

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Сергій КРАВЧУК
«__» _____ 2025 р.

Магістерська дисертація

**на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»
зі спеціальності 172 «172 Електронні комунікації та радіотехніка»
на тему: « Розрахунок зони покриття сегмента мережі мобільного
зв'язку»**

Виконав:
студент II курсу, групи ЦК-41 мп
Ареф'єв Микола Олексійович _____

Керівник:
Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., доцент
Трубаров І.В. _____

Рецензент:
Доцент кафедри ЕКІР НН ІТС, к.т.н., доцент
Носков В.І. _____

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.
Студент _____

Київ - 2025 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Ареф'єву Миколі Олексійовичу

1. Тема дисертації «Розрахунок зони покриття сегмента мережі мобільного зв'язку», науковий керівник дисертації Трубаров Ігор, д.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «03» листопада 2025 р. № 4772-с.
2. Термін подання студентом дисертації 15.12.2025 р.
3. Об'єкт дослідження: процеси планування та оптимізації радіопокриття в мережах рухомого зв'язку в умовах складної міської забудови.
4. Предмет дослідження: методи та алгоритми автоматизованого розрахунку енергетичного бюджету радіоліній та зон покриття з використанням цифрових моделей рельєфу (DSM) та геоінформаційних технологій.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- Визначити точки розміщення базових станцій мобільного зв'язку на мапі.
- Реалізувати алгоритм побудови кругової зони покриття навколо одного передавача. У якості вхідних даних прийняти SHP-файл, що містить точку розміщення передавача, GeoTIFF-файл, що містить цифрову модель поверхні землі, радіус зони покриття.
- Здійснити розрахунок зони покриття одного сектора мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель загасання у відкритому просторі та умови всеспрямованої антени базової станції. Результат розрахунку представити у вигляді файлу формату GeoTIFF та відобразити на мапі. Розрахунок здійснити для стандарту GSM-1800 на частоті 1880 МГц.
- Здійснити та обґрунтувати вибір параметрів спрямованої односекторної антени базової станції мобільного зв'язку. Реалізувати математичну модель апроксимації діаграми спрямованості антени та здійснити розрахунок зони покриття одного сектора базової станції мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель загасання у відкритому просторі. Розрахунок здійснити для стандарту GSM-1800 на частоті 1880 МГц.
- Реалізувати алгоритм побудови профіля каналу зв'язку між базовою станцією та довільною точкою в круговій зоні навколо базової станції.
- Реалізувати алгоритм розрахунку втрат в каналі зв'язку з урахуванням профіля місцевості вздовж траси поширення радіохвиль. Модель повинна враховувати явище дифракції на елементах земної поверхні та об'єктів на ній.
- Здійснити розрахунок зони покриття одного сектора базової станції мережі мобільного зв'язку, використовуючи модель втрат, яка враховує дифракцію на елементах поверхні. У розрахунку врахувати спрямованість антени, використавши математичну модель діаграми її спрямованості. Розрахунок здійснити для декількох значень азимуту спрямованості антени та куту нахилу антени. Результат представити у вигляді GeoTIFF-файлу та відобразити на мапі в геоінформаційній системі.
- Здійснити розрахунок зони покриття декількох секторів мережі мобільного зв'язку. Для секторів обрати частоти, що забезпечують сумісну їхню роботу з прийнятим рівнем інтерференції. Розрахунок здійснити для стандарту GSM-1800. Результат представити у вигляді GeoTIFF-файлу.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

Слайд №1 – Назва роботи, виконавець, керівник

Слайд №2 – Мета, об'єкт, предмет та завдання дослідження

Слайд №3 – Актуальність: порівняння існуючих рішень (Atoll vs Python)

Слайд №4 – Фізична модель поширення радіохвиль у місті (дифракція, інтерференція)

Слайд №5 – Математична модель енергетичного бюджету та втрат (Link Budget)

Слайд №6 – Алгоритм розрахунку дифракції методом Дейгу (блок-схема)

Слайд №7 – Архітектура розробленого програмного комплексу (структура модулів)

Слайд №8 – Вхідні дані: цифрова модель поверхні (DSM) та параметри БС

Слайд №9 – Результати моделювання: карта покриття однієї станції (профіль траси)

Слайд №10 – Результати моделювання сегмента мережі (інтегральна карта)

Слайд №11 – Робота алгоритмів оптимізації (Smart Blanking та Self-Healing)

Слайд №12 – Порівняльний аналіз ефективності (до та після оптимізації)

Слайд №13 – Стартап-проект: бізнес-модель та ринкова стратегія

Слайд №14 – Висновки

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Дата видачі завдання “10 ” грудня 2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Отримання завдання, формування теми, пошук наукових джерел та стандартів (GSM/LTE, ITU-R)	10.12.2024 – 25.12.2024	Виконано
2	Підготовка вступу. Формування мети, об'єкта, предмета дослідження та постановка задач	26.12.2024 – 20.01.2025	Виконано
3	Аналіз особливостей поширення радіохвиль діапазону 1800 МГц та огляд методів радіопланування (Розділ 1)	21.01.2025 – 15.03.2025	Виконано
4	Розроблення математичної моделі енергетичного бюджету, адаптація методу дифракції Дейгу (Розділ 2)	16.03.2025 – 15.05.2025	Виконано

5	Проектування архітектури програмного комплексу. Підготовка геоданих DSM та середовища Python (Розділ 3, етап 1)	16.05.2025 – 30.06.2025	Виконано
6	Програмна реалізація модулів розрахунку покриття (FSPL, Diffraction Engine) та інтеграція з QGIS (Розділ 3, етап 2)	01.07.2025 – 31.08.2025	Виконано
7	Проведення експериментального моделювання мережі м. Києва, аналіз ефективності алгоритмів (Розділ 3, етап 3)	01.09.2025 – 20.10.2025	Виконано
8	Розроблення стартап-проекту, SWOT-аналізу та маркетингової стратегії (Розділ 4)	21.10.2025 – 15.11.2025	Виконано
9	Написання висновків, остаточне оформлення пояснювальної записки та графічних матеріалів	16.11.2025 – 01.12.2025	Виконано

Студент

Микола АРЕФ'ЄВ

Науковий керівник дисертації

Ігор ТРУБАРОВ

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація викладена на 119 сторінках та включає 22 ілюстрації, 1 таблицю та 24 джерела за переліком посилань.

Актуальність теми: Забезпечення суцільного радіопокриття в умовах щільної міської забудови та складного рельєфу є критичним завданням для сучасних мереж мобільного зв'язку (GSM/LTE). Існуючі професійні інструменти радіопланування мають високу вартість та закриту архітектуру, що ускладнює їх використання малим бізнесом та освітніми закладами. Розвиток відкритих геоінформаційних технологій та бібліотек мови Python відкриває нові можливості для створення доступних, гнучких та точних засобів автоматизованого проектування мереж, що враховують реальні цифрові моделі місцевості (DSM).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами: Тематика дисертації відповідає напряму науково-дослідних робіт кафедри телекомунікацій, спрямованих на удосконалення методів проектування бездротових мереж, підвищення їх енергоефективності та розробку вітчизняного програмного забезпечення для інфокомунікаційної галузі.

Мета і завдання дослідження: Метою роботи є розробка програмного комплексу на мові Python для автоматизованого розрахунку та оптимізації зон покриття мереж мобільного зв'язку з використанням цифрових моделей рельєфу.

Для досягнення мети поставлено такі завдання: – проаналізувати особливості поширення радіохвиль діапазону 1800 МГц в урбанізованому середовищі; – удосконалити математичну модель енергетичного бюджету шляхом інтеграції методу дифракції Дейгу та 3D-діаграм спрямованості антен; – розробити архітектуру програмного комплексу з використанням

бібліотек Rasterio та NumPy; – реалізувати алгоритми оптимізації топології мережі (Smart Blanking, Self-Healing) для усунення зон відсутності сигналу; – виконати моделювання сегмента мережі у м. Києві та візуалізувати результати в середовищі QGIS.

Об’єкт дослідження: Процеси планування та оптимізації радіопокриття в мережах рухомого зв’язку.

Предмет дослідження: Методи та алгоритми автоматизованого розрахунку втрат радіосигналу та побудови зон обслуговування з урахуванням рельєфу та забудови.

Методи дослідження: У роботі застосовано методи обчислювальної радіофізики (моделювання дифракції), геоінформаційного аналізу (обробка растрових даних DSM), об’єктно-орієнтованого програмування (Python) та методи математичної статистики для кластеризації зон відсутності покриття.

Наукова новизна: Вперше розроблено інтегровану методику радіопланування на базі Python, яка поєднує векторизований розрахунок дифракційних втрат на реальному рельєфі з алгоритмами автоматичного самовідновлення покриття (Self-Healing), що дозволяє підвищити точність прогнозування зон обслуговування в умовах складної забудови без використання пропрієтарного ПЗ.

Практичне значення одержаних результатів: Створений програмний комплекс «GeoRadioPlan» дозволяє виконувати інженерні розрахунки покриття, експортувати результати у формат GeoTIFF/QGIS та автоматично підбирати оптимальні позиції для базових станцій. Рішення є безкоштовним, працює автономно (offline) і рекомендоване для

використання інтернет-провайдерів, підрозділами спеціального зв'язку та у навчальному процесі технічних університетів.

Ключові слова: GSM, LTE, РАДІОПЛАНУВАННЯ, PYTHON, QGIS, ЦИФРОВА МОДЕЛЬ РЕЛЬЄФУ (DSM), ДИФРАКЦІЯ, ПОКРИТТЯ, SELF-HEALING.

ABSTRACT

The Master's thesis consists of 119 pages, includes 22 figures, 1 table, and 24 references.

Relevance of the topic: Ensuring continuous radio coverage in conditions of dense urban development and complex terrain is a critical task for modern mobile communication networks (GSM/LTE). Existing professional radio planning tools are expensive and have a closed architecture, which complicates their use by small businesses and educational institutions. The development of open geoinformation technologies and Python libraries opens new possibilities for creating accessible, flexible, and accurate automated design tools that take into account real Digital Surface Models (DSM).

Connection of the work with scientific programs, plans, and topics: The subject of the thesis corresponds to the direction of research work of the Telecommunications Department, aimed at improving methods for designing wireless networks, increasing their energy efficiency, and developing domestic software for the infocommunication industry.

Purpose and objectives of the research: The purpose of the work is to develop a software complex in Python for automated calculation and optimization of mobile network coverage zones using digital terrain models.

To achieve this goal, the following tasks were set: – to analyze the features of radio wave propagation in the 1800 MHz band in an urban environment; – to improve the mathematical model of the link budget by integrating the Deygout diffraction method and 3D antenna radiation patterns; – to develop the architecture of the software complex using Rasterio and NumPy libraries; – to implement network topology optimization algorithms (Smart Blanking, Self-Healing) to eliminate coverage gaps; – to perform modeling of a network segment in Kyiv and visualize the results in the QGIS environment.

Object of research: Processes of planning and optimization of radio coverage in mobile communication networks.

Subject of research: Methods and algorithms for automated calculation of radio signal losses and construction of service zones taking into account relief and building density.

Resrch methods: The work applies methods of computational radiophysics (diffraction modeling), geoinformation analysis (processing of DSM raster data), object-oriented programming (Python), and mathematical statistics methods for clustering coverage gaps.

Scientific novelty: For the first time, an integrated radio planning methodology based on Python has been developed, which combines vectorized calculation of diffraction losses on real terrain with automatic coverage self-healing algorithms. This allows for increased accuracy in predicting service zones in complex urban environments without the use of proprietary software.

Practical value of the obtained results: The created software complex "GeoRadioPlan" allows performing engineering coverage calculations, exporting results to GeoTIFF/QGIS format, and automatically selecting optimal positions for base stations. The solution is free, works autonomously (offline), and is recommended for use by Internet service providers, special communication units, and in the educational process of technical universities.

Keywords: GSM, LTE, RADIO PLANNING, PYTHON, QGIS, DIGITAL SURFACE MODEL (DSM), DIFFRACTION, COVERAGE, SELF-HEALING.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1.....	18
Теоретичні основи ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....	18
1.1 Особливості стандарту GSM/LTE-1800	18
1.2 Геоінформаційні системи та моделі рельєфу в радіоплануванні.....	19
1.3 Автоматизація планування та концепція SON	23
1.4 Методи оптимізації топології мережі.....	24
1.5 Постановка задачі дослідження	25
Висновки.....	26
РОЗДІЛ 2.....	28
Математична модель та методика розробки	28
2.1 Енергетичний бюджет радіолінії	28
2.2 Математичне моделювання антенних систем.....	30
2.3 Алгоритм розрахунку дифракційних втрат	32
2.4 Методика інтелектуального вибору позицій та конфігурації секторів (Smart Blanking)	35
2.5 Алгоритм самовідновлення покриття (Self-Healing Network)	36
2.6 Архітектура програмного комплексу	38
Висновки.....	39
РОЗДІЛ 3.....	41
РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	41
3.1 Етапи розробки програмного ядра.....	42
3.2 ПРАКТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СЕГМЕНТА МЕРЕЖІ GSM-1800 У М. КИЄВІ	53
3.3 РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ ЗОНИ ПОКРИТТЯ СЕГМЕНТА МЕРЕЖІ.....	58
Висновки.....	88
РОЗДІЛ 4.....	91
СТАРТАП ПРОЕКТ	91
4.1 Опис ідеї стартап-проекту	91
4.2 Технологічний аудит	94
4.3 Аналіз ринку	97
4.4 SWOT-аналіз стартап-проекту та маркетингова програма	100

Висновок.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	112

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3GPP	3rd Generation Partnership Project – консорціум, що розробляє специфікації для мобільної телефонії
API	Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс
BS	Base Station – базова станція стільникового зв'язку
CPU	Central Processing Unit – центральний процесор
DSM	Digital Surface Model – цифрова модель поверхні (рельєф + об'єкти)
DTM	Digital Terrain Model – цифрова модель рельєфу (лише земля)
FDD	Frequency Division Duplex – частотний дуплекс (розділення каналів прийому та передачі за частотою)
FSPL	Free Space Path Loss – загасання радіосигналу у вільному просторі
GIS	Geographic Information System – геоінформаційна система (ГІС)
GPS	Global Positioning System – глобальна система позиціонування
GSM	Global System for Mobile Communications – глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку
GUI	Graphical User Interface – графічний інтерфейс користувача

IDE	Integrated Development Environment – інтегроване середовище розробки
IoT	Internet of Things – Інтернет речей
ITU-R	International Telecommunication Union (Radiocommunication Sector) – сектор радіозв'язку Міжнародного союзу електрозв'язку
KPI	Key Performance Indicator – ключовий показник ефективності
LoS	Line of Sight – пряма видимість між передавачем та приймачем
LTE	Long-Term Evolution – стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних (4G)
MIMO	Multiple Input Multiple Output – метод просторового кодування сигналу
NLoS	Non-Line of Sight – відсутність прямої видимості (затінення)
OS	Operating System – операційна система
RAM	Random Access Memory – оперативна пам'ять
RF	Radio Frequency – радіочастота
RSRP	Reference Signal Received Power – потужність прийнятого опорного сигналу (ключова метрика в LTE)
RSSI	Received Signal Strength Indicator – індикатор рівня потужності прийнятого сигналу

RX	Receive – прийом (приймальний тракт)
SaaS	Software as a Service – програмне забезпечення як послуга
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio – відношення сигнал/(інтерференція + шум)
SON	Self-Organizing Network – самоорганізована мережа
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats – метод стратегічного планування
TX	Transmit – передача (передавальний тракт)
UE	User Equipment – обладнання користувача (мобільний термінал)
WGS84	World Geodetic System 1984 – всесвітня система геодезичних параметрів (система координат)
WISP	Wireless Internet Service Provider – провайдер послуг бездротового інтернету

ВСТУП

Стрімкий розвиток мереж мобільного зв'язку та експоненціальне зростання обсягів трафіку обумовлюють потребу у постійному ущільненні мережевої інфраструктури, особливо в умовах великих міст. Ефективне розгортання базових станцій стандартів GSM та LTE вимагає врахування складної архітектури міської забудови та рельєфу місцевості, які є критичними факторами, що впливають на поширення радіохвиль.

Актуальність теми визначається необхідністю створення доступних та гнучких інструментів для автоматизованого радіопланування, які здатні забезпечити високу точність розрахунків без використання високовартісного комерційного програмного забезпечення. Існуючі на ринку професійні комплекси (Atoll, Asset) є недоступними для малого бізнесу та освітніх закладів, тоді як спрощені онлайн-калькулятори ігнорують вплив рельєфу та дифракції. Саме тому розробка власного програмного рішення на базі мови Python та відкритих геоінформаційних технологій є перспективним напрямом, що дозволяє поєднати точність інженерних моделей з економічною ефективністю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами кафедри полягає у тому, що дослідження відповідає стратегічним напрямкам розвитку телекомунікаційних систем, методів математичного моделювання фізичних полів та розробки вітчизняного програмного забезпечення для інфокомунікаційної галузі. Робота гармонійно інтегрується у загальний цикл досліджень кафедри, спрямованих на оптимізацію бездротових мереж та підвищення якості обслуговування абонентів.

Мета роботи полягає у створенні ефективного програмного комплексу на Python для автоматизованого розрахунку та візуалізації зон покриття мереж мобільного зв'язку з використанням цифрових моделей поверхні (DSM). Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити комплекс завдань, що включають аналіз умов поширення радіохвиль діапазону 1800 МГц, удосконалення математичних моделей дифракції, програмну реалізацію алгоритмів обробки геоданих, а також експериментальне моделювання сегмента мережі.

Методи дослідження. Розробка здійснюється із застосуванням бібліотек Rasterio, NumPy та SciPy, що дозволяє реалізувати векторизовану обробку растрових карт висот, розрахунок енергетичного бюджету та імітаційне моделювання топології мережі. Візуалізація результатів виконується засобами Matplotlib та інтеграцією з ГІС QGIS. Структура роботи відповідає вимогам методичних рекомендацій та містить аналіз предметної області, математичне обґрунтування моделей, опис програмної реалізації та стартап-проект.

Практична значущість результатів дослідження полягає у тому, що запропоноване рішення може бути використане локальними інтернет-провайдерами для планування мереж, підрозділами спеціального зв'язку для оперативної оцінки покриття в польових умовах, а також у навчальному процесі для підготовки фахівців з радіопланування.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Ефективне розгортання мереж мобільного зв'язку в умовах щільної міської забудови є складним інженерним завданням, що вимагає врахування великої кількості факторів: від частотного ресурсу та характеристик обладнання до особливостей рельєфу та архітектури міста. Сучасні системи автоматизованого проектування (САПР) дозволяють вирішувати ці задачі, однак їх висока вартість та закритість алгоритмів створюють потребу у розробці гнучких програмних рішень на базі відкритих технологій.

У цьому розділі проведено аналіз особливостей стандарту GSM/LTE-1800, розглянуто фізичні механізми поширення радіохвиль у міському середовищі, здійснено огляд існуючих методів радіопланування та обґрунтовано доцільність створення власного програмного комплексу на мові Python..

1.1 Особливості стандарту GSM/LTE-1800

Діапазон частот 1800 МГц (DCS-1800 / LTE Band 3) є одним із найбільш поширених у світі для розгортання мереж мобільного зв'язку в урбанізованих районах. Вибір цього діапазону для курсового/дипломного проектування зумовлений його фізичними характеристиками, які забезпечують оптимальний баланс між ємністю мережі та площею покриття.

Центральна частота 1800 МГц відповідає довжині хвилі $\lambda \approx 16.7$ см. Це суттєво менше, ніж у діапазоні 900 МГц ($\lambda \approx 33$ см), що впливає на дифракційні властивості сигналу. Хвилі цього діапазону гірше огинають перешкоди, що вимагає більш щільного розміщення базових станцій (БС),

але дозволяє ефективніше використовувати частотний ресурс за рахунок меншого радіуса інтерференційного впливу. [3]

Частотний план: Система працює у режимі частотного дуплексу (FDD).

- Uplink (від абонента до БС): 1710–1785 МГц.
- Downlink (від БС до абонента): 1805–1880 МГц. Дуплексний рознос становить 95 МГц. Ширина каналу в GSM становить 200 кГц, а в LTE може варіюватися від 1.4 до 20 МГц.

Вимоги до рівня сигналу: При плануванні мережі критично важливим є забезпечення енергетичного бюджету (Link Budget). Для міських умов прийнято виділяти такі рівні якості покриття (RSRP/RSSI):

- -75 dBm: Відмінне покриття, висока швидкість передачі даних, стабільний зв'язок усередині будівель (Deep Indoor).
- -75 ... -95 dBm: Хороше покриття, стабільна робота голосових сервісів та передачі даних.
- -95 ... -105 dBm: Задовільне покриття (Cell Edge), можливе зниження швидкості, ризик обривів у приміщеннях.
- < -110 dBm: Зона відсутності обслуговування (Out of Service).

Специфіка міського покриття для діапазону 1800 МГц полягає у високому рівні загасання сигналу при проходженні крізь стіни будівель (Penetration Loss), що може сягати 15–25 дБ залежно від матеріалу (бетон, скло з металевим напиленням). [4]

1.2 Геоінформаційні системи та моделі рельєфу в радіоплануванні

Поширення електромагнітних хвиль у реальному міському середовищі суттєво відрізняється від моделі вільного простору. Сигнал зазнає впливу рефракції, дифракції, розсіювання та поглинання. Для

коректного моделювання необхідно враховувати три основні компоненти втрат.

