

УДК 621.391.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.2/07>**Михалевський Д.В.**<https://orcid.org/0000-0001-5797-164X>

Вінницький національний технічний університет

**Василишин В.І.**<https://orcid.org/0000-0002-5461-0125>Харківський національний університет повітряних сил  
імені Івана Кожедуба**Коцюба В.П.**<https://orcid.org/0000-0001-6336-8193>Харківський національний економічний університет  
імені Семена Кузнеця

## ОЦІНЮВАННЯ ПОКРИТТЯ КОРПОРАТИВНИХ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ НА БАЗІ МОДИФІКОВАНОЇ МОДЕЛІ ОКАМУРА-ХАТА

У роботі проведено дослідження можливості оцінювання покриття безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж на базі моделі Окамура-Хата із складною архітектурною забудовою. Для цього проведено аналіз моделі з точки зору параметрів затухання та потужності сигналу, що дало можливість визначити оптимальну адаптацію до умов поширення хвиль в діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц із врахуванням втрат у вільному просторі, втрат пов'язаних із параметрами середовища та втрат на конкретних архітектурних перешкодах з використанням наперед визначеної бази коефіцієнтів та використання методу трасування променів.

Для отримання максимально наближених поверхонь поширення сигналу у приміщеннях, запропоновано модифіковану модель Окамура-Хата із врахуванням просторового розподілу за координатами приміщення. Для цього, було застосовано механізм перерахунку відстаней між передавачем та приймачем для кожної точки простору приміщення. Це дозволило застосувати результати експериментальних досліджень, як параметри для розрахунків покриття отриманих за допомогою діагностичних засобів клієнтських пристроїв.

Встановлено, що використання модифікованих моделей Окамура-Хата, як у базовому вигляді, так і з трасуванням променів, є доцільним для операцій прогнозування поширення хвиль в частотних діапазонах 2,4 ГГц та 5 ГГц при умовах існування складних архітектурних перешкод. Стандартна модель Окамура-Хата є ефективною для попереднього та швидкого планування безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж, оскільки вона потребує мінімум ресурсів і забезпечує достатню точність. Модель із застосуванням трасування променів потребує калібрування параметрів архітектурних перешкод, особливо при складних забудовах, та проведення значної кількості розрахунків, але при цьому дозволяє підвищити точність у два і більше раз. Особливо це є актуальним для середовищ із високою щільністю точок доступу.

**Ключові слова:** модель оцінювання, безпроводні канали, корпоративна телекомунікаційна мережа, модель Окамура-Хата, статистичний аналіз.

**Постановка проблеми.** Оцінювання просторового розподілу радіосигналу є ключовим завданням у проектуванні сучасних безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж [1]. Класичні моделі затухання, такі як Okumura–Hata, ITU-R P.1238, COST231-Walfisch–Ikegami, Log-Distance Path Loss Model та ECC-33, традиційно застосовуються для сценаріїв оцінювання рівня

сигналу у радіоканалі між передавачем та приймачем, із подальшою просторовою інтерпретацією [2]. Проте розвиток багатоповерхових будівель, щільних міських середовищ та нових стандартів безпроводних систем потребує переведення цих моделей у тривимірний простір для підвищення точності прогнозування покриття та врахування відповідних факторів впливу, особливо багато-

© Михалевський Д.В., Василишин В.І., Коцюба В.П., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0



променевого поширення хвиль. Одним із напрямків вирішенні такої проблеми є вдосконалення та адаптація існуючих моделей затухання до складних архітектурних забудов для підвищення ефективності методів та засобів планування та оптимізації ресурсів сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У дослідженнях, що присвячені поширенню хвиль та впливу геометрії середовища передачі, традиційно виділяють два основні підходи. Перший ґрунтується на детермінованих моделях, серед яких модель вільного простору та її модифікації, а також моделі, що враховують відбиття від земної поверхні та дифракційні явища [4]. Такі методи базуються на наперед відомих параметрах і не враховують випадкових факторів. Другий підхід представлений емпіричними моделями, зокрема Окумура-Хата, COST231, Уолфіша-Ікегамі та іншими. Їхня особливість полягає у використанні результатів експериментальних вимірювань у різних умовах поширення сигналу та визначенні коефіцієнтів затухання [5].

