

Прогнозування коефіцієнту проникнення метаматеріалу за його структурою та параметрами електромагнітного опромінення

<https://doi.org/10.31713/MCIT.2024.054>

Олександр Трофимчук

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Київ, Україна
trofymchuk@nas.gov.us

Дмитро Корольок

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
Київ, Україна
dimitri.koroliouk@ukr.net

Павло Крисенко

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України
Київ, Україна
p.krysenko@gmail.com

Анотація – В цій роботі представлено архітектуру штучної нейронної мережі для прогнозування коефіцієнту пропускання метаматеріалу за його структурною інформацією та параметрами електромагнітного випромінювання. Також представлено метод кодування просторової інформації про склад метаматеріалу.

Ключові слова – штучна нейронна мережа; згортоква нейронна мережа; метаматеріал; коефіцієнт пропускання; машинне навчання; глибоке навчання; прогнозування; діелектричні матеріали

I. ВСТУП

У сучасному світі існує нагальна потреба у матеріалах, що мають надзвичайні характеристики. Такими матеріалами можуть виступити метаматеріали. Їх властивості залежать від топологічної періодичної структури. Для різних видів хвиль, а саме електромагнітних, акустичних та інших існують різні метаматеріальні моделі [1,2]. Проблема використання цих моделей в тому, що розв'язок їх ускладнюється разом з ускладненням топологічної структури метаматеріалу. В даний час не існує універсальних методів для прогнозування коефіцієнтів пропускання, відбивання та поглинання метаматеріалів за їх структурою. Тому існує потреба у розробці універсального та спрощеного методу, який буде брати до уваги як структурну інформацію про склад метаматеріалу, так і про параметри електромагнітного опромінення.

З розвитком обчислювальної техніки та розробкою нових підходів у глибокому навчанні були зроблені спроби обробки структурної

інформації метаматеріалів за допомогою методів глибокого навчання. Але, ці методи використовують спрощену та неповну інформацію про топологію, таку як використання послідовної обробки двовимірної структури та інші [3-5].

II. ПРЕДСТАВЛЕННЯ ВХІДНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Для кодування однозначної інформації про матеріали, з якого складається метаматеріал було запропоновано використання діелектричної проникності, магнітної провідності та питомої провідності, як значень, що характеризують матеріал. Тобто, топологічна інформація кодується як чотирирівимірний тензор з трьома каналами значень діелектричної проникності, магнітної провідності та питомої провідності.

$$X = (x, y, z, n). \quad (1)$$

Де X – вхідний тензор, x, y, z – координати відповідних осей, n – канал з характеристиками.

Таким чином, вхідний тензор можна представити як тривимірне зображення з RGB каналами, де замість значень інтенсивності кольору знаходяться характеристики матеріалів у кожній точці (x, y, z) .

Також, потребує кодування інформація про параметри електромагнітного опромінення. З експериментів були взяті такі значення, як показник заломлення підкладки, кут опромінення, взаємна чи кросс поляризована електромагнітна хвиля. Значення заломлення та кута опромінення були масштабовані за допомогою MinMax масштабювання, інформація про кросс або взаємну

поляризацію було закодовано як 0 взємної поляризації, та 1 для кросс.

$$c = [\rho, \alpha, \eta]. \quad (1)$$

Де c – вектор параметрів електромагнітного опромінення, α – кут опромінення, η – коефіцієнт заломлення діелектрику.

III. НАВЧАННЯ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖИ

А) Для обробки структурної інформації було обрано за основу для архітектури тривимірну згорткову нейронну мережу. Із-за незначної кількості даних було обрано LeNet[6] подібну архітектуру, де замість двовимірної згортки було використано тривимірну.

Б) Також для обробки вектора параметрів електромагнітного опромінення була додана додаткова нейронна мережа яка представляє тривимірний вектор як вектор n внутрішнього представлення.

В) Третій блок нейронної мережі являє собою декілька шарів повнозв'язної нейронної мережі, яка на вхід приймає об'єднаний вектор представлення структурної інформації та векторне представлення параметрів електромагнітного опромінення.

Схематичне зображення такої архітектури представлено на рис.1 з підписаними блоками А, Б, В.



Рис. 1. Архітектура для прогнозування коефіцієнту пропускання діелектрику

Коефіцієнт пропускання представлений у вигляді набору із 20 значення для обраних частот із проміжку, що був досліджений. Для цього навчання були обрані дані про електромагнітні властивості метаматеріалів для частотного проміжку від 136 до 371 ГГц. Тобто, із цього проміжку було обрано 20 значень коефіцієнту пропускання для 20 частот.

Із-за малої кількості даних було створено таку вибірку для навчання та тестування.