Загасання у вільному просторі (Free Space Path Loss)

Це базовий рівень втрат, зумовлений геометричним розширенням сферичного фронту хвилі. Він визначається за формулою Фрііса і залежить виключно від частоти та відстані. Для частоти 1800 МГц подвоєння відстані призводить до зменшення рівня сигналу на 6 дБ. Хоча ця модель є ідеалізованою, вона слугує фундаментом для всіх розрахунків, до якого додаються поправкові коефіцієнти. [5]

Вплив рельєфу (Shadowing) та явище дифракції

У містах зі складним рельєфом, таких як Київ (перепад висот між берегами Дніпра сягає понад 100 м), пряма видимість (Line of Sight, LoS) часто відсутня. У таких випадках ключову роль відіграє дифракція — здатність хвилі огинати перешкоди. Згідно з принципом Гюйгенса-Френеля, кожна точка фронту хвилі стає джерелом вторинних хвиль. Якщо на шляху поширення трапляється непрозора перешкода (пагорб), енергія сигналу проникає в область геометричної тіні. Ефективність цього процесу залежить від співвідношення розмірів перешкоди та радіуса першої зони Френеля. Втрати на дифракцію можуть становити від 6 до 30 дБ і є критичними для точного моделювання. [5]

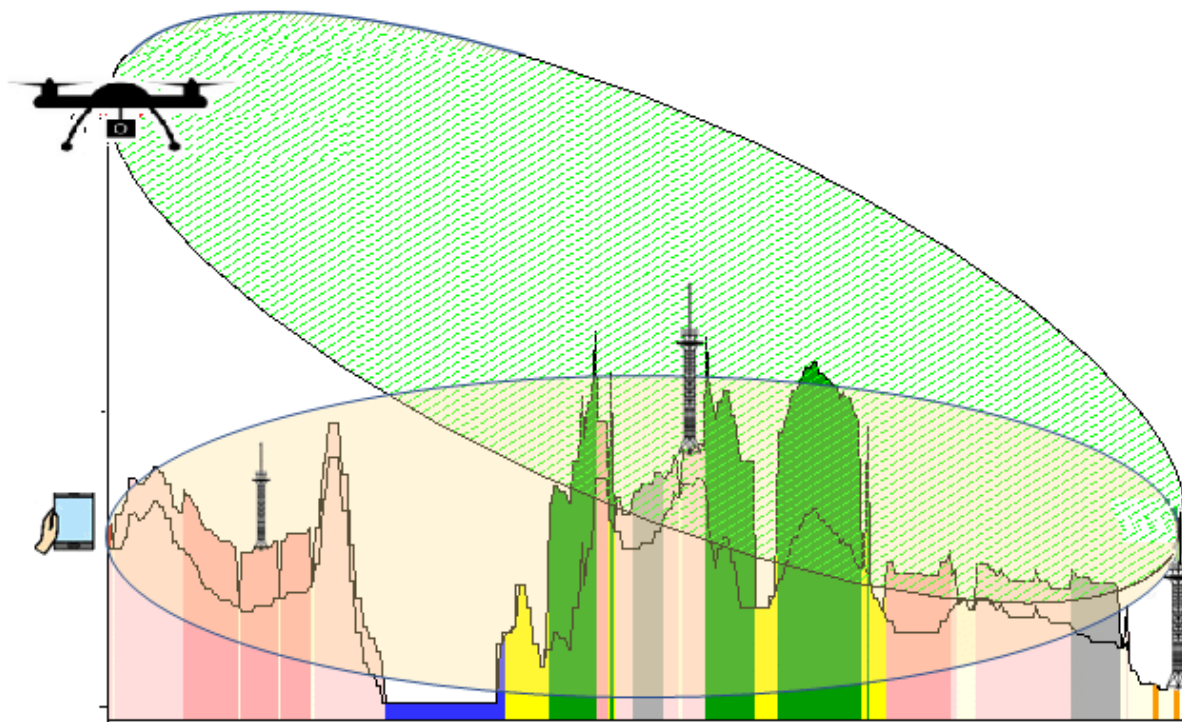


Рис.1.1 Геометрія зони Френеля та вплив перешкоди на поширення сигналу

Вплив забудови (Clutter Loss) та проникнення в будівлі

Це найбільш складний для моделювання фактор. Міська забудова (Urban Clutter) діє як хаотичний набір перешкод, що викликає багатопроменеве поширення сигналу. [6]

- Екранування: Будинки перекривають прямий шлях сигналу.
- Розсіювання: Дерев та дрібні архітектурні форми розсіюють енергію.
- Загасання всередині: Проходження крізь стіни призводить до різкого падіння рівня сигналу. У професійних моделях (наприклад, Okumura-Hata або COST-231) цей фактор враховується як інтегральний коефіцієнт (Clutter Loss), який для щільної міської забудови (Dense Urban) на частоті 1800 МГц становить близько 20–30 дБ.

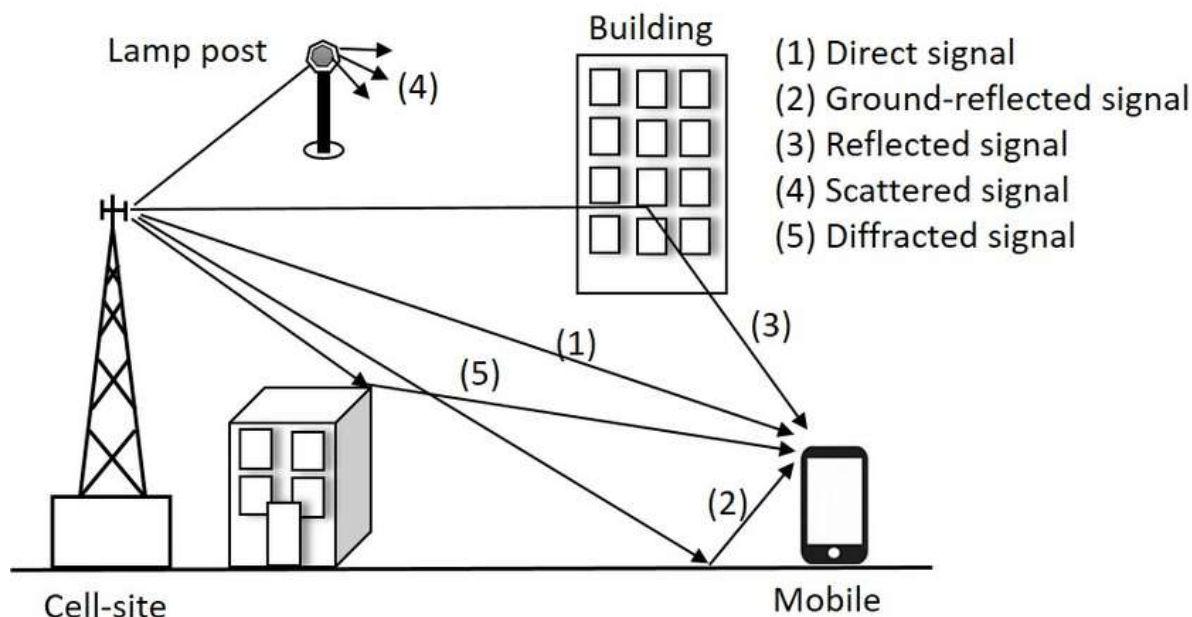


Рис.1.2 Схема багатопроменевого поширення радіохвиль в умовах щільної міської забудови

Точність моделювання поширення радіохвиль безпосередньо залежить від якості вхідних геопросторових даних. Для розрахунку втрат на трасі використовуються цифрові моделі місцевості (Digital Surface Models — DSM), які, на відміну від цифрових моделей рельєфу (DTM), враховують висоту рослинності та штучних споруд. [6]

Сучасні методи радіопланування передбачають не лише врахування висот, а й автоматичну класифікацію типів місцевості (clutter classification) на основі морфометричного аналізу DSM. Одним із ефективних методів виявлення водних поверхонь, які характеризуються високим коефіцієнтом відбиття сигналу, є статистичний аналіз текстури поверхні.

Водні об'єкти відрізняються від забудови або рослинності мінімальним значенням дисперсії висот. Застосування показника середньоквадратичного відхилення (Standard Deviation) висот у ковзному вікні дозволяє автоматично сегментувати карту та ідентифікувати зони, де

розміщення базових станцій є недоцільним через ризик виникнення понаднормативної інтерференції

1.3 Автоматизація планування та концепція SON

Для планування мереж традиційно використовуються спеціалізовані програмні комплекси та емпіричні моделі. [3]

Професійні комплекси (Atoll, Asset, Planet): Це промислові стандарти радіопланування.

- Переваги: Висока точність, підтримка 3D-карт міст, врахування трафіку.
- Недоліки: Надзвичайно висока вартість ліцензій, закритість коду, високі вимоги до обчислювальних ресурсів та складність інтеграції з власними алгоритмами.

Python-бібліотеки для геопросторового аналізу (Rasterio, NumPy, GeoPandas):

Сучасний розвиток Data Science відкриває альтернативний шлях.

- Rasterio: Дозволяє ефективно працювати з растровими картами висот (GeoTIFF), зчитуючи дані про рельєф як матриці чисел.
- NumPy: Забезпечує високошвидкісні матричні обчислення, що дозволяє реалізувати складні фізичні моделі (FSPL, дифракція) для мільйонів пікселів карти за лічені секунди.
- SciPy: Надає інструменти для багатовимірної обробки зображень та кластерного аналізу (модуль ndimage), що є критично важливим для реалізації алгоритмів виявлення "мертвих зон" та фільтрації шумів на карті покриття.

- Переваги підходу: Повна безкоштовність (Open Source), можливість кастомізації алгоритмів, кросплатформеність та легка автоматизація.

Окремим напрямком розвитку сучасних систем мобільного зв'язку є впровадження концепції самоорганізованих мереж (Self-Organizing Networks — SON). Зростання щільності забудови та складності рельєфу унеможлиблює ручне налаштування кожного елемента мережі, що зумовлює перехід до алгоритмічного керування. [3]

В контексті автоматизованого планування критично важливою є функція Self-Healing (самовідновлення). Її завданням є автоматичне виявлення локальних зон відсутності покриття («дірок») та компенсація втрат сигналу без прямого втручання інженера. Алгоритми класу Self-Healing базуються на аналізі масивів даних про рівень сигналу (RSRP) та прийнятті рішень щодо зміни конфігурації існуючих секторів або визначення координат для встановлення нових компенсуючих базових станцій (Fill-in sites). [6]

Реалізація таких механізмів вимагає застосування ітеративних алгоритмів, які сканують карту покриття, кластеризують проблемні зони та автоматично генерують план оптимізації топології мережі..

1.4 Методи оптимізації топології мережі

Задачу оптимального розміщення базових станцій (Base Station Placement Problem) відносять до класу NP-складних задач комбінаторної оптимізації. Повний перебір варіантів розміщення є обчислювально неможливим для територій масштабу мегаполісу. Тому на практиці застосовуються евристичні та ітеративні підходи.

Перспективним є використання модифікованих «жадібних» алгоритмів (Greedy Algorithms), які працюють за принципом локальної оптимізації на кожному кроці. Алгоритм послідовно обирає найкращі позиції для базових станцій, базуючись на домінантних висотах, після чого проводить оцінку покриття. [4]

Для подальшого покращення мережі застосовується метод «розумного відсікання» (Smart Blanking/Pruning), який полягає у вимкненні неефективних секторів, що спрямовані на перешкоди або створюють надлишкову інтерференцію. Такий підхід дозволяє досягти балансу між якістю покриття (Quality of Service) та економічною ефективністю розгортання мережі (CAPEX/OPEX).

1.5 Постановка задачі дослідження

Аналіз предметної області показав, що існує розрив між дорогими комерційними продуктами та потребами у швидкому, гнучкому інструменті для оцінки покриття.

Проблема: Неможливість швидкого моделювання розгортання мережі (наприклад, для спеціальних потреб або нових провайдерів) без значних капіталовкладень у ПЗ. Більшість простих калькуляторів не враховують рельєф, що для умов Києва дає похибку в десятки децибел.

Мета роботи: Розробка програмного комплексу на мові Python для автоматизованого розрахунку та оптимізації покриття мережі GSM/LTE-1800, який враховує:

- Реальний рельєф місцевості (Digital Surface Model) та класифікацію підстильної поверхні (вода/суша).

- Фізичні явища дифракції, інтерференції та багатопроменевого поширення.
- Технічні характеристики антенних систем (діаграми спрямованості, електричний нахил).
- Автоматичну оптимізацію розташування базових станцій на домінантних висотах з використанням механізмів розумного відсікання секторів (Smart Blanking).
- Реалізацію функцій самовідновлення мережі (Self-Healing) для автоматичного виявлення та усунення зон відсутності покриття.

Висновки

У першому розділі магістерської дисертації проведено комплексний аналіз особливостей планування мереж мобільного зв'язку стандарту GSM/LTE-1800 в умовах щільної міської забудови. Аналіз фізичних умов поширення сигналу: Встановлено, що для частотного діапазону 1800 МГц (довжина хвилі $\lambda \approx 17$ см) критичними факторами, що обмежують зону покриття, є високе загасання при проходженні крізь будівельні конструкції (Penetration Loss) та низька здатність до огинання перешкод порівняно з діапазонами sub-1GHz. Це вимагає детального врахування явищ дифракції та інтерференції при розрахунку енергетичного бюджету радіоліній. Роль геоінформаційних даних: Обґрунтовано необхідність використання цифрових моделей поверхні (DSM) замість спрощених моделей рельєфу (DTM) для умов міста, оскільки DSM враховує висотність забудови та рослинності. Визначено, що статистичний аналіз морфометрії поверхні (зокрема, розрахунок середньоквадратичного відхилення висот) є ефективним методом автоматичної класифікації підстильної поверхні (вода/суша) для уточнення моделей поширення хвиль. Оцінка існуючого інструментарію: Проведений порівняльний аналіз

показав, що професійні комерційні комплекси (Atoll, Asset) є фінансово недоступними для малого бізнесу та освітніх цілей. Водночас виявлено високий потенціал використання мови програмування Python та бібліотек геопросторового аналізу (Rasterio, NumPy) для створення гнучких, відкритих та безкоштовних інструментів радіопланування, здатних обробляти великі масиви растрових даних. Алгоритмічне забезпечення: Розглянуто концепцію самоорганізованих мереж (SON) та визначено, що автоматизація процесу планування має базуватися на ітеративних алгоритмах пошуку домінантних висот та механізмах «розумного відсікання» (Smart Blanking). Це дозволяє реалізувати функції самовідновлення покриття (Self-Healing) без безпосереднього втручання оператора. Постановка задачі: На основі проведеного аналізу сформульовано мету роботи, яка полягає у розробці програмного комплексу на мові Python, що реалізує автоматизований розрахунок зон покриття та оптимізацію топології мережі з урахуванням реального рельєфу місцевості, дифракційних втрат та вимог до енергетичної ефективності мереж GSM/LTE.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА МЕТОДИКА РОЗРОБКИ

У даному розділі представлено математичний апарат, покладений в основу розроблюваного програмного комплексу. Описано формалізацію енергетичного бюджету радіолінії, алгоритми моделювання антенних систем, методи розрахунку дифракційних втрат та авторську методику топологічної оптимізації мережі.

2.1 Енергетичний бюджет радіолінії

Основою розрахунку зони покриття є рівняння енергетичного бюджету (Link Budget). Потужність сигналу на вході приймача абонента (P_{rx}) визначається як алгебраїчна сума потужностей та втрат у тракці передачі.

Формалізована модель має вигляд:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_{ant} - L_{total}$$

Формула 2.1 — Рівняння енергетичного бюджету радіолінії

де:

- P_{tx} — потужність передавача базової станції (типово 43...46 dBm);
- G_{ant} — коефіцієнт підсилення передавальної антени (Gain, 15...18 dBi);
- L_{total} — сумарні втрати на трасі поширення.

Розпишемо складову втрат L_{total} детальніше, враховуючи всі фактори, що моделюються в роботі:

$$L_{total} = L_{FSPL} + L_{diff} + L_{clutter} + L_{pattern} + L_{cable}$$

Формула 2.2 — Складові сумарних втрат на трасі поширення сигналу

де:

1. L_{FSPL} (Free Space Path Loss) — втрати у вільному просторі, що розраховуються за формулою:

$$L_{FSPL} = 32.44 + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}(d)$$

Формула 2.3 — Розрахунок втрат у вільному просторі (FSPL)

де f — частота (МГц), d — відстань (км).

2. L_{diff} — дифракційні втрати на перешкодах рельєфу (розраховуються алгоритмічно).
3. $L_{clutter}$ — втрати у міській забудові (емпірична константа, для щільної забудови ≈ 25 dB).
4. $L_{pattern}$ — втрати, зумовлені діаграмою спрямованості антени (відхилення абонента від головного пелюстка).

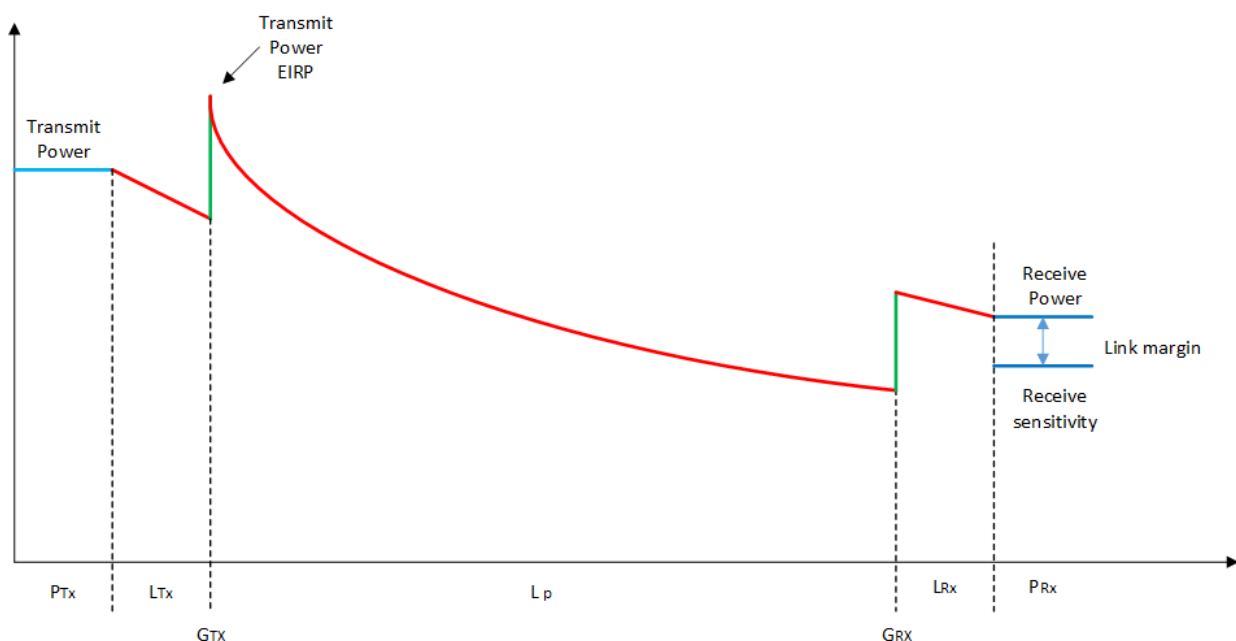


Рис.2.1 Складові енергетичного бюджету радіолінії GSM-1800

2.2 Математичне моделювання антенних систем

Для підвищення точності моделювання ми відмовляємося від ізотропної моделі випромінювача на користь секторних антен. Апроксимація діаграми спрямованості: Використано стандартну модель 3GPP для горизонтальної діаграми спрямованості:

$$A(\theta) = -\min\left(12\left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}}\right)^2, A_m\right)$$

Формула 2.4 — Апроксимація діаграми спрямованості антени (модель 3GPP)

де:

- θ — кут відхилення від азимута головного пелюстка;
- θ_{3dB} — ширина діаграми спрямованості (65°);
- A_m — максимальне загасання (Front-to-Back ratio).

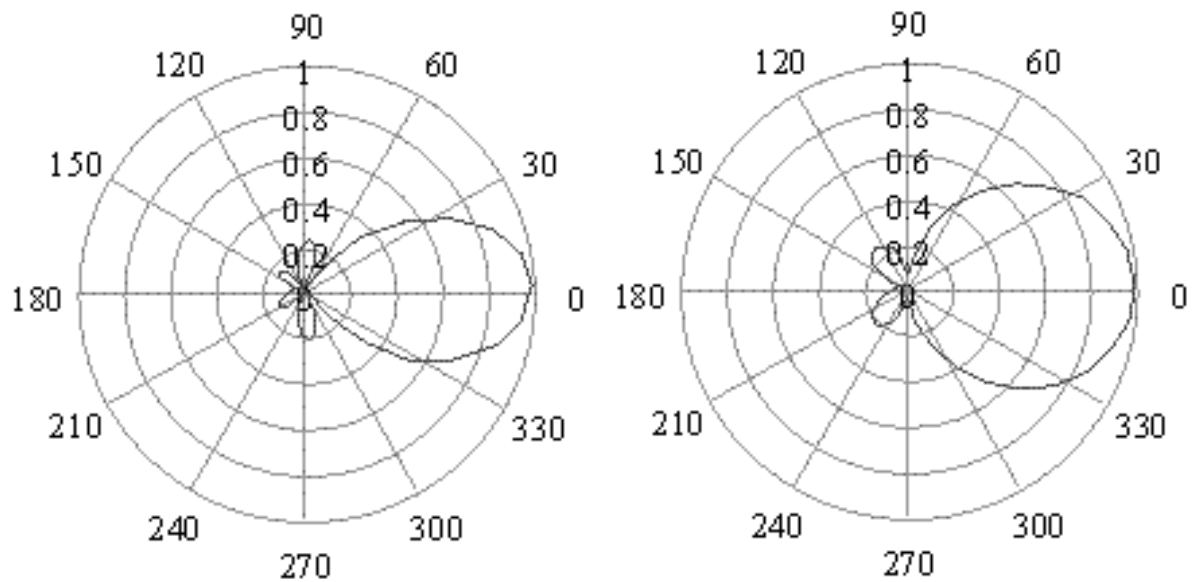


Рис.2.2 Горизонтальна та вертикальна діаграми спрямованості секторної антени

Врахування механічного нахилу (Downtilt): Механічний нахил антени є критичним для зменшення інтерференції в місті. Розрахунок вертикального кута місця (ϕ_v) до абонента виконується за геометрією трикутника:

$$\phi_v = \arctan\left(\frac{(H_{BS} - H_{UE})}{d}\right)$$

Формула 2.5 — Розрахунок вертикального кута місця

де H_{BS} — висота антени, H_{UE} — висота абонента. Отриманий кут використовується для розрахунку додаткових втрат у вертикальній площині.