Окрім цього, експериментальні дослідження дозволяють застосовувати статистичні методи для опису випадкових процесів у каналі. Наприклад, розподіл Релея використовується для моделювання завмирань, розподіл Райса – для каналів із прямою видимістю, а логнормальний розподіл – для опису затухання сигналу. Такі підходи знайшли широке застосування у практичному проектуванні та експлуатації бездротових мереж, проте мають певні обмеження. Зокрема, детерміновані та емпіричні моделі не завжди враховують усі фактори, що впливають на поширення сигналу, а статистичні методи потребують значного обсягу даних для досягнення високої точності [6–7]. Класичні моделі затухання часто виявляються недостатньо надійними у складних умовах щільної міської забудови чи всередині приміщень. Таким чином, детерміновані моделі мають високу точність, але обмежені у врахуванні випадкових факторів, емпіричні моделі базуються на вимірюваннях, проте не завжди універсальні, а статистичні методи оцінювання дозволяють описати випадкові процеси, але потребують великих даних. Результати досліджень у роботі [2026] підтверджують, що ні одна існуюча технологія передачі інформації не є універсальним чи оптимальним рішенням для всіх середовищ розгортання мереж. Проте, враховуючи особливості поширення хвиль доцільно виділити адаптацію певних моделей до конкретного середовища передачі інформації із

врахуванням відповідних факторів впливу, що є актуальним.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вдосконалення моделі Окумура-Хата для оцінювання покриття у просторі приміщення із складною архітектурною забудовою для безпроводних корпоративних телекомунікаційних мереж.

**Виклад основного матеріалу.** Як відомо [9], пропускна здатність каналів корпоративних телекомунікаційних мереж та ймовірність виникнення помилок залежить від рівня потужності сигналу на вході приймача  $P_{RX}$  та параметрів середовища передачі. Оскільки, цей показник прямо пропорційно залежить від вихідної потужності передавача, то для розрахунку параметрів поширення сигналу доцільно використовувати рівняння бюджету каналу. Тоді, взаємозв'язок таких енергетичних параметрів пристроїв, які знаходяться на відстані один від одного, можна визначити із використанням параметру затухання сигналу та потужності сигналу на вході приймача, можна записати так:

$$P_{RX} = P_{TX} + G_{TX} + G_{RX} - L, \quad (1)$$

де  $P_{TX}$  – потужність передавача;  $G_{TX}$  – коефіцієнт підсилення антени передавача;  $G_{RX}$  – коефіцієнт підсилення антени приймача;  $L$  – втрати, які визначаються згідно моделі затухання.

Розглянемо затухання за моделлю Окумура-Хата. Як правило, така модель використовується для міських і приміських умов та базується на емпіричних дослідженнях Окумура та аналітичних апроксимаціях Хата. Класичний математичний запис можна представити так [2]:

$$L = 69,55 + 26,16 \log f - 13,82 \log h_{TX} - ah_{RX} + (44,9 - 6,55 \log h_{TX}) \log l \quad (2)$$

де:  $f$  – частота сигналу;  $h_{TX}$  – висота передавальної антени;  $h_{RX}$  – висота приймальної антени;  $l$  – відстань між приймачем та передавачем;  $a$  – поправка для висоти приймача.

Вираз (2) використовується для розрахунку втрат поширення хвиль у радіоканалах для міських і приміських умов. При оцінюванні затухання сигналу у корпоративних телекомунікаційних мережах, в умовах прямої видимості, можна застосовувати модифікований вираз [10]:

$$L_c = 20 \log l + 20 \log f - 27,55. \quad (3)$$

Враховуючи існування архітектурних перешкод у приміщеннях, додаткове затухання, яке залежить від типу та матеріалу визначається як:

$$L_n = 10b \log(l/l_0) + \sum_{i=1}^n k_i L_i, \quad (4)$$

де:  $l_0$  – відстань, на якій вимірюють початкову

потужність сигналу як точку відліку;  $k_i$  – кількість однотипних перешкод;  $L_i$  – затухання сигналу при проходженні  $i$ -ї перешкоди;  $b$  – показник, який описує, наскільки швидко загасає сигнал зі збільшенням відстані у певному середовищі.

