

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2026-62-16>

УДК 004.724.4

Ткачук Богдан Романович, магістрант

Булатецький Віталій Вікторович, к. фіз.-мат. н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-9883-4550>

Волинський національний університет імені Лесі Українки, м. Луцьк, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ КАРТ WI-FI ПОКРИТТЯ В ЗАКРИТИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Ткачук Б.Р., Булатецький В.В. Моделювання теплових карт Wi-Fi покриття в закритих приміщеннях. У роботі представлено результати розробки та валідації мобільного iOS-додатку для моделювання теплових карт Wi-Fi покриття. В основі розрахункового ядра лежить модель логарифмічного загасання відстані (Log-Distance Path Loss Model), адаптована для врахування сумарних втрат на перешкодах. Методика дослідження базувалася на порівняльному аналізі результатів роботи додатка з даними реальних замірів та прогнозами професійного ПЗ NetSpot. Результати дослідження підтвердили, що розроблена модель забезпечує точність прогнозування, зіставну з професійними інструментами радіопланування. Похибка моделювання відносно фактичних показників у зонах зі складними перешкодами не перевищує 3–5 dB. Використання безперервної градієнтної інтерполяції дозволило досягти високої деталізації меж зон покриття та відображення «радіотіней». Практичне значення полягає у створенні доступного інструменту для планування мереж, ефективного як для професійних комерційних проєктів, так і для оптимізації розміщення роутерів у домашніх умовах. Рішення дозволяє мінімізувати витрати на розгортання інфраструктури, забезпечуючи рівень достовірності даних на рівні спеціалізованих комерційних систем.

Ключові слова: Wi-Fi покриття, теплові карти, Log-Distance Path Loss, iOS-розробка, Swift, загасання сигналу, моделювання мереж.

Tkachuk B., Bulatetskyi V. Modeling of Wi-Fi Coverage Heatmaps in Indoor. This work presents the results of the development and validation of an iOS mobile application for modeling Wi-Fi coverage heatmaps. The core computational engine is based on the Log-Distance Path Loss Model, adapted to account for cumulative obstacle-induced losses. The research methodology was based on a comparative analysis of the application's output with real measurement data and predictions generated by the professional software NetSpot. The study results confirmed that the developed model provides prediction accuracy comparable to professional radio planning tools. The modeling error relative to actual measurements in areas with complex obstacles does not exceed 3–5 dB. The use of continuous gradient interpolation enabled high-detail visualization of coverage boundaries and accurate representation of “radio shadows.” The practical significance of this work lies in the creation of an accessible tool for network planning, effective both for professional commercial projects and for optimizing router placement in home environments. The solution allows minimizing infrastructure deployment costs while providing data reliability comparable to specialized commercial systems.

Keywords: Wi-Fi coverage, heatmaps, Log-Distance Path Loss, iOS development, Swift, signal attenuation, network modeling.

Постановка наукової проблеми. У сучасних умовах всебічної цифровізації та зростання мобільності, бездротові локальні мережі (WLAN) відіграють роль ключової інфраструктури як у корпоративному, так і в побутовому середовищі. Забезпечення стабільної роботи та достатнього рівня покриття Wi-Fi є важливим завданням, успішність якого значною мірою визначається ефективністю радіопланування та точністю прогнозування поширення сигналу, особливо у приміщеннях зі складною просторовою конфігурацією.

Традиційні підходи до радіопланування базуються на використанні комерційних спеціалізованих програмних пакетів, зокрема Ekahau [1], iBwave [2] та NetSpot [3]. Висока вартість таких систем, а також потреба у кваліфікованому персоналі для їх експлуатації обмежують можливість їх широкого застосування у малому та середньому бізнесі, освітніх установах та індивідуальних дослідницьких проєктах. Це призводить до суттєвого розриву між професійними інструментами проєктування та реальними потребами широкого кола користувачів.[4]

Одним із перспективних напрямів подолання зазначених обмежень є створення доступного та інтуїтивно зрозумілого програмного інструменту моделювання. Мобільні пристрої на базі операційної системи iOS, такі як iPhone та iPad, є доцільною платформою для реалізації такого рішення, оскільки поєднують високу обчислювальну продуктивність, портативність і широке розповсюдження. Використання сучасних технологій Apple, зокрема мови програмування Swift [5] та фреймворку SwiftUI [6], забезпечує можливість створення продуктивних застосунків, здатних реалізувати алгоритмічно складні моделі поширення радіохвиль.

