

5. Sery, A. I. Baryshevsky–Luboshitz Effect in Spin-Polarized Electron Gas at High Temperatures in Quantizing Magnetic Field / A. I. Sery // *Astronomy Reports*. – 2021. – Vol. 65, № 10. – P. 1036–1038.

6. Серый, А. И. Эффект Барышевского–Любошица при низких отличных от нуля температурах / А. И. Серый // Научная конференция, посвященная 110-летию со дня рождения Ф. И. Федорова (Гомель, 25 июня 2021 года) [Электронный ресурс]: сборник материалов / Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины, отделение физики, математики и информатики Национальной академии наук Беларуси, ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова Национальной академии наук Беларуси»; редкол.: С. А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – Режим доступа: <http://conference.gsu.by>. – С. 97–102.

7. Румер, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика: учеб. пособие. / Ю. Б. Румер, М. Ш. Рывкин. – 2-е изд., испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 608 с.

8. Серый, А. И. Влияние резонансного комптоновского рассеяния в магнитном поле на вращение плоскости поляризации фотонов / А. И. Серый // *Вестник Брэскага універсітэта. Серыя 4 «Фізіка. Матэматыка»*. – 2020. – № 2. – С. 40–49.

9. Sery, A. I. Influence of resonance Compton scattering in a magnetic field on rotation of the polarization plane of photons / A. I. Sery // *Materials Physics and Mechanics*. – 2020. – Vol. 45, № 1. – P. 101–103.

10. Секержицкий, В. С. Равновесные системы фермионов и бозонов в магнитных полях : монография / В. С. Секержицкий ; Брест. гос. ун-т имени А. С. Пушкина. – Брест: Издательство БрГУ, 2008. – 198 с.

11. Серый, А. И. Об усовершенствованной кусочно-гладкой аппроксимации распределения Ферми–Дирака при конечных температурах / А. И. Серый // Актуальные вопросы общества, науки и образования: сборник статей Международной научно-практической конференции. – Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение». – 2022. – 352 с. – С. 22–26.

**П. А. Сомов¹ А. Л. Самофалов¹, Ю. В. Никитюк¹, С. А. Хахомов¹, И. В. Семченко²,
Хуэй Чу³, Мэнмэн Ли³, Даши Динг³**

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины,
г. Гомель, Республика Беларусь,

²Государственное научно-производственное объединение
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
г. Минск, Республика Беларусь,

³Нанкинский университет науки и технологии,
г. Нанкин, Китайская Народная Республика

НЕЙРОСЕТЕВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МЕТАМАТЕРИАЛА-ФАЗОМАНИПУЛЯТОРА

Введение. Исследования метаматериалов и метаповерхностей обеспечивают возможность создания искусственных структур, обладающих уникальными свойствами, которые не встречаются у природных материалов: отрицательным показателем преломления, низким дифракционным пределом при формировании изображений предмета, полным поглощением в заданном диапазоне частот и т. д. [1].

Искусственные нейронные сети обеспечивают возможность получения необходимых результатов при моделировании сложных связей между входными и выходными параметрами системы, что обусловлено их возможностями при нахождении нелинейных зависимостей в многомерных массивах данных. В настоящее время искусственные нейронные сети успешно применяются в различных областях науки и техники [2–6].

В данной работе искусственные нейронные сети применены для прогнозирования параметров метаматериала для возможности фазовой манипуляции электромагнитных волн при их взаимодействии с метаповерхностью на основе планарных резонаторов.

1. Моделирование. В программе Ansys HFSS построен проект метаматериала-фазоманипулятора, состоящего из 25 парных планарных спиральных резонаторов, расположенных на диэлектрическом слое (рисунок 1 (а)). Каждый резонатор содержит также варикап.

Метаматериал смоделирован на основе двустороннего стеклотекстолита FR4 с толщиной ядра 1,5 мм и медными слоями толщиной 35 мкм. В качестве экрана за метаматериалом вплотную расположен односторонний стеклотекстолит FR4 с такой же толщиной ядра и медного слоя.

Для формирования волнового фронта волны, излучаемой метаповерхностью с заданными параметрами главного лепестка диаграммы направленности (рисунок 1 (б)), необходимо на соседних элементах установить разность хода волны или смещение по фазе. Это возможно реализовать путем изменения емкости варикапов на отдельных резонаторах. Задавая значение электроемкости варикапов C в первом ряду (поскольку в каждом ряду C одинаково), а затем в следующем ряду – в соответствии с требуемой разностью фаз, можно добиться управления наклоном главного лепестка диаграммы направленности метаматериала в плоскости XOZ.

