

Карпенко М.І.

Національний університет харчових технологій

Мошенський А.О.

Національний університет харчових технологій

КОНСТРУЮВАННЯ ТА ПОЛЬОВА АПРОБАЦІЯ ПРИСТРОЮ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКРИТТЯ БСМ МЕРЕЖ

У статті висвітлено процес проектування, збирання та практичного застосування експериментального пристрою для дослідження просторових характеристик покриття безпроводної сенсорної мережі (БСМ), що функціонує на базі технології LoRa. Актуальність теми обумовлена зростаючою потребою у побудові високонадійних мереж передавання даних у складних умовах – зокрема в урбанізованих районах, районах з підвищеним рівнем перешкод та у прифронтових зонах, де традиційні засоби зв'язку демонструють нестабільність. Основною метою дослідження є створення мобільного технічного рішення, що дозволяє не лише теоретично, а й практично оцінювати ефективність покриття, залежно від параметрів середовища. Враховуючи критичну важливість просторового охоплення мережі, особливо у складних умовах – урбанізованих та прифронтових зонах – було розроблено компактний польовий інструмент збору даних з урахуванням реального середовища. До складу пристрою увійшли модуль E220-900T30D, GPS-приймач GP-01Kit та ноутбук із ПЗ u-center для синхронізації координат й часу. Особливу увагу приділено напрямленій антені типу Мохоп, яка була змодельована, побудована та протестована. Для електромагнітного моделювання використано MMANA-GAL, а для прогнозування зони покриття – Tower Coverage. В ході дослідження було проведено серію випробувань в умовах міста Київ, де аналіз втрати пакетів та стабільності сигналу продемонстрував значну залежність якості зв'язку від типу забудови, наявності перешкод та особливостей рельєфу. Зібраний пристрій дозволив не лише підтвердити гіпотези щодо впливу факторів навколишнього середовища на зв'язок, але й виявити обмеження існуючих розрахункових моделей покриття. Висновком є необхідність поєднання теоретичного моделювання з реальними польовими вимірюваннями під час проектування БСМ для забезпечення надійної роботи в специфічних умовах.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, радіомодуль, антена Мохоп, LoRa, GPS.

Постановка проблеми. Одним з критично важливих пунктів проектування безпроводної сенсорної мережі (БСМ) є розрахунок її покриття. Розрахунок може проводитися різними способами, однак лише перевірка даних на практиці може виявити непередбачені при розрахунках змінні, наприклад, природні чи техногенні елементи місцевості. У прифронтових або урбанізованих зонах це питання набуває особливої актуальності.

Проектування БСМ зазвичай ґрунтується на попередньому розрахунку покриття із використанням аналітичних моделей або симуляцій. Проте в реальних умовах – особливо в міській забудові, в районах зі складним рельєфом або у прифронтових зонах – розрахункові моделі не враховують усіх змінних, таких як електромагнітні завади, несподівані техногенні або природні об'єкти, перешкоди прямої видимості тощо. Це може призвести до помилок у визна-

ченні ефективної зони покриття мережі, втрати зв'язку та зниження ефективності передачі критично важливої інформації, зокрема в задачах екологічного моніторингу або виявлення небезпечних речовин. Таким чином, виникає потреба у створенні мобільного, надійного і технологічно простого пристрою для збору просторових характеристик сигналу безпосередньо в польових умовах, що дозволить скоригувати або доповнити розрахункові моделі на основі реальних даних.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті Х. Х. Лопеса-Ескобара (J. J. López-Escobar) та ін. [2] особливу увагу приділено відстеженню популяції морських птахів. Принцип роботи реалізованого продукту базується на прогнозуванні місцеположення за допомогою нейронних мереж на основі останніх отриманих даних GNSS та доступних характеристик сигналу LoRa (RSSI та SNR). Автори змодельовали покриття на основі готових даних та використали

трикутник шлюзів для позначення зони покриття й отримання даних щодо позиціонування на основі RSSI та SNR. Стаття занадто ускладнена деталями, які необхідні для описаних автором умов, але які є зайвими у випадку визначення зони покриття.

Праця Бхану П. Р. Бхаванама (Bhanu Pratap Reddy Bhavanam) та ін. [3] показує дослідження покриття сенсорами вугільних шахт Індії. Були реалізовані мережі пристроїв ZigBee, LoRaWAN для вимірювання дальності покриття та позиціонування по RSSI. Проводилась ґрунтівна оцінка якості сигналу. У роботі використовувались стандартні антени на 868 МГц, пристрої були прості (приймач, передавач), однак з використанням можливостей мереж для визначення позиціонування. Даний спосіб краще підходить за рахунок малої кількості апаратури, але все одно надає більшу складність за рахунок конфігурації мережі для проведення досліду.