Метою цієї роботи є розроблення iOS-застосунку для моделювання поширення Wi-Fi-сигналу в приміщеннях на основі емпіричних моделей, зокрема Моделі Багатостінного Затухання (Multi-Wall Model). Результатом має стати інструмент, що забезпечує підтримку процесу планування бездротових мереж у різних типах приміщень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Загасання сигналу (зменшення потужності радіохвиль під час їх поширення) є ключовим фактором, що впливає на якість бездротового з'єднання, зокрема у Wi-Fi мережах. Саме рівень загасання визначає максимальну дистанцію передачі та мінімальну потужність сигналу, необхідну для його надійного прийому. На цей процес впливають характеристики навколишнього середовища, наявність перешкод, частота сигналу та інші фізичні чинники [7, 8]. Для точного визначення зони покриття та оптимального розміщення точок доступу застосовуються спеціалізовані моделі оцінки загасання.

У реальних умовах поширення сигналу відбувається в середовищі зі стінами, меблями, людьми та металевими конструкціями. За таких обставин рівень загасання суттєво зростає, тому для його опису зазвичай використовують модель логарифмічного загасання відстані (Log-Distance Path Loss Model). Теоретичні розрахунки та експериментальні вимірювання показують, що середній прийнятий сигнал зменшується логарифмічно зі збільшенням відстані, з додаванням логнормального розсіювання (або логнормального розподілу) навколо середнього значення. Відповідно, модель втрат на відстані з логнормальним розподілом (у дБ) описується такою формулою [8, 9]:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma, \quad (1)$$

де $PL(d)$ – це середні втрати на відстані d (path loss),

$PL(d_0)$ – це втрати на опорній відстані d_0 ,

n – показник втрат шляху, що характеризує швидкість загасання сигналу,

X_σ – це гаусова випадкова величина з нульовим середнім значенням і стандартним відхиленням σ у дБ.

Автори [10] використовують опорну відстань $d_0=1$ метр як стандартизований параметр у всіх своїх моделях прогнозування втрат на шляху. Такий підхід забезпечує узгодженість між різними моделями та дозволяє коректно порівнювати результати. Використання опорної відстані 1 метр у зоні близького вільного простору (close free-space) є ключовим, оскільки саме на цій відстані загасання сигналу підпорядковується закону вільного простору. Це дає можливість нормалізувати вимірювання та встановити базову точку, від якої далі моделюється додаткове загасання в реальних умовах.

Втрати потужності сигналу на опорній відстані $d_0=1$ розраховуються, виходячи з закону поширення у вільному просторі. Для частот Wi-Fi цей базовий рівень затухання становить близько 40 дБ (на 2.4 ГГц) та 46.4 дБ (на 5 ГГц). Загальне ослаблення сигналу в реальному середовищі описується показником втрат шляху (n), чие значення коливається від 2.0 (мінімальні втрати) до 4.0 (максимальні втрати у приміщеннях з великою кількістю перешкод) [7].

Такий підхід дозволяє створювати спрощені та глобально порівнювані моделі втрат на шляху, що має вирішальне значення для стандартизації параметрів нових бездротових мереж.

Вплив стін на поширення сигналу моделюється через додаткові втрати, що залежать від матеріалу та товщини перешкод [11-14]. Загальна формула втрат з урахуванням стін має вигляд:

$$PL_{total}(d) = PL(d) + \sum WAF_i, \quad (2)$$

де WAF_i – коефіцієнт загасання для i стіни на шляху сигналу. Алгоритм визначення перешкод включає побудову прямої лінії від джерела сигналу до точки розрахунку, виявлення всіх перетинів цієї лінії з геометричними об'єктами стін та сумування відповідних коефіцієнтів атенуації.

Коефіцієнти затухання для різних матеріалів визначені на основі експериментальних даних та стандартних довідкових значень. Гіпсокартонні перегородки створюють загасання сигналу 3-5 дБ, дерев'яні конструкції 4-6 дБ, цегляні стіни 6-8 дБ, бетонні конструкції 10-15 дБ, а скляні перегородки 2-3 дБ [7, 14,15].

Геометричні розрахунки перетинів реалізовані через алгоритми обчислювальної геометрії з оптимізацією для швидкодії. Просторова індексация стін дозволяє ефективно знаходити потенційні перешкоди без перевірки всіх об'єктів сцени.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження. В роботі розроблено мобільний додаток для моделювання теплових карт Wi-Fi покриття, який

базується на математичних моделях логарифмічного загасання сигналу та корекції втрат, зумовлених перешкодами, що дозволяє оцінювати рівні сигналу в різних точках приміщення та візуалізувати їх у вигляді детальних теплових карт [16].