Таким чином, підставляючи (3) і (4) у (1) отримаємо:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - 20 \log l - 20 \log f + 27,55 - 10b \log(l/l_0) - \sum_{i=1}^n k_i L_i, \quad (5)$$

Вираз (5) є інтерпретацією емпіричної моделі Окамура-Хата для умов поширення хвиль в діапазонах 2.4 ГГц та 5 ГГц, що є доцільним при використанні операцій оцінювання потужності сигналу на вході приймача, на базі енергетичного балансу радіоканалу. Модель враховує три групи факторів впливу: втрати у вільному просторі, втрати пов'язані із параметрами середовища та втрати на конкретних архітектурних перешкодах з використанням наперед визначеної бази коефіцієнтів. Як недоліки такої моделі, можна виділити відсутність урахування багатопроменевого поширення хвиль у просторі, що є критичним фактором у приміщеннях з великою кількістю відбиваючих поверхонь. Тому, для врахування такого фактору, можна застосувати модель трасування променів [11].

Передавальна антена засобів корпоративних телекомунікаційних систем має всенаправлену діаграму спрямованості, тому вона створює сукупність геометричних променів, які проходячи через середовище передачі інформації зазнають відбиття, заломлення та дифракції на об'єктах і перешкодах у приміщенні. В результаті на приймальній антені отримується векторна сума всіх променів із відповідними фазовими зсувами. Тоді, додаткове затухання буде мати наступний вигляд:

$$L_n^r = 10 \log \left| \sum_{i=1}^k A_i \cdot e^{j\phi_k} \right|^2, \quad (6)$$

де  $A_k$  – амплітуда  $k$ -го променя,  $\phi_k$  – його фазовий зсув.

Для найбільш поширених випадків (прямої, відбитої, заломленої, згинаючої хвиль),  $A_k$  визначається так [8]:

$$A_n = \frac{\lambda}{4\pi l}, \quad A_s = \frac{\lambda}{4\pi l} \prod_{i=1}^m \Gamma_m,$$

$$A_3 = \frac{\lambda}{4\pi l} \prod_{i=1}^m T_m e^{-\alpha_m t_m}, \quad A_o = \frac{\lambda}{4\pi l} D(\theta_f, \theta_d, n),$$

де  $\Gamma_m$  – коефіцієнт відбиття Френеля для  $m$ -ї поверхні;  $T_m$  – коефіцієнт пропускання для  $m$ -ї поверхні;  $\alpha_m$  – коефіцієнт поглинання матеріалу,  $t_m$  – товщина стіни,  $D$  – коефіцієнт дифракції, який залежить від кута падіння  $\theta_f$ , кута дифракції  $\theta_d$  та параметра кута поширення сигналу.

Тоді вираз (5) можна записати наступним чином:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - 20 \log l - 20 \log f + 27,55 - 10 \log \left| \sum_{i=1}^k A_i \cdot e^{j\phi_k} \right|^2. \quad (7)$$