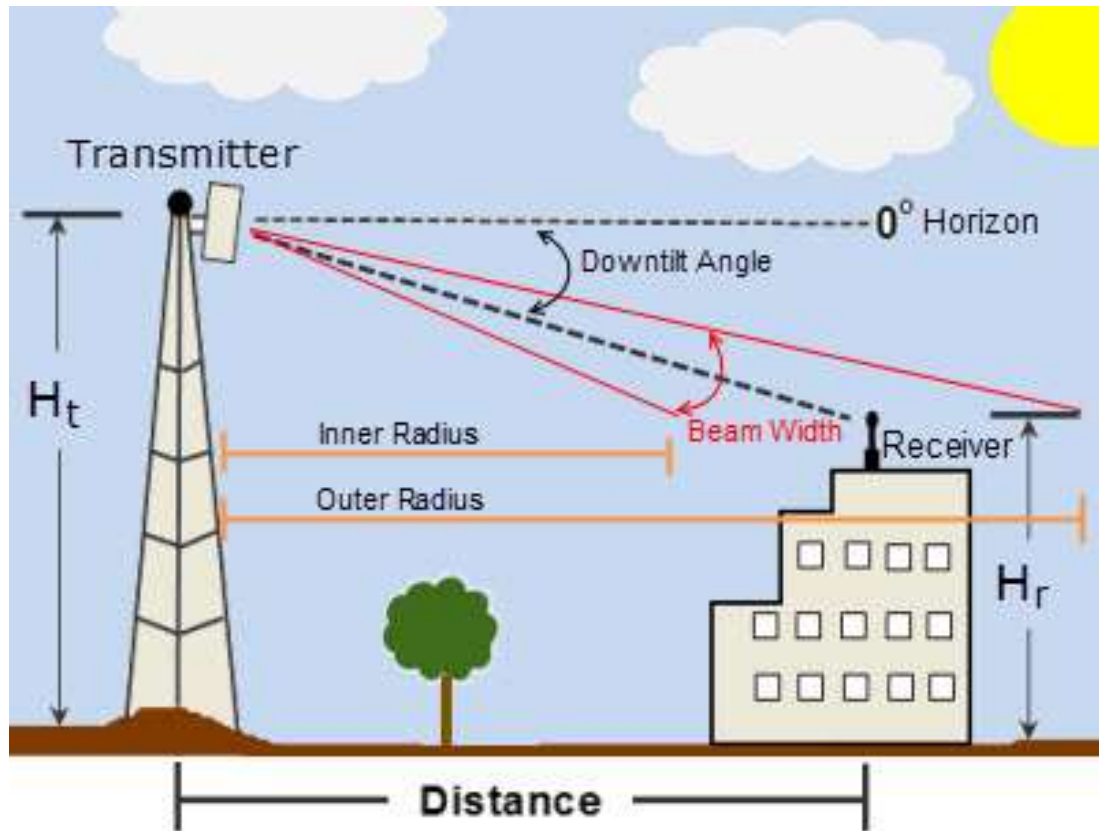


Рис.2.3 Геометрична модель механічного нахилу антени (Downtilt)

2.3 Алгоритм розрахунку дифракційних втрат

Найбільш обчислювально складною частиною моделі є розрахунок дифракції. У роботі застосовано метод Дейгу (**Deygout**), адаптований для растрових карт висот.

Алгоритм визначає "тіньові зони", що виникають за пагорбами. Ключовим параметром є число Френеля-Кірхгофа, яке визначає ступінь перекриття зони Френеля перешкодою:

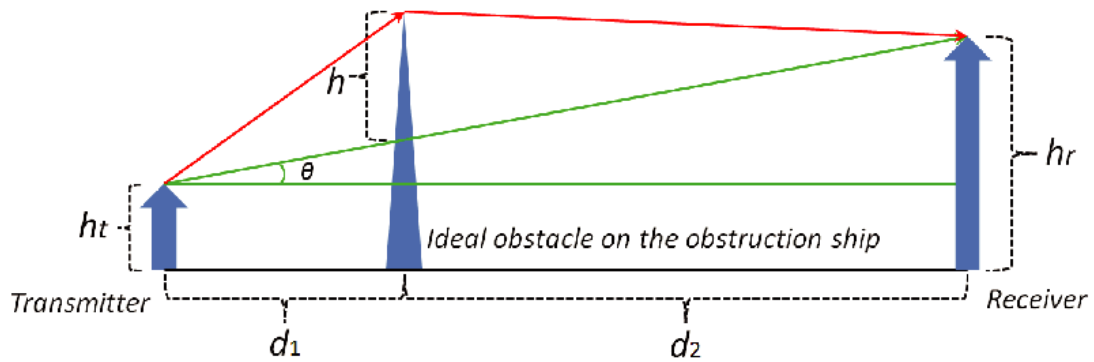


Рис.2.4 Розрахункова схема дифракції методом «вістря ножа» (Knife-Edge)

$$v = h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

Формула 2.6 — Параметр дифракції Френеля-Кірхгофа

де:

- h — висота перешкоди над лінією прямої видимості;
- d_1, d_2 — відстані від перешкоди до передавача та приймача;
- λ — довжина хвилі.

На основі параметра розраховуються додаткові дифракційні втрати за апроксимацією Лі-Вудса:

$$L_{diff} = 6.9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(\nu - 0.1)^2 + 1} + \nu - 0.1 \right)$$

Формула 2.7 — Апроксимація дифракційних втрат за методом Лі-Вудса

Цей підхід дозволяє коректно моделювати різке падіння сигналу за схилами правого берега Києва.

Оскільки розрахунок дифракції для кожного пікселя карти є найбільш ресурсоємною операцією, у роботі застосовано векторизований підхід до методу Дейгу (Deugout). Замість ітеративного перебору точок профілю використовується матрична алгебра.

Алгоритм визначає основну перешкоду ("Main Peak") шляхом знаходження максимуму кута підйому променя α відносно лінії прямої видимості. Для масиву висот профілю H та відстаней D кут розраховується як:

$$\alpha = \frac{(H - H_{BS})}{D}$$

Формула 2.8 — Розрахунок кута підйому променя для пошуку перешкод

Визначення точок, що знаходяться в "тіні", виконується через операцію накопиченого максимуму (cumulative maximum) масиву кутів. Це дозволяє за один прохід (складність $O(N)$) визначити всі перешкоди на трасі.

Параметр дифракції v для методу "вістря ножа" (Knife-Edge) розраховується за формулою:

$$v = h \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{\lambda}\right) \cdot \left(\frac{1}{d^1} + \frac{1}{d^2}\right)}$$

Формула 2.9 — Розрахунок середньоквадратичного відхилення висот (аналіз шорсткості)

де h — висота перешкоди над лінією зору, d_1 та d_2 — відстані до перешкоди від передавача та приймача. Втрати апроксимуються функцією Лі-Вудса, що дозволяє уникнути сингулярності при $v = 0$.

2.4 Методика інтелектуального вибору позицій та конфігурації секторів (Smart Blanking)

Для підвищення ефективності мережі та зменшення інтерференції розроблено методику, що складається з двох етапів: аналіз підстильної поверхні та секторна фільтрація.

Етап 1. Аналіз морфології поверхні (Water Detection). Для автоматичного виключення водних об'єктів (річка Дніпро) з множини кандидатів на розміщення БС застосовується статистичний аналіз текстурі DSM. Критерієм є середньоквадратичне відхилення висот σ_H у ковзному вікні W :

$$\sigma_H = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \cdot \sum (h_i - h_{avg})^2}$$

Формула 2.9 — Розрахунок середньоквадратичного відхилення висот (аналіз шорсткості)

Якщо $\sigma_H < T_{roughness}$ (де $T_{roughness} = 0.35$ м) та абсолютна висота відповідає рівню води, точка класифікується як "Вода" і відкидається.

Етап 2. Інтелектуальне відсікання секторів (Smart Blanking). Для кожної потенційної БС проводиться аналіз життєздатності кожного з трьох секторів (азимуту 0° , 120° , 240°). Сектор вимикається програмно, якщо виконується одна з умов:

1. Блокування (Blockage): На відстані до 500 м виявлено перешкоду, дифракційні втрати на якій перевищують порогове значення ($L_{diff} > 15$ дБ). Це свідчить про розташування антени "в стіну" сусідньої будівлі.

2. Водна поверхня: Головний пелюсток діаграми спрямованості направлений на водний простір, де відсутні абоненти.

Такий підхід дозволяє автоматично формувати топологію, адаптовану до складної забудови Києва.

2.5 Алгоритм самовідновлення покриття (Self-Healing Network)

Для ліквідації локальних зон відсутності покриття ("дірок") розроблено ітеративний алгоритм автоматичного планування компенсуючих станцій (Fill-in sites).

Крок1. Ідентифікація проблемних зон. На карті покриття виділяються пікселі, де рівень сигналу P_{rx} нижчий за пороговий рівень чутливості (P_{min} -98 дБм), але вищий за рівень шуму.

$$Mask_{bad} = (x, y) \mid -115 < P_{rx}(x, y) < -98$$

Крок 2. Кластеризація та визначення центроїдів. Застосовується метод зв'язних компонент (Connected-component labeling) для групування сусідніх пікселів у кластери. Відкидаються кластери, площа яких менша за мінімально допустиму (S_{min} 50 пікселів). Для кожного валідного кластера розраховується центр мас (Centroid):

$$C_x = \frac{(\sum x_i)}{N} \quad C_y = \frac{(\sum y_i)}{N}$$

Формула 2.10 — Визначення координат центроїда кластера

Крок 3. Пошук компенсуючої позиції. В радіусі пошуку R_{search} (400 м) від центроїда алгоритм сканує DSM для знаходження локального максимуму, що задовольняє вимогам "суша" та "пряма видимість". У цю

точку автоматично додається нова БС типу "Fill-in" з адаптованим кутом нахилу (Tilt), що розраховується динамічно:

$$\theta_{tilt} = \arctan\left(\frac{(H_{ant} - H_{target})}{R_{cell}}\right)$$

Формула 2.11 — Розрахунок кута механічного нахилу антени (Tilt)

Цей механізм імітує роботу інженера з оптимізації мережі, автоматизуючи процес "латання дірок" у покритті..

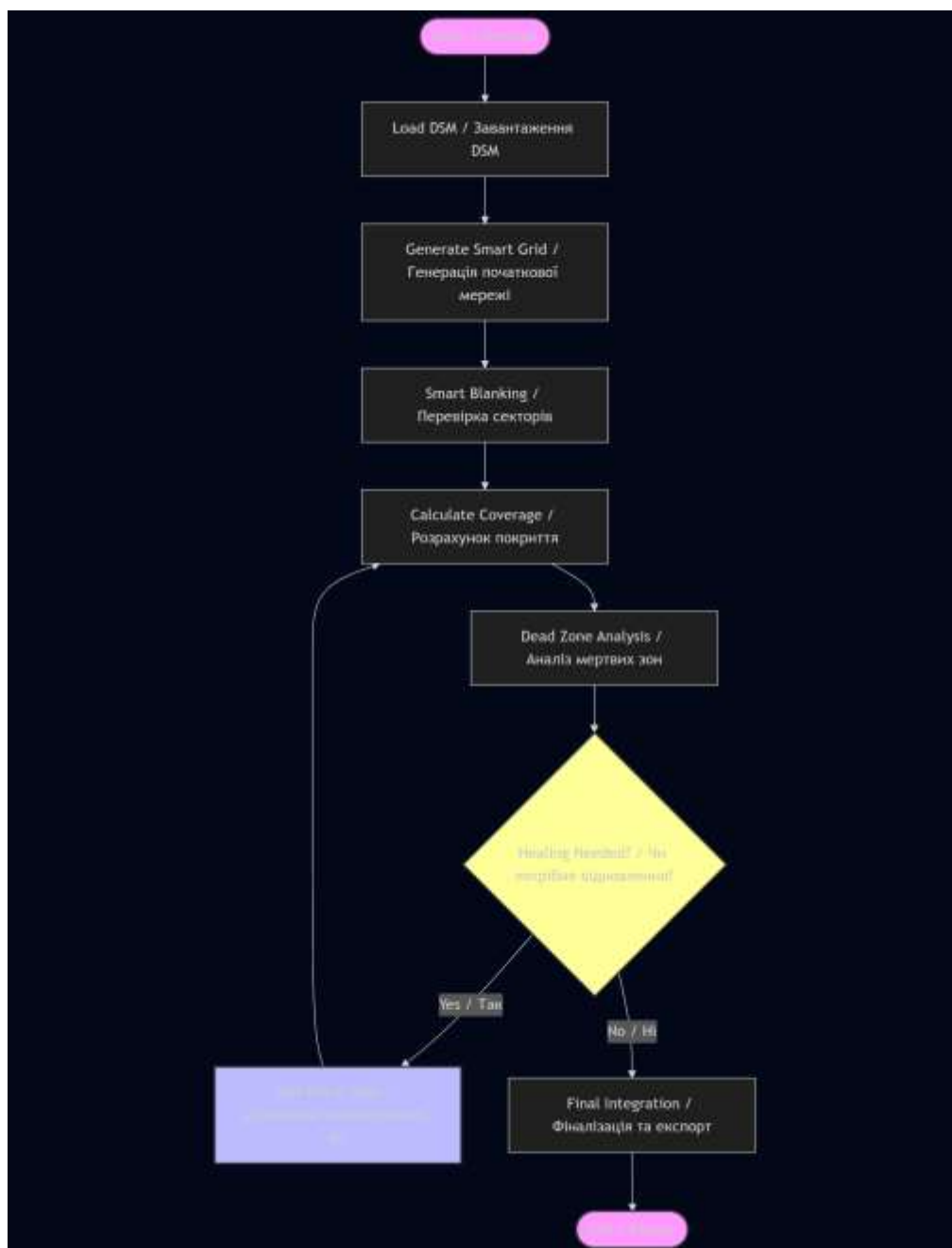


Рис.2.5 Блок-схема ітеративного алгоритму автоматизованого планування та оптимізації мережі

2.6 Архітектура програмного комплексу

Програмна реалізація виконана мовою Python із використанням модульної архітектури, що забезпечує гнучкість та швидкодію.

Основні модулі:

- **Data Loader:** Відповідає за імпорт геоданих. Використовує бібліотеку Rasterio для зчитування файлів .tif (GeoTIFF) та перетворення їх у масиви NumPy.
- **Physics Engine:** Ядро розрахунків. Реалізує векторизовані математичні моделі (формули 2.1–2.7) для одночасної обробки тисяч променів.
- **Ray Tracer:** Модуль трасування променів, який сканує профіль рельєфу між антеною та кожною точкою карти з заданим кутовим кроком (0.15°).
- **Optimization Engine:** Модуль інтелектуального керування мережею. Відповідає за логіку Smart Blanking (відключення неефективних секторів) та алгоритм Self-Healing (пошук і усунення "мертвих зон").
- **Network Planner:** Модуль високого рівня, що реалізує логіку Best Server (вибір найкращого сигналу з-поміж усіх секторів для кожного пікселя).

Висновки

У другому розділі магістерської дисертації розроблено математичне та алгоритмічне забезпечення програмного комплексу для розрахунку зон покриття мереж мобільного зв'язку. Модель енергетичного бюджету: Формалізовано рівняння енергетичного бюджету радіолінії (Link Budget) для діапазону 1800 МГц, яке, на відміну від спрощених емпіричних моделей, враховує повний комплекс факторів: втрати у вільному просторі (FSPL), коефіцієнт підсилення та діаграму спрямованості антенних систем, а також додаткові втрати через вплив рельєфу та міської забудови. Моделювання антенних систем: Впроваджено математичну модель

секторної антени, що базується на апроксимації діаграми спрямованості згідно зі стандартами 3GPP. Це дозволяє враховувати не лише азимутальне спрямування, а й механічний кут нахилу (Downtilt), що є критичним для мінімізації інтерференції в умовах щільної мережі. Алгоритм розрахунку дифракції: Адаптовано метод Дейгу (Deygout) для роботи з растровими картами висот. Застосування векторизованого підходу до аналізу профілю траси дозволило значно пришвидшити визначення «тіньових зон» та розрахунок дифракційних втрат на множинних перешкодах за моделлю «вістря ножа» (Knife-Edge Diffraction). Методи оптимізації мережі: Розроблено авторську методику інтелектуального вибору конфігурації секторів (Smart Blanking), яка автоматично вимикає неефективні сектори, спрямовані на перешкоди або водні поверхні. Запропоновано ітеративний алгоритм самовідновлення покриття (Self-Healing), що базується на кластерному аналізі проблемних зон та автоматичному пошуку оптимальних позицій для компенсуючих станцій. Архітектура системи: Обґрунтовано модульну структуру програмного комплексу на мові Python, яка включає ядро фізичних розрахунків (Physics Engine), модуль обробки геоданих (Data Loader) та блок оптимізації. Такий підхід забезпечує гнучкість налаштування параметрів та можливість масштабування системи.

РОЗДІЛ 3

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

У третьому розділі викладено етапи практичної реалізації програмного комплексу для розрахунку зон покриття мереж мобільного зв'язку, теоретичне обґрунтування якого наведено у попередніх частинах роботи. Основною метою цього етапу є створення дієвого інструменту, здатного трансформувати математичні моделі поширення радіохвиль та цифрові геодані у високоточні карти покриття, придатні для інженерного аналізу.

Розробка базується на використанні мови програмування Python та бібліотек наукового обчислення (NumPy, Rasterio, SciPy), що дозволяє відмовитися від дорогих пропрієтарних рішень на користь відкритого коду. Особлива увага приділяється питанням оптимізації швидкодії розрахунків через векторизацію алгоритмів, що є критичним при обробці масивів даних цифрових моделей поверхні (DSM) великої розмірності.

У розділі детально описано архітектуру програмного ядра, алгоритми імпорту та геоприв'язки растрових даних, програмну реалізацію фізичних моделей загасання (FSPL, дифракція) та діаграм спрямованості антен. Окремий акцент зроблено на розробці інтелектуальних механізмів автоматичного планування мережі: алгоритмах фільтрації непридатних локацій («вода/суша»), оптимізації секторів (Smart Blanking) та самовідновлення покриття (Self-Healing), які адаптують топологію мережі до складної забудови м. Києва.

3.1 Етапи розробки програмного ядра

Першим етапом практичної реалізації стала розробка механізму імпорту цифрової моделі поверхні (DSM) та створення базової геометричної моделі зони обслуговування.

А. Імпорт та обробка растрових даних Для взаємодії з геопросторовими даними використано бібліотеку Rasterio. Програмний модуль зчитує файл ALPSMLC30_N050E030_DSM.tif та отримує метадані: профіль файлу, розмірність матриці та коефіцієнти афінного перетворення.

Оскільки вхідні дані представлені у вигляді матриці пікселів, для подальших розрахунків було реалізовано процедуру перетворення індексів масиву (рядок, стовпець) у реальні географічні координати (широта, довгота) для кожного пікселя карти.

Б. Реалізація геометричної моделі покриття Для визначення зони обслуговування розроблено функцію розрахунку відстані від базової станції до кожної точки растру. Враховуючи сферичну форму Землі, програмна реалізація базується на формулі гаверсинусів, яка була детально розглянута в теоретичному розділі.

Алгоритм працює наступним чином:

1. Генеруються масиви координат (lat, lon) для всієї сітки покриття.
2. Виконується векторизований розрахунок відстані від координат БС до кожного елемента масиву.
3. Формується бінарна маска (NumPy array), де значення "1" присвоюється пікселям, що потрапляють у заданий радіус (наприклад, 5 км), а "0" — решті.

Фрагмент коду, що відповідає за цей етап:

```

# Завантаження та перетворення координат
with rasterio.open(dsm_filename) as src:
    cols, rows = np.meshgrid(np.arange(src.width), np.arange(src.height))
    lons, lats = rasterio.transform.xy(src.transform, rows, cols, offset='center')
# Розрахунок відстані (реалізація формули гаверсинусів)
dist_matrix = haversine_distance(bs_lat, bs_lon, np.array(lats), np.array(lons))
# Бінаризація за порогом відстані
zone_mask = np.where(dist_matrix <= RADIUS_METERS, 1,
0).astype(rasterio.uint8)

```

Результатом роботи модуля є файл GeoTIFF, що містить ідеальну кругову зону покриття, прив'язану до карти Києва.



Рис.3.1 Тестова зона покриття (ідеальне коло), згенерована на основі геоданих

Наступним кроком стало впровадження фізичної моделі поширення радіохвиль. Замість бінарної логіки ("є зв'язок" / "немає зв'язку") було реалізовано розрахунок рівня прийнятого сигналу (P_{rx}) у кожній точці.

Програмний модуль використовує модель **Free Space Path Loss (FSPL)**, описану в Розділі 2. Розрахунок виконується для частотного діапазону GSM-1800 (1880 МГц).

Особливістю реалізації є використання бібліотеки NumPy для виконання математичних операцій над матрицями. Замість ітеративного перебору мільйонів пікселів, формула загасання застосовується до всього масиву відстаней одночасно. Це дозволяє скоротити час розрахунку карти розміром 3600×3600 пікселів з декількох хвилин до часток секунди.

Логіка роботи модуля:

1. На вхід подається матриця відстаней (розрахована на попередньому етапі).
2. Обчислюється матриця втрат шляхом застосування логарифмічної формули FSPL.
3. Розраховується фінальний рівень сигналу шляхом віднімання втрат від потужності передавача.

Фрагмент коду реалізації моделі FSPL:

```
# Векторизований розрахунок втрат
# dist_km - масив відстаней у кілометрах
fspl = 32.44 + 20 * np.log10(FREQ_MHZ) + 20 * np.log10(dist_km)
# Розрахунок рівня сигналу (Link Budget)
received_power = TX_POWER_DBM + TX_GAIN_DBI - fspl
```

Результат роботи скрипта демонструє концентричний розподіл рівня сигналу, що зменшується від центру до країв зони, що відповідає фізиці поширення хвиль у вільному просторі.

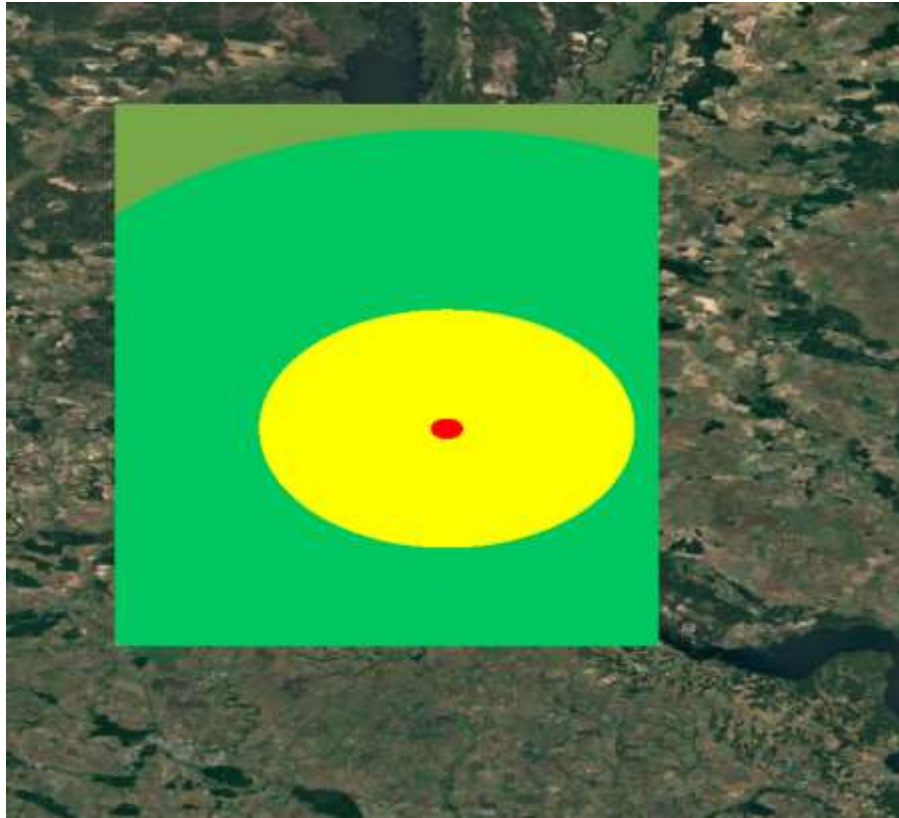


Рис.3.2 Карта розподілу рівня сигналу (модель FSPL)

У реальних мережах мобільного зв'язку (LTE/GSM) всеспрямовані антени використовуються вкрай рідко. Для збільшення ємності мережі та дальності зв'язку застосовуються секторні антени. Тому наступним етапом стала програмна реалізація діаграми спрямованості (Radiation Pattern).

