

РАСЧЕТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ВИХРЯ

Р.И. Кашапов¹

¹Самарский университет, Самара
e-mail: rusl.kashapov@gmail.com

Аннотация

Работа посвящена численному синтезу диэлектрической метаповерхности для формирования оптического вихревого пучка. С использованием FDTD-моделирования получен датасет амплитудно-фазовых характеристик метаатомов с фазовым охватом 2π . Для решения задачи фазового расчёта разработана нейронная сеть, определяющая геометрию элементов по заданному фазовому профилю. Распространение поля рассчитано методом углового спектра; результаты согласуются с FDTD-моделированием. Подход может быть использован для ускоренного проектирования метаповерхностей.

Ключевые слова: метод конечных разностей во временной области, метаповерхности, оптический вихрь, фурье-преобразование, метод углового спектра, нейронные сети, фазовый синтез.

Введение

Современные методы формирования световых полей с орбитальным угловым моментом (ОУМ) основаны на использовании пространственно-модулирующих элементов, обеспечивающих заданное распределение фазы и амплитуды оптического поля. Одним из наиболее перспективных подходов является применение диэлектрических метаповерхностей, представляющих собой массив субволновых резонансных элементов (метаатомов), позволяющих реализовать требуемый фазовый профиль в компактной плоской структуре [1, 2].

Проектирование таких метаповерхностей традиционными методами требует большого числа электродинамических расчётов, особенно при решении обратной задачи — определения геометрических параметров метаатомов по заданному фазовому распределению. Это существенно увеличивает вычислительные затраты и усложняет процесс оптимизации.

В связи с этим актуальной является разработка подхода, сочетающего численное электродинамическое моделирование и методы машинного обучения, позволяющего эффективно решать задачу обратного проектирования метаповерхностей [3, 4].

1. Результаты численного моделирования

Моделирование выполнялось при длине волны излучения $\lambda = 1,5$ мкм. В качестве источника использовалось нормальное падение плоской волны (эквивалент локальному участку гауссова пучка в приближении unit-cell) с фиксированной линейной поляризацией. Пространственный период элементарной ячейки составлял $p = 0,9$ мкм.

Геометрия метаатома представляла собой цилиндрический столбик из кремния (Si) в воздухе с варьируемым радиусом r и заданной высотой h (далее в работе анализируется ветвь для $h = 1,0$ мкм).

Для различных значений высоты столбиков были проанализированы фазовый охват, стабильность амплитуды и непрерывность фазовой зависимости (рис. 1, 2). Установлено, что при высоте столбика $h = 1.0$ мкм достигается оптимальный баланс между шириной фазового диапазона и допустимыми амплитудными потерями.

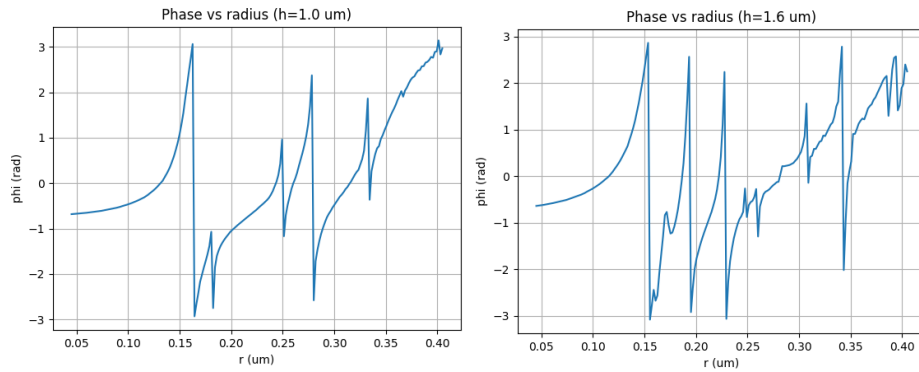


Рисунок 1 – Графики зависимости фазы от радиуса метаатома

На основании полученных данных была выделена непрерывная фазовая ветвь с фазовым охватом более 2π , пригодная для синтеза метаповерхности. Для данной фазовой ветви была обучена нейронная сеть, аппроксимирующая обратную зависимость между фазовым сдвигом и радиусом диэлектрического столбика. Обучение показало устойчивую сходимость функции потерь и высокую точность аппроксимации, что показано на рисунке 2.

