

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИФРАКЦИИ АБЕРРИРОВАННОГО ВОЛНОВОГО ФРОНТА ПРИ АПОДИЗАЦИИ ФОКУСИРУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ МНОГОПОРЯДКОВЫМИ КОЛЬЦЕВЫМИ ФИЛЬТРАМИ

Д.П. Серафимович¹

¹Самарский университет, г. Самара
e-mail: dmitry.serafimovich@gmail.com

Аннотация

Исследуется возможность повышения информативности в задачах анализа волновых aberrаций на основе использования многопорядковых дифракционных оптических элементов, согласованных с различными типами аксиконов, формирующих кольцевые распределения интенсивности в фокальной плоскости линзы.

Ключевые слова: волновые aberrации, кольцевые решетки, линейный и бинарный аксикон, многопорядковые фильтры.

Введение

Детектирование, распознавание и компенсация aberrаций волнового фронта [1, 2] играет ключевую роль в современных оптических системах, применяемых в таких областях, как астрономия (адаптивная оптика телескопов), лазерные технологии (формирование и фокусировка излучения) и медицинская диагностика (абберометрия, оптическая когерентная томография) [3-4]. Изменения в волновом фронте могут привести к значительным оптическим искажениям, что делает задачу точной идентификации aberrаций особенно актуальной.

Одним из наиболее эффективных методов анализа является использование сверточных нейронных сетей (CNN), способных выявлять сложные визуальные паттерны в картинах функции рассеяния точки (ФРТ) [5-7]. Развитие методов машинного обучения позволяет значительно повысить точность и скорость классификации, исключая необходимость сложных математических моделей для обработки данных. Более того, с учетом применения нейронных сетей возможно существенное усложнение картин ФРТ с целью внесения дополнительной информации и повышения эффективности алгоритмов. Одним из способов внесения дополнительной информации является использование многопорядковых (многоканальных) дифракционных оптических фильтров, формирующих в фокальной плоскости сразу несколько различным образом преобразованных ФРТ [8]. При этом преобразования могут выполняться с различной целью: согласованная фильтрация [9], модовое или координатное преобразование [10], а также повышение детализации за счет дефокусировки [11]. Нужно отметить, что можно одновременно выполнять модовое преобразование и повышение детализации ФРТ за счет использования кольцевых решеток или дифракционных аксиконов [7, 12]. В частности, в работе [7] было показано, что использование бинарного аксикона, производящего двойное кольцевое распределение, более эффективно, чем линейного аксикона, формирующего одинарное кольцо.

В работе рассмотрены многопорядковые кольцевые фильтры, согласованные с несколькими типами дифракционных аксиконов: линейными, бинарными и вихревыми различных порядков. В присутствии волновых aberrаций такие фильтры позволяют формировать сложные детализированные картины ФРТ, которые обеспечивают

повышенную информативность в задачах анализа волновых aberrаций с использованием сверточных нейронных сетей [5-7].

1. Теоретическая часть

Как правило, aberrированный волновой фронт описывается следующим выражением

$$W(r, \varphi) = \exp[2\pi i \sum_{n,m} c_{nm} Z_n^m(r, \varphi)], \quad (1)$$

где $Z_n^m(r, \varphi)$ – круговые полиномы Цернике [6], c_{nm} – соответствующие веса.

Дифракционный фазовый вихревой аксикон описывается следующей функцией пропускания:

$$g_m^{ax}(r, \varphi) = \exp(-ik\alpha_0 r + im\varphi), \quad (2)$$

где $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число, λ – длина волны излучения, параметр аксикона $\alpha_0 = \sin \beta$, определяет угол β наклона лучей к оптической оси, m – вихревой порядок.

Также хорошо известным является бинарный аксикон с функцией пропускания:

$$g_m^{bax}(r, \varphi) = \exp\{i \arg[\cos(k\alpha_0 r + m\varphi)]\}, \quad (3)$$

который фактически соответствует комбинации собирающего и рассеивающего аксиконов, т.е. элементов вида (1) с разными знаками.

В работе [8] было показано, что для анализа aberrированного волнового фронта с помощью нейронных сетей, использование бинарного аксикона, производящего двойное кольцевое распределение, более эффективно, чем линейного аксикона, формирующего одинарное кольцо. В данном исследовании рассмотрены многопорядковые фильтры, согласованные с несколькими типами дифракционных аксиконов вида (2) и (3):

$$g_{ch}(x, y) = \sum_{p=1}^P g_{m_p}(r, \varphi) \exp(ib_p x), \quad (4)$$

где b_p – параметры, определяющие пространственное смещение соответствующих дифракционных порядков.

Оптический элемент вида (4) позволяет формировать в фокальной плоскости линзы сразу несколько кольцевых распределений, в том числе имеющих вихревую фазовую составляющую, в соответствии с параметрами аксиконов (2) и (3) (Таблица 1).

Из результатов, приведенных в Таблице 1 и 2 видно, что вихревая составляющая у линейных аксиконов (2) не сказывается на распределении интенсивности как в отсутствии, так и при наличии волновых aberrаций. В то же время, у бинарных аксиконов (3) заметно влияние на распределение интенсивности не только наличия вихревой составляющей, но и ее знака (направления вращения). В результате, трех-порядковые элементы, согласованные с несколькими бинарными аксиконами, обеспечивают значительно больше информации, которая может в дальнейшем повысить эффективность применения сверточных нейронных сетей в задаче анализа и компенсации волновых aberrаций.

