

Михалевський Д.В.

Вінницький національний технічний університет

Бриль Д.Р.

Вінницький національний технічний університет

ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ СТАНДАРТУ WI-FI ЗА ДОПОМОГОЮ ЗАСОБІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

У роботі проведено дослідження можливості оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних безпроводних мереж стандарту Wi-Fi за допомогою засобів штучного інтелекту. Для цього проведено аналіз існуючих методів побудови штучних нейронних мереж, які мають високу ефективність у завданнях прогнозування та оцінювання параметрів каналів передачі інформації. Встановлено доцільність використання нейронних мереж на базі вентильних рекурентних блоків, що є основою для побудови трансформера, для аналізу та ефективної обробки послідовних даних для оцінювання параметрів безпроводних каналів. Такі нейронні мережі здатні запам'ятовувати релевантну інформацію для пов'язаних параметрів, що дозволяє моделювати довгострокові залежності між ними.

На основі сучасного алгоритму штучного інтелекту на базі трансформера, проведено оцінювання основного енергетичного параметра та визначення його зміни від архітектурних перешкод. За допомогою механізму перехресного затвердження оптимальної моделі оцінювання із застосуванням середньої квадратичної помилки та коефіцієнту детермінації, на основі вимірних значень отримано функції розподілу сигналу у приміщенні. За допомогою машинного навчання проведено дослідження оптимальних моделей побудови поверхні поширення сигналу. Встановлено, що для побудови максимально наближених поверхонь є використання поліноміальної моделі із ступенем 3, а для операції прогнозування доцільно застосовувати поліноміальну функцію з ступенем 2.

Запропоновано комплексний підхід для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного параметра, який включає наступні етапи: створення бази даних, отримання оптимальної функції на основі середньої помилки та коефіцієнту детермінації; прогнозування поширення сигналу; прогнозування флуктуацій сигналу біля архітектурних перешкод та кутів приміщення; порівняння із існуючими моделями та визначення похибок. Такий підхід дає можливість оцінювати як поширення сигналу у просторі, так і врахування факторів впливу.

Ключові слова: модель оцінювання, безпроводні канали, корпоративна телекомунікаційна мережа, нейронні мережі, штучний інтелект, статистичний аналіз.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних телекомунікаційних технологій стандартів 5G/Wi-Fi, спонукає до підвищення вимог точності і оперативності операції моніторингу та оцінювання параметрів безпроводних каналів. Застосування традиційних методів оцінювання, заснованих на детермінованих моделях та статистичному аналізі, часто не забезпечують достатньої ефективності в умовах складної й динамічної зміни параметрів середовища передачі інформації [1], що обумовлено існуванням значної кількості факторів впливу різного роду. Це створює потребу в розробці нових підходів, здатних враховувати такі фактори із мож-

ливістю адаптації, залежно від умов поширення хвиль для підвищення ефективності методів та засобів оптимізації ресурсів безпроводних мереж. Одним із напрямків вирішенні такої проблеми є застосування алгоритмів штучного інтелекту та технології машинного навчання, які мають значний потенціал для дослідження каналного та фізичного рівнів [2]. Здатність алгоритмів штучного інтелекту виявляти складні нелінійні залежності й закономірності, у великих обсягах даних, робить їх перспективним інструментом для оцінювання та прогнозування параметрів безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Як відомо [3], ефективність функціонування безпроводних систем передачі інформації значною мірою залежить від точності оцінювання наступних параметрів радіоканалу: коефіцієнт затухання сигналу, який характеризує ослаблення потужності сигналу при поширенні хвиль від передавача до приймача; багатопроменеве поширення хвиль, що відображає явище надходження сигналу до приймача через середовище передачі із різними затримками; доплерівське зміщення частоти, що являє собою зміну частоти сигналу внаслідок руху передавача, приймача або об'єктів навколишнього середовища; затримка поширення сигналу, що характеризується часом проходження сигналу від передавача до приймача; міжсимвольна інтерференція, де символи сигналу впливають один на одного; відношення рівня сигнал/шум; пропускну здатності каналу та ін. Кожен із перерахованих параметрів потребує відповідних методів та засобів аналізу та врахування різноманітних факторів впливу. Із них можна виділити декілька груп традиційних підходів до оцінювання таких параметрів безпроводних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж.