До переваг такої моделі можна віднести швидке оцінювання потужності сигналу для радіоканалу, а також підвищення точності для проблемних зон де виникають флуктуації сигналу із можливим високим рівнем затухання, особливо у місцях складної архітектурної забудови. Проте, для отримання максимально наближених поверхонь поширення сигналу у приміщеннях не вистачає врахування просторового розподілу за координатами приміщення. Для цього, застосуємо параметр  $d$ , як ширину приміщення. Площину поширення сигналу задамо масивом із розмірами  $(l;d)$  [1]. Враховуючи типову побудову радіоканалу корпоративних телекомунікаційних мереж, для кожної точки  $(l;d)$  необхідно обчислити відстань до передавача, в результаті чого отримується поверхня  $P(l;d)$ . Для розрахунку такої поверхні необхідно перерахувати математичну модель на базі масиву координат, який можна записати так:

$$(l,d) = \sqrt{(l-l_0)^2 + (d+d_0)^2}, \quad (8)$$

Якщо додати координату висоти приміщення  $h$  та врахувати контрольний вимір  $(l_0;d_0) = (l;l)$  м від токи доступу, то вираз (5) можна записати так:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{tx} + G_{rx} - (20 - 10b) \log \left( \sqrt{l^2 + d^2 + h^2} \right) - 20 \log f + 27,55 - \sum_{i=1}^n k_i^z L_i^z - \sum_{j=1}^m k_j^v L_j^v, \quad (9)$$

де  $z$  – індекс який показує параметри горизонтальної  $i$ -ї архітектурної перешкоди в площині координат  $(l;d)$ ;  $v$  – індекс  $j$ -ї перешкоди за координатою  $h$ .

Аналогічний результат можна отримати для виразу (7).

Для встановлення можливості оцінювання покриття у просторі приміщень із складною архітектурною забудовою, було застосовано модифіковані моделі Окамура-Хата до експериментальних даних розподілу сигналу отриманих у роботах [1] і [12], для радіоканалів стандарту Wi-Fi частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц та координати  $h=1,5$  м. Результати наведено на рис. 1 і рис. 2.

Як видно із результатів на рис. 1, похибка визначення положення точки доступу складає 1 м. Для такого випадку, модифікована модель Окамура-Хата забезпечує прийнятну точність (RMSE  $\approx 5.5$  дБм) і може використовуватись для попереднього планування покриття. Модель із застосуванням трасування променів із каліброваними параметрами для стін, не дає покращення і навіть погіршує результат, що потребує значних обчис-

лень коефіцієнтів відбиття та розсіювання. Для результатів на рис 2. спостерігається протилежна картина, де базова модель Окамура-Хата дає значну помилку, понад 8 дБм. При використанні трасування променів та двох порядків відбиття від стін помилка зменшується у два рази.

Розріз за координатою  $l$  демонструє найбільшу похибку обох моделей при довжині каналу більше 8 м, де сигнал має значне послаблення із помітними флуктуаціями із-за багатопроменевого поширення хвиль. Класична модель дає помилку до 7–9 дБм. Це приводить до переоцінювання рівня сигналу у дальніх зонах приміщення та в зонах за перешкодами, що передбачає проведення додаткових досліджень.

**Висновки.** Таким чином, встановлено, що моделі Окамура-Хата та Окамура-Хата із трасуванням променів можуть бути адаптовані для

просторового оцінювання поширення сигналу у приміщеннях із архітектурними перешкодами для частотних діапазонів 2,4 ГГц та 5 ГГц. Параметри моделей можуть бути визначені з довідкових даних або шляхом простих вимірювань із застосуванням засобів абонентських пристроїв. Дослідження показали, що адаптована Модель Окамура-Хата підходить для швидкого оцінювання зони покриття корпоративних телекомунікаційних мереж при мінімальних обчислювальних ресурсах, при цьому забезпечуючи похибку  $\pm 5..10$  дБм. При існуванні складної архітектурної забудови та щільному розгортанні точок доступу необхідно застосовувати трасування променів де можна зменшити похибку до  $\pm 4$  дБм, але це потребує значних обчислень та додаткових вимірювань, що є доцільним при застосуванні алгоритмів машинного навчання.