Праця Грегорі Дж. М. Маццаро (Gregory J. M. Mazzaro) [4] щодо побудови антен в домашніх умовах надала ідеї для конструкцій антен, в той час як стаття Марії Кампо-Валери (María Campo-Valera) та ін. [5] більш докладно описує процес розробки моноімпульсної антени для систем локалізації RFID, що може бути корисним для інтеграції в створення інформаційної системи.

Автори статті Цзячжі Танга (Jiazhi Tang) та ін. [6] розглядають статичні високоточні умови в контрольованому середовищі, що не підходить до реальних умов міського середовища, де метаповерхневі лінзи є недоцільними як через складність, так і через вартість та необхідність вузькоспеціалізованої апаратури.

У роботі [7] представлено розробку та побудову недорогого портативного наземного приймального комплексу для прийому зображень із супутників NOAA у діапазоні АРТ (~137,5 МГц). Авторі показують, що для цього не обов'язково використовувати дорогі параболічні антени чи спеціалізовані приймачі – достатньо простого RTL-SDR та саморобної V-дипольної антени. Отримані сигнали оброблялись через SDRSharp та MATLAB, що дозволяло перетворювати аудіосигнал у високоякісні супутникові знімки. Хоча ця стаття демонструє ефективність дешевого підходу для супутникового моніторингу погоди, вона зосереджена на пасивному прийомі широкосмугових сигналів на фіксованій частоті. На відміну від цього, наше дослідження зосереджене на оцінці параметрів покриття в місь-

ких умовах з використанням вузькосмугового LoRa-зв'язку в діапазоні 868 МГц, що потребує інших вимог до антен, обробки даних та методології вимірювань.

У статті Андреаса Кріетемайєра (Andreas Krietemeier) та ін. [8] запропоновано метод калібрування для досягнення високоточного рівня позиціонування за допомогою недорогих двочастотних GNSS-приймачів та антен. Авторі розробили польове рішення, яке дозволяє значно покращити точність позиціонування, наближаючи її до рівня професійного обладнання. Хоча ця робота демонструє ефективність у підвищенні точності GNSS-вимірювань, вона зосереджена на статичних умовах та потребує специфічних калібрувальних процедур. У нашому дослідженні основна увага приділяється оцінці покриття бездротових сенсорних мереж у реальних міських умовах, де важливими є не лише точність позиціонування, але й стійкість зв'язку в умовах завад та перешкод.

У статті Тіма А. Вайлда (Timm A. Wild) та ін. [9] представлено розробку мікророзмірних, відкритих та недорогих GPS-логерів масою менше 1 г, призначених для моніторингу руху дрібних тварин. Авторі зосереджуються на зменшенні впливу пристроїв на поведінку тварин, забезпечуючи при цьому високу точність позиціонування та тривалий час роботи. Хоча дана робота демонструє ефективність у збиранні даних про переміщення об'єктів, вона орієнтована на біологічні дослідження та не враховує специфіку міського середовища з його численними завадами для бездротового зв'язку.

Аналогічною є робота Махендри Свейна (Mahendra Swain) та ін. [10], які зосереджуються на оптимізації бюджету зв'язку (link budget), розглядаючи параметри, такі як коефіцієнт розширення (spreading factor) та чутливість приймача, з метою забезпечення ефективної передачі даних на великі відстані. Проте, результати статті орієнтовані на відкриті простори з мінімальними перешкодами для сигналу.

Постановка завдання. Створення портативного пристрою для збору просторових характеристик сигналу LoRa-модуля в різних умовах місцевості, а також експериментальна апробація цього пристрою в польових умовах.

Методологія. Було проведено експериментальне дослідження, в ході якого була зібрана та проаналізована інформація з різних літературних джерел та досліджень. Було проведено моделювання спрямованої антени типу Мохон, її виго-

товлення та подальше тестування на різних висотах і в різних локаціях: у міських умовах Київ та на відкритій місцевості. До складу пристрою увійшли модуль E220-900T30D, GPS-приймач GP-01Kit та ноутбук з програмою u-center для фіксації координат і часу передачі даних.

Виклад основного матеріалу. З огляду на властивість напрямлених антен мінімізувати розсіювання енергії передачі сигналу у визначеному секторі, що у свою чергу ускладнює його виявлення [1], було прийнято рішення використати для дослідів даний тип антен. Враховуючи задачі виявлення небезпечних речовин, варто було звернути увагу на дрони. В дронах популярні омні-антени за рахунок всенапрямленості. Однак, існує тип напрямлених антен, які частіше інших використовуються в FPV дронах – антени типу Мохон.