Одним із напрямків вивчення фізичних законів поширення хвиль та геометричних особливостей середовища передачі можна виділити детерміновані моделі: модель вільного простору та подальші її модифікації, та модель відбиття від земної поверхні з моделями дифракції [4]. Процес оцінювання за такими моделями передбачає наявність наперед відомих параметрів та відсутність врахування випадкових факторів впливу. Якщо використовувати протилежний підхід, можна виділити емпіричні моделі, такі як модель Окумура-Хата, модель COST231, модель Уолфіша-Ікегамі та ін. Особливістю їх є використання експериментальних вимірювань у різних умовах поширення радіосигналу та отримання коефіцієнтів затухання [5]. Крім того, використовуючи експериментальні дослідження можна використовувати ймовірнісні характеристики для опису випадкових процесів у каналі, такі як: Релевський розподіл для моделювання завмирань; розподіл Райса для каналів з прямою видимістю та логнормальний розподіл для моделювання затухання сигналу. Такі методи отримали широке використання в практичному проектуванні та експлуатації безпроводних мереж та систем передачі інформації, але вони мають певні обмеження. Зокрема, детерміновані та емпіричні моделі часто не враховують усіх факторів, що впливають на

поширення сигналу, а статистичні методи вимагають значного обсягу даних для досягнення необхідної точності [6–7]. Наприклад, класичні моделі затухання не забезпечують достатньої достовірності результатів оцінювання в складних умовах щільної міської забудови та всередині приміщень. Для подолання таких недоліків широкого використання набули методи штучного інтелекту, які дозволяють створювати більш адаптивні моделі оцінювання параметрів безпроводних каналів, що враховують різноманітні фактори впливу. Наприклад, у роботі [8] запропоновано використання багатопроменевих перцептрона для прогнозування затухання сигналу в міському середовищі. Нейронна мережа була навчена на даних вимірювань потужності сигналу в різних точках міста з урахуванням таких факторів, як: відстань між передавачем і приймачем; висота антен; щільність забудови; наявність перешкод; частота сигналу та погодні умови. Результати експериментальних досліджень показали, що модель на основі алгоритмів штучного інтелекту забезпечує на 15–20% вищу точність прогнозування порівняно з традиційними емпіричними моделями. Більш складний підхід запропонований у [9], де використовується комбінація згорткових нейронних мереж та рекурентних нейронних мереж з довгою короткочасною пам'яттю. Перші використовуються для обробки просторових характеристик середовища (карти місцевості, розташування будівель тощо), тоді як другі моделюють часову динаміку змін потужності сигналу. Такий гібридний підхід дозволив досягти середньоквадратичної помилки прогнозування потужності сигналу менше 3 дБ.

Таким чином, згідно проведеного аналізу, доцільно виділити можливість оцінювання одного із основних параметрів безпроводного каналу на базі алгоритмів штучного інтелекту з метою підвищення точності вихідних результатів та кращого визначення їх взаємозв'язку від різноманітних факторів впливу, що є актуальним.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз сучасних досягнень та перспектив застосування технологій штучного інтелекту для оцінювання основних параметрів безпроводних каналів передачі інформації, а також розробка комплексного підходу до застосування алгоритмів штучного інтелекту для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного параметра.

Виклад основного матеріалу. Розвиток технологій штучного інтелекту відкриває нові можливості для вирішення завдань оцінювання параметрів безпроводних каналів. В цьому напрямку

можна проаналізувати відповідну класифікацію основних напрямків розвитку спеціалізованих алгоритмів для аналізу та прогнозування.