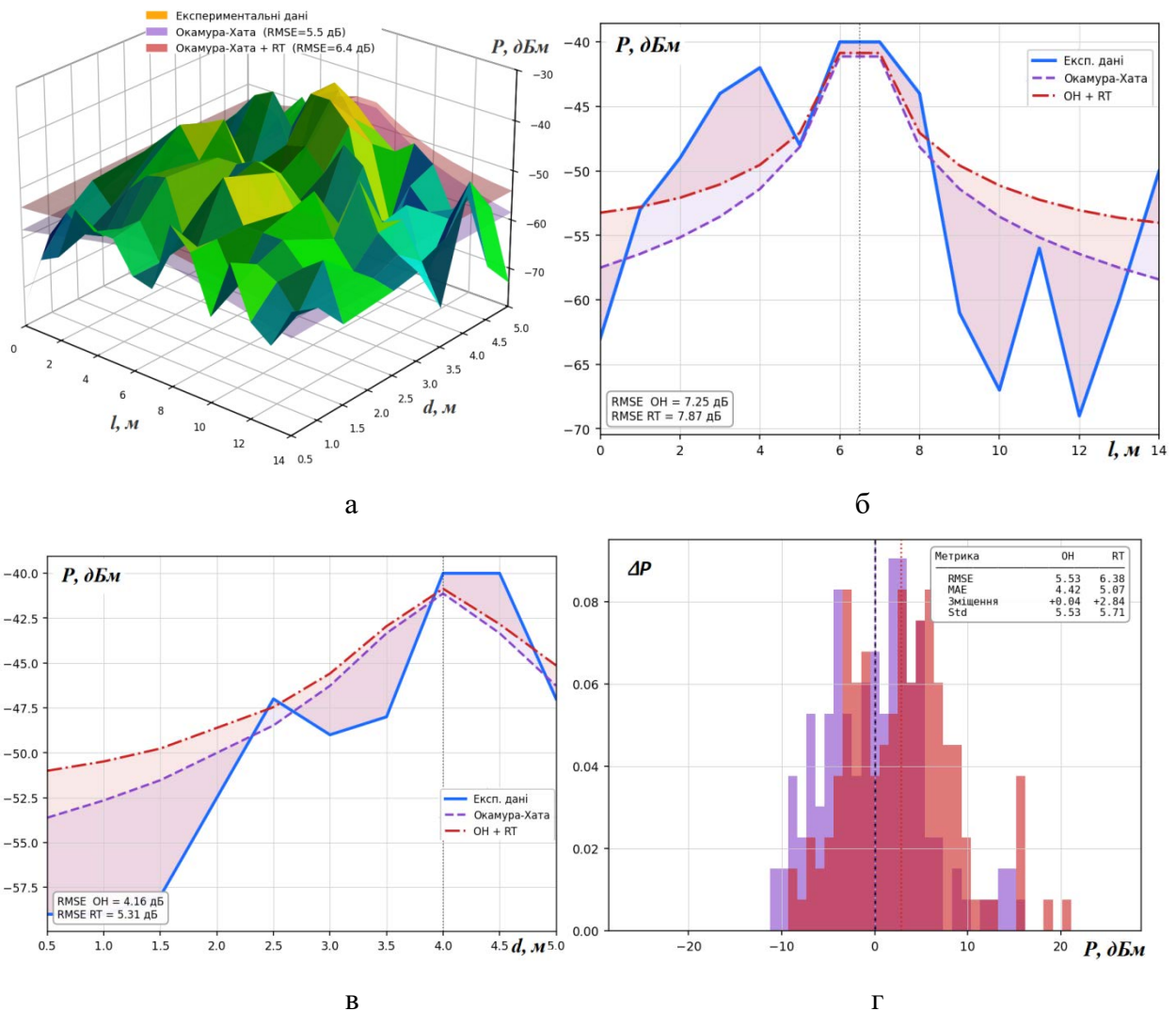


Рис. 1. Результати оцінювання розподілу сигналу у приміщенні для діапазону «2,4 ГГц»: а – поверхні розподілу; б – розрізу за координатою  $l$ ; в – розрізу за координатою  $d$ ; г – похибок

