

Анализ погрешностей юстировки по картине дифракции лазерного излучения на микроаксиконах

Р.И. Кашапов

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева
Самара, Россия;

~~mailto:~~rusl.kashapov@gmail.com

Аннотация— В данной работе представлена разработка программного обеспечения для анализа данных, полученных при моделировании дифракции лазерного излучения на микроаксиконах с учетом таких погрешностей юстировки, как смещение и наклон оптического элемента по отношению к падающему излучению. При рассмотрении аксикона в виде тонкого элемента моделирование наклона выполнялось с использованием внесения волновых aberrаций в падающий пучок, таких как астигматизм и кома. Для классификации дифракционных картин разработана и обучена свёрточная нейронная сеть, которая демонстрирует высокую точность при определении типа aberrации.

Ключевые слова— дифракция, аксикон, aberrации, свёрточная нейронная сеть, FDTD, искусственный интеллект.

I. ВВЕДЕНИЕ

Дифракция лазерного излучения используется в различных областях, включая оптику, физику, материаловедение и нанотехнологии [1,2]. Этот процесс позволяет исследовать структуру и свойства микроэлементов, тонкие пленки, а также микрооптические устройства и системы.

Отметим, что картина дифракции может подвергаться существенным искажениям в результате технологических неточностей изготовления микрорельефа (например, несоответствие высоты и изменение структуры зон дифракционного оптического элемента), а также при наличии погрешности юстировки оптической системы, включая несоосность освещающего пучка и оптического элемента [3, 4]. Аналогичные искажения могут проявляться при наличии aberrаций волнового фронта освещающего пучка [5, 6].

Основная цель разработки программного обеспечения для анализа данных дифракции заключается в автоматизации процесса обработки и интерпретации экспериментальных результатов. Это включает в себя сбор данных, их предварительную обработку, анализ и визуализацию. Современные программные решения, в том числе на основе методов машинного обучения [7-9], позволяют значительно сократить время на анализ и повысить точность результатов.

II. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Астигматизм и кома – это aberrации волнового фронта, которые могут использоваться для описания

наклона и смещения оптического элемента или исследуемого объекта.

В случае астигматизма волновой фронт имеет следующий вид:

$$U(x, y) = e^{-i\gamma\pi(x^2 - y^2)}, \quad (1)$$

где γ - коэффициент, характеризующий степень астигматизма в системе.

В отличие от астигматизма, который проявляется в различных фокусных расстояниях для различных меридианов, кома вызывает растяжение изображения вдоль одной оси, создавая эффект хвоста кометы. В этом случае волновой фронт можно описать следующим образом:

$$U(x, y) = e^{-i\gamma\pi(x^3 + y^3)}, \quad (2)$$

где γ - коэффициент, характеризующий степень комы.

Отметим, что при малых коэффициентах aberrаций картина функции рассеяния точки (ФРТ) примерно одинаковая и близка к идеальной [10]. Отметим, что нейронные сети работают более эффективно и обеспечивают меньшую погрешность идентификации для наборов, имеющих наибольшие отличия (аналогично человеческому восприятию).

Усиление визуального влияния aberrаций на ФРТ возможно за счет внесения в оптическую систему дополнительного элемента, например, аксикона. Аксикон — это коническая линза в рефракционном варианте [11, 12] и радиальная решетка в дифракционном варианте [13]. Аксикон преобразует падающий гауссов пучок в Бесселев пучок в ближней области и кольцевое распределение в дальней области дифракции. Комплексная функция пропускания дифракционного аксикона выглядит следующим образом:

$$e^{-i\alpha\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (3)$$

где α – параметр, определяющий частоту кольцевой решетки и радиус формируемого светового кольца.

Дополнение оптической системы аксиконом позволяет визуально усилить влияние волновых aberrаций и/или погрешностей оптической системы на картину ФРТ (см. Таблицу I) и выделить ключевые признаки, которые могут быть использованы для классификации типов aberrаций с использованием свёрточных нейронных сетей (CNN).

3D-модель аксикона для тестирования обученной CNN, представлена на рис. 1.

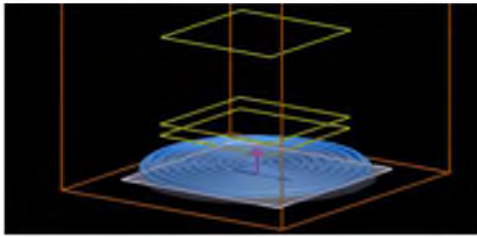


Рис. 1. 3D модель аксикона

Для обучения была использована модель Sequential, что позволяет последовательно добавлять слои CNN. Примеры картин из сгенерированного набора данных с соответствующими метками показаны в таблице I. Затем обученная CNN использовалась для анализа данных, полученных методом FDTD (рис. 2) на 3D модели (рис. 1). В обоих случаях (вариант а) и б)) результатом предсказания оказался астигматизм. Такой результат связан с особенностями дифракции на 3D микроэлементах, которые ранее отмечались в других работах [12].