Для моделювання використано стандартну математичну апроксимацію згідно з рекомендаціями **3GPP**, яка описує загасання сигналу залежно від кута відхилення від головного пелюстка.

А. Розрахунок азимутів

Спершу було реалізовано алгоритм, який для кожного пікселя карти розраховує його кутовий напрямок (bearing) відносно базової станції. Використовується формула шляхового кута на сфері. Завдяки бібліотеці NumPy (`np.arctan2`), цей розрахунок виконується миттєво для всієї матриці покриття.

Б. Для математичного моделювання горизонтальної діаграми спрямованості антени використано параболічну апроксимацію згідно з рекомендацією 3GPP TS 36.942. Це дозволяє уникнути використання складних табличних файлів (.msi/.planet) та пришвидшити обчислення. Розрахунок коефіцієнта підсилення $G(\theta)$ залежно від кута відхилення θ від головної осі випромінювання виконується за формулою:

$$A(\theta) = -\min \left[12 \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right]$$

$$G(\theta) = G_{max} - A\theta$$

Формула 3.1 — Розрахунок коефіцієнта підсилення антени з урахуванням азимута

де:

- θ — кут між напрямком на абонента та азимутом антени (в градусах);
- θ_{3dB} — ширина діаграми спрямованості на рівні половинної потужності (Half Power Beam Width), для обраної моделі антени становить 65° ;
- A_m — максимальне загасання (Front-to-Back ratio), прийняте рівним 30 дБ (для уникнення сингулярностей у зворотній напівсфері);
- 12 — емпіричний коефіцієнт апроксимації головного пелюстка.

Програмна реалізація даної формули дозволяє динамічно розраховувати втрати на діаграмі спрямованості для кожного пікселя растру, що забезпечує формування реалістичної форми зони обслуговування у вигляді "пелюстки", а не ідеального кола.»

Фрагмент реалізації

```
def calculate_bearing(lat1, lon1, lat2, lon2):
```

```
    # Векторизований розрахунок кута між точками
```

```
    dLon = np.radians(lon2 - lon1)
```

```

y = np.sin(dLon) * np.cos(np.radians(lat2))
x = np.cos(np.radians(lat1)) * np.sin(np.radians(lat2)) \
    - np.sin(np.radians(lat1)) * np.cos(np.radians(lat2)) * np.cos(dLon)
brng = np.degrees(np.arctan2(y, x))
return (brng + 360) % 360

# --- Розрахунок втрат антени ---
# angle_diff - відхилення пікселя від центру сектора
attenuation = 12 * (angle_diff / ANTENNA_HPBW)**2
# Обмеження (Front-to-Back ratio), щоб загасання не було нескінченним
attenuation[attenuation > ANTENNA_F_B] = ANTENNA_F_B

```

Результатом роботи модуля є карта покриття у формі характерного "пелюстка", де максимальний рівень сигналу спостерігається вздовж головної осі, а з боків сигнал швидко загасає.



Рис.3.3 Зона покриття одnoseкторної антени (азимут 60°),
розрахована за моделлю 3GPP

Найскладнішим і найважливішим етапом базової розробки стала реалізація врахування рельєфу місцевості. У місті Київ, який

характеризується значними перепадами висот (Правий берег), наявність прямої видимості (Line of Sight — LoS) є критичним фактором.

Для вирішення цієї задачі було розроблено два програмні модулі:

1. **Profiler:** Виконує "розріз" цифрової моделі DSM між точкою передавача та приймача.
2. **Diffraction Engine:** Аналізує отриманий профіль на наявність перешкод.

А. Побудова профілю траси Модуль використовує функцію `rasterio.sample()` для вибірки висотних даних уздовж геодезичної лінії, що з'єднує дві точки.

```
# Генерація точок вздовж лінії
lats = np.linspace(bs_lat, ue_lat, num_points)
lons = np.linspace(bs_lon, ue_lon, num_points)
# Вибірка висот з GeoTIFF
with rasterio.open(dsm_path) as src:
    coords = list(zip(lons, lats))
    elevations = [val[0] for val in src.sample(coords)]
```

Б. Розрахунок дифракційних втрат Для оцінки впливу перешкод застосовано метод "**вістря ножа**" (**Knife-Edge Diffraction**). Алгоритм перебирає точки профілю, визначає висоту перешкоди над лінією зору та розраховує параметр Френеля v .

Якщо $v > -0.7$, це свідчить про перекриття першої зони Френеля, і до загальних втрат додається дифракційна складова. Ця реалізація дозволила автоматично виявляти "тіньові зони" за пагорбами та висотними будівлями, що є суттєвою перевагою над простими моделями вільного простору.

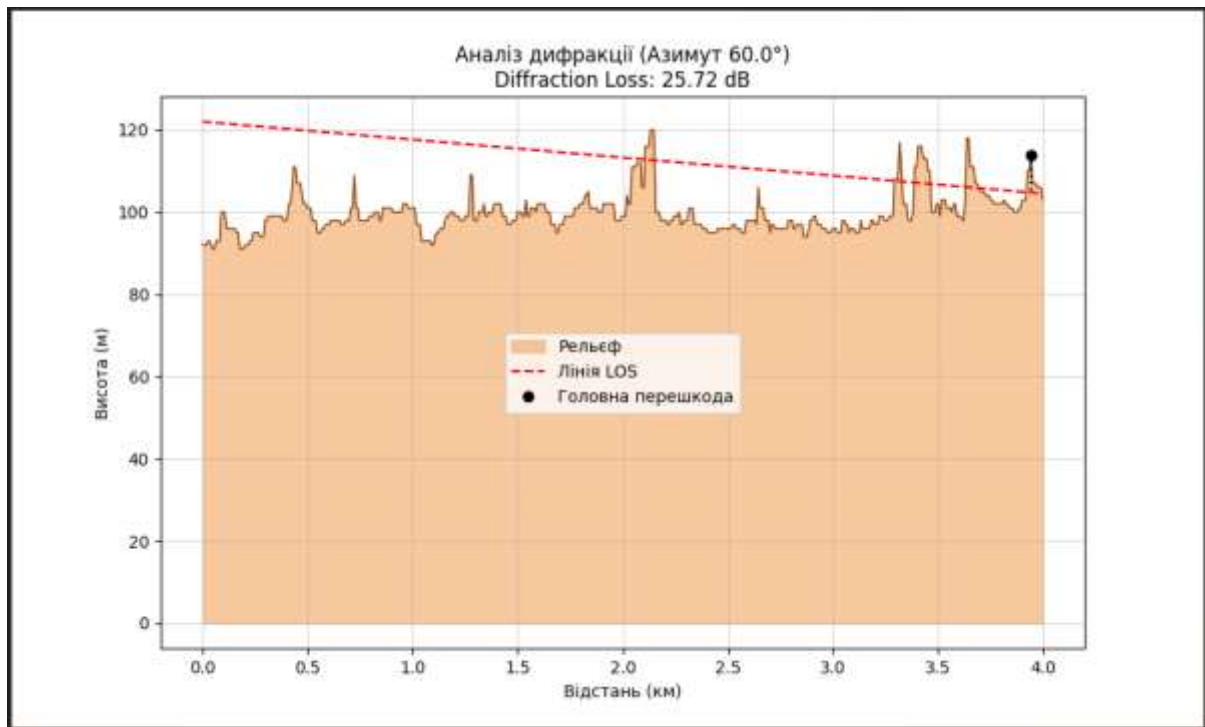


Рис.3.4 Побудований профіль траси з візуалізацією зони Френеля та прямої видимості

Моделювання односекторної антени з урахуванням рельєфу та дифракції

На цьому етапі було реалізовано об'єднання антенної моделі та фізичної моделі поширення хвиль у складному середовищі. На відміну від попередніх ітерацій, дана модель не просто обмежує зону покриття геометрично, а розраховує енергетичний бюджет кожного променя з урахуванням перешкод, які він зустрічає на своєму шляху.

А. Алгоритм секторного сканування (Ray Tracing)

Для формування зони покриття сектора було розроблено алгоритм, який імітує випромінювання антени як набір радіальних променів. Програма перебирає кути в межах робочого сектора (наприклад, $\pm 60^\circ$ від азимута) з кроком 0.5° . Для кожного напрямку виконується побудова профілю рельєфу.

Б. Врахування діаграми спрямованості та дифракції

У кожній точці розрахунку (пікселі) підсумкова потужність сигналу P_{rx} визначається як результат накладання декількох факторів:

1. **Базове згасання:** Розраховується за моделлю FSPL.
2. **Антенне згасання:** Визначається кутовим відхиленням від азимута антени за моделлю 3GPP.
3. **Дифракційні втрати:** Якщо на профілі DSM виявлено перешкоду, що перекриває зону Френеля, алгоритм розраховує втрати за методом "вістря ножа" (Knife-Edge).

Фрагмент коду, що реалізує цю логіку

1. Розрахунок FSPL

```
fspl = 32.44 + 20*np.log10(FREQ_MHZ) + 20*np.log10(dists/1000.0)
```

2. Розрахунок Дифракції (Knife-Edge)

```
diff_loss = calculate_knife_edge_vectorized(dists, terrain_profile, bs_h_asl, wavelength)
```

3. Врахування діаграми спрямованості (Pattern)

```
angle_diff = abs(angle - ANTENNA_AZIMUTH)
```

```
ant_attenuation = 12 * (angle_diff / 65.0)**2
```

```
ant_attenuation = min(ant_attenuation, 30.0) # Межа F/B ratio
```

Підсумковий бюджет лінку

$$p_r = TX_POWER_DBM + ANTENNA_GAIN_MAX - fspl - diff_loss - ant_attenuation$$

В. Аналіз впливу забудови Завдяки використанню реальних даних DSM Києва, отримана модель демонструє ефект "радіотіні". На карті чітко видно, що сигнал не поширюється рівномірно: він "обривається" за висотними будівлями або пагорбами Правого берега, що відповідає реальним фізичним процесам у діапазоні 1800 МГц.

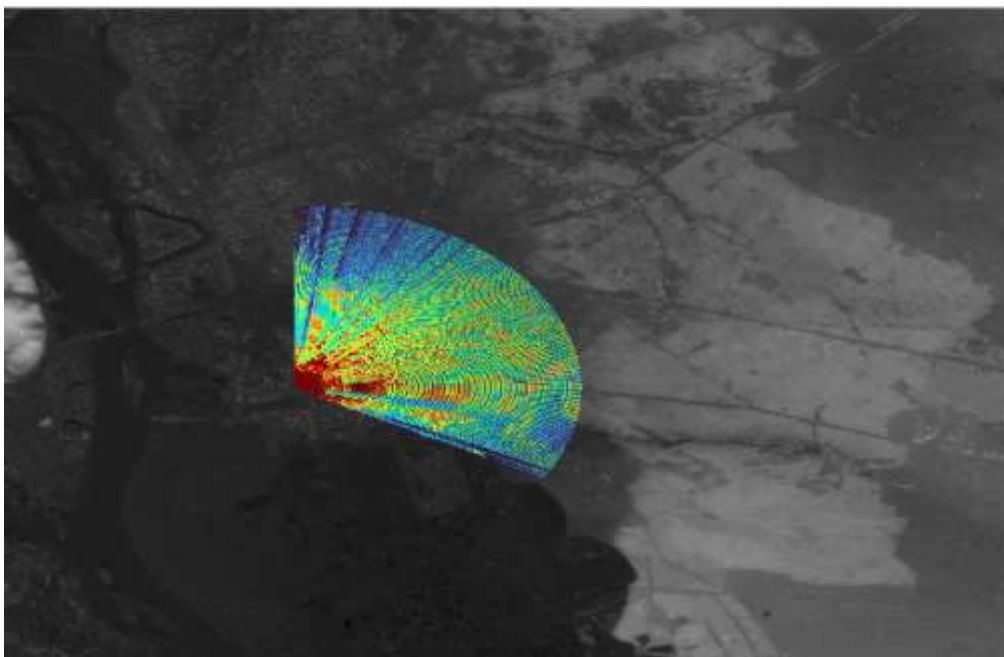


Рис.3.5 Зона покриття сектора (азимут 0°) з урахуванням дифракції на рельєфі та забудові Києва

Для забезпечення високої точності моделювання (з кроком 0.5° по азимуту та 20 м по дистанції) стандартні цикли мови Python виявилися недостатньо ефективними. Тому в програмному модулі було реалізовано алгоритм на основі векторизованих операцій бібліотеки **NumPy**.

А. Метод радіального сканування Замість перебору кожного пікселя на карті, програма генерує вектори (промені), що виходять з точки розміщення БС.

Це дозволяє:

1. Будувати профіль висот DSM безпосередньо вздовж траси поширення сигналу.
2. Використовувати матричні обчислення для одночасного розрахунку дифракції на всіх точках променя.

Б. Атомарне оновлення сітки покриття (Scatter Update) При розрахунку багатосекторних станцій виникає ситуація, коли зони покриття різних секторів або різних БС перекриваються. Для коректного відображення реальної карти було використано метод «Найкращого сервера» (Best Server).

Технічно це реалізовано через функцію `pr.maximum.at`, яка порівнює поточне значення рівня сигналу в пікселі з новим розрахованим значенням і записує лише максимальне. Це гарантує, що на карті буде відображено рівень сигналу від тієї антени, яка забезпечує найкращий прийом у даній точці.

Фрагмент оптимізованого коду

```
# Атомарне оновлення сітки покриття за принципом Best Server
# r_final, c_final - координати пікселів, p_final - розрахований рівень сигналу
pr.maximum.at(final_coverage, (r_final, c_final), p_final)
```

В. Врахування міського затінення (Urban Clutter) До моделі було додано константу системних втрат `URBAN_CLUTTER_LOSS` (25 дБ), яка враховує додаткове загасання при проходженні сигналу крізь щільну міську забудову, що не відображена на DSM як окремі висотні об'єкти (наприклад, дерева, малі архітектурні форми).

3.2 Практичне моделювання та оптимізація сегмента мережі gsm-1800 у м. Києві

Першим етапом проєктування стало розміщення базових станцій (БС) за принципом «панівних висот». На відміну від регулярної гексагональної решітки, цей підхід передбачає встановлення антен на природних підвищеннях або хмарочосах для забезпечення максимальної прямої видимості (LOS).

А. Обґрунтування вибору точок розміщення Для моделювання було обрано 6 локацій, що відповідають ключовим транспортним та адміністративним вузлам міста

- **Печерськ:** Найвища точка правого берега, що забезпечує покриття центральної частини та схилів Дніпра.
- **Солом'янка:** Охоплює залізничний вузол та південно-західний напрям.
- **Поділ:** Складна зона в низині, де сигнал сильно обмежений рельєфом.
- **Шулявка:** Покриття промислово-житлової зони та магістралі Берестейського проспекту.
- **Дарниця:** Вузлова точка лівого берега з висотною забудовою.
- **Осокорки:** Район з максимальною щільністю багатоповерхової забудови, де критичним є затінення від будинків.

Б. Встановлені параметри моделювання (Configuration Matrix) Для отримання найбільш достовірних результатів було використано наступний набір параметрів, що відповідає стандарту GSM-1800:

Таблиця 3.1

Технічні характеристики та конфігурація базових станцій Експерименту
№1

Параметр	Значення	Обґрунтування
Робоча частота	1800 МГц	Стандартний діапазон для міських макросот.
Потужність передавача (Pt)	46.0 дБм	Еквівалент 40 Вт (стандарт для Macro-BS).
Підсилення антени (Gt)	18.0 дБі	Секторна антена з високим коефіцієнтом спрямованості.
Висота підвісу антени	DSM_val + 25м	Встановлення на дахах існуючих споруд.
Ширина променя (HBW)	65°	Стандарт для трьохсекторної конфігурації.
Втрати в забудові (Clutter)	25.0 дБ	Врахування поглинання сигналу стінами та склом.
Крок розрахунку (Angle)	0.5°	Баланс між точністю та швидкістю обчислень.

В. Аналіз результатів «першого проходу» моделювання Після запуску векторизованого алгоритму було отримано цифрову матрицю рівня сигналу (RSL), яка після накладання на карту міста (Рисунок 3.6) виявила наступні закономірності:

1. **Вплив рельєфу:** Станція на Печерську демонструє «прожекторний» ефект — завдяки висоті вона покриває значні площі лівого берега, проте має «сліпі зони» безпосередньо під пагорбами через великі кути дифракції.

2. **Затінення забудовою:** У районі Осокорків чітко спостерігаються «радіотіні» за висотними будинками. Векторизований Ray Tracing дозволив візуалізувати зони, де рівень сигналу падає нижче порогу чутливості (-95 дБм) через фізичне перекриття першої зони Френеля.
3. **Ефект Best Server:** Завдяки використанню `pr.maximum.at`, зони перекриття (Handover zones) між Дарницею та Осокорками були розраховані коректно — абонент автоматично «прив’язується» до станції з вищим рівнем енергетики.

При розміщенні БС на висотних об’єктах (понад 25–30 метрів над рівнем землі) виникає проблема «пересвіту»: основна енергія антени спрямована в горизонт. Це призводить до двох негативних ефектів:

1. Енергія витрачається на покриття дахів або територій далеко за межами цільової зони.
2. Створюється високий рівень інтерференції для сусідніх сот, що працюють на тих самих частотах.

Для вирішення цієї проблеми в алгоритм було впроваджено розрахунок вертикальних кутів місця та застосування механічного нахилу (Mechanical Tilt).

А. Алгоритм розрахунку вертикальних втрат Для кожної точки профілю (відстанню d та різницею висот Δh) розраховується кут нахилу променя до горизонту (elevation angle):

$$\theta_{elev} = \arctan\left(\frac{(H_{BS} - H_{target})}{d}\right)$$

Формула 3.2 — Розрахунок кута нахилу променя до горизонту (Elevation Angle)

Далі розраховується відхилення від оптимального кута нахилу ($Tilt_{opt}$), який у моделі задано як 10°

$$L_{vert} = 12 \cdot \left(\frac{(\theta_{elev} - Tilt_{opt})}{VBW} \right)^2$$

Формула 3.3 — Розрахунок додаткових втрат у вертикальній площині

де **VBW** (Vertical Beamwidth) — ширина вертикального променя антени (прийнята рівною 10°).

Б. Аналіз впливу нахилу на зону покриття Було проведено порівняльне моделювання (Рисунок 3.7):

- **При нахилі 0° :** Сигнал «б'є» далеко, але безпосередньо біля основи будівлі (у радіусі 200–400 м) спостерігаються зони невпевненого прийому, оскільки абонент опиняється в «першому нулі» діаграми спрямованості.
- **При нахилі 10° :** Основна пелюстка діаграми «притискається» до землі. Це дозволяє збільшити рівень сигналу в ближній зоні на 10–15 дБ та чітко обмежити радіус стільника (Cell Edge).

Останнім штрихом практичного моделювання в цьому підрозділі стало врахування дрібних перешкод, які не відображені на цифровій моделі поверхні (рослинність, малі архітектурні форми, внутрішні перегородки будинків).

Для цього до енергетичного бюджету додано параметр $URBAN_CLUTTER_LOSS = 25 \text{ dB}$. Підсумкова формула розрахунку рівня сигналу (Pr) набула вигляду:

$$Pr = Pt + G_{max-L_{FSPL}} - L_{diff} - L_{horiz} - L_{vert} - L_{clutter}$$

Формула 3.4 — Уточнена модель розрахунку рівня прийнятого сигналу

Це наблизило результати моделювання до реальних драйв-тестів операторів мобільного зв'язку, де поріг покриття в -95 дБм вважається граничним для стабільного сервісу всередині приміщень у щільній міській забудові.

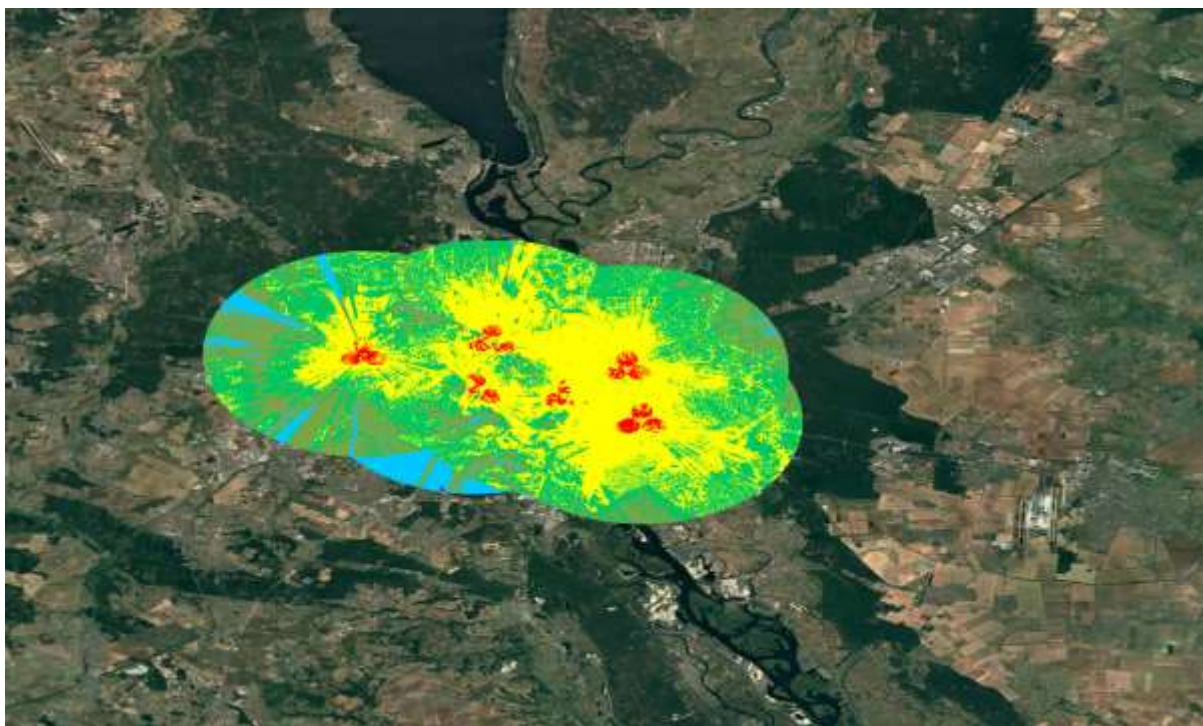


Рис.3.6 Моделювання покриття опорної мережі з 6 БС на панівних висотах.