До першої групи можна віднести штучні нейронні мережі, які демонструють високу ефективність у завданнях прогнозування та оцінювання параметрів безпровідних каналів. Найбільш поширеними з них є [10, 11]: багат шарові перцептрони (MLP); згорткові нейронні мережі (CNN); рекурентні нейронні мережі (RNN) та мережі з довгою короткочасною пам'яттю (LSTM). У завданнях прогнозування та класифікації параметрів безпровідного каналу важливо враховувати як часову динаміку, так і просторові спектри каналів. Наприклад, багат шарові перцептрони можуть бути достатніми для аналізу простих завдань із статичною обробкою даних, але для дослідження динамічних змін та багатовимірних даних точність їх значно зменшується. Для більш складних сценаріїв доцільніше використовувати рекурентні нейромережі та мережі із довгою короткочасною пам'яттю. Для аналізу декількох змінних одночасно використовуються гібридні архітектури, що комбінують переваги дослідження ознак із певної вибірки даних та здатність їх пов'язування із часовими залежностями. Вибір архітектури нейромережі залежить від певного завдання, обсягу даних та вимог до обчислювальних ресурсів.

До другої групи можна віднести подальший розвиток нейромереж, що привів до появи модифікацій так званих вентильних рекурентних блоків (GRU), які використовуються для ефективною обробки послідовних даних, таких як текст, мова, часові ряди та ін. Такі нейромережі здатні

запам'ятовувати важливу інформацію з попередніх кроків вхідної послідовності та забувати нерелевантну, що дозволяє моделювати довгострокові залежності між параметрами. Такий тип нейронних мереж отримав назву «трансформерів» [12], які можна досить ефективно застосовувати у прогнозуванні параметрів і характеристик каналів передачі інформації, особливо в умовах високої динаміки та складних середовищ, де існує значна кількість факторів впливу.

Застосуємо трансформер, як основну технологію сучасних алгоритмів штучного інтелекту, для оцінювання розподілу поширення сигналу для безпровідних каналів корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi. Для цього проведено експериментальні дослідження основного енергетичного параметра, для типового приміщення розмірами $(l;d)=10 \times 10$ м із архітектурними перешкодами у вигляді стін. Мережа складалась із точки доступу стандарту Wi-Fi та абонентського пристрою. За допомогою засобів моніторингу абонентського пристрою проведено ряд вимірювань потужності сигналу у діапазоні 2,4 ГГц із висотою антен на рівні 1,5 м [13–14]. Отриманий масив даних проаналізовано та досліджено із використанням алгоритмів штучного інтелекту на базі трансформера та методів статистичного аналізу. Оскільки, приміщення складалось із декількох кімнат, то для візуалізації результатів досліджень можна використати побудову поверхні розподілу сигналу для окремих кімнат із подальшим їх об'єднанням. Поверхня розподілу сигналу в частотному діапазоні 2,4 ГГц, побудована за допомогою штучного інтелекту, показано на рис. 1а.

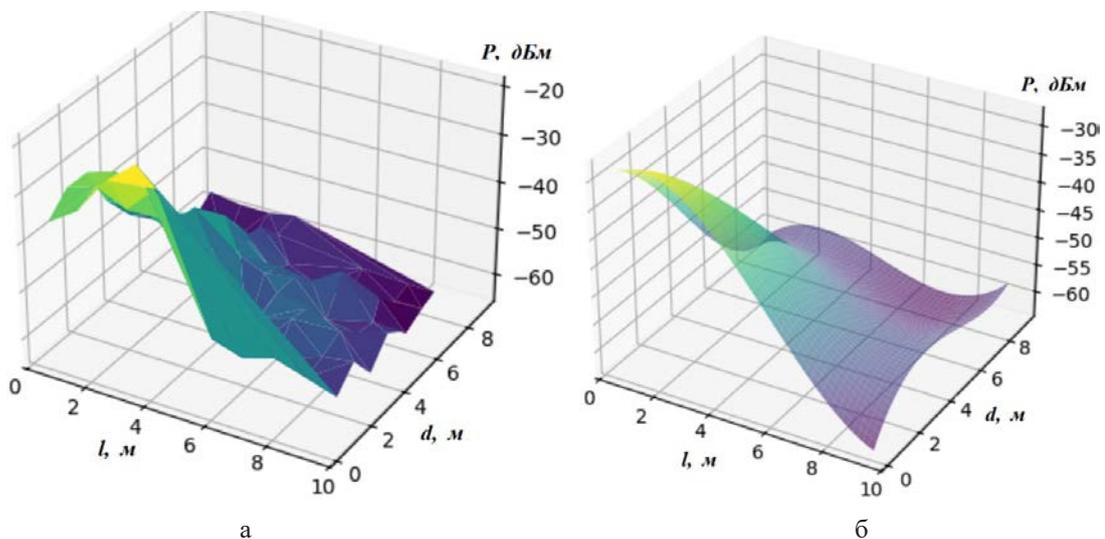


Рис. 1. Розподіл сигналу у приміщення за результатами експериментальних досліджень (а) та їх регресійний аналіз

