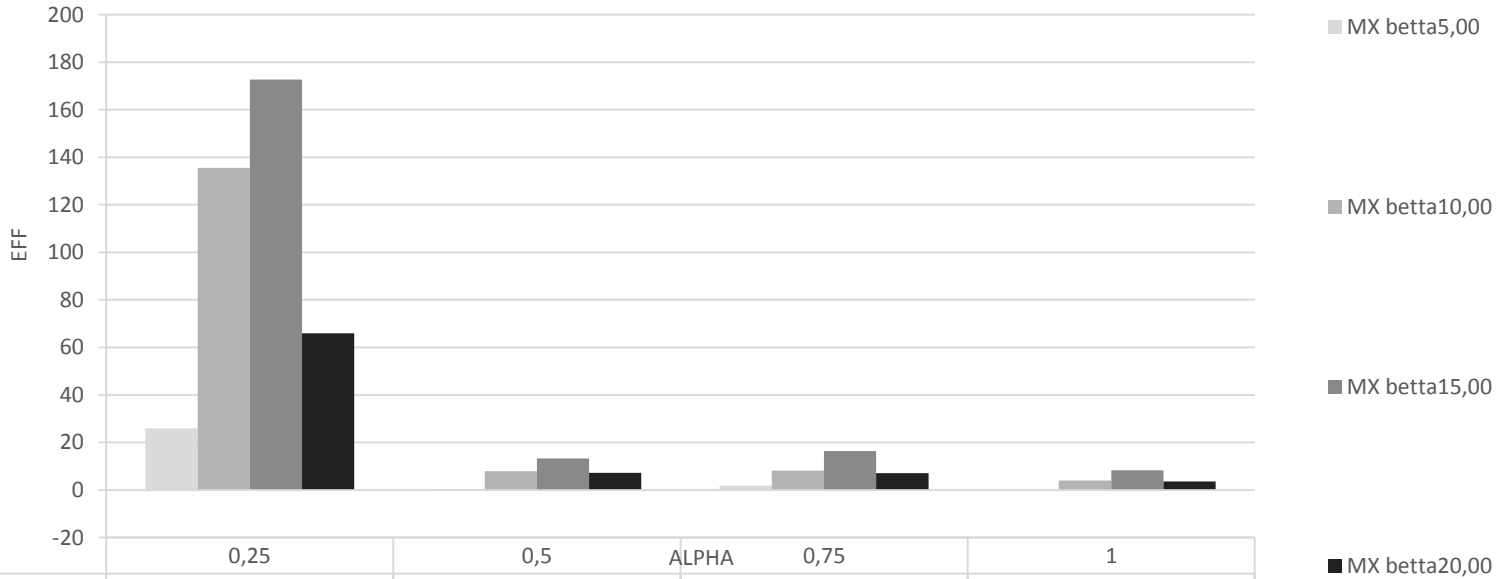
$$MSE\left(E_p, E_q\right) = \frac{1}{N^2}\sum_{i=0}^{N-1}\sum_{j=0}^{N-1}\left(E_p(x_i, y_j)^2 - E_q(x_i, y_j)^2\right)$$

Эффективность предложенного подхода относительно обычной линзы – можно рассчитать при помощи следующего соотношения:

$$Eff_{MSE_{ij}} = \frac{MSE_{\xi_i}}{MSE_{\xi_j}} - 1, MSE_{\xi_i} = MSE\left(E_p, E_q\right), MSE_{\xi_j} = MSE\left(E_{1p}, E_{1q}\right)$$

Results and discussion

На основе полученных значений средних (MSE усреднённые по аберрациям) квадратичных отклонений картин интенсивности для аберрированного и идеального волнового фронта показана эффективность предложенного метода для усиления визуализации именно слабых аберраций (до α=0,25λ).



	0,25	0,5	0,75	1
MX betta5,00	25,982605	0,32672875	1,76626125	-0,14198125
MX betta10,00	135,5934675	7,89954	8,12929125	3,93172125
MX betta15,00	172,7240863	13,25419625	16,36124	8,2506975
MX betta20,00	65,87549125	7,18702125	7,1209875	3,6329175

Conclusion

Подход, основанные на линзаконе, даёт возможность более точно детектировать и интерпретировать аберрации в анализируемом волновом фронте на основе алгоритмов цифровой обработки, включая нейронные сети. Так как распределение интенсивности в результирующей плоскости зависит только от уровня аберрации и известных параметров оптической системы (показателя преломления среды, фокуса линзы, периода аксикона и расстояния детектирования), то обратная задача имеет однозначное решение.

САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
SAMARA UNIVERSITY

ИСОИ IPSI

Acknowledgments

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. **20-37-90129**).

paul.95.de@gmail.com

ул. Московское шоссе, д. 34, г. Самара, 443086
Тел.: +7 (846) 335-18-26 , факс: +7 (846) 335-18-36
Сайт: www.ssau.ru, e-mail: ssau@ssau.ru