Процес створення теплових карт (heatmaps) починається з дискретизації простору приміщення на регулярну сітку точок, після чого здійснюється розрахунок сили сигналу для кожної точки сітки, а результати візуалізуються через кольорове кодування. Розмір сітки обирається як компроміс між необхідною точністю результатів та швидкістю обчислень. Оптимізація обчислень досягається завдяки кешуванню проміжних результатів, просторовій оптимізації алгоритмів пошуку перетинів та паралелізації розрахунків на багатоядерних процесорах. При цьому адаптивна сітка дозволяє збільшувати щільність точок розрахунку в областях з різкими градієнтами сигналу. Зрештою, інтерполяція між точками сітки забезпечує плавні переходи кольорів у візуалізації та створює теплові карти з вищою візуальною роздільністю, ніж базова сітка розрахунків, а алгоритми згладжування усувають артефакти дискретизації та покращують загальне візуальне сприйняття результатів.

Вибір платформи для розробки мобільного додатку моделювання Wi-Fi-сигналів ґрунтується на технічних можливостях, цільовій аудиторії та вимогах до продуктивності. Було розглянуто три підходи: нативну розробку під iOS, кросплатформенні рішення та вебдодатки. Нативна iOS-розробка обрана як оптимальна завдяки доступу до апаратних ресурсів, високій продуктивності математичних обчислень та стабільним системним API, необхідним для роботи з графікою та файлами.

Кросплатформенні фреймворки (Flutter, React Native) відхилено через обмеження доступу до низькорівневих API та можливі втрати продуктивності. Вебдодатки також не підходять через недостатню швидкодію та обмежену роботу з локальними файлами.

Основною мовою обрано Swift завдяки її продуктивності, безпеці та сучасним мовним конструкціям [5]. У порівнянні з Objective-C Swift забезпечує кращу читабельність, безпечність типів і підтримку сучасних парадигм. Мова демонструє продуктивність, близьку до C++, що важливо для інтенсивних обчислень. Фреймворк SwiftUI вибрано для створення інтерфейсу завдяки декларативному стилю, швидкості розробки та автоматичній адаптації UI [6]. Використання Combine забезпечує ефективне керування асинхронними операціями та оновленням стану моделі.

Для візуалізації теплових карт застосовано Core Graphics [17]. Це рішення вибрано як збалансований варіант порівняно з Metal і OpenGL. Core Graphics гарантує коректне відображення градієнтів і масштабованість зображень для різних екранів. Експорт у PDF реалізується як векторний, що забезпечує високу якість документації, тоді як PNG-експорт використовує стандартні API iOS для отримання оптимальних растрових зображень.

Архітектура iOS-додатку для моделювання поширення Wi-Fi-сигналу побудована за принципами модульності з чітким поділом відповідальності між компонентами. Система складається з кількох рівнів, рекомендованих Apple для SwiftUI-додатків. Рівень представлення включає SwiftUI Views, що відповідають за відображення даних та взаємодію з користувачем (ContentView, CanvasView, HeatMapView, MapListView). Бізнес-логіка реалізована у ViewModel-класах, які керують станом додатку та координують роботу сервісів. Центральним компонентом виступає SimulatorViewModel. Рівень сервісів містить модулі для обчислень, роботи з даними та експорту: SignalPropagationEngine, MapStorageManager, ExportManager. Усі сервіси ізолювані та взаємодіють через узгоджені протоколи.

SignalPropagationEngine є ядром системи й реалізує математичні моделі поширення сигналу. Основою є Log-Distance Path Loss із врахуванням втрат на стінах. Движок обчислює теплові карти в реальному часі, використовуючи визначення перетинів сигналу з перешкодами та розрахунок сукупного загасання сигналу на стінах.

Продуктивність забезпечується кешуванням проміжних даних, просторовою індексацією та паралельними обчисленнями. Движок має чітко визначений інтерфейс, що спрощує тестування й оновлення алгоритмів.

SimulatorViewModel реалізує патерн MVVM та керує основним станом додатку: колекцією карт, активним проектом, режимами взаємодії та параметрами візуалізації. Реактивність забезпечена через Combine, що автоматично оновлює інтерфейс. Обчислення та операції

збереження виконуються асинхронно, з підтримкою автоматичного збереження стану та опрацюванням помилок.

