

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-60-33>

УДК 004.725.5:004.056

Ухань Єгор Олександрович, аспірант

<https://orcid.org/0000-0002-5384-0105>

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, м. Миколаїв, Україна

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОН ПОКРИТТЯ WI-FI ТА ВПЛИВУ ІНТЕРФЕРЕНЦІ НА ЯКІСТЬ СИГНАЛУ

**Ухань Є. О. Методи та засоби моделювання зон покриття Wi-Fi та впливу інтерференції на якість сигналу.**

Досліджено методи та засоби моделювання зон покриття Wi-Fi та впливу перешкод у локальних бездротових комп'ютерних мережах на базі Wi-Fi-технології. Розглянуто актуальність проблеми, зумовлену зростанням вимог до якості сигналу умовах інтенсивного використання Wi-Fi у офісах та виробничих об'єктах. Для вирішення поставленої задачі проведено аналіз сучасних методів моделювання зон покриття, що поділяються на фізичні (регулювання потужності передавачів, застосування спрямованих антен, повторювачів) та програмні (симулятори NS-3, OMNeT++, САД-засоби Ekahau, AirMagnet, математичні моделі поширення сигналу). Особливу увагу приділено моделюванню за допомогою симуляторів NS-3 та OMNeT++, які дозволяють відтворювати роботу протоколів рівнів PHY та MAC для стандартів Wi-Fi 802.11a/b/g/n/ac/ax/be. Проведено практичне моделювання зони покриття сегменту мережі Чорноморського національного університету ім. Петра Могили із застосуванням математичної моделі ITU-R P.1238 та візуалізацією теплової карти сигналу в MATLAB. Результати підтвердили важливість правильного розміщення точок доступу для мінімізації втрат та покращення якості сигналу. Додатково виконано симуляцію у середовищі NS-3, яка дозволила оцінити вплив інтерференції та відстані на якість обслуговування. Отримані результати демонструють перспективність комбінованого підходу до моделювання та підтверджують необхідність подальшого дослідження новітніх технологій Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7 із підтримкою MU-MIMO та OFDMA.

**Ключові слова:** бездротова комп'ютерна мережа; Wi-Fi; зона покриття; інтерференція; моделювання; симулятори NS-3 та OMNeT++; математична модель; MU-MIMO; OFDMA.

**Ukhan Ye. Methods and tools for modeling Wi-Fi coverage areas and the impact of interference on signal quality.**

Methods and means of modeling Wi-Fi coverage areas and the influence of interference in local wireless computer networks based on Wi-Fi technology have been studied. The relevance of the problem is determined by the growing requirements for signal quality under conditions of intensive Wi-Fi use in offices, industrial facilities, and urban environments. To address this issue, an analysis of modern methods for modeling coverage areas has been carried out, which are classified into physical (transmitter power control, use of directional antennas, repeaters) and software-based approaches (NS-3 and OMNeT++ simulators, Ekahau and AirMagnet CAD tools, mathematical models of signal propagation). Particular attention was given to modeling with the NS-3 and OMNeT++ simulators, which enable reproduction of PHY- and MAC-layer protocol behavior for Wi-Fi standards 802.11a/b/g/n/ac/ax/be. Practical modeling of the coverage area for a segment of the Petro Mohyla Black Sea National University's network was performed using the ITU-R P.1238 mathematical model, with signal heat map visualization in MATLAB. The results confirmed the importance of optimal access point placement for minimizing losses and improving signal quality. In addition, a simulation in the NS-3 environment was conducted, allowing assessment of the impact of interference and distance on the quality of service. The findings highlight the effectiveness of a combined modeling approach and confirm the need for further research into next-generation Wi-Fi 6 & Wi-Fi 7 technologies with MU-MIMO and OFDMA support.

**Keywords:** wireless computer network; Wi-Fi; coverage area; interference; modeling; NS-3 and OMNeT++ simulators; mathematical model; MU-MIMO; OFDMA.