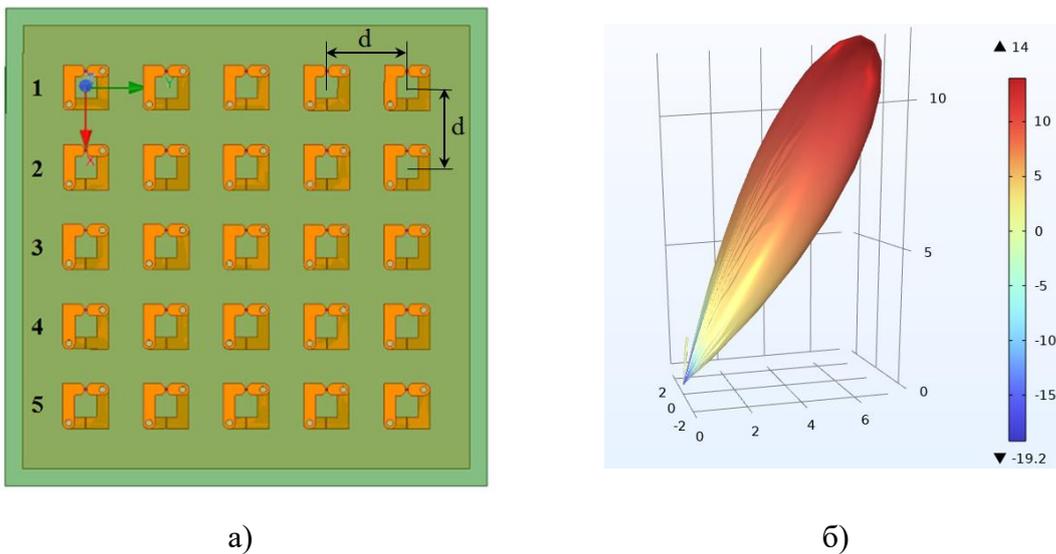


Рисунок 1 – Проект метаматериала, состоящего из 25 парных планарных спиральных резонаторов, расположенных на диэлектрическом слое (а); пример сформированной метаповерхностью диаграммы направленности (б).

Здесь d – расстояние между резонаторами в метаповерхности

Для формирования обучающего массива данных и данных для тестирования нейронной сети были выполнены расчеты диаграмм направленности в Ansys HFSS с помощью метода конечных элементов.

Входные параметры варьируются таким образом, чтобы метаматериал обладал диаграммой направленности с минимальной шириной лепестков, то есть создавал сконцентрированное в пространстве излучение максимальной мощности. В ходе исследования было установлено, что самыми эффективными параметрами для решения данной задачи является межэлементное расстояние (пространственный период метаповерхности d) и электроёмкость варикапов.

Геометрические параметры планарных спиральных резонаторов найдены заранее с использованием аналитического подхода для определения поляризуемостей любой электрически малой частицы произвольной формы, описанного в работе [7]. В результате

использования данного подхода и компьютерного моделирования, на основе метода конечных элементов были определены все поляризуемости планарных спиральных резонаторов и найдены его оптимальные геометрические параметры для выбранной частоты 3,14 ГГц.

При реализации численного эксперимента была применена выборка, сформированная с использованием метода латинских гиперкубов в модуле DesignXplorer.

В соответствии с планом эксперимента выполнялись расчёты для 20 комбинаций двух входных параметров (таблица 1): P1 – межэлементное расстояние d , P2 – электроёмкость варикапа C_{vr} . При этом определялись следующие выходные параметры: напряжённость электрического поля в максимуме диаграммы направленности E , ширина половины мощности излучения $d\Theta$. Таким образом, моделью объекта исследования являлись функции отклика, связывающие выходные параметры (E , $d\Theta$) с факторами (d , C_{vr}) (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры планарных спиральных резонаторов

Входные параметры	Значения входных параметров
P1 (d , мм)	28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40
P2 (C_{vr} , пф)	0,1–0,5

Задачей оптимизации был поиск максимума E и минимума $d\Theta$. Для удобства представления данных E мы рассматривали по модулю.

Расчеты выполнены для 533 вариантов входных параметров (рисунок 2), 513 из которых были использованы для обучения искусственных нейронных сетей, а 20 для тестирования.

Искусственные нейронные сети формировались при помощи библиотеки для машинного обучения TensorFlow. При создании сетей использовались функция активации ReLu, оптимизатор Adam и функция потерь MSE. Обучение нейронной сети осуществлялось на протяжении 700 эпох. В результате было обучено 25 искусственных нейронных сетей с количеством нейронов в двух скрытых слоях от 10 до 50 с шагом 10.

Для оценки полученных моделей использовались следующие критерии: средняя абсолютная ошибка (англ. MAE), средняя квадратичная ошибка (англ. RMSE), средняя абсолютная процентная ошибка (англ. MAPE) и коэффициент детерминации R^2 .

На рисунке 2 показаны тепловые карты, показывающие распределение средней абсолютной процентной ошибки при определении выходных параметров. Вертикальная и горизонтальная оси показывают соответственно количество нейронов в первом и втором скрытых слоях искусственных нейронных сетей.