Формування теплових карт передбачає послідовну обробку даних, що включає нормалізацію значень рівня сигналу, інтерполяцію між вузлами сітки та кольорове кодування результатів. На першому етапі розраховані значення сили сигналу переводяться з діапазону дБм у нормалізований інтервал від 0 до 1, що забезпечує уніфіковану подальшу обробку та коректне відображення. Межі нормалізації можуть визначатися автоматично або задаватися користувачем з метою досягнення оптимального контрасту візуалізації.

Для усунення ефектів дискретизації та забезпечення плавних переходів між рівнями сигналу застосовується білінійна інтерполяція, яка дозволяє сформувати безперервне поле значень на основі дискретної сітки вимірювань. За потреби результати інтерполяції можуть додатково оброблятися згладжувальними фільтрами з метою покращення візуального сприйняття теплової карти.

Заключним етапом є кольорове кодування, що реалізується за допомогою градієнтних схем і забезпечує наочне та інформативне представлення зон покриття. Залежно від режиму аналізу система підтримує різні кольорові палітри, зокрема стандартну схему з переходом від синього через зелений до червоного, яка відображає зростання рівня сигналу.

ExportManager підтримує експорт у PNG, PDF і CSV. PNG забезпечує високоякісні растрові карти до 3000×3000 пікселів. PDF генерує професійні звіти з векторною графікою та параметрами моделювання. CSV містить координати точок сітки та значення сигналу для подальшого аналізу.

Валідація математичних алгоритмів включає модульні та еталонні тести, що перевіряють точність Log-Distance моделі й коректність обчислення втрат на стінах. UI-тестування охоплює сценарії створення карт, роботу інтерфейсу та експорт результатів. Продуктивність вимірюється за часом побудови теплових карт і використанням пам'яті. Інтеграційні тести перевіряють взаємодію модулів та консистентність стану системи.

Тестування продуктивності на різних iOS-пристроях підтвердило стабільну роботу системи, починаючи з iPhone 8. Розрахунок теплової карти для приміщення 20×15 м виконується за 150–200 мс на сучасних моделях та 400–500 мс на старших.

Споживання пам'яті становить у середньому 50–80 МБ для проектів з кількістю до 50 стін і 10 джерел Wi-Fi. Ефективність забезпечується кешуванням і вивільненням ресурсів під час перемикання між проектами.

Рекомендовано регулярно зберігати проекти, використовувати експорт як резервування та оновлювати додаток для отримання оптимізацій.

Оптимальні умови використання передбачають площу приміщення до 500 м², до 100 стін та до 20 джерел Wi-Fi для збереження прийнятної швидкодії.

Для валідації запропонованої моделі було виконано порівняльний аналіз між результатами реальних вимірювань інтенсивності Wi-Fi-сигналу, тепловими картами, згенерованими розробленим iOS-додатком, та візуалізаціями, отриманими за допомогою програмного забезпечення NetSpot 3.1.0.478. NetSpot – це професійний інструмент для аналізу та візуалізації Wi-Fi-покриття, що використовується для планування та оптимізації бездротових мереж. Програма підтримує імпорт планів приміщень, виконання вимірювань у режимі Site Survey та побудову детальних теплових карт на основі зібраних даних. NetSpot 3.1.0.478 застосовує власні алгоритми інтерполяції та фільтрації сигналу, що дозволяє отримувати візуалізації з високою гладкістю та деталізацією. Завдяки широкому набору функцій і підтримці різних типів аналізу, NetSpot вважається одним із найпоширеніших програмних рішень для професійного Wi-Fi-радіопланування.

Вимірювання проводились в одноповерховій будівлі з газоблоків, де було розгорнуто безпроводну мережу Mesh на базі тридіапазонних маршрутизатора Linksys MR9000 та двох нод Linksys Velop Whole Home Mesh (WHW0302), положення яких не вказувалось, а було визначено на основі даних вимірювання, що відповідало реальному їх розміщенню з точністю близько 1 метра. На основі реальних вимірюваних даних за допомогою NetSpot 3.1.0.478 було побудовано теплову карту покриття WiFi (рис.1).

На рис. 2 та рис. 3 подано теплові карти покриття WiFi, згенеровані методом прогнозного моделювання в середовищі NetSpot 3.1.0.478 [3] та розробленого iOS-додатку [16] відповідно. Порівняльний аналіз отриманих теплових карт дозволяє оцінити рівень достовірності розробленої моделі прогнозування відносно емпіричних даних та існуючих рішень. При зіставленні карти

реальних замірів (рис. 1), виконаної в середовищі NetSpot, з результатами прогнозного моделювання NetSpot (рис. 2) та розробленого iOS-додатку (рис. 3), було виявлено ключові розбіжності в точності відтворення сигналу.