**Постановка наукової проблеми.** У сучасних бездротових комп'ютерних мережах (БKM) одним з ключових завдань є забезпечення стабільного зв'язку та рівномірного покриття, а також мінімізація впливу інтерференції між передавачами. Із поширенням БKM та можливих сфер їх застосування (офісні приміщення, виробничі об'єкти, густозаселені міські райони тощо) зростають вимоги до параметрів якості сигналу. Це суттєво ускладнює задачу ефективного розгортання та управління мережею.

Інтерференція призводить до зниження пропускну здатності, збільшення затримок та втрат пакетів, що негативно впливає на надійність сервісів, зокрема критично важливих застосунків реального часу.

З цього випливає потреба в використанні математичних моделей при формуванні БKM, які б відповідали низці вимог:

- прогнозування параметрів мережі;
- урахування впливу перешкод;
- оцінка стійкості мережі;
- визначення оптимальних параметрів позиціонування точок доступу;
- розрахунок потужності передавачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З розповсюдженням БКМ багато досліджень було направлено на оптимізацію роботи мережі за рахунок моделювання зон покриття сигналу. Це надає можливість вирішувати проблеми доступу до мережі та прораховувати вплив інтерференції. Одним з практичних підходів розглядається застосування програмних симуляторів для побудови мережі та візуалізації зони покриття.

Серед симуляторів більшість спеціалістів приділяють особливу увагу Network Simulator 3 (NS-3). Цей симулятор є у відкритому доступі та з відкритим кодом, що надає ланку додаткових переваг. Головною спеціалізацією є моделювання на глибокому рівні PHY та MAC мереж Wi-Fi. Його WiFi-модуль включає реалізації таких стандартів, як 802.11a/b/g/n/ac/ax/be, агрегацію MSDU/MPDU, OFDMA (802.11ax), EDCA/QoS (802.11e), різні алгоритми контролю швидкості (Minstrel, AARF тощо) та розділення спектра для сценаріїв з перехресною інтерференцією [1].

Яскравий приклад використання NS-3 продемонстрували у своїй праці індонезійські науковці, які за допомогою даного симулятора проводили дослідження впливу розміру пакету (*payload*) на пропускну здатність мережі Wi-Fi 6 [2]. Головними результатами моделювання є те, що *payload* суттєво впливає на пропускну здатність мережі. Моделювання з розміром корисного навантаження 64 байти та 1500 байт при пропускну здатності каналу (англ. Channel Bandwidth, CBW) 160 МГц та захисному інтервалі (англ. Guard Interval, GI) 800 ns показує забезпечення пропускну здатності 51 Мбіт/с та 766 Мбіт/с відповідно.

Потужним аналогом виступає симулятор OMNeT++. Це середовище моделювання з відкритим кодом, орієнтоване на дослідження мереж зв'язку, розподілених систем і протоколів. Завдяки модульній архітектурі OMNeT++ широко застосовується як у наукових дослідженнях, так і в навчальному процесі. Його ключова особливість – компонентний підхід, де мережеві протоколи та пристрої реалізуються у вигляді незалежних модулів. Головними особливостями симулятору є можливість інтеграції з іншими програмними застосунками та інструментами (MATLAB, Python та ін.), а також підтримка гібридного підходу «симуляція–емуляція». Дослідники з університету Ньюкасла у своїй статті, присвяченій моделюванню Wi-Fi 6 (802.11ax) в середовищі OMNeT++/INET [3], дослідили вплив алгоритмів адаптації швидкості на якість обслуговування (англ. Quality of Service, QoS). Результати продемонстрували, що використання удосконалених схем *rate adaptation* дозволяє підвищити пропускну здатність та зменшити затримку у перевантажених сценаріях WLAN.