Таблица I. ПРИМЕРЫ КАРТИН ИЗ СГЕНЕРИРОВАННОГО НАБОРА ДАННЫХ ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ CNN

Величина	$\gamma = 1,5$	$\gamma = 2$	$\gamma = 3$	$\gamma = 4$	$\gamma = 5$
Астигматизм					
Кома					

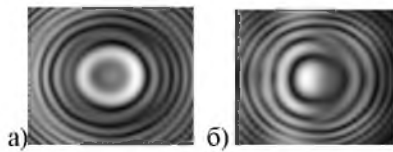


Рис. 2. Интенсивность, полученная методом FDTD для 3D-модели аксикона (рис. 1): (а) без аберрации и (б) при астигматизме.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализируя результаты, представленные в таблице I, приходим к выводу, классификация становится не верной при установлении весов аберрации менее $\gamma = 1,5$. Для использования данной нейронной сети по прикладному назначению, необходима верная классификация для любых $\gamma > 0$. Ошибки вызваны ограниченным датасетом. Ожидается, что расширение датасета большим количеством дифракционных картин с различными коэффициентами аксикона и аберраций, а также применение методов аугментации исправит возникшие ошибки. Кроме того, наряду с расширением датасета необходимо искать новые признаки для обучения, например, использовать не только интенсивность, но и фазы или интерферограммы.

Результаты на данных, полученных методом FDTD ошибочны из-за особенностей дифракции на 3D микроэлементах.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Соيفер, В.А. Дифракционные оптические элементы в устройствах нанофотоники / В.А. Соифер, В.В. Когляр, Л.Л. Досколович // Компьютерная оптика. – 2009. – Т. 33, № 4. – С. 352–368.
[2] Khonina, S.N. Exploring Diffractive Optical Elements and Their Potential in Free Space Optics and Imaging – A Comprehensive Review / S.N. Khonina, N.L. Kazanskiy, M.A. Butt // Laser Photonics Review. – 2024. – 2400377. – DOI: <https://doi.org/10.1002/lpor.202400377>.

[3] Li, W. Analysis of misaligned optics effects on beam pointing stability in dual-pass optical system / W. Li, F. Chen, K. Zhang, J. Wang, Z. Lv // Physica Scripta. – 2024. – Vol. 99(3). – P. 035502.
[4] Хорин, П.А. Влияние отклонений 3D формы спиральной микроструктуры на свойства формируемого вихревого пучка в ближней зоне дифракции / П.А. Хорин, С.Н. Хонина // Оптический журнал. – 2023. – Т. 90, № 5. – С. 48–57.
[5] Harvey, J.E. Aberrations of diffracted wave fields / J.E. Harvey, R.V. Shack // Applied Optics. – 1978. – Vol. 17. – P. 3003–3009.
[6] Welford, W.T. Aberrations of Optical Systems. – Bristol: Adam Hilger, 1991.
[7] Paine, S.W. Machine learning for improved image-based wavefront sensing / S.W. Paine, J.R. Fienup // Optics Letters. – 2018. – Vol. 43, № 6. – P. 1235–1238.
[8] Родин, И.А. Распознавание типов аберраций волнового фронта, соответствующих отдельным функциям Цернике, по картине функции рассеяния точки в фокальной плоскости с применением нейронных сетей / И.А. Родин, С.Н. Хонина, П.Г. Серафимович, С.Б. Попов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 6. – С. 923–930. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-810.
[9] Jiang, J. Aberrations estimate based on diffraction patterns using deep residual network / J. Jiang, X. Liu, Y. Chen, S. Gao, Y. Liu, Y. Jiang // AIP Advances. – 2023. – Vol. 13(10). – P. 105322.
[10] Degtyarev, S.A. Zernike basis-matched multi-order diffractive optical elements for wavefront weak aberrations analysis / S.A. Degtyarev, A.P. Porfirev, S.N. Khonina // Proc. SPIE. – 2017. – Vol. 10337. – P. 103370Q. – DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2269218>.
[11] Radwell, N. Achromatic vector vortex beams from a glass cone / N. Radwell, R.D. Hawley, J.B. Gotte, S. Franke-Arnold // Nature Communications. – 2016. – Vol. 7. – P. 10654.
[12] Хорин, П.А. Исследование методом FDTD поляризационных преобразований, осуществляемых преломляющим биконическим аксиконом / П.А. Хорин, А.М. Алгубили, С.А. Дегтярев, С.К. Сергунин, С.В. Карпеев, С.Н. Хонина // Компьютерная оптика. – 2023. – Т. 47, № 5. – С. 742–750.
[13] Pereiro-García, J. Flat variable liquid crystal diffractive spiral axicon enabling perfect vortex beams generation / J. Pereiro-García, M. García-de-Blas, M.A. Geday // Scientific Reports. – 2023. – Vol. 13. – P. 2385. – DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29164-0>.