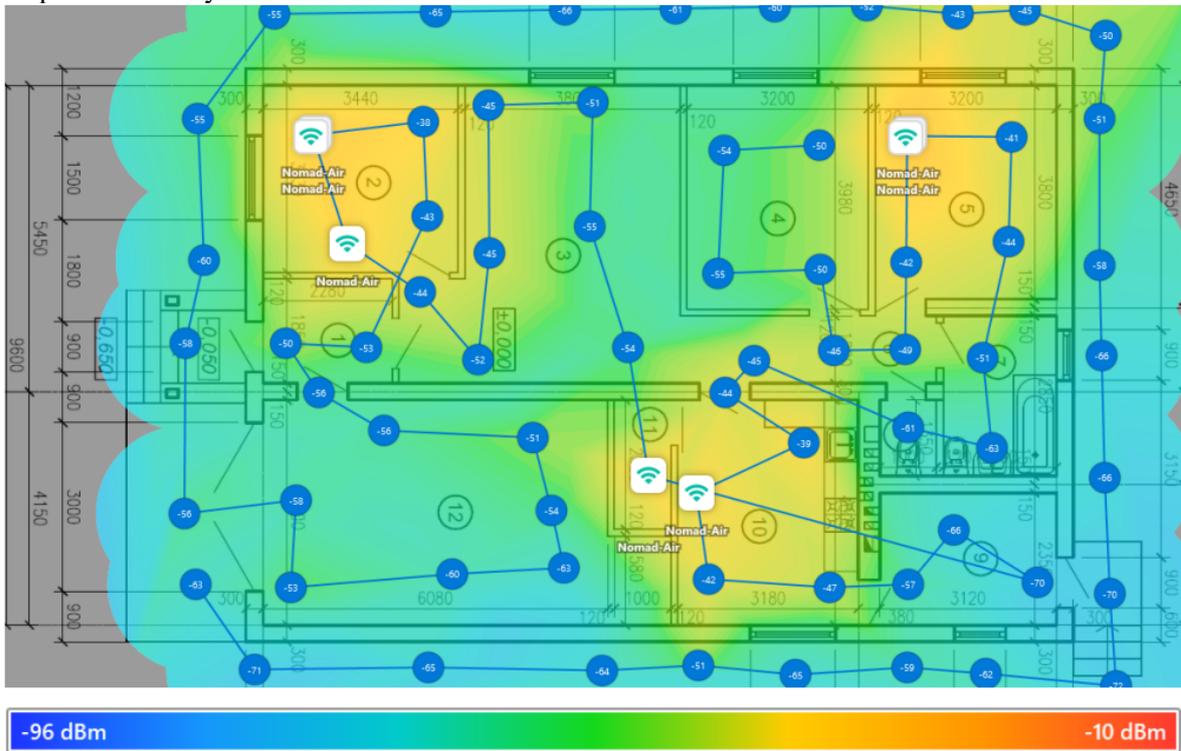


Рис. 1. Теплова карта покриття WiFi, згенерована за допомогою NetSpot 3.1.0.478 на основі реальних даних.