При дослідженні проблеми інтерференції важливу ланку займають технології фізичного рівня (PHY), такі як формування променя, MIMO (багато входів-виходів) та OFDMA (ортогональний частотний поділ множинного доступу). Зазначені технології мають вирішальне значення для мінімізації перешкод у сучасних системах бездротового зв'язку. У роботі шведських спеціалістів розглядається потенціал використання для стабілізації зони покриття та протидії перешкодам за рахунок використання Massive MIMO [4]. У даній статті було проведено ряд моделювань та випробувань, з яких видно великий потенціал Massive MIMO як ключової технології. Ця технологія пропонує величезні переваги з точки зору енергоефективності, спектральної ефективності, стійкості та надійності. Вона дозволяє використовувати недороге обладнання як на базовій станції, так і на стороні мобільного пристрою. На базовій станції використання дорогого та потужного, але енергоефективного обладнання замінюється масовим використанням паралельних недорогих низькоенергетичних пристроїв, які працюють узгоджено разом. Але також підкреслюються невирішені проблеми реалізації та впровадження технології, а саме: обчислювальна складність, реалізація розподілених алгоритмів обробки та синхронізація антенних блоків. Це надає дослідникам як в академічних колах, так і в промисловості велику кількість абсолютно нових дослідницьких проблем для вирішення.

**Формулювання мети дослідження.** Метою роботи є розробка та аналіз методів моделювання зон покриття у БКМ з урахуванням інтерференції для підвищення ефективності функціонування мережі та покращення параметрів якості обслуговування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Зона покриття Wi-Fi – це область, розповсюдження мережі у якій забезпечується обмін даними між точкою доступу та пристроєм. Головними факторами, які впливають на її роботу, є потужність передавача точки доступу, особливості середовища та рівень інтерференції. Для забезпечення стабільності роботи мережі проводиться моделювання зони покриття та її оптимізації. Методи моделювання поділяють на програмні та фізичні (табл. 1).

Таблиця 1. Методи моделювання зон покриття Wi-Fi

Фізичні	Програмні
Регулювання потужності передавача	Програмні симулятори (NS-3, OMNeT++)
Використання спрямованих антен	CAD-засоби для радіопланування (EkaHau, AirMagnet)
Зонування приміщень екрануванням	Алгоритми моделювання поширення сигналу (Ray-tracing, Log-distance)
Використання повторювачів та ретрансляторів	Програмний аналіз інтерференції та колізій

На фізичному рівні одним із найбільш поширених методів є моделювання регулювання потужності передавача. Наприклад, маршрутизатор Mikrotik RB951Ui-2nD має діапазон потужності сигналу від 6 dBm до 22 dBm, що дозволяє варіювати розмір зони покриття від однієї кімнати до поверху. Це особливо зручно для малих офісів та приватних приміщень, де необхідно уникати «витоку» сигналу назовні.

Для покращення сигналу та зменшення впливу перешкод застосовуються спрямовані антени – панельні, секторні, типу Yagi [5]. Вони дозволяють звзити діаграму направленості та зменшити вплив інтерференції від сусідніх точок доступу (табл. 2).

Таблиця 2. Кути огляду спрямованих антен

Тип антени	Кут огляду, град.
Панельна	60–90
Секторна	60–120
Типу Yagi	20–30

Для дослідження зон покриття широко застосовуються програмні моделі:

- NS-3 та OMNeT++ дозволяють створювати симуляції з урахуванням маршрутизації, протоколів доступу та впливу шумів;
- інженерні пакети EkaHau та AirMagnet будують карти покриття в реальному приміщенні, враховуючи матеріали стін, розташування меблів та інші фізичні фактори.

Особливу роль відіграють математичні моделі поширення сигналу. Найбільш вживаними є (табл. 3):

- Ray-tracing – моделює поширення хвиль із урахуванням відбиття;
- Log-distance path loss – емпірична модель, яка описує загасання сигналу залежно від відстані.