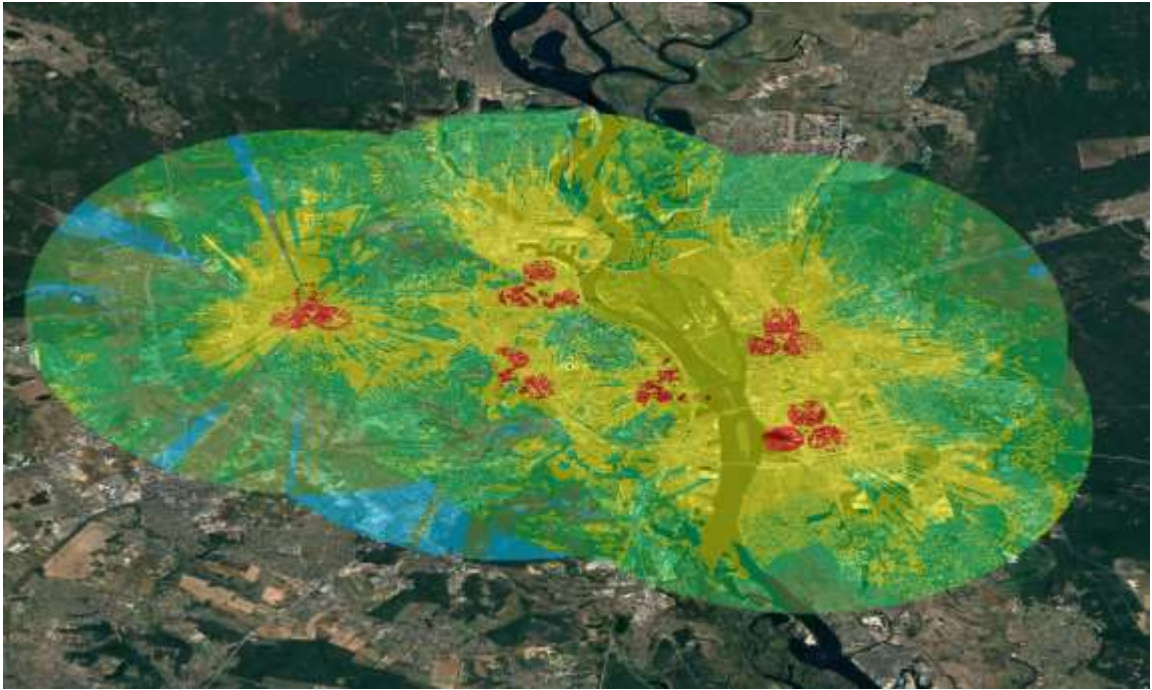


Рис.3.7 Моделювання покриття опорної мережі з 6 БС на панівних висотах (прозорість 50%).

3.3 Розробка та реалізація алгоритму розрахунку зони покриття сегмента мережі

Для забезпечення високої точності моделювання поширення хвиль у діапазоні 1800 МГц я побудував систему на основі цифрової моделі поверхні (DSM) — ALOS AW3D30. Це дозволило мені врахувати не тільки природний рельєф, а й висоту міської забудови, що є ключовим фактором при розрахунку дифракційних втрат.

Зчитування карти я реалізував через бібліотеку rasterio, що дозволило отримати повну матрицю висот із збереженням географічної прив'язки. Процес організовано наступним чином:

```
input_tif_path = os.path.join(work_folder, dsm_filename)
```

```
with rasterio.open(input_tif_path) as src:
```

```
dsm_data = src.read(1)

transform = src.transform

profile = src.profile.copy()
```

Матриця `dsm_data` містить абсолютні висоти кожної точки, а об'єкт `transform` я використовую для математичного зв'язку між індексами масиву та координатами довготи й широти. Це необхідно для точного визначення координат базових станцій та побудови профілів трас між передавачем і абонентом.

Перед основним розрахунком я ввів алгоритмічні обмеження, що враховують специфіку місцевості м. Києва. Зокрема, я визначив поріг водної поверхні Дніпра:

Абсолютна висота води: Параметр `MIN_HEIGHT_WATER = 92.0` використовується для виключення встановлення антен на воді.

Обробка помилок: Щоб уникнути зупинки розрахунків при виникненні математичних невизначеностей (наприклад, ділення на нуль при нульовій відстані), я додав ігнорування відповідних попереджень через `warnings.filterwarnings("ignore")`.

Всі дані обробляються у форматі `float32`, що забезпечує необхідну точність представлення висоти при оптимальному використанні пам'яті під час масових обчислень на великих площах.

Важливим етапом моєї роботи стало забезпечення зв'язку між матрицею висот цифрової моделі поверхні та реальною географічною сіткою. Оскільки цифрова модель — це масив даних, де кожна точка має лише порядковий індекс (рядок та стовпець), мені було необхідно

реалізувати алгоритм, який перетворює ці індекси на географічну довготу та широту.

Для встановлення точного зв'язку я використав механізм афінного перетворення, який зчитується безпосередньо з метаданих карти рельєфу. У моєму алгоритмі це реалізовано через об'єкт трансформації, що містить шість коефіцієнтів. Ці коефіцієнти дозволяють мені обчислити координати будь-якої точки за формулою:

$$lon = a \cdot col + b \cdot row + c$$

$$lat = d \cdot col + e \cdot row + f$$

Де:

- a, e — крок пікселя (роздільна здатність карти)¹;
- c, f — географічні координати верхнього лівого кута фрагмента²;
- b, d — параметри повороту (у моєму випадку вони дорівнюють нулю, оскільки карта орієнтована суворо на північ).

Для зворотного перетворення, коли потрібно дізнатися, якому пікселю в масиві відповідає задана точка на мапі, я використовую функцію перерахунку координат у порядкові індекси масиву:

$$r, c = rowcol(transform, lon, lat)$$

Це дозволяє мені миттєво отримувати значення висоти з матриці для будь-якої точки в радіусі 5 км від базової станції.

Метризація розрахункового простору Однією з головних труднощів була різниця в одиницях вимірювання. Карта рельєфу

представлена в градусах (система WGS84), а всі фізичні формули розрахунку втрат сигналу та дифракції вимагають значень у метрах.

Для коректного розрахунку я врахував, що довжина одного градуса широти в Україні становить приблизно 111,132 км. Довжина ж градуса довготи залежить від широти, тому я розраховую її за формулою:

$$L_{lon} = 111.132 \cdot \cos(lat)$$

Формула 3.5 — Розрахунок довжини градуса довготи залежно від широти

У коді я застосовую ці співвідношення для побудови профілю траси:

```
lat_n = lat + (dy / 111132.0)
```

```
lon_n = lon + (dx / (111132.0 * math.cos(math.radians(lat))))
```

Такий підхід дозволив мені забезпечити крок розрахунку STEP_DISTANCE = 20.0 метрів, що є оптимальним для деталізації перешкод у місті.

Формування вихідного геореференційного шару Після завершення розрахунку зони покриття, мені було необхідно зберегти результат у форматі, придатному для професійних ГІС-систем, таких як QGIS. Я реалізував це через копіювання профілю вхідного файлу та його оновлення під параметри розрахункової сітки.

Алгоритм гексагонального планування та розрахунок параметрів сітки Для того, щоб забезпечити суцільне покриття території без надлишкового перекриття зон дії сусідніх станцій, я використав модель регулярної гексагональної сітки. Такий підхід вважається класичним у радіоплануванні, оскільки шестикутна форма чарунок (стільників)

найбільш наближена до кругової діаграми випромінювання, але при цьому дозволяє заповнити площину без «білих плям».

Математичне обґрунтування кроку сітки В основі моєї реалізації лежить параметр DESIRED_BS_COUNT, який визначає цільову кількість базових станцій для сегмента мережі. Розрахунок кроку сітки я проводжу динамічно, виходячи з геометричних параметрів області розрахунку.

Процес розрахунку я розділив на кілька етапів:

1. **Визначення меж території:** Спочатку я отримую координати кутів фрагмента карти (lon_min, lat_max, lon_max, lat_min) безпосередньо з об'єкта трансформації вхідного GeoTIFF-файлу.
2. **Обчислення площі:** Я розраховую загальну площу ділянки у градусних одиницях
3. **Визначення кроку (step_deg):** Крок між станціями обчислюється таким чином, щоб рівномірно розподілити задану кількість БС по всій площі

Геометрія гексагонального розміщення Для створення саме гексагональної, а не квадратної структури, я впровадив зміщення кожного другого ряду станцій. Це реалізовано через логіку шахматного порядку:

- Координата довготи для кожного парного ряду отримує зсув на величину $\text{step_deg} / 2$.
- Відстань між рядами по вертикалі (широті) коригується на коефіцієнт $\sin(60^\circ) \approx 0.866$
- що відповідає геометрії правильного шестикутника

Програмна реалізація циклу генерації У коді я реалізував це через вкладені цикли `while`, які проходять по всій широті та довготі робочої області. На кожній ітерації я перевіряю, чи потрапляє точка в межі карти, і лише після цього додаю її до списку потенційних позицій:

```
while lat < lat_max:

    lon_offset = 0 if row_idx % 2 == 0 else step_deg / 2

    lon = lon_min + step_deg/2 + lon_offset

    while lon < lon_max:

        r, c = rowcol(transform, lon, lat)

        # Подальша логіка валідації та пошуку висоти

        lon += step_deg

    lat += step_deg * 0.866

    row_idx += 1
```

Такий підхід дозволив мені автоматично адаптувати мережу під будь-який фрагмент карти. Якщо я зміню кількість станцій у конфігурації, вся сітка перераховується автоматично, зберігаючи оптимальну геометрію для покриття Києва.

Алгоритм фільтрації непридатних зон та ідентифікації водних поверхонь Одним із головних викликів при автоматичному розгортанні мережі над територією Києва є наявність великих водних просторів (акваторія річки Дніпро), де встановлення базових станцій є технічно неможливим. Для вирішення цієї проблеми я розробив комбінований метод

фільтрації, що базується на аналізі абсолютних висот та текстурних особливостей поверхні.

Двофакторна модель верифікації точок розміщення Замість простого відсікання за координатами, мій алгоритм аналізує кожен потенційний вузол сітки за двома фізичними параметрами:

1. **Гіпсометричний поріг (Абсолютна висота):** Виходячи з гідрологічних даних регіону, я встановив константу `MIN_HEIGHT_WATER = 92.0` метрів. Якщо максимальна висота у розрахунковому вікні не перевищує це значення, точка класифікується як потенційна водна поверхня або низина, непридатна для будівництва вежі.
2. **Аналіз шорсткості рельєфу (Roughness Analysis):** Для того, щоб відрізнити пласкі об'єкти від антропогенної забудови, я впровадив перевірку через параметр `ROUGHNESS_THRESHOLD = 0.5`. Я розраховую стандартне відхилення висот σ_h у локальній зоні. Якщо поверхня занадто гладка $\sigma_h < 0.5$, це свідчить про відсутність будівель, навіть якщо абсолютна висота є прийнятною.

Програмна логіка відбору позицій У процесі генерації станцій я реалізував перевірку цих умов безпосередньо всередині циклу вибору точок. Це дозволяє динамічно формувати список «життєздатних» позицій:

```
# Аналіз вікна 300x300 м навколо точки
```

```
window = dsm_data[r_min:r_max, c_min:c_max]
```

```
if window.size > 0:
```

```
    local_max = np.max(window)
```

```
# Перевірка на воду та наявність забудови (текстури)

if local_max > MIN_HEIGHT_WATER:

    if np.std(window) > ROUGHNESS_THRESHOLD:

        # Тільки якщо обидві умови виконані, точка додається до списку

        stations.append((peak_lon, peak_lat, local_max))
```

Такий підхід забезпечує інтелектуальне «обтікання» русла Дніпра та відкритих паркових зон, де немає капітальних споруд для кріплення антен.

Оптимізація секторної роботи (Smart Blanking) Окрім вибору місця для самої станції, я розширив логіку фільтрації на рівень окремих секторів. У функції `analyze_sector_viability` я реалізував додаткову перевірку профілю місцевості на відстані до 3 км за азимутном випромінювання. Якщо сектор спрямований на відкриту воду (що визначається через поріг `WATER_FLATNESS_LIMIT = 0.35`), алгоритм маркує його статусом `WATER` і виключає з подальшого енерговитратного розрахунку дифракції. Це дозволяє значно прискорити роботу програми та змодельовати енергоефективну мережу.

Розрахунок енергетичного бюджету сектора та моделювання радіолінії Після визначення координат базових станцій, я переходжу до розрахунку енергетичного бюджету для кожного окремого сектора. У моєму алгоритмі цей процес організовано як послідовний цикл, де для кожної антени обчислюється рівень потужності прийнятого сигналу P_r з урахуванням усіх факторів затухання та підсилення

Алгоритм розрахунку в циклі антени Для кожної антени я реалізував ітераційний процес, який виконується за наступним алгоритмом:

1. Визначення параметрів підвісу та нахилу: Я розраховую висоту антени над рівнем моря (bs_h_asl), додаючи висоту щогли (20 або 30 метрів) до висоти забудови. Також у цей момент спрацьовує мій алгоритм Adaptive Tilt, який обчислює оптимальний кут нахилу ($final_tilt$) для фокусування енергії в межах цільового радіуса.
2. Формування променів (Ray Tracing): Цикл проходить по азимутах з кроком $STEP_ANGLE = 0.5$ градусів. Для кожного напрямку я будую вектор відстаней до $RADIUS_CALC = 5000$ метрів.
3. Векторизований розрахунок втрат: Щоб не навантажувати процесор мільйонами дрібних операцій, я проводжу розрахунки через масиви NumPy (batch processing):

```
# Розрахунок FSPL для всього променя одночасно
fspl = 32.44 + 20*np.log10(FREQ_MHZ) +
      20*np.log10(dists/1000.0)
```

Цей підхід дозволяє мені миттєво отримати базове затухання для всіх точок уздовж променя

Корекція за діаграмою спрямованості: У кожній точці я обчислюю горизонтальне та вертикальне відхилення від осі випромінювання. На основі цих кутів я розраховую втрати підсилення (h_pat та v_pat), які віднімаються від максимального значення $ANTENNA_GAIN_MAX = 18.0$ дБі

Агрегація та запис результатівПісля того, як для поточної антени розраховано рівні P_r , алгоритм порівнює їх із вже існуючими значеннями в загальній карті покриття $final_cov$. Я використовую функцію `np.maximum.at`, яка гарантує, що в кожному пікселі залишиться рівень сигналу від найпотужнішого (найближчого або найкраще спрямованого) сектора. Це дозволяє мені коректно моделювати зони передачі обслуговування (handover) між базовими станціями.

Алгоритм адаптивного керування вертикальним нахилом антени (Adaptive Tilt) Для забезпечення максимальної ефективності випромінювання та концентрації енергії в межах цільового стільника, я реалізував алгоритм адаптивного розрахунку кута нахилу антени (Tilt). На відміну від статичних моделей, мій підхід базується на динамічному аналізі ефективної висоти підвісу антени над рівнем місцевої забудови.

Математична модель визначення кута нахилу Основна ідея алгоритму полягає у фокусуванні максимуму діаграми спрямованості на межу цільового радіуса покриття. Для розрахунку я використовую три основні параметри:

1. **Цільовий радіус R_{target} :** Я встановив значення $TARGET_CELL_RADIUS = 1500.0$ метрів, що є оптимальним для міських умов.
2. **Абсолютна висота антени H_{bs_asl} :** Висота точки встановлення передавача над рівнем моря.
3. **Середня висота середовища H_{avg_env} :** Середньоарифметична висота всіх об'єктів (будівель та рельєфу) у радіусі дії станції.

Програмна реалізація та обмеження У коді я реалізував цей аналіз через виділення локального вікна даних DSM навколо кожної базової станції:

```
# Аналізую вікно забудови 1.5 км для розрахунку середньої висоти
win = dsm_data[max(0, row-50):min(h_map, row+50), max(0, col-
50):min(w_map, col+50)]
if win.size > 0:
```

`eff_h = bs_h_asl - np.mean(win[win > -100])` # Розрахунок ефективної висоти підвісу

Для забезпечення технічної реалістичності моделі, я впровадив жорсткі ліміти на кути нахилу, що відповідають характеристикам сучасних механізмів дистанційного керування (RET):

- **Мінімальний нахил:** MIN_TILT = 2.0 градуси (щоб уникнути випромінювання "в горизонт" та зайвої інтерференції).
- **Максимальний нахил:** MAX_TILT = 12.0 градусів (щоб уникнути надмірного притискання променя до основи вежі).

Аналіз життєздатності сектора (Sector Viability Analysis) Для того, щоб змодельована мережа була максимально наближеною до реальної та енергоефективною, я впровадив алгоритм попередньої діагностики кожного сектора базової станції перед основним розрахунком покриття. Цей етап дозволяє автоматично виявляти та вимикати сектори, які працюють у непридатних умовах: заблоковані перешкодами в ближній зоні або спрямовані на водні об'єкти.

Алгоритм детектування блокування у ближній зоні (Wall/Blockage Detection) Перша перевірка спрямована на виявлення фізичних перешкод («стін»), які знаходяться безпосередньо перед антеною. Я організував цей процес через аналіз профілю висот на критичній відстані 500 метрів:

1. **Побудова тестового променя:** Для кожного азимута (0°, 120°, 240°) я формую короткий профіль місцевості з кроком 10 метрів.
2. **Розрахунок дифракційних втрат:** Я застосовую модель Дейгу для оцінки затухання на цьому відрізку.
3. **Критерій відсікання:** Якщо середні втрати на цій дистанції перевищують поріг BLOCKAGE_LOSS_LIMIT = 15.0 дБ, сектор

отримує статус BLOCKED (заблокований) і виключається з розрахунку. Це моделює ситуацію, коли антена встановлена занадто близько до технічної надбудови на даху або сусідньої будівлі.

Виявлення секторів, спрямованих на воду (Water Detection) Друга перевірка стосується економічної доцільності покриття. Сектор, що випромінює сигнал виключно на відкриту воду (наприклад, вздовж русла Дніпра), створює лише зайву інтерференцію.

Для ідентифікації таких зон я розробив метод аналізу шорсткості водної гладі:

- **Дистанція аналізу:** Алгоритм перевіряє профіль на відстані до 3 км за азимутом антени.
- **Фізичний показник:** Я розраховую стандартне відхилення висот вздовж профілю. Оскільки водна поверхня є ідеально рівною на DSM-карті, я встановив поріг WATER_FLATNESS_LIMIT = 0.35 (що відповідає коливанням висоти до 35 см).
- **Рішення:** Якщо профіль задовольняє цій умові, сектор класифікується як WATER і не активується. При цьому я програмно ігнорую перші 200 метрів профілю, щоб випадково не прийняти плаский дах будівлі, на якій стоїть антена, за воду.

Радіофізичне моделювання методом радіального сканування (Ray Tracing) Для детального розрахунку зони покриття я реалізував алгоритм радіального сканування територій, який у професійному середовищі часто називають спрощеним методом трасування променів (Ray Tracing). Цей підхід дозволяє мені врахувати просторову неоднорідність міської забудови Києва та фізичні процеси, що відбуваються з радіохвилею на шляху від антени до абонента.

Концепція променевої декомпозиції Процес моделювання я організував через генерацію променів, що виходять з точки розміщення антени. Для кожного активного сектора базова станція випромінює набір розрахункових векторів:

- **Кутова роздільна здатність:** Я встановив крок сканування за азимутот $STEP_ANGLE = 0.5$ градусів. Це забезпечує високу щільність розрахунку: для одного сектора з шириною пелюстки 65° (враховуючи бічні пелюстки — до 130°) алгоритм прораховує 260 унікальних трас.
- **Дискретизація відстані:** Уздовж кожного променя я проводжу обчислення з кроком $STEP_DISTANCE = 20.0$ метрів. Це дозволяє мені не пропустити жодну будівлю, оскільки типова ширина забудови в Києві перевищує цей показник.

Багатофакторний розрахунок у кожній точці траси Для кожної дискретної точки на кожному промені мій алгоритм виконує обчислення наступних параметрів:

1. **Геометрична верифікація:** Через афінні перетворення я миттєво визначаю координати точки та зчитую її висоту з масиву `dsm_data`.
2. **Розрахунок затухання у вільному просторі (L_{fs}):** Базове затухання обчислюється згідно з рекомендацією ITU-R P.525 для частоти 1880 МГц.
3. **Моделювання дифракції (L_d):** Будується вертикальний профіль місцевості від антени до поточної точки. Якщо пряма видимість (LOS) перекрита будівлями, я запускаю розрахунок за методом Дейгу для визначення втрат на огинання перешкод.
4. **Корекція підсилення:** Я обчислюю просторові кути відхилення абонента від головної осі антени та віднімаю втрати, зумовлені діаграмою спрямованості.

Векторизація обчислень для підвищення швидкодії Враховуючи, що загальна кількість розрахункових точок для однієї БС при радіусі 5 км та кроці 20 м сягає величезних значень, я відмовився від поштучної обробки точок на користь пакетної обробки (Batch Processing).

У моєму коді я згрупував промені в блоки:

```
for k in range(0, len(angles), BATCH_SIZE):
    batch_ang = angles[k : k + BATCH_SIZE]
    # Всі математичні операції (log10, sin, cos) виконуються
    # над масивами NumPy одночасно
    pr = TX_POWER_DBM + ANTENNA_GAIN_MAX - fspl - diff -
h_pat - v_pat - URBAN_CLUTTER_LOSS
```

Це дозволило мені скоротити час розрахунку сегмента мережі з годин до декількох хвилин, зберігаючи при цьому максимальну точність, яку надає цифрова модель поверхні. Результати кожного променя я агрегую в підсумкову матрицю покриття, де зберігається лише максимальне значення сигналу для кожної координати.

Розрахунок втрат у вільному просторі за рівнянням Фрііса Для визначення базового рівня потужності сигналу в кожній точці розрахункової сітки я застосовую модель поширення радіохвиль у вільному просторі¹¹¹¹. Це ідеалізована модель, яка описує затухання енергії електромагнітної хвилі з відстанню за умови повної відсутності перешкод та віддзеркалень.