На основі рис. 1 а, виконано аналіз поверхні із застосуванням механізму перехресного затвердження оптимальної моделі оцінювання, що передбачає визначення середньої квадратичної помилки та коефіцієнту детермінації, використовуючи наперед створену базу даних. Найбільш оптимальним описом є поліноміальна модель зі ступенем 3, яку можна записати так:

$$P = a_1 l^3 + a_2 d^3 + a_3 l^2 + a_4 d^2 + a_5 l^2 d + a_6 l d^2 + a_7 l + a_8 d + a_9 l d + P_0, \quad (1)$$

де $a_1 \dots a_9$ – коефіцієнти затухання моделі; P_0 – початковий рівень.

Графічне представлення отриманої моделі наведено на рис. 1 б. Оскільки алгоритми штучного інтелекту працюють на базі моделей із машинним навчанням, то було проведено прогнозування поверхні для більших розмірів приміщення. Для цього, збільшено довжину та ширину приміщення, що передбачає побудову прогнозованих значень розподілу основного енергетичного параметра. Результати прогнозування за виразом (1) наведено на рис. 2 а.

Як видно із графіку, використання моделі із ступенем 3 та вище передбачає отримання максимально наближених поверхонь до отриманих експериментальних даних, проте для операцій оцінювання та прогнозування поверхонь поширення сигналу є недоцільним, оскільки це приводить до виникнення значних похибок. На малюнку це спостерігається як зона що знаходиться за координатами (10;10) м, тому використання такої моделі має обмеження, що обумовлено отриманими даними. Для зменшення похибки, доцільно використовувати поліноміальні моделі із ступенем 2:

$$P = b_1 l^2 + b_2 d^2 + b_3 l d + b_4 l + b_5 d + P_0, \quad (2)$$

де $b_1 \dots b_5$ – коефіцієнти затухання моделі.

Результат прогнозування за моделлю (2) наведено на рис. 2 б. Така модель розширює значення границь оцінювання, але недієздатна для великих довжин каналу, більше 20 м, хоча для приміщень із архітектурними завадами, цього є достатньо. Але, як відомо, [1] біля стін, особливо кутів, приміщення спостерігається значна нерівномірність просторового розподілу сигналу за рахунок існування максимумів та мінімумів, особливо на певних відстанях від точки доступу. Найбільший вагомий внесок таких флуктуацій проявляється на границі стелі та підлоги зі стінами, що в результаті приводить до знаного зменшення пропускної здатності. Тому за виразом (2) можна виконувати прогнозування флуктуацій сигналу у приміщеннях із архітектурними перешкодами із використанням обернених коефіцієнтів затухання. Приклад наведено на рис. 3 а.

Використовуючи можливості трансформера та отриману базу даних результатів експериментальних досліджень, проведемо порівняльний аналіз отриманого розподілу на базі квадратичної моделі (2) (позначимо, як поверхня 1) із результатами на основі поширених моделей затухання сигналу. Для досліджень використано такі моделі: Okumura–Hata extrapolated (поверхня 2), ITU-R P.1238 indoor (поверхня 3), COST231-Walfisch–Ikegami (поверхня 4), Log-Distance Path Loss Model (поверхня 5), ECC-33 (Extended Hata) (поверхня 6). Ці моделі були адаптовані до параметрів безпроводного каналу на базі якого отримано експериментальні дані (позначено як 7) та застосовано обробку результатів алгоритмами машинного навчання. Результати отриманих досліджень наведено на рис. 3 б.