Таблиця 3. Кути огляду спрямованих антен

Модель	Особливості	Переваги	Недоліки
Ray-tracing	Точне врахування багатопроменевого поширення	Висока точність	Високі обчислювальні витрати
Log-distance	Просте наближення залежності сигналу від відстані	Швидкість і простота	Низька точність у приміщеннях складної конфігурації

Великий вплив створює інтерференція, яка виникає при накладанні сигналів від декількох джерел у спільному частотному діапазоні. Вона призводить до падіння швидкості та збільшення затримок. Для її мінімізації застосовуються:

- вибір оптимального каналу у діапазоні 2,4 або 5 ГГц;
- перехід на новітні стандарти Wi-Fi 6 та Wi-Fi 7, які підтримують MU-MIMO та OFDMA;
- використання спрямованих антен для локалізації сигналу;

– оптимальне розміщення точок доступу з урахуванням карт покриття.

Також для моделювання зон покриття використовують математичні методи. Так, для розрахунку втрат у приміщення за рекомендацією ІТУ використовується формула з ІТУ-R P.1238 [6]:

$$L_{ITU}(dB) = 20\log_{10}(f) + N\log_{10}(d) + L_f(n) - 28, \quad (1)$$

де  $f$  – частота сигналу, МГц;

$d$  – відстань між передавачем і приймачем, м;

$N$  – коефіцієнт загасання, що залежить від середовища:

житлові приміщення:  $\sim 28$ ;

офіси:  $\sim 30$ ;

торгові центри:  $\sim 22-25$ ;

$L_f(n)$  – додаткові втрати на проходження стін (залежить від матеріалу, наприклад, бетон  $\approx 10-15$ , дерево  $\approx 4-6$ ).

Для проведення моделювання було обрано сегмент першого поверху головного корпусу Чорноморського національного університету ім. Петра Могили (надалі – ЧНУ ім. Петра Могили). Вибір такого ландшафту цікавий через велику кількість можливих перешкод та низьку якість сигналу мережі й можливого впровадження моделі для реального використання (рис 1.).

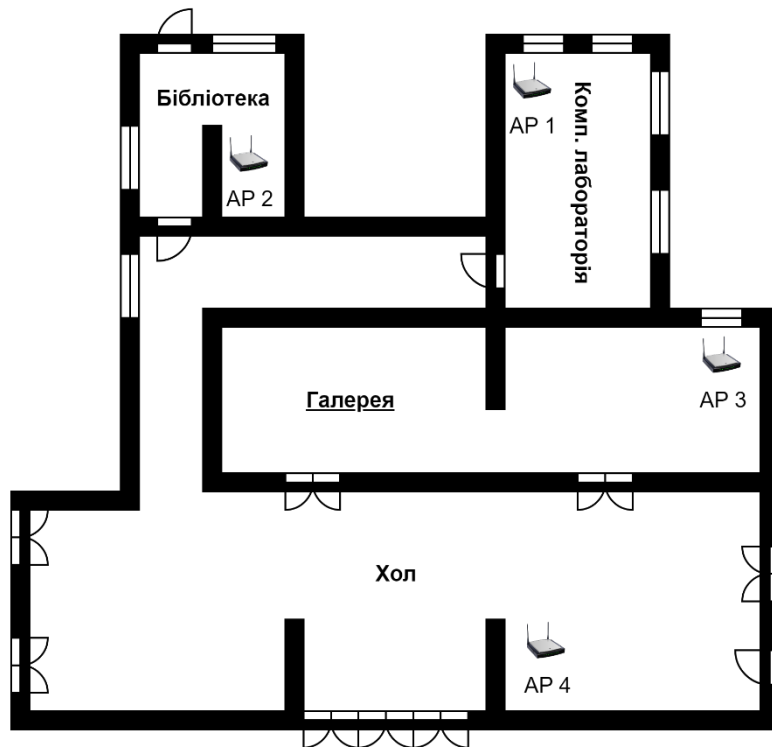


Рис. 1. План приміщень першого корпусу з розміщеними точками доступу

Для моделювання було використано комплексний метод, першим кроком якого був прорахунок ІТУ-R P.1238 та побудова теплової карти. У якості точок доступу встановлені Mikrotik RB951Ui-2nD, стіни цегляні для проведення розрахунку за формулою ІТУ-R P.1238.