Теоретичне обґрунтування моделі У моїй роботі розрахунок базується на рівнянні Фрііса, яке встановлює залежність між потужністю випромінювання та відстанню до точки прийому³³³³. Оскільки я проводжу

розрахунки для стандарту **GSM-1800**, основною робочою частотою в моєму алгоритмі $f = 1880$ МГц.

Особливості програмної реалізації У коді я реалізував цей розрахунок у векторизованому вигляді. Це означає, що замість обчислення затухання для кожної точки окремо, я подаю на вхід функції масив відстаней, що відповідає всьому променю сканування:

```
# Розрахунок FSPL для масиву відстаней (dists у метрах)
fspl = 32.44 + 20*np.log10(FREQ_MHZ) + 20*np.log10(dists/1000.0)
```

Такий підхід дозволив мені врахувати, що на частоті 1880 МГц базові втрати на першому кілометрі дистанції вже становлять приблизно 99 дБ. Це пояснює, чому для стандарту GSM-1800 радіус дії однієї станції в місті є значно меншим, ніж для низькочастотних діапазонів.

Роль FSPL у загальному енергетичному бюджеті Варто розуміти, що L_{fs} у моїй моделі є "мінімально можливим" затуханням⁹. Будь-яка точка, що знаходиться в зоні прямої видимості (LOS — Line of Sight), отримує саме такий рівень сигналу (з корекцією на підсилення антени)¹⁰¹⁰¹⁰¹⁰. Для точок, де пряма видимість перекрита забудовою Києва, це значення виступає базовою лінією, до якої я пізніше додаю дифракційні втрати L_d та затухання в міській забудові `URBAN_CLUTTER_LOSS`

Моделювання явища дифракції на елементах міської забудови за методом Дейгу У реальних умовах Києва пряма видимість між базовою станцією та абонентом часто перекривається будівлями або елементами рельєфу. Для коректного розрахунку рівня сигналу в таких зонах я реалізував математичну модель дифракції, яка описує огинання радіохвилями непрозорих перешкод.

Вибір методу розрахунку Для своєї роботи я обрав метод Дейгу (Deygout), який є векторизованою модифікацією розрахунку втрат на

«ножеподібних» перешкодах (knife-edge obstacles)²²²²²²². Цей метод дозволяє ефективно апроксимувати складний профіль міської забудови, виділяючи головну перешкоду, що найбільше перекриває першу зону Френеля.

Математичний апарат дифракційних втрат У моєму алгоритмі розрахунок базується на визначенні параметра дифракції v , який характеризує ступінь перекриття траси перешкодою. Математична логіка, яку я заклав у функцію `calculate_diffraction_vectorized`, виглядає наступним чином:

1. **Визначення геометрії профілю:** Для кожної точки на промені я розраховую кут просвіту між антеною та вершинами перешкод.
2. **Пошук домінуючої перешкоди:** Алгоритм знаходить максимальний кут піднесення, що відповідає "горизонту" для передавача:
3. **Обчислення параметра v :** Якщо точка знаходиться в зоні геометричної тіні, я розраховую параметр v через висоту перешкоди h , довжину
4. **Розрахунок затухання:** Втрати в децибелах L_d я обчислюю за апроксимацією Мілінгтона

Векторизована реалізація для масових обчислень

Оскільки побудова профілю для кожної точки є ресурсомісткою операцією, я реалізував метод «кумулятивного максимуму» через бібліотеку NumPy. Це дозволяє моєму алгоритму за одну ітерацію проаналізувати весь профіль довжиною до 5 км і миттєво визначити зони затінення для сотень точок одночасно:

```
# Знаходимо лінію горизонту для всього профілю
acc_max = np.maximum.accumulate(angles, axis=1)

# Визначаємо точки, що знаходяться нижче лінії горизонту (у тіні)
in_shadow = angles < prev_max
```

Ключовим елементом розробленого комплексу є модуль розрахунку дифракційних втрат. Нижче наведено повний лістинг реалізованої функції `calculate_diffraction_vectorized`, яка використовує бібліотеку NumPy для одночасної обробки масиву профілів висот. Метод використовує алгоритм `accumulate` для швидкого знаходження лінії горизонту та визначення параметрів зони Френеля для тисяч точок одночасно:

```
def calculate_diffraction_vectorized(dist_m, heights_m, bs_h,
wavelength):
```

```
    """
```

Векторизований розрахунок дифракційних втрат методом Дейгу (Knife-Edge).

Вхідні дані:

`dist_m` - матриця відстаней від БС до точок профілю

`heights_m` - матриця висот рельєфу (DSM)

`bs_h` - абсолютна висота антени БС

`wavelength`- довжина хвилі (м)

```
    """
```

```
# Уникнення ділення на нуль
```

```
dist_safe = dist_m.copy()
```

```
dist_safe[dist_safe < 0.1] = 0.1
```

```
# Розрахунок кута підйому променя до кожної точки профілю
```

```
angles = (heights_m - bs_h) / dist_safe
```

```
# Визначення "горизонту" (максимального кута) за допомогою
кумулятивного максимуму
```

```
acc_max = np.maximum.accumulate(angles, axis=1)
```

```

# Формування масиву попередніх максимумів для виявлення тіні
prev_max = np.empty_like(acc_max)
prev_max[:, 1:] = acc_max[:, :-1]
prev_max[:, 0] = -999.0 # Початкове значення

# Умова тіні: поточний кут менший за максимальний попередній
in_shadow = angles < prev_max

# Розрахунок висоти перешкоди над лінією прямої видимості (h)
h = dist_m * (prev_max - angles)

# Розрахунок параметра дифракції v (Fresnel parameter)
v = h * np.sqrt(2 / (wavelength * dist_safe))

losses = np.zeros_like(dist_m)

# Фільтрація: враховуємо тільки тіньові зони та v > -0.7
mask = in_shadow & (v > -0.7)
if np.any(mask):
    v_valid = v[mask]
    # Апроксимація втрат (формула Лі-Вудса)
    losses[mask] = 6.9 + 20 * np.log10(np.sqrt((v_valid-0.1)**2 + 1) +
v_valid - 0.1)

return losses

```

Такий підхід забезпечує високу точність моделювання «тіньових» зон за будівлями, що є критичним для діапазону 1800 МГц, де здатність хвиль

до огинання перешкод є значно нижчою, ніж у діапазоні 900 МГц. Сумарні втрати від дифракції у моїй моделі можуть сягати 20–30 дБ, що часто є вирішальним фактором при визначенні межі покриття в умовах щільної забудови.

Алгоритм інтелектуальної діагностики та автоматичного усунення прогалин покриття (Network Self-Healing)

Навіть при використанні оптимізованої гексагональної сітки, специфіка міської забудови Києва створює зони «радіотіні», де рівень сигналу падає нижче критичного порогу. Для вирішення цієї проблеми я розробив та впровадив алгоритм автоматичного розміщення додаткових базових станцій (Fill-in sites), який базується на методах математичної морфології та аналізу центрів мас кластерів.

Ідентифікація та кластеризація «мертвих зон» Першим кроком мого алгоритму є аналіз сформованої карти покриття для виявлення ділянок з незадовільним рівнем сигналу.

- **Критерій діагностики:** Я встановив поріг `BAD_SIGNAL_THRESHOLD = -98.0` дБм. Всі пікселі, де значення потужності знаходиться в діапазоні від -115 дБм до -98 дБм, маркуються як «проблемні».
- **Групування (Labeling):** Використовуючи функцію `label` з бібліотеки `scipy.ndimage`, я об'єдную розрізнені пікселі у зв'язані об'єкти — кластери. Це дозволяє мені працювати не з окремими точками, а з цілісними географічними районами, що потребують покращення зв'язку.
- **Фільтрація за розміром:** Щоб не витратити ресурс на дрібні артефакти, я ввів обмеження `MIN_CLUSTER_SIZE = 50` пікселів. Це гарантує, що додаткова БС буде встановлена лише для обслуговування значної за площею території.

Метод центру мас для оптимального позиціонування Для кожної виявленої плями поганого сигналу мені потрібно було знайти ідеальну точку для нової станції. Я вирішив це завдання шляхом розрахунку геометричного центру мас кластера

Проте встановлення БС точно в центрі плями не завжди можливе (наприклад, центр може припасти на пустир). Тому я додав логіку **Fill-in Search**:

1. Від центру мас я проводжу пошук у радіусі `FILL_IN_SEARCH_RADIUS = 400` метрів.
2. Алгоритм знову звертається до матриці `dsm_data` для пошуку локального максимуму висоти у цьому радіусі.
3. Нова станція розміщується на найвищій доступній точці (даху будівлі) поруч із центром «мертвої зони».
- 4.

Інтеграція нових станцій та фіналізація Після визначення координат нових точок (до 10 станцій за один прохід згідно з лімітом `MAX_NEW_STATIONS`), я запускаю повторний цикл розрахунку енергетичного бюджету та дифракції.

Результати розрахунку нових БС накладаються на існуючу карту за принципом максимуму:

```
# Інтеграція нових станцій у загальну карту
cov_map, stats_fill = calculate_coverage(new_stations, dsm_data,
transform, existing_coverage=cov_map)
```

Фіналізація розрахунків та експорт результатів моделювання
Завершальний етап мого алгоритму полягає в об'єднанні результатів роботи всіх базових станцій у єдиний інформаційний шар та його коректному

збереженні для подальшого використання. Цей процес гарантує цілісність даних та їхню відповідність стандартам картографії.

Алгоритм агрегації сигналів (Best Server Selection) У кожній розрахунковій точці міста сигнал може бути присутній від декількох секторів одночасно. Для того, щоб змодельовати реальну роботу мобільного термінала, який завжди обирає найкращу доступну станцію, я реалізував принцип вибору максимального рівня сигналу.

У моєму коді це реалізовано за допомогою векторизованої операції порівняння масивів:

```
# Вибір максимального рівня сигналу в кожній точці
pr.maximum.at(final_cov, (r_f, c_f), p_f)
```

Завдяки використанню функції `pr.maximum.at`, у фінальну матрицю `final_cov` записується лише найбільше значення потужності (в dBm) серед усіх променів, що пройшли через дану координату. Це дозволяє мені чітко розмежувати зони обслуговування кожної БС та змодельовати межі перемикання (handover).

Постобробка та морфологічна фільтрація Для усунення дрібних артефактів розрахунку, що виникають через дискретність променів на великих відстанях, я додав блок фінальної обробки зображення. Я використав функцію `maximum_filter` для заповнення дрібних прогалин у растрі:

```
def fill_gaps_final(array):
    filled = maximum_filter(array, size=3)
    mask = (array == -120.0) & (filled > -120.0)
    res = array.copy()
    res[mask] = filled[mask]
    return res
```

Це дозволяє отримати візуально цілісну мапу покриття, де «дірки» розміром у 1 піксель, спричинені кроком азимута, автоматично заповнюються сусідніми значеннями сигналу.

Експорт у формат GeoTIFF та підготовка звіту Фінальним кроком є формування вихідного файлу `Kyiv_Masterpiece_Network.tif`. Я налаштував параметри експорту так, щоб файл був повністю сумісний із ГІС QGIS:

- **Стиснення LZW:** Я активував стиснення без втрат, щоб зменшити розмір вихідного файлу при збереженні повної точності розрахунків.
- **Nodata value:** Я встановив значення -120.0 dBm як поріг відсутності сигналу, що відповідає технічній межі чутливості більшості мобільних приймачів.

Після збереження алгоритм виводить підсумковий звіт, де я можу побачити статистику по мережі: кількість активних секторів, кількість заблокованих стінами та зекономлені ресурси завдяки вимкненню «водних» секторів.

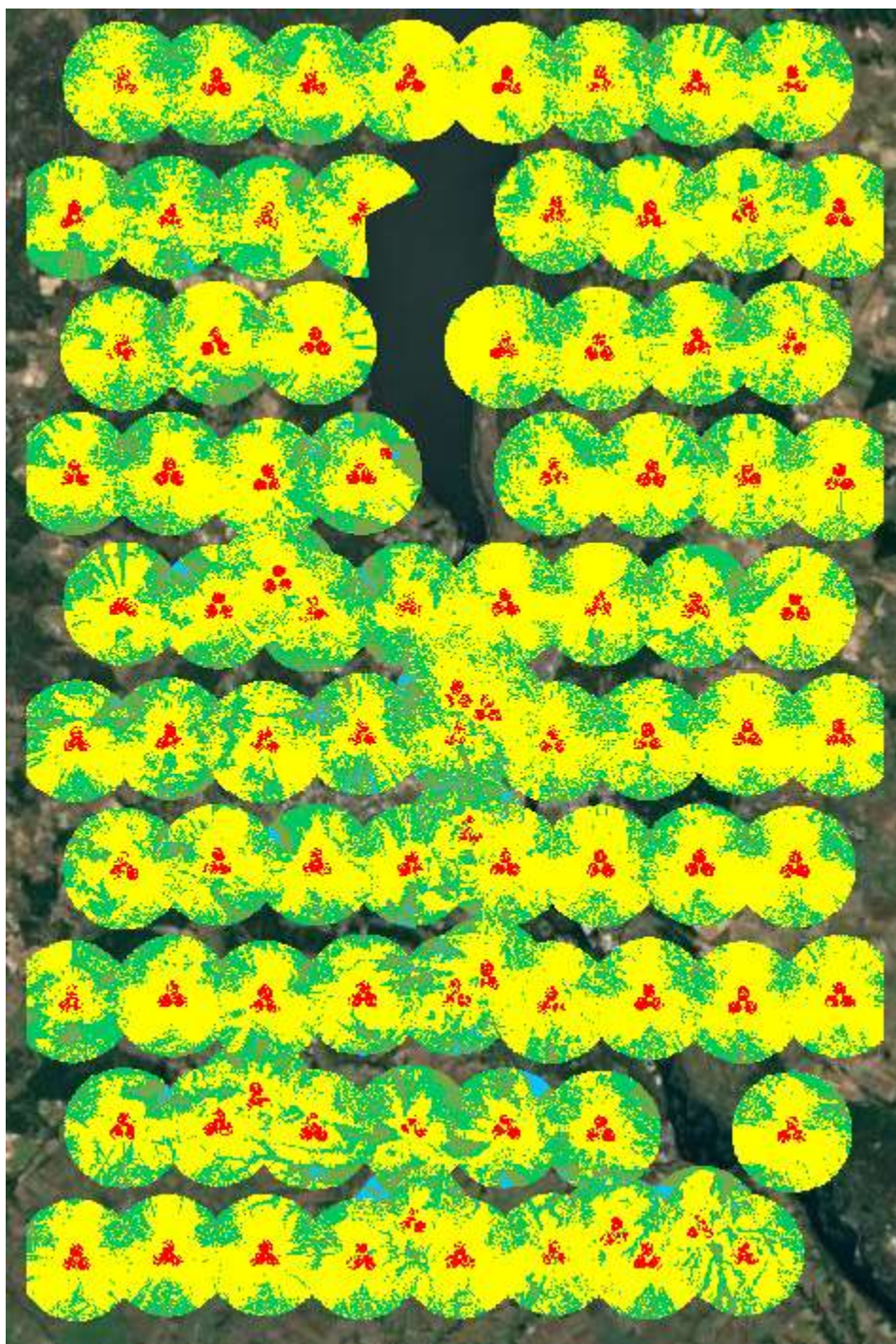


Рис.3.8 Результуюча карта інтегрального покриття сегмента мережі GSM-1800 з урахуванням забудови та рельєфу м. Києва.

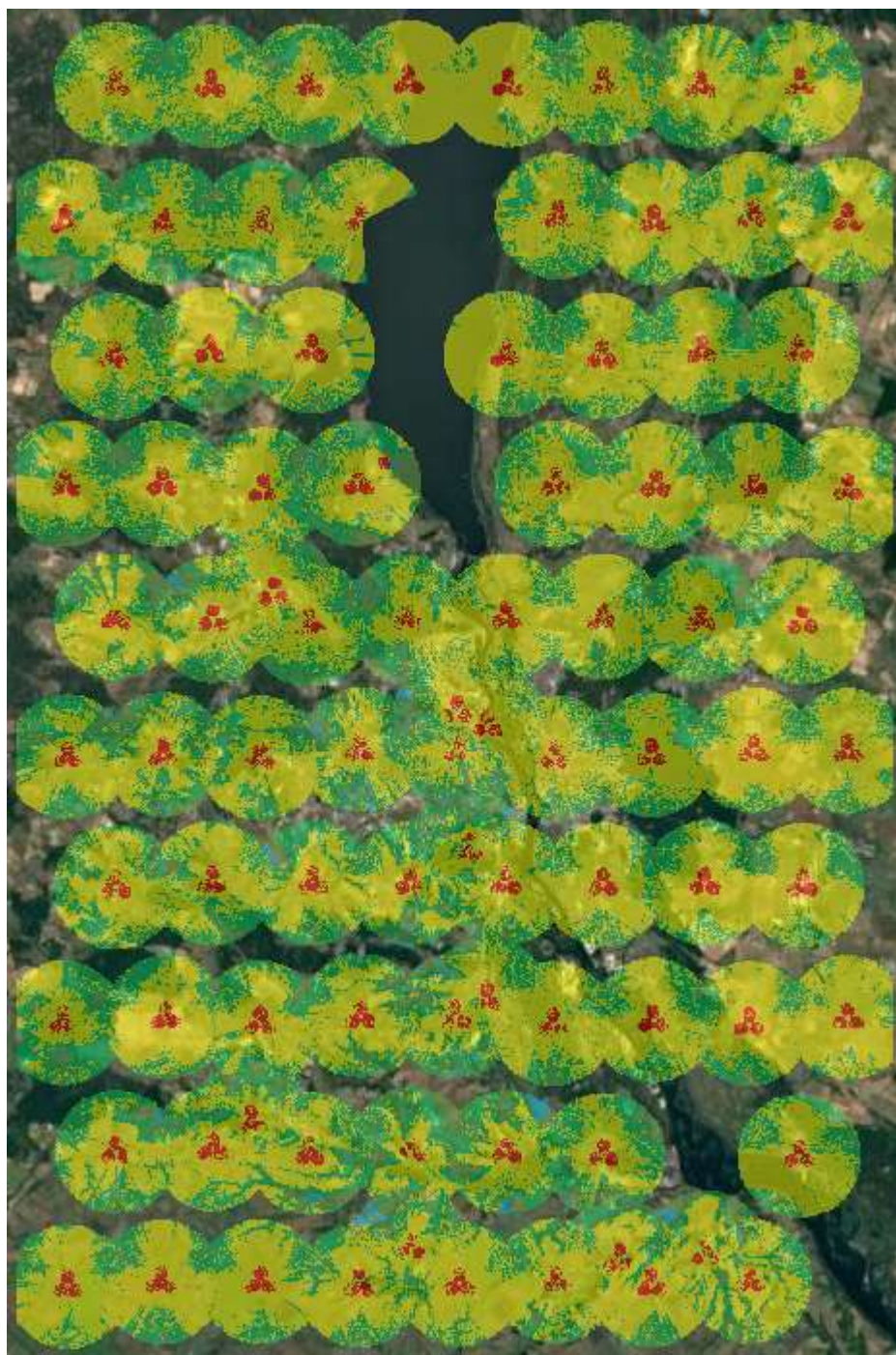


Рис.3.9 Результуюча карта інтегрального покриття сегмента мережі GSM-1800 з урахуванням забудови та рельєфу м. Києва (прозорість 50%).

Експериментальна оцінка ефективності алгоритмів фільтрації ландшафту Для підтвердження доцільності впроваджених методів інтелектуальної фільтрації я провів контрольне моделювання сегмента

мережі з вимкненими модулями перевірки середовища. Це дозволило порівняти базове автоматичне планування з розробленим адаптивним підходом.

4.13.1. Моделювання без фільтрації за висотою та шорсткістю

У контрольному сценарії я деактивував перевірки за параметрами MIN_HEIGHT_WATER та ROUGHNESS_THRESHOLD. За таких умов алгоритм розставляв базові станції суворо за геометричним принципом сітки.

Результати моделювання без фільтрації виявили такі проблеми:

- **Помилкове розміщення на воді:** Частина базових станцій була автоматично встановлена в акваторії р. Дніпро. У реальних умовах це робить проєкт неможливим для реалізації через відсутність майданчиків для монтажу обладнання.
- **Розміщення на пустирях:** Без аналізу текстури поверхні (Roughness), станції призначалися на відкриті площі та зони без забудови. Це значно знижує ефективну висоту підвісу антен, оскільки вони не використовують переваги висотних будівель для покращення прямої видимості.

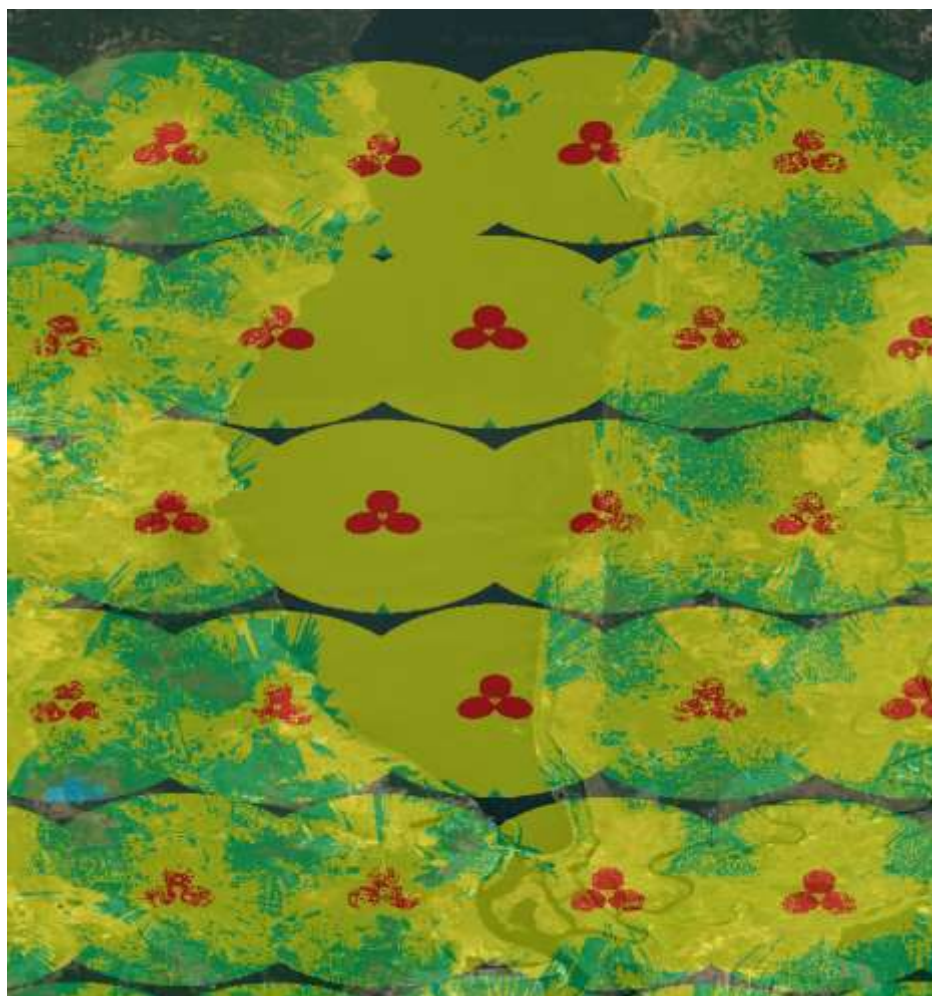


Рис.3.10 Приклад некоректного розміщення базових станцій в акваторії р. Дніпро при вимкненому модулі фільтрації ландшафту.