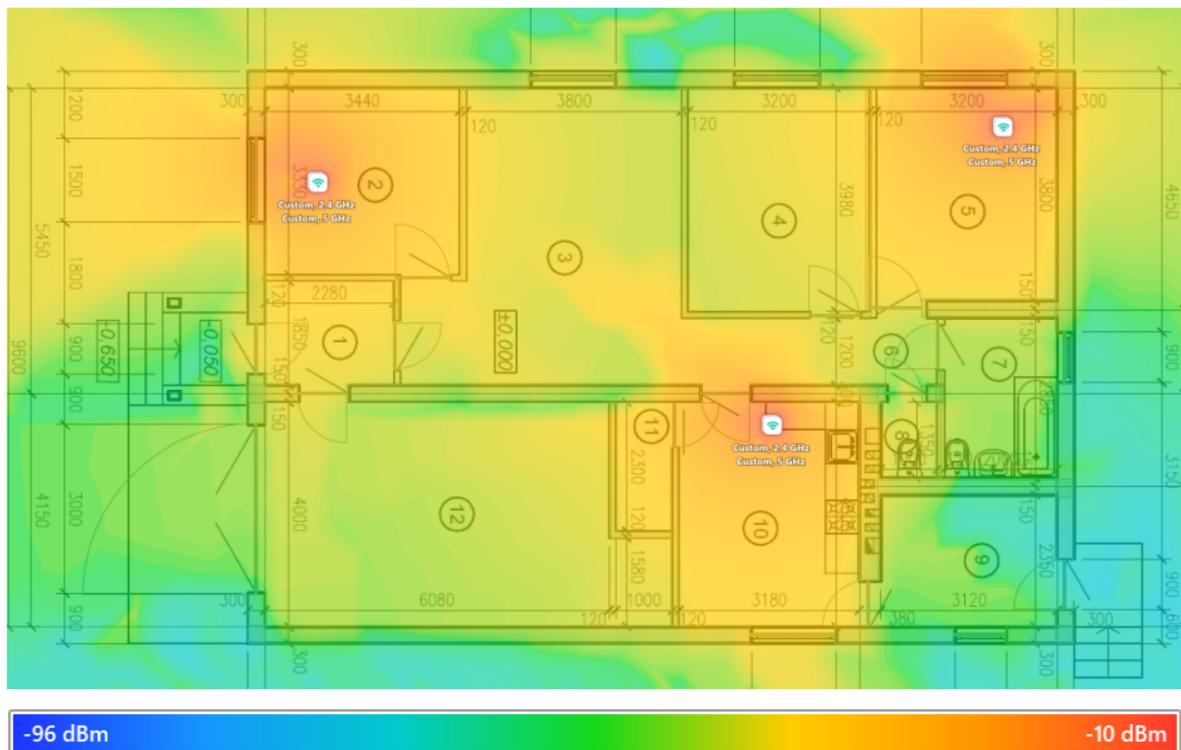


Рис.2. Теплова карта покриття WiFi, згенерована методом прогнозного моделювання в середовищі NetSpot 3.1.0.478.

На рис. 1, що базується на реальних даних, шкала охоплює діапазон від -10 dBm до -96 dBm. Аналіз показує, що в зоні «Нижня права кімната» (приміщення 9 та 10) фактичні значення сигналу на маркерах опускаються до -66...-70 dBm, що візуально відображається синьо-зеленим кольором.

Прогноз NetSpot (рис. 2) демонструє завищену оцінку рівня сигналу, адже в тих самих точках алгоритм передбачає -60...-65 dBm, що не відповідає реальному затуханню.

iOS-додаток (рис. 3) забезпечує вищу точність у зонах перешкод. На шкалі від -50 dBm до -90 dBm додаток чітко ідентифікує падіння потужності в нижній правій кімнаті до рівня -70...-80 dBm (жовто-помаранчева зона «Погано»), що набагато ближче до реальних фізичних втрат, зафіксованих на еталонній карті.

Особливу увагу варто приділити «Нижній лівій кімнаті» (приміщення 12). На рис. 1 реальний сигнал становить близько -60...-63 dBm. Прогноз NetSpot на рис. 2 згладжує цю зону до -51...-58 dBm. Водночас iOS-додаток (рис. 3) успішно відтворює градієнт згасання в діапазоні -60...-72 dBm.

Таким чином, розроблений iOS-додаток демонструє високу кореляцію з емпіричними даними (похибка 3-9 dB), перевершуючи стандартний прогнозний модуль комерційного ПЗ у точності відтворення радіотіней та дифракції хвиль на кутах стін.