Умови розрахунків:

–  $f = 2,4$  МГц;

–  $N = 30$ ;

– втрата на одну цегляну стіну 8 дБ;

– EIRP Mikrotik RB951Ui-2nD  $\approx 20$  дБм.

Для розрахунків та візуалізації використовується програмний застосунок MATLAB. Результатом є тепла карта зон покриття при даному розміщенні точок доступу (рис. 2).

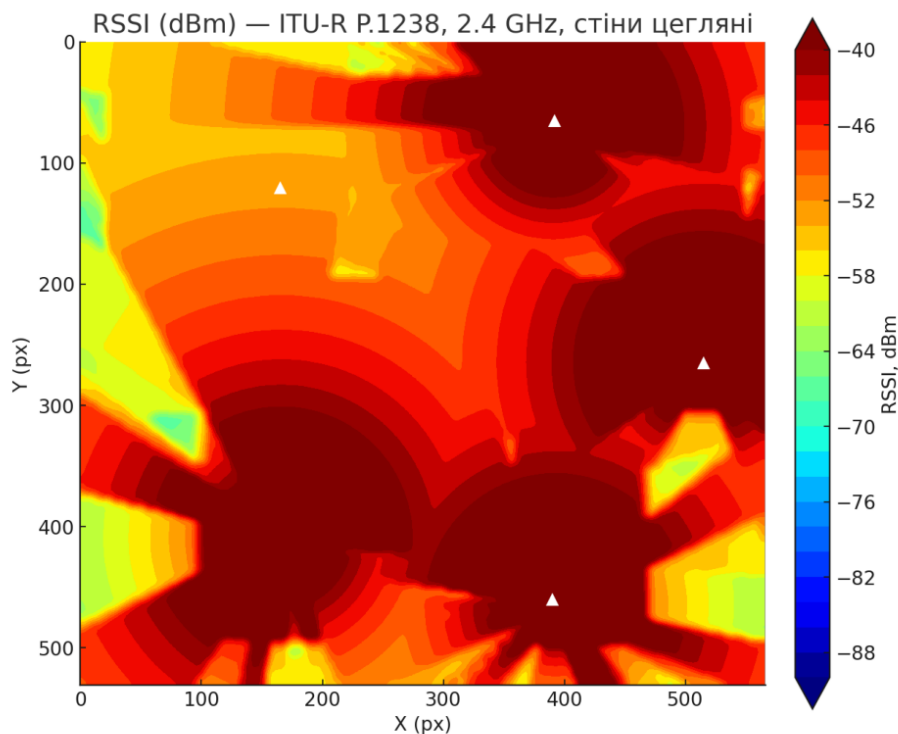


Рис. 2. Теплова карта розповсюдження WiFi-сигналу

З даної теплової карти видно, що на даному етапі моделюванні було обрано оптимальні місця встановлення точок доступу для стабільного сигналу та мінімізації впливу перешкод. Наступним кроком є проведення моделювання у NS-3 для наглядної візуалізації роботи мережі. Для симуляції буде випадково згенеровано користувачів мережі для оцінки сигналу у різних точках зони покриття та проаналізовано якість сигналу. Так як симулятор працює у термінальній системі, то результатом є вивід у термінал результатів передачі та прийому пакетів. Для наочності було створено таблицю цих дій (табл. 4).

Таблиця 4. Обмін даними між клієнтами мережі

Джерело (STA)	Приймач (STA)	Відправлено	Отримано	Втрати, %	Середня затримка, ms	Середній Throughput, kbps
STA0	STA1	8	8	0	2,1	8,2
STA1	STA2	8	7	12,5	3,4	7,1
STA2	STA3	8	8	0	2,5	8,0
STA3	STA4	8	8	0	2,2	8,1

З даної симуляції видно, що якість мережі висока, хоча через перешкоди та більшу відстань до точки доступу є невеликі втрати сигналу між клієнтами 1 та 2. Також з послабленням сигналу зростає затримка.