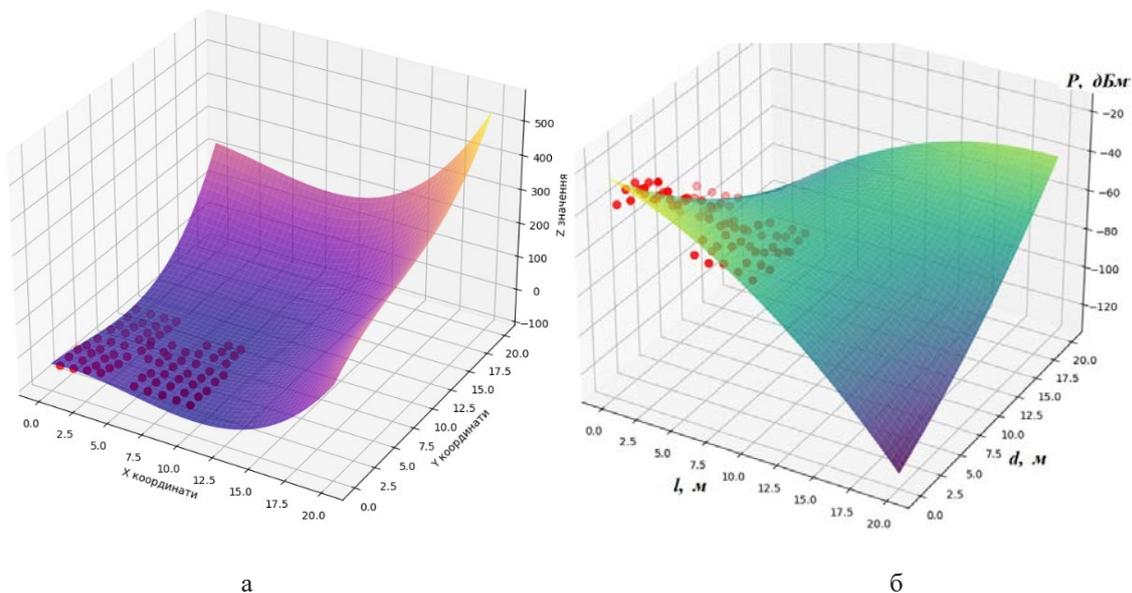


Рис. 2. Результати прогнозування за поліноміальною моделлю за порядком 3 (а) та 2 (б)