Для побудови антени було виконано низку кроків. По-перше, було використано Мохон Rectangle Generator як калькулятор розмірів антени (рис. 1) для швидкого отримання геометрії Мохон-антени для потрібної частоти (868,125 МГц).

По-друге, отриманий шаблон антени було імпортовано в програму для електромагнітного моделювання антен MMANA-GAL.

Після обробки параметрів, калібровки та інших процедур було проведено аналіз характе-

ристик антени (діаграма спрямованості, коефіцієнт підсилення, резонансна частота) і обрано оптимальні параметри.

По-третє, засобами Tower Coverage було змодельовано зону покриття отриманої антени при вказаних умовах: розташування антени (на лівому березі Дніпра) на висоті 35 м (позиція антени), напрямок на правий берег Києва (рис. 3) та інших характеристик.

По-четверте, для перевірки теоретичних даних було вирішено зібрати радіомодуль з GPS-приймачем та отриманою антеною. З огляду на технічні характеристики модуля E220-900T30D було прийнято рішення використати його можливості для дослідів.

До RX та TX було під'єднано відповідні піни GPS для надсилення геолокації. Живлення відбувалось через павербанк. Для стабільної роботи пристрою був напаяний конденсатор. Зібрана модель передавача з від'єднаною антеною зображена на рис. 4.

Для приймача була виконана аналогічна конфігурація, без модуля GPS. Приймач було під'єднано через TTL-перехідник до ноутбука з програмою u-center.

Для роботи GP-01Kit було необхідне попереднє налаштування у вигляді позиціонування на