Таблица 1 – Трех-порядковые элементы вида (4) при $m_1=-1$, $m_2=0$, $m_3=1$.

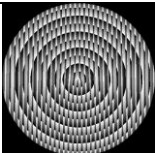
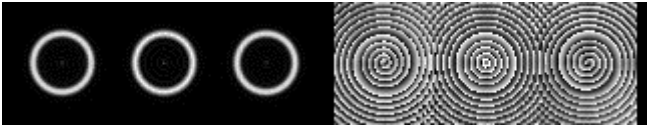
	Фаза элемента	Распределение интенсивности и фазы в фокальной плоскости
Аксиконы типа (2)		



Таблица 2 – Действие трех-порядковых элементов в фокальной плоскости при наличии волновых aberrаций $Z_n^m(r, \varphi)$.

Параметры aberrации	Вид aberrации	Аксиконы типа (2)	Аксиконы типа (3)
$(n,m)=(2,2)$ $c_{nm}=1$			
$(n,m)=(3,1)$ $c_{nm}=0.5$			
$(n,m)=(3,3)$ $c_{nm}=1$			

Заклучение

Моделирование доказало превосходство бинарных аксиконов над линейными по чувствительности дифракционной картины к волновым aberrациям. Зависимость двойного кольцевого распределения от знака вихревого порядка создаёт уникальные оптические картины для каждого типа искажений. Это обосновывает их интеграцию в гибридные оптико-нейросетевые сенсоры, обеспечивающие CNN структурированными данными высокой информативности для точной и быстрой классификации aberrаций.

Список использованных источников

- Wyant, J. C. Basic Wavefront Aberration Theory for Optical Metrology / J. C. Wyant, K. Creath // Appl. Opt. Opt. Eng. – 1992. – V. X.
- Khorin, P. A. Optical wavefront aberration: detection, recognition, and compensation techniques – a comprehensive review / P. A. Khorin, A. P. Dzyuba, S. N. Khonina // Optics & Laser Technology. – 2025. – V. 191. – P. 113342.
- Wang, J. Adaptive optics in super-resolution microscopy / J. Wang, Y. Zhang // Biophysics Reports. – 2021. – V 7, № 4. – P. 267–279.
- Khorin, P. A. Simulation of the Human Myopic Eye Cornea Compensation Based on the Analysis of Aberrometric Data / P. A. Khorin, S. N. Khonina // Vision. – 2023. – V. 7, № 1. – P. 21.
- Paine, S. W. Machine learning for improved image-based wavefront sensing / S. W. Paine, J. R. Fienup // Optics Letters. – 2018. – V. 43, № 6. – P. 1235–1238.
- Wavefront Aberrations Recognition Study Based on Multi-Channel Spatial Filter Matched with Basis Zernike Functions and Convolutional Neural Network with Xception Architecture / A. P. Dzyuba, P. A. Khorin, P. G. Serafimovich [et al.] // Opt. Mem. Neural Networks. – 2024. – V. 33, № 1. – P. S53–S64.
- Serafimovich, D. P. Comparison of the Efficiency of Using a Convolutional Neural Network for Analyzing Wave Aberrations Based on the Diffraction Pattern on Linear and Binary Axicons / D. P. Serafimovich, P. A. Khorin // Opt. Mem. Neural Networks. – 2025. – V. 34, № Suppl 2. – P. S230–S242.

8. Khonina, S. N. Wavefront aberration sensor based on a multichannel diffractive optical element / S. N. Khonina, S. V. Karpeev, A. P. Porfirev // *Sensors*. – 2020. – V. 20, № 14. – P. 3850.
9. Хорин, П. А. Многопорядковые комбинированные дифракционные оптические элементы для идентификации волновых aberrаций различной величины / П. А. Хорин, А. П. Дзюба, С. Н. Хонина // *Компьютерная оптика*. – 2025. – Т. 49, № 5. – С. 741–748.
10. Kaczorowski, A. Adaptive, spatially-varying aberration correction for real-time holographic projectors / A. Kaczorowski, G. S. D. Gordon, T. D. Wilkinson // *Opt. Express*. – 2016. – V. 24. – P. 15742–15756.
11. Single-shot phase diversity wavefront sensing in deep turbulence via metasurface optics / A. Martin Jimenez, M. Baltes, J. Cornelius [et al.] // *Nat. Photon.* – 2025. – V. 19. – P. 1315–1321.
12. Vaity, P. Perfect vortex beam: Fourier transformation of a Bessel beam / P. Vaity, L. Rusch // *Opt. Lett.* – 2015. – V. 40, № 4. – P. 597–600.

MODELING THE DIFFRACTION OF AN ABERRATED WAVEFRONT DURING APODIZATION OF A FOCUSING SYSTEM USING MULTI-ORDER RING FILTERS

D.P. Serafimovich ¹

¹ *Samara University, Samara*
e-mail: dmitry.serafimovich@gmail.com

Abstract

The possibility of increasing the information content in problems of wave aberration analysis is investigated based on the use of multi-order diffractive optical elements matched with various types of axicons that form ring-shaped intensity distributions in the focal plane of the lens.

Keywords: wave aberrations, ring gratings, linear and binary axicon, multi-order filters.