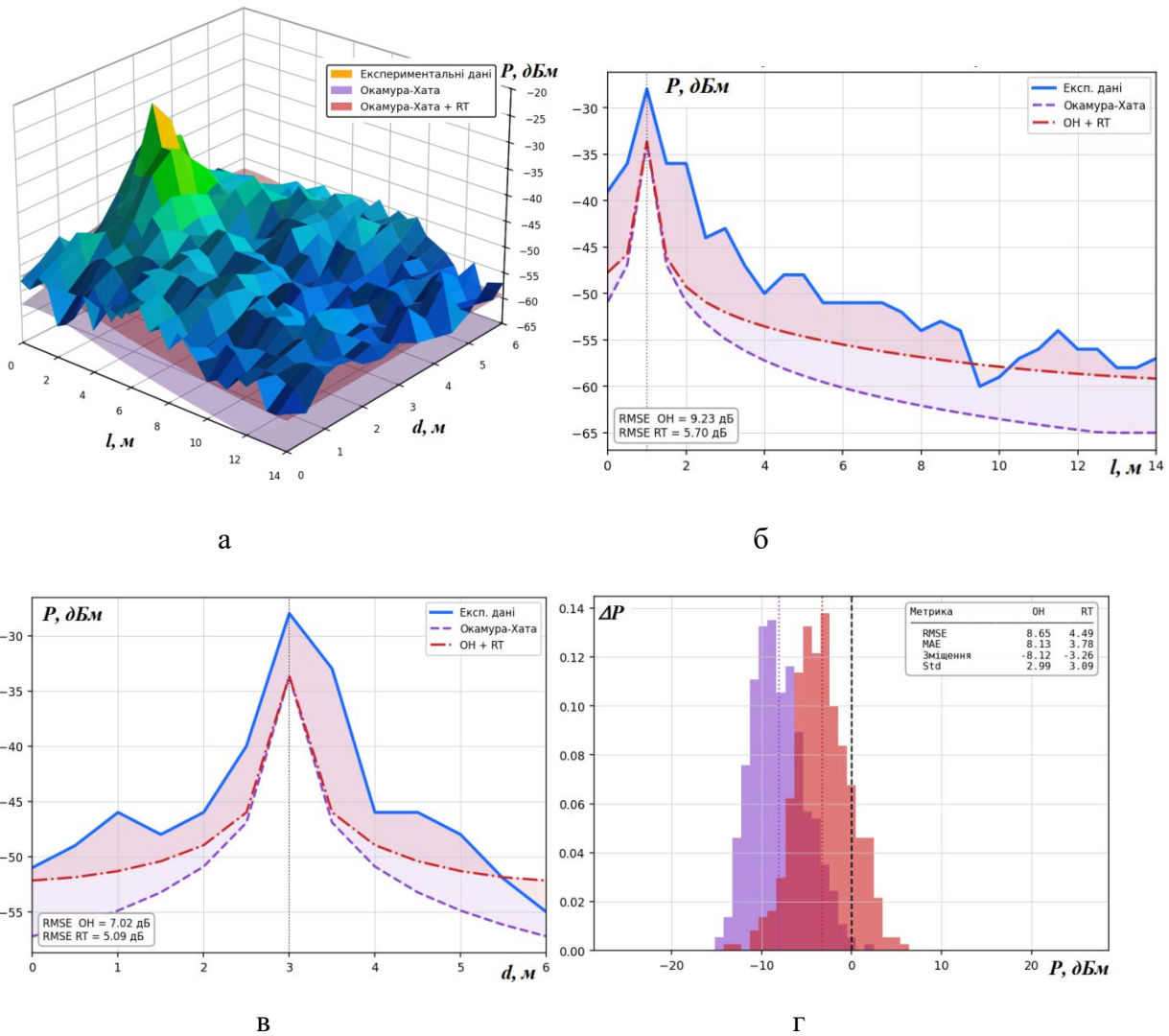


Рис. 2. Результати оцінювання розподілу сигналу у приміщенні для діапазону 5 ГГц: а – поверхні розподілу; б – розрізу за координатою  $l$ ; в – розрізу за координатою  $d$ ; г – похибок