**Висновки та перспективи подальшого дослідження.** Було проаналізовано існуючі та новітні методи моделювання зон покриття у БКМ, їх переваги та недоліки. Розгляну фізичні та програмні методи моделювання, а також математична модель поширення сигналу. Було проведено теоретичне моделювання сегменту мережі ЧНУ ім. Петра Могили з побудовою теплової карти сигналу за допомогою ITU-R P.1238, яке підтвердило важливість правильного розташування точок доступу для забезпечення рівномірного покриття та мінімізації втрат сигналу. Проведено симуляції у середовищі NS-3, яке дозволило оцінити роботу моделі мережі. Отриманні результати підтверджують вплив інтерференції та відстані на якість сигналу. У подальшому дослідженні доцільно провести моделювання новітніх WiFi-мереж та впливу MU-MIMO та OFDMA на

зменшення інтерференції. Перспективним напрямком також є проведення інтеграції NS-3 з інженерними пакетами AirMagnet для поєднання моделі з даними з робочої мережі.

#### Список бібліографічного опису

- 1.Design documentation – Model library. ns-3 | a discrete-event network simulator for internet systems. URL: [https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-design.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-design.html?utm_source=chatgpt.com) (Last accessed: 15.08.2025).
- 2.Putra Y. M., Wellem T. Simulasi jaringan IEEE 802.11ax WiFi 6 menggunakan simulator NS-3 untuk pengukuran throughput pada band frekuensi 6 GHz. *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*. 2023. Vol. 4, No. 3. P. 913–923. DOI: 10.35870/jimik.v4i3.298 [Indonesian].
- 3.Zawawi H., Muhamad W. N. W., Seroja S., Naim F. Rate adaptation for Quality of Service (QoS) improvement in IEEE 802.11ax Wireless Local Area Network (WLAN). *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*. 2023. Vol. 28. P. 764–771. DOI: 10.5954/icarob.2023.os29-6.
- 4.This H. DSR: frameworks guiding experimental work in science. N3AF, Teaching document. *Academic Notes of the French Academy of Agriculture*. 2017. Vol. 4, No. 2. P. 1–14. DOI: 10.58630/pubac.not.a372706.
- 5.Anju-man-ara. A literature review on Yagi Uda antenna: Old but still used in communities. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. 2025. Vol. XII, Is. VII. P. 510–515. DOI: 10.51244/IJRSI.2025.120700051.
- 6.Request rejected. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-6-200910-S/en> (Last accessed: 17.08.2025).

#### References

- 1.Design documentation – Model library. ns-3 | a discrete-event network simulator for internet systems. URL: [https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-design.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nsnam.org/docs/models/html/wifi-design.html?utm_source=chatgpt.com) (Last accessed: 15.08.2025).
- 2.Putra Y. M., Wellem T. Simulasi jaringan IEEE 802.11ax WiFi 6 menggunakan simulator NS-3 untuk pengukuran throughput pada band frekuensi 6 GHz. *Jurnal Indonesia: Manajemen Informatika dan Komunikasi*. 2023. Vol. 4, No. 3. P. 913–923. DOI: 10.35870/jimik.v4i3.298 [Indonesian].
- 3.Rate adaptation for Quality of Service (QoS) improvement in IEEE 802.11ax Wireless Local Area Network (WLAN) / H. Zawawi та ін. *Proceedings of International Conference on Artificial Life and Robotics*. 2023. Vol. 28. P. 764–771. DOI: 10.5954/icarob.2023.os29-6.
- 4.This H. DSR: frameworks guiding experimental work in science. N3AF, Teaching document. *Academic Notes of the French Academy of Agriculture*. 2017. Vol. 4, No. 2. P. 1–14. DOI: 10.58630/pubac.not.a372706.
- 5.Anju-man-ara. A literature review on Yagi Uda antenna: Old but still used in communities. *International Journal of Research and Scientific Innovation*. 2025. Vol. XII, Is. VII. P. 510–515. DOI: 10.51244/IJRSI.2025.120700051.
- 6.Request rejected. URL: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1238-6-200910-S/en> (Last accessed: 17.08.2025).