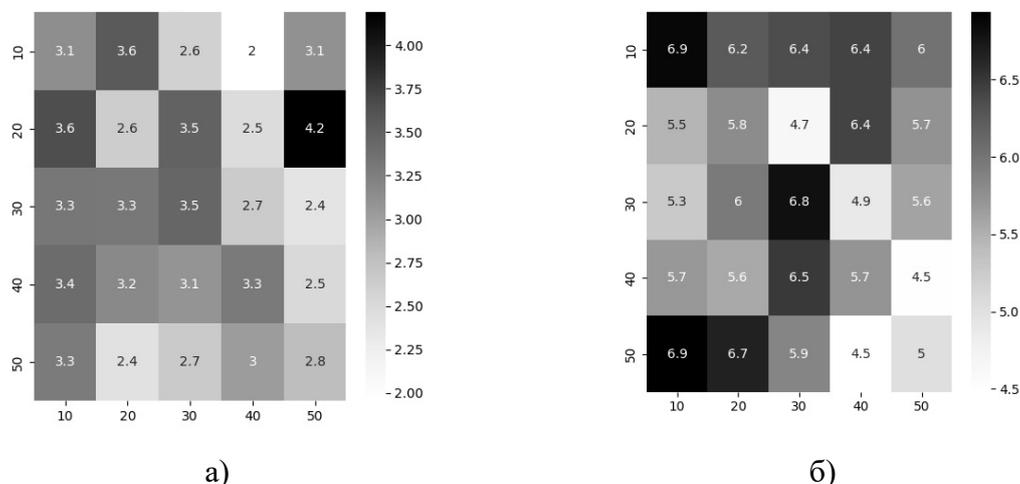


Рисунок 2 – Тепловая карта распределения MAPE при определении E (а) и при определении $d\Theta$ (б)

Наилучшие результаты при определении значений E показала нейронная сеть с архитектурой [2-10-40-2], а при определении значений $d\Theta$ сеть с архитектурой [2-50-40-2].

В таблице 2 представлены результаты оценки соответствующих нейросетевых моделей.

Таблица 2 – Результаты оценки нейросетевых моделей

Критерий	E	$d\Theta$
RMSE	0,3 dB	2,1 deg
MAE	0,2 dB	1,3 deg
MAPE	2,0 %	4,5 %
R^2	0,9715	0,9398

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать вывод о достаточной эффективности нейросетевых моделей при прогнозировании параметров метаматериалов, что в свою очередь обеспечит возможность проведения оптимизации соответствующих параметров с использованием генетических алгоритмов [8–9].

Работа выполнена в рамках реализации проектов БРФФИ Ф22КИТГ-021, Ф23КИ-027, Ф24КИТГ-005.

Литература

1. Семченко, И. В. Электромагнитные волны в метаматериалах и спиральных структурах: [монография] / И. В. Семченко, С. А. Хахомов; Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины. – Минск: Беларуская навука, 2019. – 279 с.
2. Головки, В. А. Нейросетевые технологии обработки данных : учеб. пособие / В. А. Головки, В. В. Краснопрошин. – Минск: БГУ, 2017. – 263 с.
3. Nikitjuk, Yu. V. Determination of the Parameters of Controlled Laser Thermal Cleavage of Crystalline Silicon Using Regression and Neural Network Models / Yu. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov // Crystallography Reports. – 2023. – Vol. 68, № 7. – P. 1199–1204.
4. Synthesis, Investigation and Neural Network Modeling of the Properties of Sol-Gel ITO/ZnO and ITO/ZnO:Mg Structures / G. Y. Ayvazyan [et al.] // Journal of Contemporary Physics. – 2023. – Vol. 58, № 3. – P. 266–273.
5. Nikitjuk, Yu. V. Determination of the parameters of two-beam laser splitting of silicate glasses using regression and neural network models / Yu. V. Nikitjuk, A. N. Serdyukov, I. Y. Aushev // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2022. – № 1. – P. 35–43. – DOI 10.33581/2520-2243-2022-1-35-43.
6. Characterization of Laser Welding of Steel 30XГCH2A by Combining Artificial Neural Networks and Finite Element Method / Y. Nikitjuk [et al.] // Lecture Notes in Networks and Systems. – 2022. – Vol. 422. – P. 273–279. – https://doi.org/10.1007/978-981-19-0379-3_28.
7. Determining polarizability tensors for an arbitrary small electromagnetic scatterer / V. S. Asadchy [et al.] // Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications. – 2014. – Vol. 12, № 4. – P. 298–304.
8. Оптимизация параметров поглощающих метаматериалов на основе П-образных элементов / С. А. Хахомов, А. Л. Самофалов, Ю. В. Никитюк [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. – 2022. – № 3(52). – С. 56–60.
9. Metamodelling technique for the efficient design optimisation of metasurfaces / F. Ferranti [et al.] // Electronics Letters. – 2016. – Т. 52. – № 14. – С. 1191–1192.