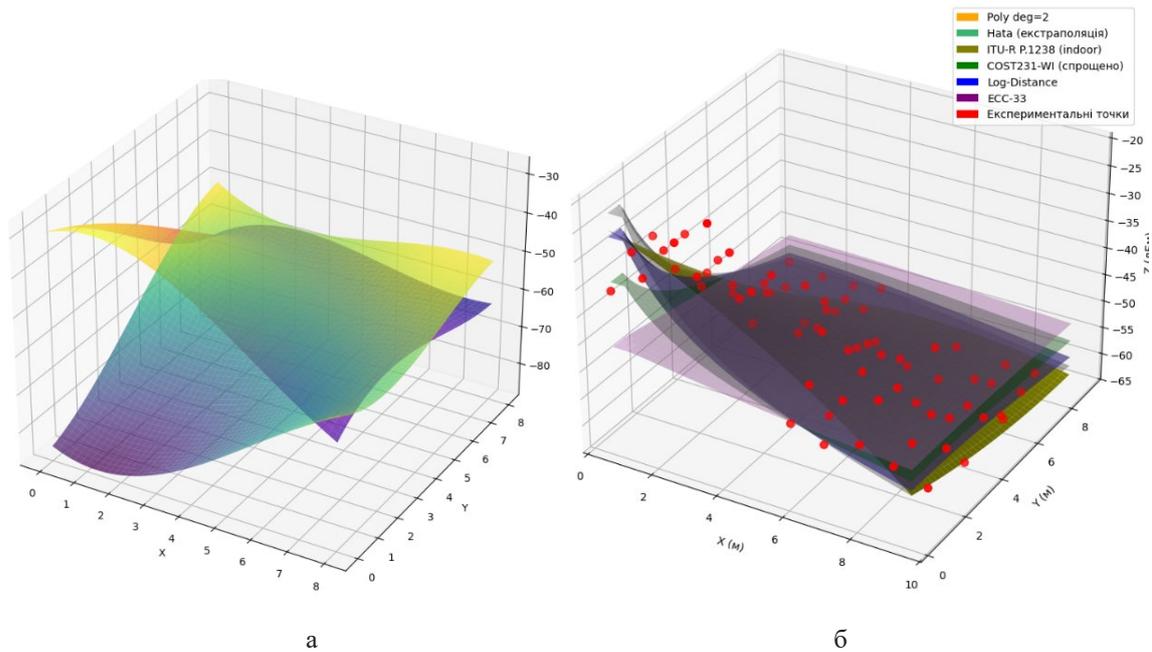


Рис. 3. Оцінювання флуктуацій сигналу у приміщенні (а) та порівняння моделей затухання

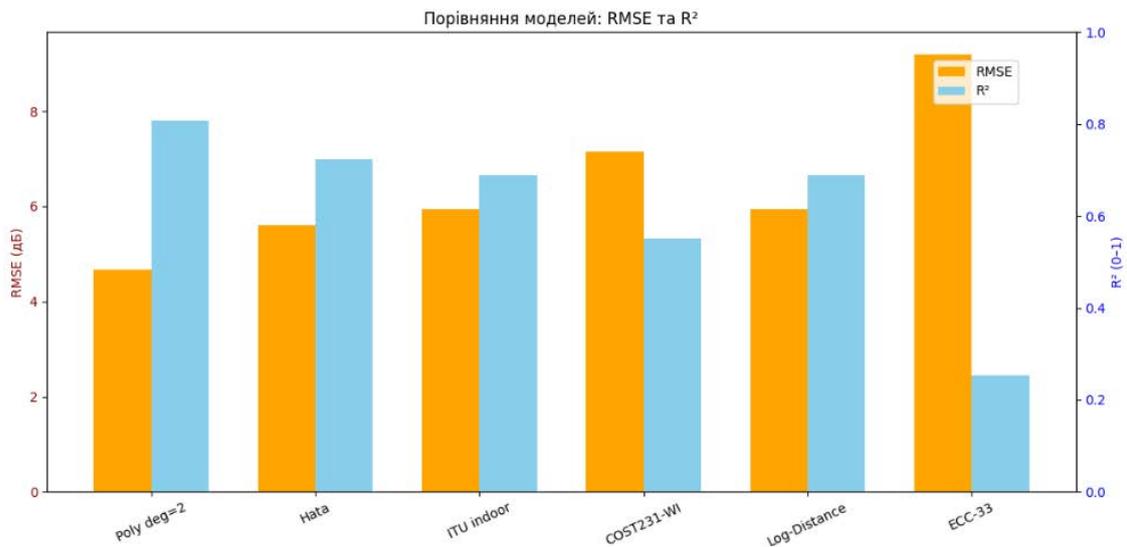


Рис. 4. Результати порівняння моделей

Результати порівняння моделей на основі середньої помилки (замість середньоквадратичної) та коефіцієнту детермінації наведено на рис. 4.

Висновки. Таким чином, встановлено, що використання засобів штучного інтелекту, зокрема трансформера, для оцінювання покриття корпоративних телекомунікаційних мереж стандарту Wi-Fi дає можливість значного спрощення, гнучкості та швидкодії операцій аналізу та візуалізації. На основі проведених досліджень запропоновано комплексний підхід для оцінювання просторового розподілу основного енергетичного пара-