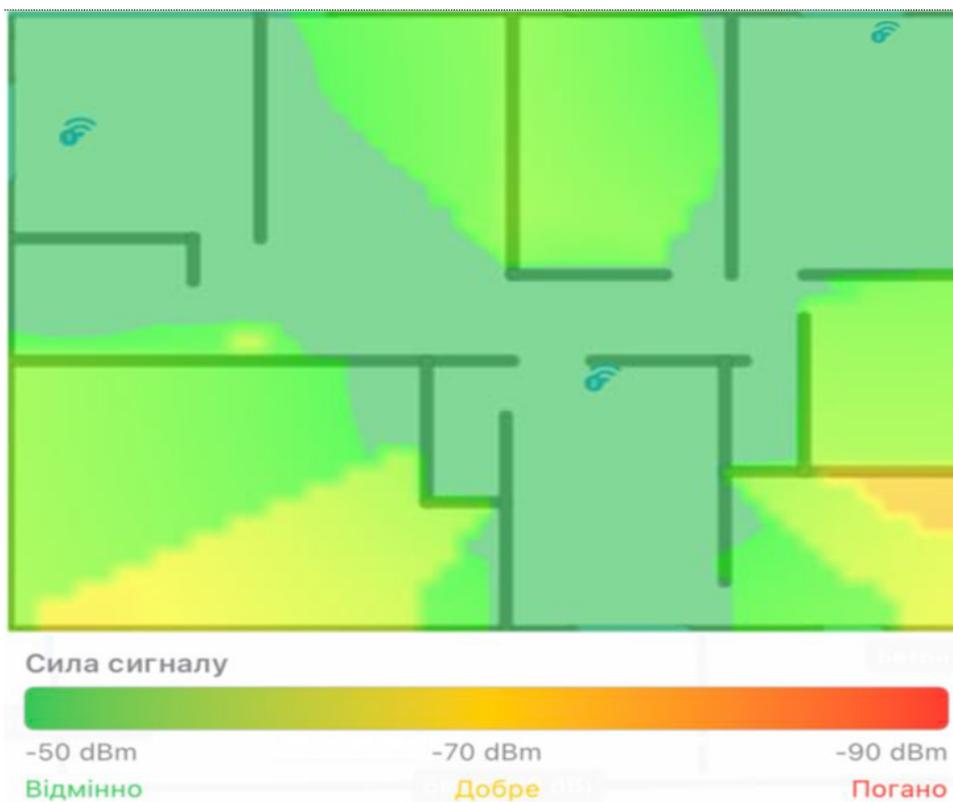


Рис. 3. Теплова карта покриття WiFi, згенерована методом прогнозного моделювання в середовищі розробленого iOS-додатку.

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено нативний iOS-додаток, що базується на моделі логарифмічного загасання відстані (Log-Distance Path Loss Model) з інтеграцією коефіцієнтів атенуації матеріалів стін. Застосування алгоритмів обчислювальної геометрії та безперервної градієнтної інтерполяції дозволило досягти високої точності візуалізації теплових карт, де похибка відносно фактичних значень не перевищує 3–10 dB. Порівняльний аналіз із даними реальних замірів та професійним ПЗ NetSpot підтвердив, що запропоноване рішення забезпечує прогнозування, яке за рівнем достовірності не поступається комерційним аналогам. Результати тестування на базі Mesh-системи Linksys довели ефективність алгоритму в складних сценаріях взаємодії кількох джерел сигналу та його здатність чітко ідентифікувати зони «радіотіней». Завдяки високій швидкодії та нативній реалізації, додаток позиціонується як універсальний інструмент для

радіопланування, придатний для використання як у масштабних комерційних об'єктах, так і в побутових умовах. Програмне рішення надає користувачам можливість самостійно розраховувати оптимальне розміщення маршрутизаторів для створення безшовного покриття, мінімізуючи негативний вплив внутрішніх стін та перешкод. Це робить розроблений додаток доступною альтернативою професійному обладнанню та дорогому ліцензійному програмному забезпеченню для широкого кола користувачів.

Список використаних джерел

1. Ekahau Support : *Ekahau*. URL: <https://support.ekahau.com>.
2. iBwave: The in-building wireless network design & deployment solutions. *In-building wireless network design & deployment solutions by iBwave*. URL: <https://www.ibwave.com/>.
3. NetSpot WiFi Site Survey Software: WiFi Heat Maps, Network Planning Tool. Free Plan. *FREE WiFi Site Survey Software for MAC OS X & Windows*. URL: <https://www.netspotapp.com/>.
4. Compare Ekahau AI Pro vs iBwave Unity. *PeerSpot*. URL: https://www.peerspot.com/products/comparisons/ekahau-ai-pro_vs_ibwave-unity.
5. Swift.org. *Swift.org*. URL: <https://www.swift.org/documentation/>.
6. SwiftUI | Apple Developer Documentation. *Apple Developer Documentation*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/SwiftUI>.
7. ITU Publications : Radiocommunication (ITU-R). *ITU*. URL: <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/Pages/default.aspx>.
8. Azevedo J. A., Mendonça F.A. Critical Review of the Propagation Models Employed in LoRa Systems. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 12. P. 3877. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24123877>.
9. Seidel S. Y., Rappaport T. S. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1992. Vol. 40, № 2. P. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.127405>.
10. Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design / T. S. Rappaport та ін. *IEEE Transactions on Communications*. 2015. Vol. 63, № 9. P. 3029–3056. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2015.2434384>.
11. Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 ghz y 5,8 ghz, para ambientes interiores de edificios comerciales / J. M. Torres et al. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 2016. Vol. 20, № 78. P. 42–53. URL: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212016000100004&lng=es&tlng=es.
12. Kang T., Seo J. Practical Simplified Indoor Multiwall Path-Loss Model. *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICCAS50221.2020.9268260>.
13. A Multiwall Path-Loss Prediction Model Using 433 MHz LoRa-WAN Frequency to Characterize Foliage's Influence in a Malaysian Palm Oil Plantation Environment / R. Anzum та ін. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 14. P. 5397. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145397>.
14. Lott M., Forkel I. A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation. *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings (Cat. №.01CH37202)*. Rhodes, Greece, 2001. Vol. 1. P. 464–468. DOI: <https://doi.org/10.1109/VETECS.2001.944886>.
15. An Indoor Path Loss Prediction Model Using Wall Correction Factors for Wireless Local Area Network and 5G Indoor Networks / H. A. Obeidat та ін. *Radio Science*. 2018. Vol. 53, № 4. P. 544–564. DOI: <https://doi.org/10.1002/2018rs006536>.
16. Network Coverage Simulator App - App Store. *App Store*. URL: <https://apps.apple.com/ua/app/network-coverage-simulator/id6757089020>.
17. Core Graphics | Apple Developer Documentation. *Apple Developer Documentation*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/coregraphics>.