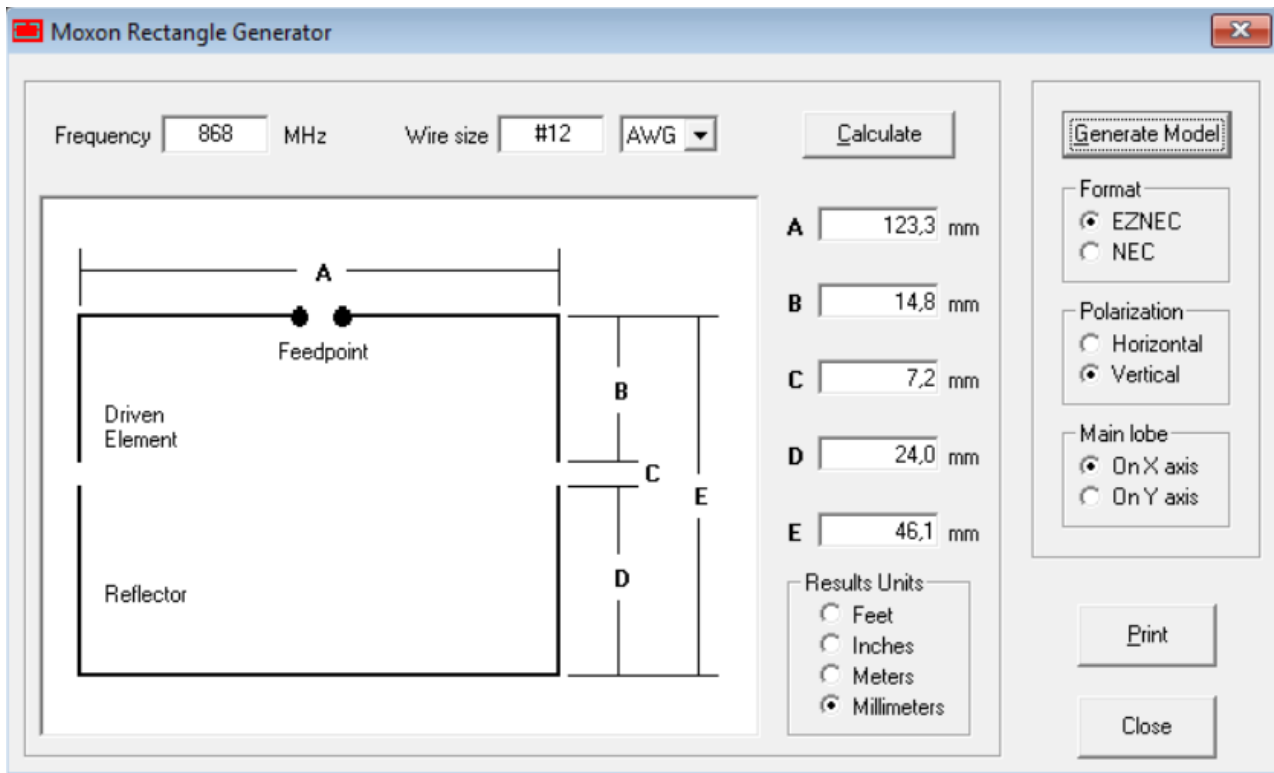


Рис. 1. Генератор геометрії антени Мохон

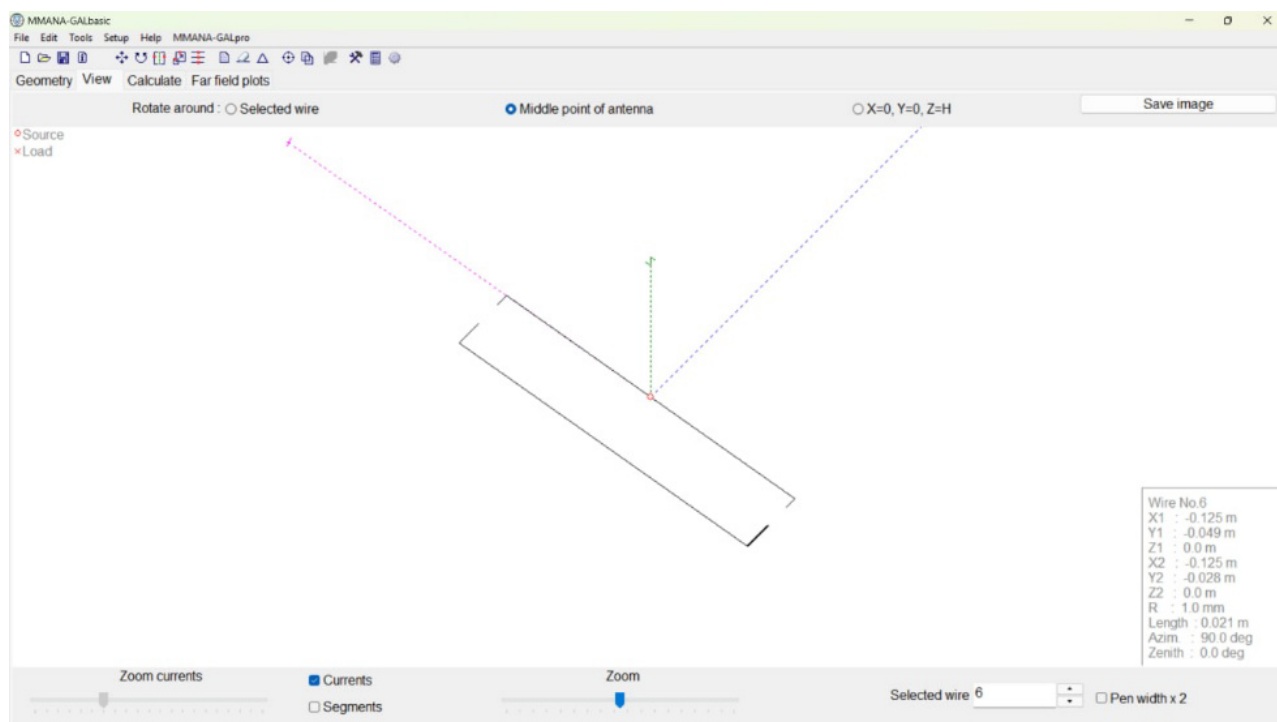


Рис. 2. Побудова антени

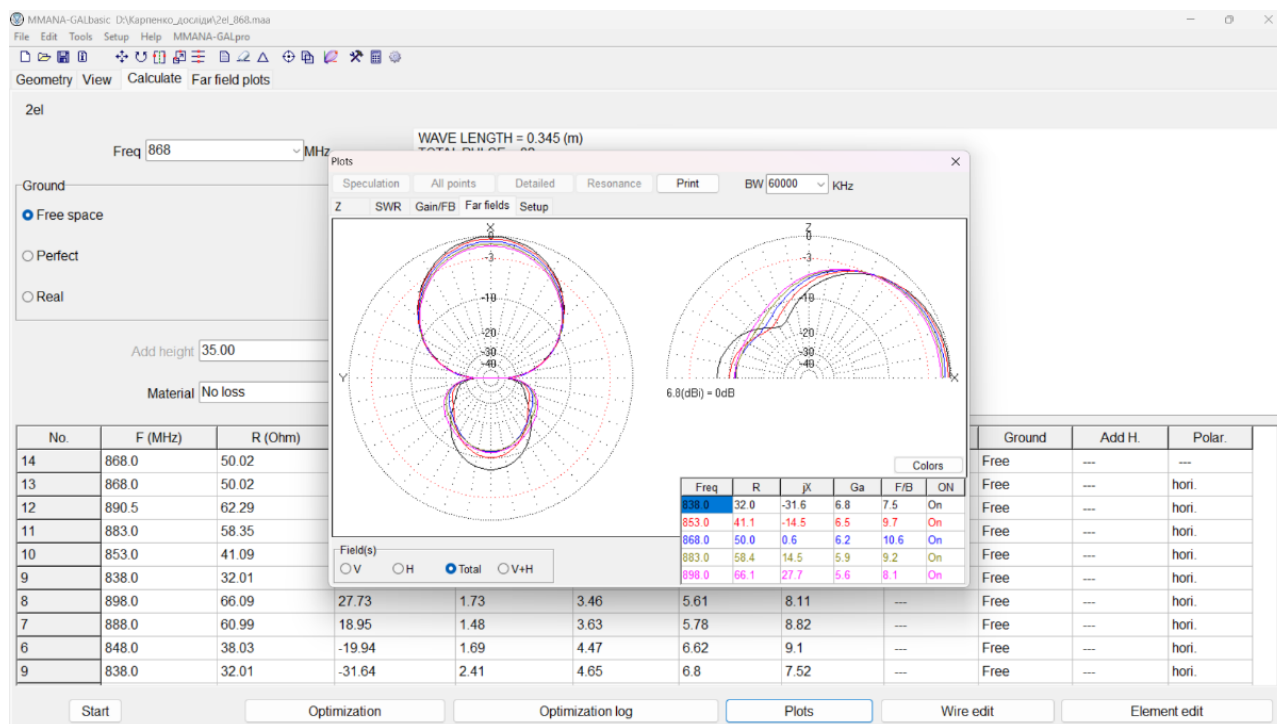


Рис. 3. Отримані значення для різних частот

відкритій місцевості протягом хвилини для отримання точних даних з супутників.

Для проведення дослідження було обрано прогулянковий маршрут від Арки Свободи українського народу, яка входила в зону покриття від вказаної позиції приймача на лівому березі і мала хороший сигнал (рис. 5).

Як можна побачити на рис. 6, маршрут GPS має уривки. Вони утворилися внаслідок втрати пакетів через різні фактори: щільність міської забудови, наявність металевих конструкцій, електромагнітні завади, а також можливе часткове перекриття прямої видимості між передавачем і приймачем.