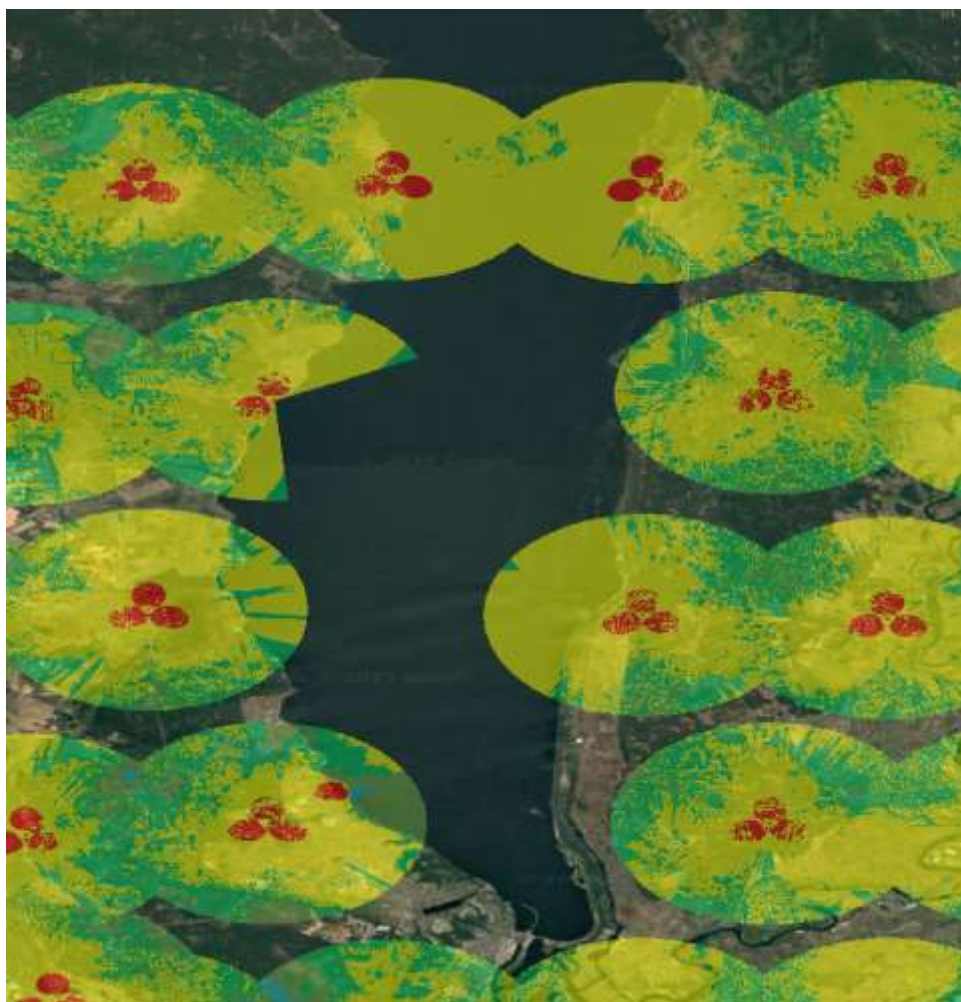


Рис.3.11 Результат роботи алгоритму інтелектуальної фільтрації `ROUGHNESS_THRESHOLD`, що забезпечує зміщення точок розміщення на суходіл.

Наслідки відсутності аналізу життєздатності секторів

Наступним кроком стало вимкнення функції `analyze_sector_viability`, що дозволило всім секторам випромінювати сигнал незалежно від перешкод та типу поверхні.

Аналіз отриманої карти покриття показав наступне:

- **Надлишкова інтерференція над водою:** Сектори, спрямовані на Дніпро, створюють зони покриття на великі відстані через відсутність перешкод над дзеркальною поверхнею води. Це

забруднює ефір і заважає роботі станцій на іншому березі, що є критичною проблемою для частотного планування.

- **Помилковий розрахунок за перешкодами:** Без фільтрації заблокованих секторів (BLOCKED), система показувала наявність зв'язку в зонах, де сигнал фактично поглинається сусідніми будівлями ще на початку траси. Це створює ілюзію стабільного покриття там, де його неможливо забезпечити.

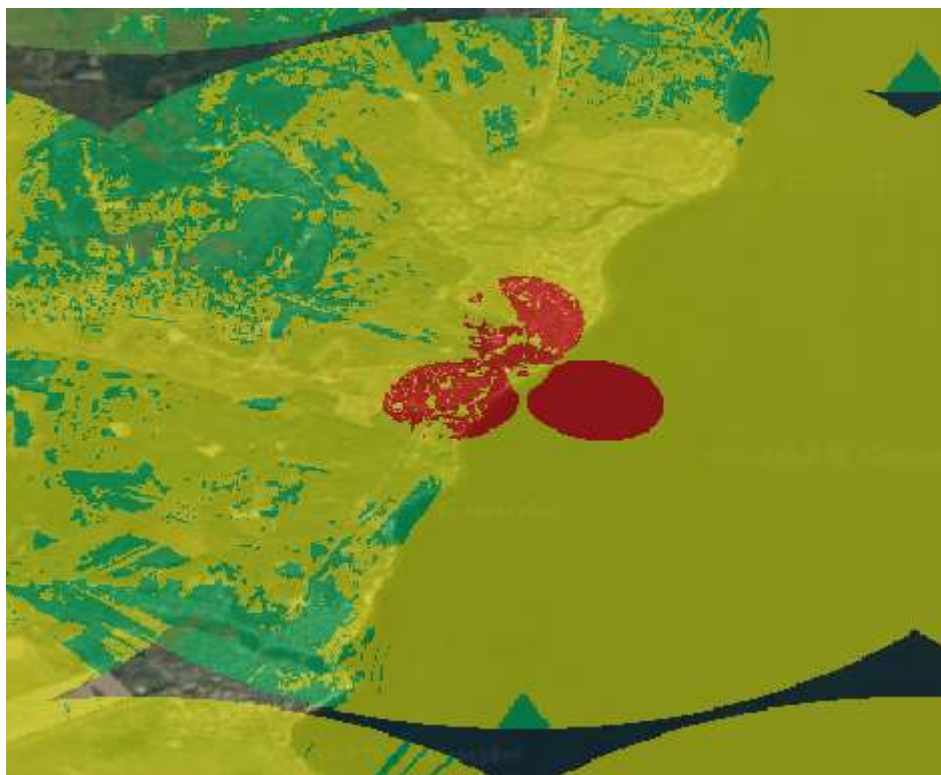


Рис.3.12 Візуалізація активного сектору антени в зоні прямої видимості (статус ОК) з розрахованою діаграмою спрямованості.

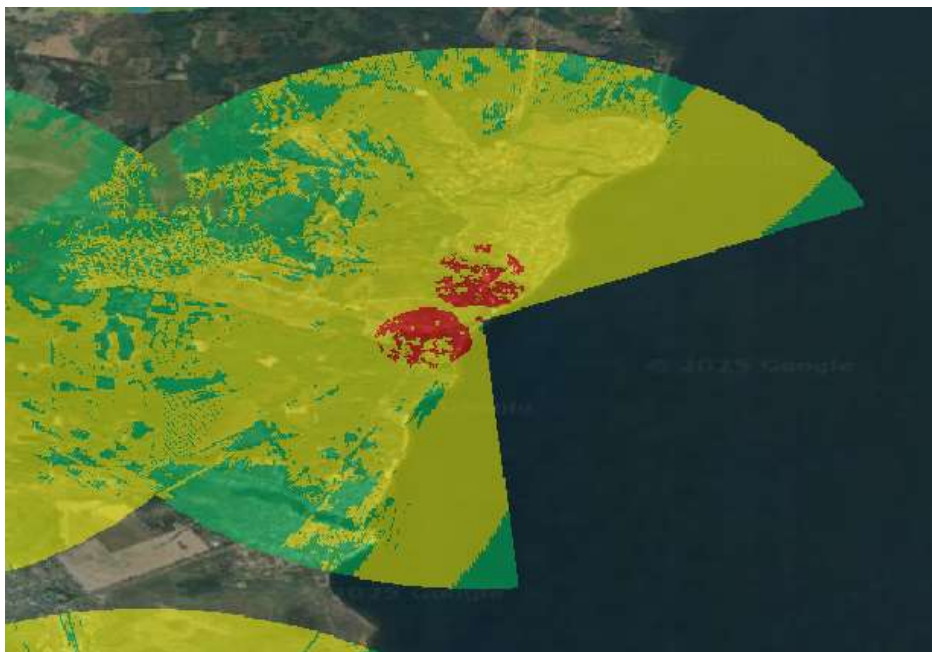


Рис.3.13 Автоматичне деактивування сектора (Smart Blanking) при виявленні водної поверхні або критичного блокування у ближній зоні.

Висновки щодо оптимізації Порівняльний аналіз підтвердив, що розроблені алгоритми фільтрації дозволяють уникнути грубих помилок при плануванні. Застосування цих методів забезпечує:

- Розміщення обладнання виключно на існуючих висотних об'єктах.
- Фокусування сигналу в зонах зосередження абонентів, а не над безлюдними водними масивами.
- Суттєве прискорення роботи програми за рахунок виключення непридатних для розрахунку секторів.

Стан мережі до «лікування» На початковому етапі, незважаючи на щільну сітку БС, на мапі чітко спостерігалися значні прогалини в покритті. Основні причини виникнення таких зон:

- **Ефект «радіотіні»:** Гексагональна сітка не враховує розташування хмарочосів, які можуть повністю блокувати сигнал для цілих кварталів, що знаходяться безпосередньо за ними.

- **Складна геометрія забудови:** В районах зі щільною та нерівномірною забудовою стандартний крок сітки виявився недостатнім для забезпечення безперервного зв'язку.

За результатами діагностики було виявлено кілька великих кластерів, де рівень сигналу був нижчим за поріг чутливості термінала.

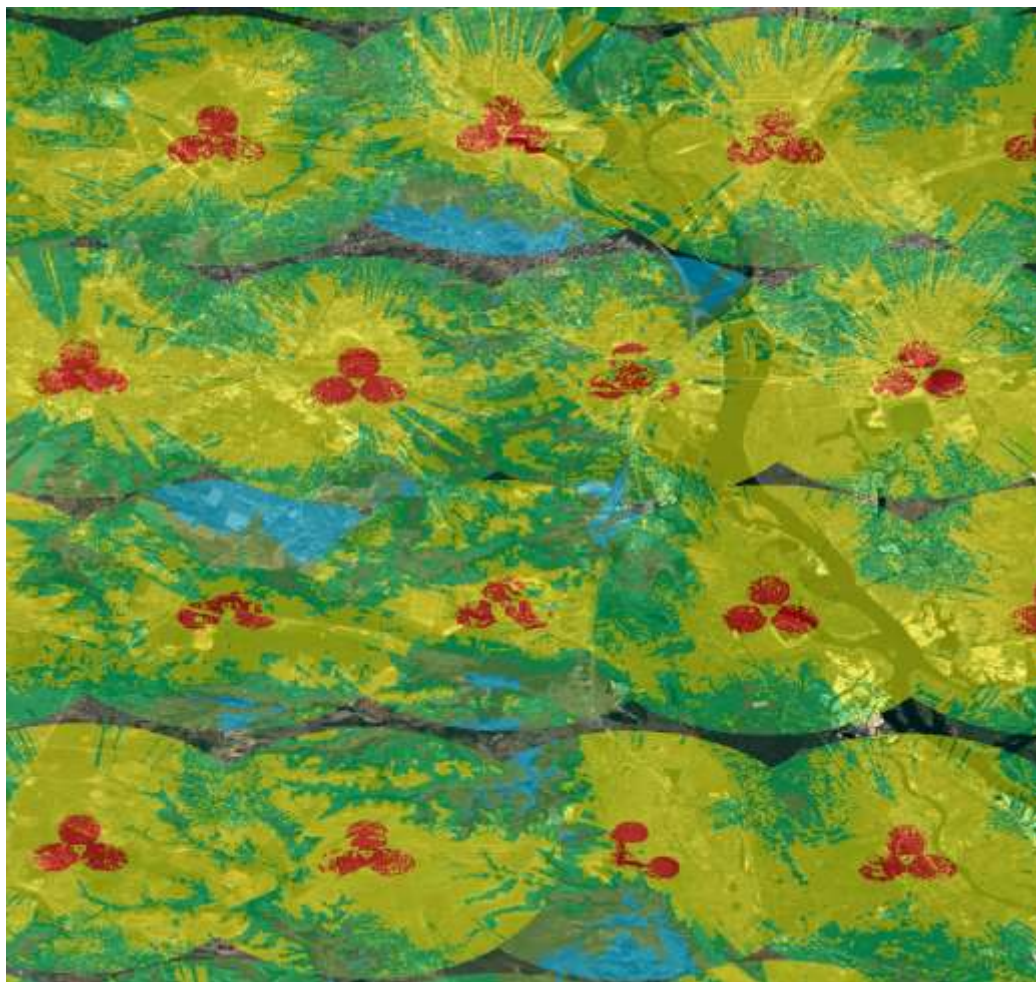


Рис.3.14 Діагностика покриття: виявлення кластерів («мертвих зон») із рівнем сигналу нижче порогу -98.0 дБм.

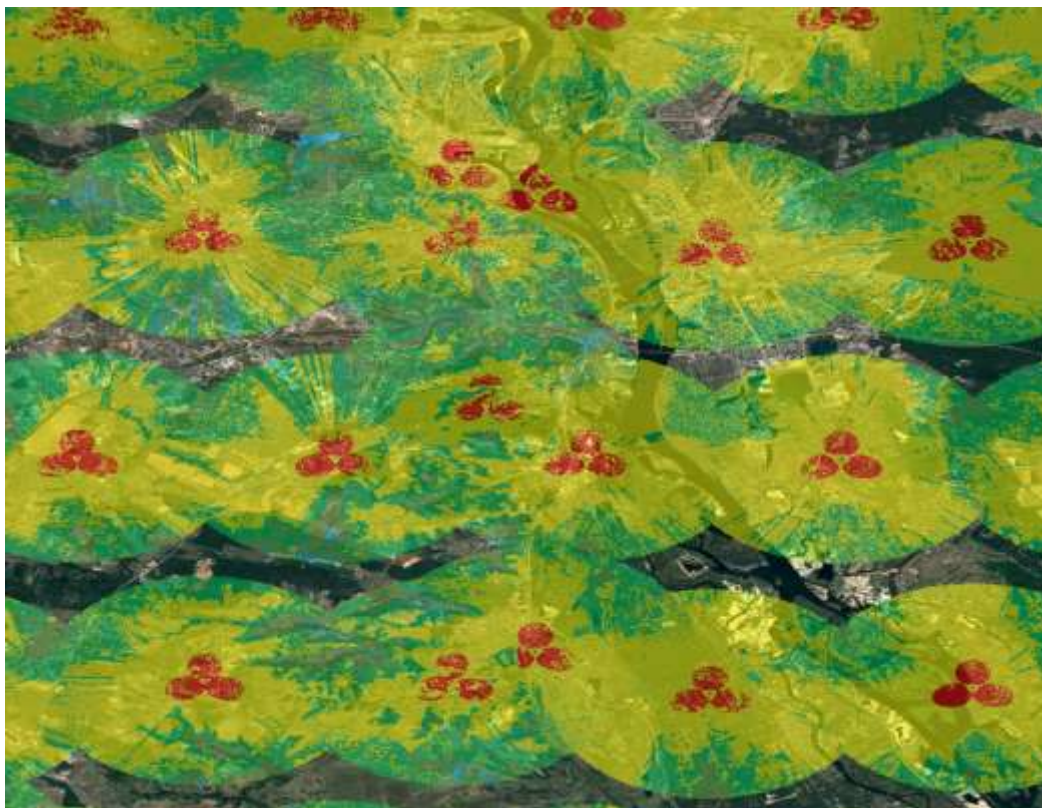


Рис.3.15 Результат роботи модуля «Self-Healing»: усунення прогалин покриття шляхом встановлення додаткових БС у центрах мас виявлених кластерів.

Висновки

У третьому розділі магістерської дисертації здійснено практичну реалізацію та тестування програмного комплексу для автоматизованого розрахунку покриття мереж GSM/LTE.

Обмеження реалізації та аналіз результатів. Слід зазначити, що отримана інтегральна карта покриття (Рис. 3.9) носить характер теоретичного дослідження можливостей автоматизованих алгоритмів. На практиці повна автоматизація планування без участі інженера майже не використовується через складність врахування всіх факторів міського середовища (багатопроменевість, перевідбиття).

Спостережувана дискретність зон покриття ("плямистість") пояснюється прийнятими обмеженнями обчислювальної моделі, а саме фіксованим радіусом розрахунку та використанням моделі "Best Server" без урахування сумарної потужності сигналів від сусідніх сот. Для досягнення суцільного килимового покриття в реальному проекті необхідно збільшувати щільність базових станцій та проводити ручне корегування параметрів (tilt/azimuth) для кожної локації, що виходить за межі автоматизованого підходу даної роботи

Програмна архітектура: Розроблено та імплементовано модульну структуру програмного забезпечення на базі екосистеми Python. Використання бібліотек Rasterio для роботи з геоданими та NumPy для матричних обчислень дозволило досягти високої швидкості обробки цифрових моделей рельєфу (DSM). Впровадження векторизованих алгоритмів скоротило час розрахунку покриття для сегмента міста з годин до декількох хвилин порівняно з ітеративними підходами.

Фізичне моделювання: Реалізовано комплексний алгоритм розрахунку енергетичного бюджету, який об'єднує модель втрат у вільному просторі (FSPL), модель дифракції на перешкодах (метод Дейгу) та 3D-діаграму спрямованості антен. Отримані карти покриття коректно відображають ефекти «радіотіні» за висотними будівлями та пагорбами Києва, що підтверджує адекватність обраних моделей.

Інтелектуальні алгоритми: Розроблено та успішно протестовано авторські методики оптимізації топології. Алгоритм Smart Blanking забезпечив автоматичне вимкнення неефективних секторів, спрямованих на водні поверхні або заблокованих перешкодами, що підвищує енергоефективність мережі. Механізм Self-Healing продемонстрував

здатність автоматично виявляти кластери з низьким рівнем сигналу та генерувати оптимальні позиції для компенсуючих базових станцій.

Практична цінність: Результати моделювання (карти покриття, позиції БС) експортуються у стандартизовані формати GeoTIFF, повністю сумісні з професійними ГІС-системами (QGIS). Це дозволяє використовувати розроблений продукт як повноцінний інструмент для попереднього планування мереж мобільного зв'язку в умовах реальної міської забудови..

РОЗДІЛ 4

СТАРТАП-ПРОЄКТ

4.1 Опис ідеї стартап-проекту

Сучасний ринок телекомунікацій характеризується стрімким впровадженням нових стандартів зв'язку (4G/LTE, 5G) та експоненціальним зростанням щільності базових станцій у міських агломераціях. Забезпечення суцільного покриття та високої якості сервісу (QoS) в умовах щільної забудови та складного рельєфу вимагає високоточного радіопланування. Попри наявність на ринку професійних інструментів, галузь відчуває гострий дефіцит доступних, гнучких та автоматизованих рішень, які дозволяли б проводити попередню оцінку покриття без необхідності закупівлі дорогих ліцензійних комплексів рівня enterprise.

Запропонований стартап-проект «**GeoRadioPlan**» спрямований на створення спеціалізованої програмної платформи для інженерного розрахунку, візуалізації та аналізу зон покриття мереж мобільного зв'язку. В основі рішення — розроблений у цій магістерській роботі програмний комплекс, який поєднує можливості геоінформаційних систем (GIS) та потужний математичний апарат обчислення втрат радіосигналу.

Ключова ідея стартапу полягає у створенні єдиного інженерного інструменту, здатного:

- виконувати імпорт та обробку цифрових моделей рельєфу (DSM/DEM) високої роздільної здатності для точного врахування перепадів висот;
- здійснювати розрахунок енергетичного бюджету радіолінії з урахуванням характеристик прийомо-передавального обладнання;

- моделювати поширення радіохвиль на основі детермінованих та емпіричних моделей (Free Space, Okumura-Hata, COST-231) залежно від типу місцевості;
- автоматизувати процес побудови діаграм спрямованості антен у тривимірному просторі з урахуванням кутів нахилу (tilt) та азимутів;
- візуалізувати зони покриття у вигляді растрових теплових карт (Heatmaps) з прив'язкою до реальних географічних координат;
- виявляти «тіньові зони» та проблемні ділянки з недостатнім рівнем сигналу (RSRP/RSSI) ще на етапі проектування;
- проводити оцінку інтерференційної обстановки при накладанні сигналів від сусідніх стільників;
- експортувати результати розрахунків у поширені формати (GeoTIFF, KML, SHP) для подальшої інтеграції з QGIS або Google Earth;
- надавати інженеру гнучкий інтерфейс для швидкої зміни параметрів мережі без необхідності перерахунку всього проекту вручну.

Особливу цінність ідея набуває завдяки використанню алгоритмів обробки геоданих, що дозволяє враховувати специфіку складного рельєфу (наприклад, правий берег Києва), який часто ігнорується спрощеними онлайн-калькуляторами. У цьому контексті розроблена система відрізняється від конкурентів відкритістю архітектури, можливістю адаптації під конкретні частотні діапазони та відсутністю залежності від хмарних сервісів, що дозволяє використовувати ПЗ локально в умовах обмеженого доступу до мережі.