References

1. Ekahau Support : *Ekahau*. URL: <https://support.ekahau.com>.
2. iBwave: The in-building wireless network design & deployment solutions. *In-building wireless network design & deployment solutions by iBwave*. URL: <https://www.ibwave.com/>.
3. NetSpot WiFi Site Survey Software: WiFi Heat Maps, Network Planning Tool. Free Plan. *FREE WiFi Site Survey Software for MAC OS X & Windows*. URL: <https://www.netspotapp.com/>.
4. Compare Ekahau AI Pro vs iBwave Unity. *PeerSpot*. URL: https://www.peerspot.com/products/comparisons/ekahau-ai-pro_vs_ibwave-unity.
5. Swift.org. *Swift.org*. URL: <https://www.swift.org/documentation/>.
6. SwiftUI | Apple Developer Documentation. *Apple Developer Documentation*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/SwiftUI>.
7. ITU Publications : Radiocommunication (ITU-R). *ITU*. URL: <https://www.itu.int/en/publications/ITU-R/Pages/default.aspx>.
8. Azevedo J. A., Mendonça F.A. Critical Review of the Propagation Models Employed in LoRa Systems. *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 12. P. 3877. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24123877>.
9. Seidel S. Y., Rappaport T. S. 914 MHz path loss prediction models for indoor wireless communications in multifloored buildings. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1992. Vol. 40, № 2. P. 207–217. DOI: <https://doi.org/10.1109/8.127405>.

10. Wideband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Channel Models for Future Wireless Communication System Design / T. S. Rappaport та ін. *IEEE Transactions on Communications*. 2015. Vol. 63, № 9. P. 3029–3056. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2015.2434384>.
11. Modelo para la estimación de las pérdidas de propagación en redes WLAN operando en 2,4 ghz y 5,8 ghz, para ambientes interiores de edificios comerciales / J. M. Torres et al. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 2016. Vol. 20, № 78. P. 42–53. URL: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212016000100004&lng=es&tlng=es.
12. Kang T., Seo J. Practical Simplified Indoor Multiwall Path-Loss Model. *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICCAS50221.2020.9268260>.
13. A Multiwall Path-Loss Prediction Model Using 433 MHz LoRa-WAN Frequency to Characterize Foliage's Influence in a Malaysian Palm Oil Plantation Environment / R. Anzum та ін. *Sensors*. 2022. Vol. 22, № 14. P. 5397. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22145397>.
14. Lott M., Forkel I. A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation. *IEEE VTS 53rd Vehicular Technology Conference, Spring 2001. Proceedings (Cat. №.01CH37202)*. Rhodes, Greece, 2001. Vol. 1. P. 464–468. DOI: <https://doi.org/10.1109/VETECS.2001.944886>.
15. An Indoor Path Loss Prediction Model Using Wall Correction Factors for Wireless Local Area Network and 5G Indoor Networks / H. A. Obeidat та ін. *Radio Science*. 2018. Vol. 53, № 4. P. 544–564. DOI: <https://doi.org/10.1002/2018rs006536>.
16. Network Coverage Simulator App - App Store. *App Store*. URL: <https://apps.apple.com/ua/app/network-coverage-simulator/id6757089020>.
17. Core Graphics | Apple Developer Documentation. *Apple Developer Documentation*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/coregraphics>.

Історія статті:

Отримано: 04.02.2026 Доопрацьовано: 18.02.2026 Прийнято до друку: 23.03.2026 Опубліковано: 29.03.2026