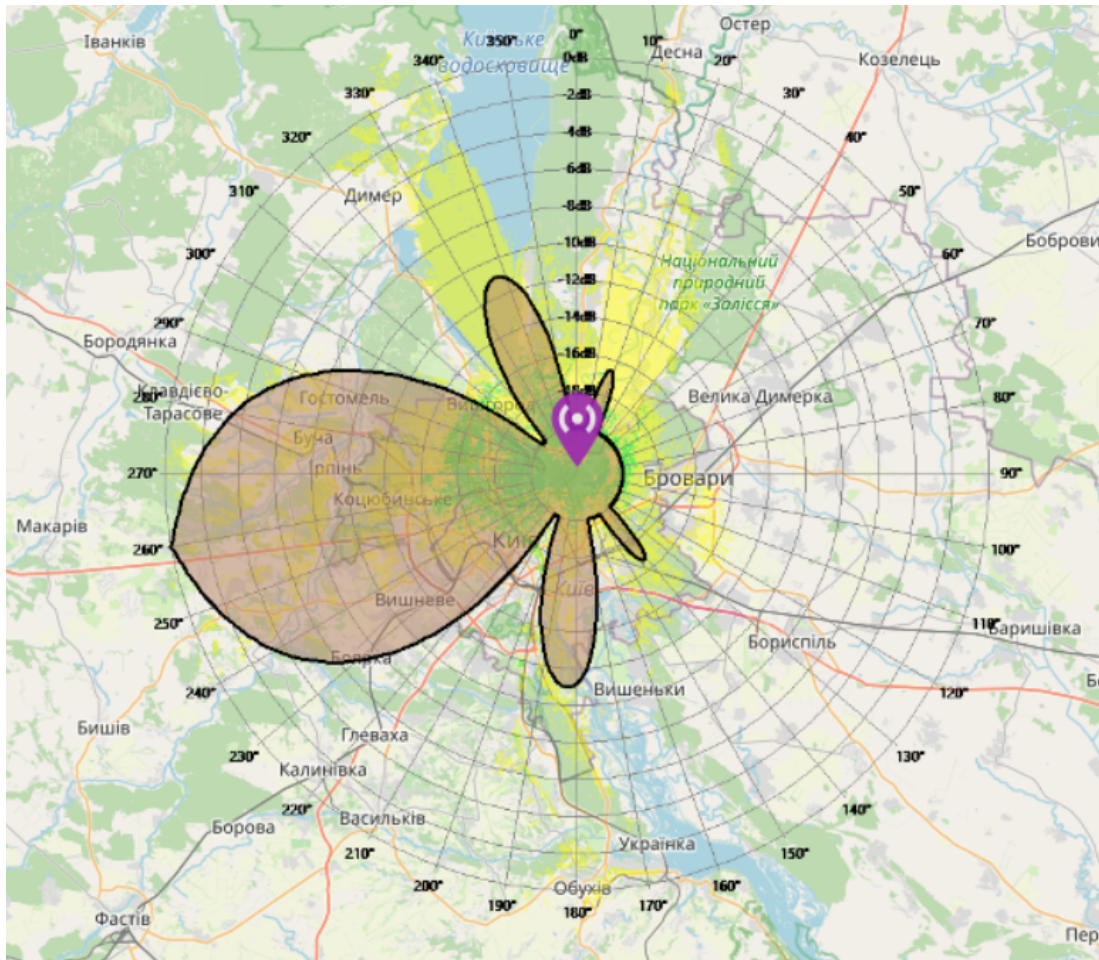


Рис. 3. Моделювання спрямованої антени в Tower Coverage



Рис. 4. Зібрана модель пристрою для дослідження покриття БСМ мереж

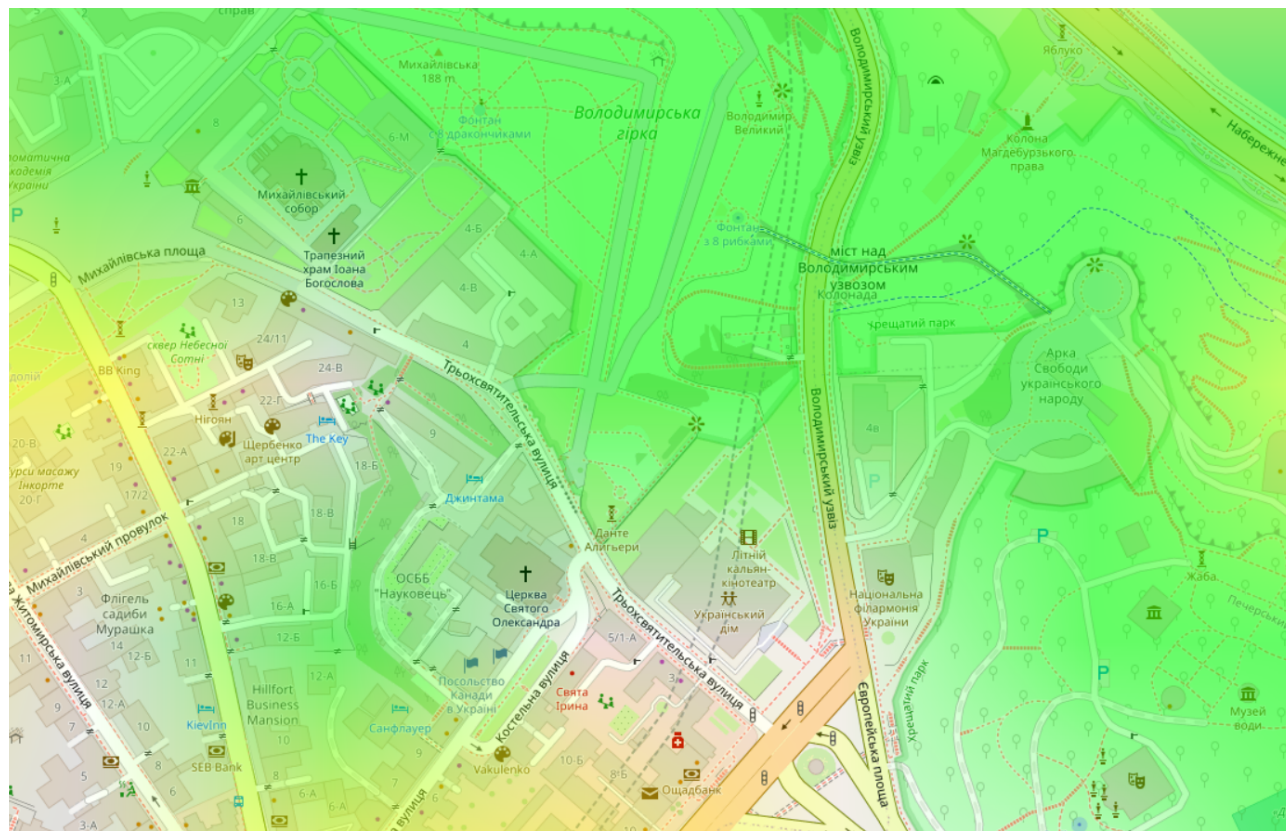


Рис. 5. Відрізок зони покриття

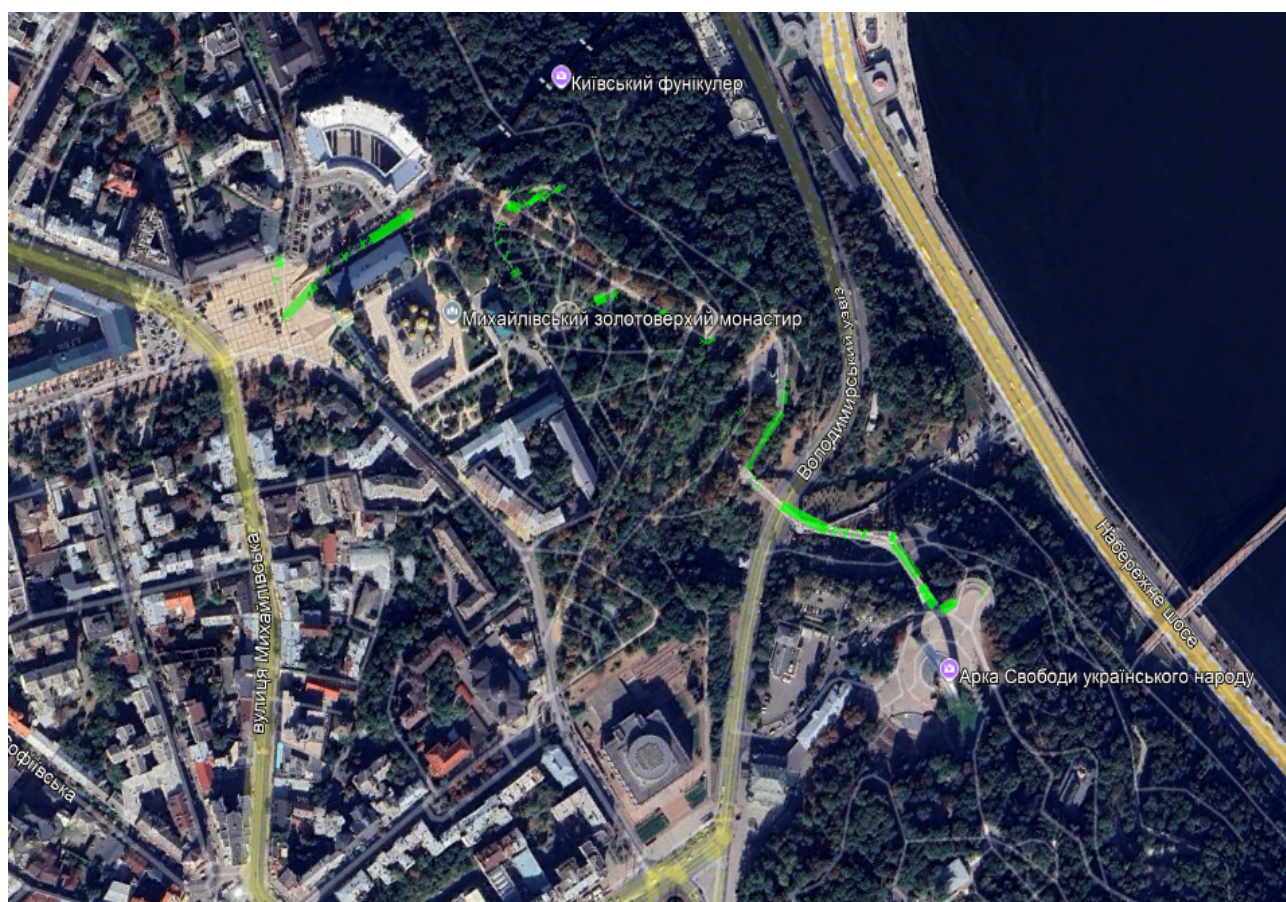


Рис. 6. Відрізок маршруту дослідів

Висновки. Навіть за умови позитивного теоретичного прогнозу зони покриття, реальні умови міського середовища можуть суттєво впливати на якість та стабільність бездротового зв'язку. В ході роботи було створено портативний інструмент для збору GPS-координат та характеристик покриття, який дозволив на практиці перевірити ефективність розрахункової моделі. Напрявлена антена типу Мохон, змодельована й побудована для випробувань, продемонструвала високу ефективність у фокусуванні сигналу, що особливо важливо для зниження електромагнітних перешкод

та покращення надійності зв'язку. Застосування програмного моделювання та подальших польових випробувань дозволило виявити невраховані фактори, що суттєво впливають на покриття: забудова, рельєф, джерела завад. Такий підхід демонструє важливість комбінування симуляцій з натурними даними під час проєктування БСМ. У перспективі розроблений пристрій може бути доопрацьований для автоматичного збору даних, інтеграції у БПЛА та побудови систем моніторингу для застосування в умовах бойових дій, техногенних загроз або екологічного аналізу.