ТАБЛИЦЯ 1. Тренувальна вибірка

Тренування	Валідація
12	2

Під час навчання було отримано такий графік значень функції помилки. Цей графік представлений на рис. 2

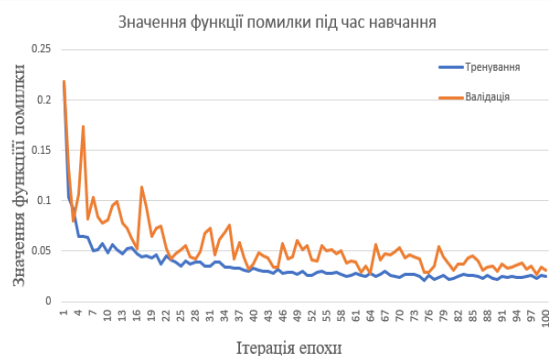


Рис. 2 Графік значень функції помилки

З графіку на рис. 2 видно нестабільні значення функції помилки для валідаційної вибірки. Це може бути зумовлено малою кількістю даних та великими значення параметру Dropout.

Для валідаційного метаматеріалу було спрогнозовано таку залежність коефіцієнту пропускання від частоти [7].

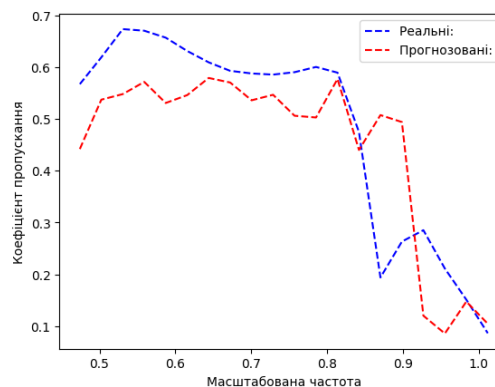


Рис. 3 Спрогнозовані та реальні значення коефіцієнту пропускання для метаматеріалу 2

З графіку залежності на рис. 3 можна легко сказати, що метаматеріал являє собою фільтр нижніх частот.

IV. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Із-за малої кількості даних прогнозовані значення не можливо використовувати як опорні значення для розрахунків та моделювання. Але, не зважаючи на таку малу кількість зібраних семплів, нейронна мережа змогла вивчити внутрішні залежності метаматеріалу, обробити вектор параметрів електромагнітного опромінення та спрогнозувати загальний вид залежності коефіцієнту пропускання від частоти, за яким можна побачити характер застосування цього метаматеріалу.

Також, навчання було проведено для доволі вузького діапазону опромінення. Це обмеження теоретично може бути виправлено тим, що інформація про частоту опромінення буде також

використана як вхідна інформація. Це можна зробити за допомогою сучасних архітектур, які мають механізм перекресної та власної уваги.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] [1] Lopez, Maël & Dupont, Thomas & Panneton, R.. (2023). A mass-spring analogy for modeling the acoustic behaviour of a metamaterial. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. 265. 6295-6301. 10.3397/IN_2022_0935.J. Clerk Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism," 3rd ed., vol. 2. Oxford: Clarendon, 1892, pp.68–73.
- [2] Porfyrakis, Polykarpos & Tsitsas, Nikolaos. (2019). Nonlinear electromagnetic metamaterials: Aspects on mathematical modeling and physical phenomena. Microelectronic Engineering. 216. 111028. 10.1016/j.mee.2019.111028.K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [3] F. Demore, G. Rizzi, M. Collet, P. Neff and A. Madeo, "Unfolding engineering metamaterials design: Relaxed micromorphic modeling of large-scale acoustic meta-structures," Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 168, no. 104995, Nov. 2022. doi:10.1016/j.jmps.2022.104995.
- [4] L. Yanglong and W. Yan, "Structural optimization of metamaterials based on periodic surface modeling," Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, vol. 395, no. 115057, May 2022. doi:10.1016/j.cma.2022.115057.
- [5] W. Pabst, S. Hříbalová and T. Uhlířová. "Quasi-laminate and quasi-columnate modeling of dielectric and piezoelectric properties of cubic-cell metamaterials," Journal of the European Ceramic Society, vol. 42, no. 3, pp. 1396-1406, Apr. 2022. doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2021.12.013.
- [6] Lecun, Y.; Bottou, L.; Bengio, Y.; Haffner, P. (1998). "Gradient-based learning applied to document recognition" Proceedings of the IEEE. 86 (11): 2278–2324. doi:10.1109/5.726791. S2CID 14542261
- [7] P. I. Krysenko, M. O. Zoziuk "Using Information about Experimental Conditions to Predict Properties of Metamaterials," Microsystems, Electronics and Acoustics, vol. 28, no. 3, 2023, pp. 287808.1-287808.7, Dec. 2023. doi: 10.20535/2523-4455.mea.287808