Средняя абсолютная ошибка восстановления радиуса составила порядка.

$$\text{MAE}(r) \approx 3.5 \times 10^{-4} \text{ мкм.} \quad (1)$$

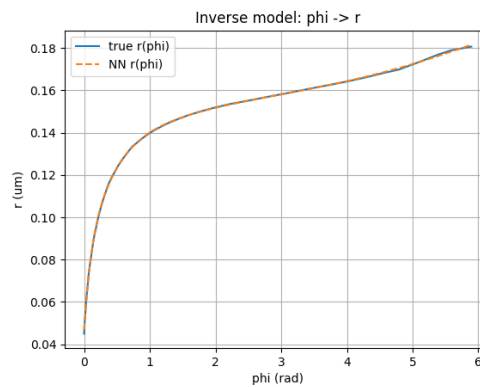


Рисунок 2 – Аппроксимация обратной зависимости радиуса метаатома от фазового сдвига с использованием нейронной сети

С использованием обученной нейронной сети была рассчитана двумерная карта радиусов метаатомов, соответствующая целевому вихревому фазовому профилю с топологическим зарядом $\ell = 1$.

Полученная карта радиусов демонстрирует характерную азимутальную симметрию, отражающую винтовую структуру требуемой фазы рисунки 3, 4(а, б). Все значения радиусов находятся в допустимом диапазоне, определённом на этапе unit-cell моделирования.

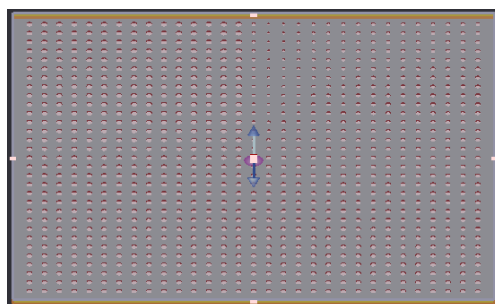


Рисунок 3 – Метаповерхность

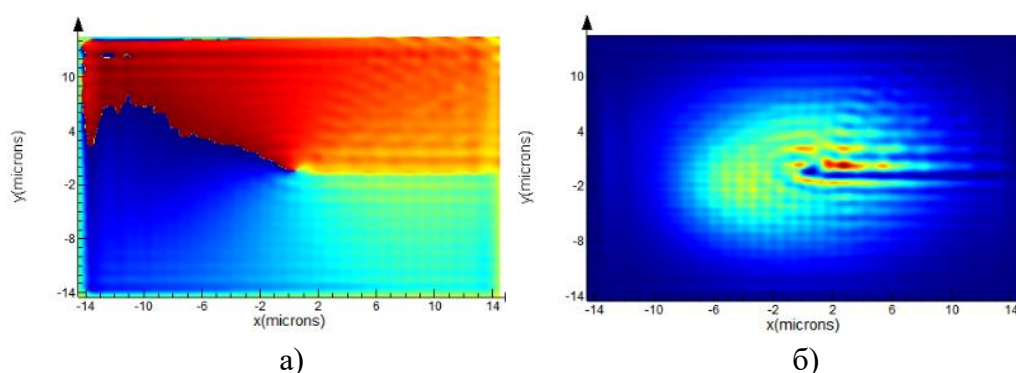


Рисунок 4 – Фаза а) и интенсивность б) после прохождения метаповерхности

На основе синтезированной метаповерхности было сформировано комплексное поле в плоскости метаповерхности, учитывающее как фазовый, так и амплитудный отклик метаатомов.