**Список літератури:**

1. Mykhalevskiy D., Vasylykivskiy N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal strength at the input of the 802.11 standard receiver. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2017. №4/9 (88). Pp. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191.
2. Abhayawardhana V.S., Wassell I.J., Crosby D., Sellars M.P., Brown M.G. Comparison of Empirical Propagation Path Loss Models for Fixed Wireless Access Systems. *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st. Volume: 1. Pp 1-5.* DOI: 10.1109/VETECS.2005.1543252
3. Mykhalevskiy D. Devising a technique to evaluate fluctuations in the main parameters of a wireless channel of the 802.11 standard. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. №6/9 (108). Pp. 18–24. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.218720.
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 11th IEEE International Conference on Data Stream Mining & Processing. Conference Proceeding. August 23–27, 2016, Lviv, Ukraine.* Pp. 369-372.
7. 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: 10.2478/lpts-2019-0004.
8. Giannakoulas A., Karkanis N., Gavriilidis I., Kaifas T. N. F. *Propagation Models for Wireless Sensor Networks. Electronics*. 2026. 15. 925. Pp. 1-45. DOI: 10.3390/electronics15050925.

9. 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: 10.2478/lpts-2019-0009.

10. Risi I., Arobo R.C., Amakiri A.R.C., Amonieah J. Performance Evaluation of Standard Path Loss Models for Cellular Network Systems. SSRG International Journal of Recent Engineering Science. 2024. Vol.11. Iss. 5. Pp. 1-6. DOI: 10.14445/23497157/IJRES-V11I5P101

11. Tarapiah S., Sulaiman B., Natsheh E., Atalla S., Kharmeh S.A., Rashed A. Optimized indoor radio signal prediction with 3D ray tracing model at 2.4 and 5 GHz. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics. 2025. Vol. 14. No. 4. Pp. 2935~2946. DOI: 10.11591/eei.v14i4.9441

12. Mykhalevskiy, D.V. (2018). Construction of Mathematical Models for the Estimation of Signal Strength at the Input to the 802.11 Standard Receiver in a 5 GHz Band. EastenEuropean Journal of Enterprise Technologies, 6/9(96), 16–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.150983.

### **Mykhalevskiy D.V., Vasylyshyn V.I., Kotsiuba V.P. COVERAGE ASSESSMENT OF CORPORATE WIRELESS NETWORKS BASED ON A MODIFIED OKUMURA-HATA MODEL**

*In this paper, investigates the feasibility of coverage assessment for wireless corporate telecommunication networks based on the Okumura-Hata model within complex architectural environments. An analysis of the model was conducted regarding attenuation parameters and signal strength, which enabled the determination of optimal adaptation to wave propagation conditions in the 2.4 GHz and 5 GHz bands. This adaptation accounts for free-space path loss, environment-related losses, and losses caused by specific architectural obstacles using a predefined coefficient database and ray-tracing methods.*

*To obtain signal propagation surfaces that most closely match indoor environments, a modified Okumura-Hata model is proposed, incorporating spatial distribution according to room coordinates. For this purpose, a mechanism for recalculating distances between the transmitter and receiver for each point in the indoor space was applied. This allowed for the integration of experimental research results—obtained via client device diagnostic tools—as parameters for coverage calculations.*

*It was established that the use of modified Okumura-Hata models, both in their base form and with ray tracing, is appropriate for predicting wave propagation in the 2.4 GHz and 5 GHz frequency bands under conditions of complex architectural obstacles. The standard Okumura-Hata model is effective for preliminary and rapid planning of wireless corporate networks, as it requires minimal resources while providing sufficient accuracy. In contrast, the ray-tracing model requires calibration of architectural obstacle parameters, especially in complex layouts, and involves significant computational effort; however, it enhances accuracy by two times or more. This is particularly relevant for environments with a high density of access points.*

**Keywords:** *assessment model, wireless channels, corporate telecommunication network, Okumura-Hata model, statistical analysis.*

Дата першого надходження статті до видання: 15.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026