Список літератури:

1. Wolff C. Radartutorial. Christian Wolff. URL: <https://www.radartutorial.eu/02.basics/LPI%20radar.en.html> (date of access: 25.04.2025).
2. Intelligent energy-efficient GNSS-assisted and LoRa-based positioning for wildlife tracking / J. J. López-Escobar et al. *IEEE Sensors Journal*. 2025. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2024.3524456> (date of access: 16.05.2025).
3. Bhavanam B. P. R., Ragam P. LoRa Sense: Sensing and Optimization of LoRa Link Behavior Using Path-Loss Models in Open-Cast Mines. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2024. P. 1–10. URL: <https://doi.org/10.32604/cmescs.2024.052355> (date of access: 16.05.2025).
4. Mazzaro G. J. M. Homemade-Antenna Project for an Undergraduate Wave-Propagation Course. *American Society for Engineering Education : Southeastern Section Conference*, South Carolina. Charleston, 2022. URL: <https://surli.cc/zqfqjv> (date of access: 16.05.2025).
5. Laboratory to Develop a Practical Hand-Made Monopulse Antenna for RFID Localization Systems / M. Campo-Valera et al. *IEEE Access*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2022.3229898> (date of access: 18.05.2025).
6. Compact Antenna Test Range Using Very Small F/D Transmitarray Based on Amplitude Modification and Phase Modulation / J. Tang et al. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2022. Vol. 71. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1109/tim.2022.3150835> (date of access: 18.05.2025).
7. MATLAB-Based Decoding of NOAA Satellite Images Using V-Dipole Antenna and RTL-SDR / M. T. Ahsan et al. *2024 14th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE)*, Hefei, China, 23–26 October 2024. 2024. P. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/isape62431.2024.10840934> (date of access: 18.05.2025).
8. A Field Calibration Solution to Achieve High-Grade-Level Performance for Low-Cost Dual-Frequency GNSS Receiver and Antennas / A. Krietemeyer et al. *Sensors*. 2022. Vol. 22, No. 6. P. 2267. URL: <https://doi.org/10.3390/s22062267> (date of access: 18.05.2025).
9. Micro-sized open-source and low-cost GPS loggers below 1 g minimise the impact on animals while collecting thousands of fixes / T. A. Wild et al. *PLOS ONE*. 2022. Vol. 17, No. 6. P. e0267730. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0267730> (date of access: 18.05.2025).
10. LoRa-LBO: An Experimental Analysis of LoRa Link Budget Optimization in Custom Build IoT Test Bed for Agriculture 4.0 / M. Swain et al. *Agronomy*. 2021. Vol. 11, No. 5. P. 820. URL: <https://doi.org/10.3390/agronomy11050820> (date of access: 18.05.2025).

Karpenko M.I., Moshenskyi A.O. DESIGN AND FIELD TESTING OF A DEVICE FOR RESEARCHING WSN COVERAGE

The article highlights the process of designing, assembling and practical application of an experimental device for studying the spatial characteristics of the coverage of a wireless sensor network (WSN) operating on the basis of LoRa technology. The relevance of the topic is due to the growing need to build highly reliable data transmission networks in difficult conditions – in particular, in urban areas, areas with a high level of interference and in frontline areas, where traditional means of communication demonstrate instability. The main goal of the research is to create a mobile technical solution that allows not only theoretically, but also practically to assess the effectiveness of coverage, depending on the parameters of the environment. Given the critical importance of the spatial coverage of the network, especially in difficult conditions – urban and frontline areas – a compact field data collection tool was developed taking into account the real environment. The device includes the

E220-900T30D module, the GP-01Kit GPS receiver and a laptop with u-center software for synchronization of coordinates and time. Special attention is paid to the Moxon-type directional antenna, which was modeled, built and tested. MMANA-GAL was used for electromagnetic modeling, and Tower Coverage was used for coverage area prediction. During the study, a series of tests were conducted in the city of Kyiv, where the analysis of packet loss and signal stability demonstrated a significant dependence of the communication quality on the type of development, the presence of obstacles and terrain features. The assembled device allowed not only to confirm the hypotheses regarding the influence of environmental factors on communication, but also to identify the limitations of existing coverage calculation models. The conclusion is the need to combine theoretical modeling with real field measurements when designing BSM to ensure reliable operation in specific conditions.

Key words: wireless sensor network, radio module, Moxon antenna, LoRa, GPS.