Численное моделирование распространения поля методом углового спектра показало, что на расстоянии $z = 200$ мкм формируется характерный оптический вихрь с кольцевым распределением интенсивности и винтовая фазовая структура с фазовым скачком 2π при обходе центра. Полученные результаты подтверждают корректность синтеза фазового профиля и адекватность используемой модели распространения рисунок 5.

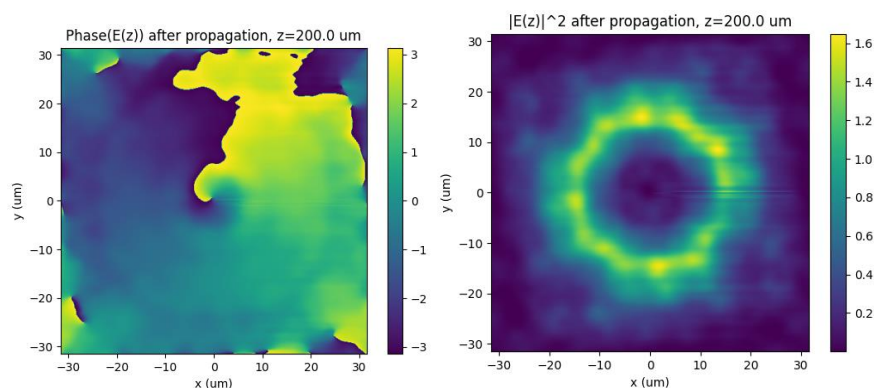


Рисунок 5 – Фаза и интенсивность после прохождения сгенерированной поверхности

Закключение

В работе проведена численная параметризация единичной ячейки метаповерхности методом FDTD и получены амплитудно-фазовые характеристики метаатомов. Выделена монотонная фазовая ветвь, обеспечивающая непрерывное управление фазой в диапазоне не менее 2π . Для аппроксимации зависимости между фазовым сдвигом и геометрией метаатома обучена нейронная сеть, обеспечивающая высокую точность восстановления радиуса. На её основе сформирована карта метаповерхности для генерации оптического вихря первого порядка и рассчитано распространение поля методом углового спектра. Сравнение с FDTD-моделированием показало хорошее согласование результатов, что подтверждает корректность предложенного гибридного подхода.

Список использованных источников

1. Wide-angle optical metasurface for vortex beam generation / M.-H. Chen, B.-W. Chen, K.-L. Xu, V.-C. Su [и др.] // *Nanomaterials*. – 2023. – V. 13. – P. 2680.
2. Khonina, S. N. A review on reconfigurable metalenses revolutionizing flat optics / S. N. Khonina, M. A. Butt, N. L. Kazanskiy // *Advanced Optical Materials*. – 2024. – V. 12, № 14.
3. Exploring AI in metasurface structures with forward and inverse design / G. Yang, Q. Xiao, Z. Zhang [и др.] // *iScience*. – 2025. – V. 28, № 11995.
4. Deep-learning-assisted inverse design of coding metasurfaces for arbitrarily directed vortex beams / J. Zhou, H. Xia, X. Bai, R. Yang [и др.] // *Optics Communications*. – 2025. – V. 577.

CALCULATION OF A DIELECTRIC METASURFACE USING A NEURAL NETWORK FOR OPTICAL VORTEX GENERATION

R.I. Kashapov¹

¹*Samara University, Samara
e-mail: rusl.kashapov@gmail.com*

Abstract

This work is devoted to the numerical synthesis of a dielectric metasurface for generating an optical vortex beam. Using FDTD modeling, a dataset of amplitude–phase characteristics of meta-atoms with a full 2π phase coverage is obtained. To solve the phase synthesis problem, a neural network is developed to determine the geometry of elements based on given phase profile. The field propagation is calculated using the angular spectrum method; the results are in good agreement with full FDTD simulations. The proposed approach can be used for accelerated metasurface design.

Keywords: finite-difference time-domain (FDTD) method, metasurfaces, optical vortex, Fourier transform, angular spectrum method, neural networks, phase synthesis