метра, який включає наступні етапи: створення бази даних, отримання оптимальної функції на основі середньої помилки та коефіцієнту детермінації; прогнозування поширення сигналу; прогнозування флуктуацій сигналу біля архітектурних перешкод та кутів приміщення; порівняння із існуючими моделями та визначення похибок. На основі порівняння класичних моделей за середньою помилкою та коефіцієнта детермінації, підтверджено, що оптимальною моделлю оцінювання корпоративних телекомунікаційних мереж у приміщенні є квадратична функція.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6/9 (108). Pp. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.218720>.
2. Wang T., Wen C.K., Wang H., Gao F., Jiang T., Jin S. Deep learning for wireless physical layer: Opportunities and challenges. *China Communications*. 2017. Vol. 14. № 11 Pp. 92–111. DOI: <https://doi.org/10.1109/CC.2017.8233654>
3. Ye Z. Exploring Impact of Doppler Effect on Time-Varying Multipath Wireless Communication Channels via Model Based Characteristic Analysis. *WSEAS Transactions on Signal Processing*. 2024. Vol. 20., Pp. 145–152. DOI: <https://doi.org/10.37394/232014.2024.20.15>
4. Saunders S.R., Aragon-Zavala A. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems* (2nd Edition). Wiley. 2007. 524 p.
5. Sarkar T.K., Ji Z., Kim K., Medouri A., Salazar-Palma M. A survey of various propagation models for mobile communication. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2003. Vol. 45, № 3. Pp. 51–82.
6. Mykhalevskiy D. Investigation of Sensitivity Impact of Receiver to Effective Data Transmission Rate. Proceeding of the 1th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine. Pp. 369–372.
7. Mykhalevskiy D., Vasylykivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Easten-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №4/9 (88). Pp. 38–43. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.114191>.
8. Agarwal T., Bandyopadhyay S., Mehta N.B. Learning based channel prediction for interference alignment in multiple antenna systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. Vol. 20. № 3. Pp. 1696–1711.
9. Zhang C., Patras P., Haddadi H. Deep learning in mobile and wireless networking: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2019. Vol. 21. № 3, Pp. 2224–2287. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2904897>
10. Ye H., Li G.Y., Juang B.H. Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. Vol. 7. № 1. Pp. 114–117. DOI: <https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2757490>
11. He H., Wen C.K., Jin S., Li G.Y. Deep learning-based channel estimation for beamspace mmWave massive MIMO systems. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. Vol. 7. № 5. Pp. 852–855.
12. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I. Attention Is All You Need. 31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017). Long Beach. CA. USA. 2017. Pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762>.
13. Mykhalevskiy D. V. Investigation of wireless channels of 802.11 standard in the 5GHz frequency band. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 1. Pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0004>.
14. Mykhalevskiy D. V., Kychak V. M. Development of information models for increasing the efficiency of evaluating wireless channel parameters of 802.11 standard. *Latvian journal of physics and technical sciences*. 2019. № 2. Pp. 41–51. DOI: <https://doi.org/10.2478/lpts-2019-0009>.

Mykhalevskiy D.V., Bryl D.R. EVALUATION OF COVERAGE OF CORPORATE WIRELESS WI-FI NETWORKS USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS

In this paper, investigates the possibility of evaluating the coverage of corporate telecommunication wireless Wi-Fi networks using Artificial Intelligence (AI) tools. To achieve this, an analysis of existing methods for constructing artificial neural networks was conducted, focusing on those that exhibit high effectiveness in tasks involving the prediction and evaluation of information transmission channel parameters. The expediency of using neural networks based on Gated Recurrent Units (GRUs), which form the basis for constructing the Transformer architecture, was established for the analysis and effective processing of sequential data to evaluate wireless channel parameters. Such neural networks are capable of memorizing relevant information for related parameters, allowing for the modeling of long-term dependencies between them.

Based on a modern AI algorithm utilizing the Transformer architecture, an evaluation of the main energy parameter was conducted, and its variation due to architectural obstacles was determined. Using a cross-validation mechanism for the optimal evaluation model, which employed the Mean Squared Error (MSE) and the Coefficient of Determination (R²), the signal distribution functions within the premises were derived from measured values. Research on the optimal models for constructing the signal propagation surface was carried out using machine learning. It was established that for building the most closely approximated surfaces, a polynomial model of degree 3 should be used, while for prediction operations, it is advisable to apply a polynomial function of degree 2.

A comprehensive approach is proposed for evaluating the spatial distribution of the main energy parameter, which includes the following stages: database creation; obtaining the optimal function based on the mean error and the coefficient of determination; signal propagation prediction; prediction of signal fluctuations near architectural obstacles and room corners; comparison with existing models and error determination. This approach makes it possible to evaluate both the signal's spatial distribution and the influence of various factors.

Key words: evaluation model, wireless channels, corporate telecommunication network, neural networks, artificial intelligence, statistical analysis.

Дата надходження статті: 22.10.2025

Дата прийняття статті: 11.11.2025

Опубліковано: 30.12.2025