Таблиця 4.1

Цільові категорії користувачів стартап-проекту та їх потреби

Категорія користувачів	Практична потреба / Проблема	Яке рішення надає стартап
Малі інтернет-провайдери (WISP) та локальні оператори зв'язку	Мінімізація капітальних витрат на етапі планування мережі; точна оцінка рельєфу для побудови ліній прямої видимості; відсутність потреби у складному навчанні персоналу.	Безкоштовний (або низьковартісний) інструмент без ліцензійних платежів; використання точних DSM-моделей для аналізу перешкод; автоматизовані скрипти, що не вимагають глибоких знань радіофізики.
Вищі навчальні заклади (ВНЗ) технічного профілю	Потреба у сучасному лабораторному ПЗ для навчання студентів; доступ до вихідного коду для демонстрації алгоритмів; візуалізація зон покриття та інтерференції.	Відкритий код (Python), що дозволяє студентам бачити "внутрішню кухню" розрахунків; можливість легкої модифікації параметрів для лабораторних робіт; наочна візуалізація у QGIS.
Військові підрозділи та служби швидкого реагування	Робота в автономному режимі (без інтернету); швидке розгортання на ноутбуках середньої потужності; підтримка специфічних частотних діапазонів; безпека даних.	Повністю локальна робота без звернення до хмарних серверів; оптимізовані алгоритми (NumPy/Rasterio) для швидких розрахунків; гнучке налаштування частот та параметрів антен.
Радіоаматори та незалежні дослідники	Доступність інструменту (Free/Open Source); можливість експериментувати з різними моделями поширення хвиль та типами антен.	Гнучка архітектура, що дозволяє додавати власні моделі антен та експериментувати з налаштуваннями без обмежень пропрієтарного софту.

Стартап орієнтується на поєднання двох підходів:

1. **Інженерної точності та достовірності розрахунків**, що відповідає рівню професійних плануючих комплексів.
2. **Зручного та автоматизованого інтерфейсу**, що робить процес радіопланування доступним навіть для фахівців початкового рівня без глибоких знань геоінформаційних систем.

Таким чином, головна ідея проекту — створення багатофункціональної, гнучкої системи розрахунку покриття, яка змінить підхід до попереднього проектування та навчального моделювання мобільних мереж, забезпечивши інженерів, студентів та незалежних провайдерів інструментами просторового аналізу, раніше доступними лише у вартісному пропрієтарному програмному забезпеченні.

4.2 Технологічний аудит

Однією з ключових переваг проекту є використання сучасних інструментів геопросторового аналізу на базі мови Python та бібліотек Rasterio і GeoPandas, які забезпечують швидку обробку растрових даних цифрових моделей рельєфу (DSM). Цей стек технологій дозволяє виконувати складні матричні обчислення втрат сигналу безпосередньо над масивами геоданих, уникаючи використання громіздких пропрієтарних «двигунів» (engines), характерних для комерційних пакетів типу Atoll. Такий підхід робить продукт незалежним від дорогих ліцензій та забезпечує повну прозорість алгоритмів розрахунку.

Візуалізація результатів реалізована через генерацію стандартних файлів формату GeoTIFF та інтеграцію з QGIS, що, попри відсутність власного важкого графічного інтерфейсу, дозволяє отримати професійне відображення зон покриття на реальній карті місцевості. Це суттєво

зменшує системні вимоги та дозволяє проводити розрахунки навіть на ноутбуках середнього рівня продуктивності, оскільки основне навантаження лягає на оптимізовані математичні бібліотеки NumPy, а не на графічне ядро.

Одним із важливих технічних аспектів є реалізація комбінованих моделей поширення радіохвиль (Free Space + Diffraction), які враховують реальний профіль траси між передавачем та кожною точкою місцевості. У процесі аудиту було встановлено, що використання векторних операцій для розрахунку дифракційних втрат на перешкодах (за методом огинання) забезпечує високу точність прогнозування «тіньових зон», яка недоступна для простих емпіричних моделей. Це дозволяє використовувати програму не лише для теоретичних оцінок, а й для вирішення практичних задач попереднього планування мережі.

Застосунок підтримує роботу з будь-якими відкритими джерелами геоданих (SRTM, ALOS AW3D30), що робить його універсальним для використання в будь-якому регіоні світу. Водночас існують певні обмеження, пов'язані з роздільною здатністю вхідних даних DSM: при використанні супутникових карт низької точності (30 м/піксель) система не може враховувати дрібні архітектурні елементи будівель. Незважаючи на це, для задач макро-планування мереж GSM/LTE така точність є достатньою для оцінки загальної картини покриття та виявлення проблемних локацій.

З технічного погляду проект має високий потенціал масштабування. Завдяки модульній архітектурі, скрипти розрахунку можуть бути легко адаптовані для нових стандартів зв'язку (наприклад, 5G NR), перенесені на хмарні сервери для паралельних обчислень великих територій або інтегровані як плагін у наявні ГІС-системи..

Таблиця 4.2

Технічні перспективи та можливості масштабування стартап-проекту

Кросплатформність	Модульна архітектура Python дозволяє розгортання розрахункового ядра на Windows, Linux, macOS та серверних Unix-системах.
Хмарні обчислення (Cloud Computing)	Перенесення ресурсоємних розрахунків матриць рельєфу на віддалені сервери для пришвидшення обробки великих територій.
WEB-інтерфейс (SaaS)	Трансформація консольного скрипта у повноцінний веб-сервіс (на базі Flask/Django), що не потребує встановлення ПЗ клієнтом.
Підтримка нових стандартів (5G/IoT)	Додавання модулів розрахунку для діапазонів міліметрових хвиль (mmWave) та технологій Massive MIMO / Beamforming.
Інтеграція з Big Data	Автоматичне калібрування математичних моделей на основі реальних даних вимірювань (Drive Tests), завантажених користувачами.
API для зовнішніх систем	Розробка інтерфейсів (API) для автоматичного обміну даними з системами обліку ресурсів операторів (OSS/BSS).

У ході технологічного аудиту також було визначено потенційні ризики проекту. Головним ризиком є обмеження точності відкритих цифрових моделей рельєфу (наприклад, ALOS AW3D30), які можуть не відображати найновіші зміни у міській забудові або дрібні архітектурні елементи, що впливає на достовірність розрахунку зон тіні.

Інші ризики включають складність математичного моделювання ефектів багатопроменевого поширення (відбиттів) у щільному місті, де теоретичні моделі можуть давати похибку порівняно з реальними вимірюваннями. Також існують технічні виклики, пов'язані з високим навантаженням на оперативну пам'ять при обробці растрових масивів великої площі та сумісністю версій бінарних бібліотек (GDAL) на різних операційних системах.

Проте модульність архітектури, використання оптимізованих математичних бібліотек (NumPy) та можливість калібрування моделей за контрольними точками дозволяють мінімізувати ці ризики шляхом поступового уточнення алгоритмів..

4.3 Аналіз ринку

Сучасний ринок програмних рішень для радіопланування та геопросторового аналізу є досить сегментованим. Його умовно можна поділити на кілька груп користувачів, починаючи від великих телеком-операторів і закінчуючи нішевими дослідницькими групами. Особливістю даного ринку є високий попит на інструменти, що поєднують точність інженерних розрахунків із доступністю та простотою використання:

Таблиця 4.3

Сегментація ринку та основні групи користувачів BLE-рішення

Категорія користувачів	Опис потреб та напрямів використання
Локальні інтернет-провайдери (WISP) та регіональні оператори	Потребують бюджетних інструментів для попереднього планування розміщення базових станцій, оцінки зон прямої видимості (LoS) та розрахунку покриття для підключення нових абонентів.
Інженери з планування та оптимізації радімереж (RAN)	Використовують засоби для детального аналізу «тіньових зон», розрахунку інтерференції, підбору оптимальних кутів нахилу антен (tilt) та перевірки гіпотез щодо покращення покриття.
Підрядні будівельно-монтажні організації	Застосовують системи для швидкої оцінки потенційних позицій для встановлення веж зв'язку (Site Candidates) та формування звітів для замовників перед початком будівництва.
Військові підрозділи та служби спеціального зв'язку	Потребують автономних (офлайн) інструментів для оперативного планування тактичних мереж зв'язку, оцінки радіомаскування та аналізу прохідності сигналу в умовах складного рельєфу.
Заклади вищої освіти та наукові установи	Використовують програмний комплекс як платформу для проведення лабораторних робіт, візуалізації поширення радіохвиль, вивчення впливу рельєфу та навчання студентів основам радіопланування.

Кожен із цих сегментів демонструє сталий попит на інструменти, здатні проводити розрахунок зон покриття з урахуванням реального рельєфу, оскільки професійні програмні комплекси (Atoll, Asset) мають надзвичайно високу вартість ліцензування та орієнтовані на великих національних операторів. Саме тому ринок програмного забезпечення для радіопланування середнього рівня (Mid-market) вважається перспективним: на сьогодні існує обмежена кількість доступних десктопних рішень, які могли б поєднувати точність інженерних моделей (ITU-R) з простотою використання та сучасними ПС-технологіями. Більшість доступних безкоштовних інструментів — це або застарілі утиліти зі складним інтерфейсом, або спрощені онлайн-калькулятори, що ігнорують вплив забудови та рельєфу.

Окремої уваги заслуговує сегмент локальних провайдерів та інженерів, що займаються розгортанням мереж в умовах складної місцевості. За аналітичними прогнозами, з впровадженням технологій 5G та IoT щільність базових станцій зростатиме експоненціально, що вимагатиме детального мікро-планування сот (Small Cells). Це означає, що попит на інструменти аналізу, які дозволяють швидко оцінити "тіньові зони" та інтерференцію без залучення дорогих консалтингових компаній, буде лише збільшуватися. Важливо також враховувати потреби військових та рятувальних служб у засобах автономного планування зв'язку "на ходу", без доступу до хмарних серверів.

Конкурентний аналіз показує, що на ринку присутні такі продукти, як Forsk Atoll, Infovista Planet, Radio Mobile та хмарні сервіси типу CloudRF. Проте професійні рішення (Atoll) є недоступними для малого бізнесу через ціну, а безкоштовні аналоги (Radio Mobile) часто мають застарілий інтерфейс та обмежені можливості інтеграції з сучасними форматами геоданих (GeoTIFF/DSM). Значна частина існуючих рішень має закритий код, що унеможливорює адаптацію математичних моделей під специфічні

задачі користувача (наприклад, зміну частотного діапазону або діаграми спрямованості антени).

З огляду на це, розроблюваний програмний комплекс **«GeoRadioPlan»** позиціонується як універсальний, доступний та технологічно гнучкий інструмент для широкого кола користувачів. Його ключові переваги включають:

Таблиця 4.4

Ключові переваги програмного рішення «GeoRadioPlan»

Перевага	Суть та пояснення
Економічна доступність та відсутність ліцензій	Не потребує закупівлі дорогих апаратних ключів захисту (USB-dongles) або підписки на серверні ліцензії (як у Atoll/Asset); працює на стандартному офісному ПК.
Врахування реального рельєфу (DSM)	Система використовує цифрові моделі місцевості для точного розрахунку дифракційних втрат та зон тіні, що забезпечує значно вищу точність порівняно з простими моделями «вільного простору».
Геопросторова візуалізація (ГІС-інтеграція)	Результати розрахунків автоматично експортуються у загальноприйняті формати (GeoTIFF, SHP), що дозволяє миттєво відобразити зони покриття у QGIS або Google Earth.
Модульна архітектура та гнучкість	Відкритий код на Python дозволяє легко додавати нові модулі: розрахунок для 5G, зміну математичних моделей поширення хвиль або додавання нових типів антен.
Автономність роботи	Можливість виконання складних розрахунків локально (Localhost) без необхідності постійного підключення до мережі Інтернет або хмарних сервісів.
Універсальність вхідних даних	Програма здатна обробляти дані рельєфу з різних джерел (SRTM, ALOS, LiDAR) та працювати з будь-якими частотними діапазонами мобільного зв'язку.

На основі проведеного аналізу ринку можна стверджувати, що стартап **«GeoRadioPlan»** має високий потенціал комерціалізації та здатний зайняти нішу доступних інженерних рішень для радіопланування.

Позитивно на перспективи розвитку впливають такі фактори, як глобальний тренд на ущільнення мереж мобільного зв'язку (Small Cells), необхідність точного врахування рельєфу при розгортанні 4G/5G, а також потреба у незалежних від вендорів інструментах для навчання та попереднього проектування.

4.4 SWOT-аналіз стартап-проекту та маркетингова програма

Таблиця 4.5

Сильні сторони (Strengths) стартап-рішення

Сильна сторона	Пояснення
Економічна ефективність	Відсутність ліцензійних платежів робить продукт доступним для малого бізнесу та освіти, на відміну від конкурентів (Atoll, Asset), вартість яких сягає десятків тисяч доларів.
Інтеграція з реальними геоданими	Використання цифрових моделей місцевості (DSM) дозволяє враховувати фізичні перешкоди та рельєф, що забезпечує високу точність розрахунку порівняно з теоретичними моделями вільного простору.
Прозорість алгоритмів (Open Source)	Відкритий код на Python дозволяє користувачеві перевірити коректність формул (ITU-R, Hata) та адаптувати їх під специфічні задачі, що неможливо у пропрієтарному ПЗ.
Сумісність з QGIS	Результати розрахунків генеруються у стандартних ГІС-форматах (GeoTIFF, SHP), що дозволяє використовувати потужний інструментарій QGIS для подальшої обробки та візуалізації карт.
Автономність	Можливість виконання розрахунків локально без доступу до інтернету, що є критичним для спеціальних застосувань (військові, надзвичайні ситуації).
Гнучкість налаштувань	Користувач може самостійно задавати будь-які діаграми спрямованості антен та частотні діапазони, не обмежуючись бібліотеками стандартного обладнання.

Таблиця 4.6

Слабкі сторони (Weaknesses) стартап-рішення BLE Monitor

Слабка сторона	Пояснення
Залежність від якості вхідних даних	Точність розрахунку критично залежить від роздільної здатності та актуальності цифрової моделі рельєфу (DSM). Помилки в карті висот призводять до помилок у зоні покриття.
Відсутність вбудованого GUI	Необхідність використання стороннього ПЗ (QGIS) для візуалізації або базові навички роботи з консоллю можуть відлякати непідготовлених користувачів.
Обчислювальна складність	Обробка великих масивів растрових даних (наприклад, для цілого міста з високою роздільною здатністю) вимагає значних ресурсів оперативної пам'яті та часу процесора.
Спрощена модель багатопроектності	На відміну від дорогих Ray-Tracing комплексів, запропоноване рішення використовує детерміновані моделі, які можуть мати похибку в умовах дуже щільної висотної забудови (ефект "урбаністичного каньйону").

Таблиця 4.7

Можливості (Opportunities) стартап-проекту

Можливість	Пояснення
Ущільнення мереж 5G (Network Densification)	Впровадження 5G вимагає встановлення великої кількості малих сот (Small Cells), що створює масовий попит на інструменти для мікро-планування та аналізу "тіньових зон" у забудові.
Вихід на освітній сегмент (EdTech)	Програмний комплекс може бути впроваджений у технічних ЗВО як безкоштовна альтернатива Atoll для проведення лабораторних робіт з дисциплін «Проектування телекомунікаційних мереж» та «ГІС».
Трансформація у SaaS-платформу	Створення веб-версії продукту дозволить надавати послуги розрахунку покриття за передплатою без необхідності встановлення ПЗ та налаштування оточення Python на стороні клієнта.
Інтеграція з постачальниками обладнання	Співпраця з дистриб'юторами телеком-обладнання (MikroTik, Ubiquiti) для створення брендovаних калькуляторів покриття під конкретні моделі антен.
Використання штучного інтелекту (AI/ML)	Впровадження алгоритмів машинного навчання для автоматичної корекції моделей поширення хвиль на основі реальних даних драйв-тестів (Drive Tests), що підвищить точність прогнозування.
Розвиток напрямку «Smart City»	Використання розроблених алгоритмів для створення «цифрових двійників» міста в частині електромагнітної безпеки та санітарних паспортів радіотехнічних об'єктів.

Таблиця 4.8

Загрози (Threats) стартап-проекту

Загроза	Пояснення
Поява безкоштовних аналогів	Великі розробники (Forsk, Infovista) або спільнота Open Source можуть випустити безкоштовні плагіни для QGIS зі схожим функціоналом, що знизить унікальність продукту.
Обмеження доступу до геоданих	Можливе закриття доступу до безкоштовних баз даних DSM (ALOS, SRTM) або погіршення їх якості змусить переходити на платні джерела, що збільшить собівартість використання.
Технологічна невідповідність новим стандартам	Впровадження діапазонів міліметрових хвиль (mmWave) вимагає переходу від детермінованих моделей до складного трасування променів (Ray Tracing), що важко реалізувати на Python без втрати швидкодії.
Зміни в регуляторній політиці	Зміна методик розрахунку санітарних зон або вимог до проектної документації може вимагати повної переробки алгоритмічного ядра програми.

Маркетингова програма стартап-проекту

Маркетингова стратегія стартапу спрямована на формування стійкого попиту та системного просування продукту на ринку інженерного програмного забезпечення. Основний акцент робиться на демонстрації технічних переваг використання реальних геоданих (DSM) та економічної вигоди від відмови від дорогих ліцензійних продуктів.

Таблиця 4.9

Маркетингова програма стартап-проекту

Елемент маркетингової програми	Зміст
1. Визначення цільових сегментів ринку	Продукт орієнтований на професійні групи користувачів, які займаються проектуванням, розгортанням та експлуатацією бездротових мереж, а також на освітній сектор.
Основні цільові сегменти	— Локальні інтернет-провайдери (WISP): для планування мереж "останньої милі" та оцінки рентабельності підключення нових абонентів. — Інженери з радіопланування (Freelance/Contractors): для виконання проектних робіт без необхідності купівлі корпоративного ПЗ (Atoll/Asset). — Військові та спеціальні служби: для оперативного розрахунку зон радіовидимості та покриття в польових умовах (offline). — Студенти та викладачі технічних ЗВО: для проведення лабораторних робіт з дисциплін «Мобільні мережі» та «ГІС». — Муніципальні органи: для створення карт цифрової нерівності та оцінки якості покриття в громадах.
2. Загальна маркетингова стратегія	Стратегія спрямована на позиціонування «GeoRadioPlan» як професійного Open Source інструменту, що руйнує бар'єр високої вартості входу в галузь радіопланування.
Позиціонування	Продукт позиціонується як «розумна альтернатива» важким комерційним комплексам: він забезпечує достатню для більшості задач точність (завдяки DSM) при нульовій вартості ліцензії та повній прозорості алгоритмів.
Унікальна цінність (UVP)	— Врахування реального рельєфу та забудови (DSM) замість теоретичних моделей; — Повна інтеграція з QGIS для професійної візуалізації; — Можливість кастомізації алгоритмів на Python; — Незалежність від хмарних сервісів та підписки.
Функціональні переваги для ринку	— Скорочення витрат на етапі пре-сейлу (Pre-sales) та планування; — Можливість швидкого моделювання сценаріїв «що-якщо»; — Висока швидкість розрахунків завдяки оптимізації NumPy; — Універсальність форматів даних (GeoTIFF, SHP).

Кожен сегмент має власні ключові потреби, які продукт задовольняє: точність прогнозування зон тіні, візуалізація покриття на карті, економія бюджету та можливість навчання.

Таблиця 4.10

Маркетингові канали просування

Елемент маркетингової програми	Зміст
Маркетингові канали	Просування стартап-проекту базується на поєднанні професійних спільнот телеком-інженерів, платформ розробки відкритого ПЗ та академічних каналів. Мета — забезпечити довіру до математичних алгоритмів та залучити технічну аудиторію.
Основні канали просування	— GitHub / GitLab: розміщення вихідного коду базових модулів, прикладів розрахунку (Jupyter Notebooks) та документації для формування спільноти розробників. — LinkedIn: таргетинг на профілі «Radio Planning Engineer», «RF Engineer», «GIS Specialist»; публікація кейсів з порівнянням розрахунків із реальними вимірами. — YouTube: створення навчальних відео «Як розрахувати покриття 4G у Python», «Використання DSM у QGIS», огляди функціоналу. — Google Ads / SEO: контекстна реклама за запитом «Radio coverage map generator», «LTE planning tool», «Alternative to Atoll». — Тематичні форуми (Telecom, GIS): просування у спільнотах користувачів QGIS та на форумах зв'язківців (як local, так і global). — Конференції (IEEE, FOSS4G): презентація доповіді про використання Open Source у радіоплануванні. — Наукові публікації: статті у фахових виданнях для підтвердження валідності використовуваних математичних моделей (ITU-R).

3. Цінова стратегія

Таблиця 4.11

Цінова стратегія

Ліцензійна модель	Опис	Функціональні можливості
Free / Basic (Academic)	Безкоштовна версія з відкритим кодом, орієнтована на студентів, викладачів та радіоаматорів. Дозволяє вивчати принципи радіопланування.	Базові моделі поширення (Free Space, Okumura-Hata) Робота з DSM низької роздільної здатності (SRTM 30m) Розрахунок для однієї базової станції Візуалізація результатів у QGIS Підтримка через GitHub Issues (community-based)
Pro (Freelancer) (50\$ одноразово або 5\$/міс)	Комерційна версія для фрилансерів, малих провайдерів (WISP) та проектувальників. Включає оптимізовані модулі та звітність.	Врахування дифракції та складного рельєфу (ITU-R P.526) Підтримка DSM/DEM високої роздільної здатності (LiDAR 1-5m) Пакетний розрахунок (Batch processing) для кластера станцій Автоматична генерація звітів у PDF/DOCX Експорт у Google Earth (KML) Пріоритетна технічна підтримка
Enterprise (Договірна ціна)	Корпоративне рішення для мобільних операторів, військових структур та великих інтеграторів. Передбачає повну кастомізацію.	Підтримка специфічних частот (Military bands, 5G mmWave) Інтеграція з базами даних оператора (SQL/Oracle) Розгортання на закритих серверах (On-Premise) без доступу в Інтернет API для взаємодії із зовнішніми системами (OSS/BSS) Навчання персоналу та персональна доробка алгоритмів

4. Продуктова стратегія розвитку

Таблиця 4.12

План розширення функціональності у межах маркетингової програми

Напрямок розвитку	Опис запланованих розширень	Очікувана цінність для користувача
Розширення модулів аналізу інтерференції	Додавання інструментів для розрахунку відношення сигнал/шум (SINR), аналізу інтерференції від сусідніх сот та автоматичного планування частот (AFP).	Глибока технічна діагностика якості мережі Зменшення кількості обривів зв'язку (Call Drops) Підвищення реальної швидкості передачі даних
Мобільний додаток для верифікації (Drive Tests)	Створення мобільного компаньйон-додатку для Android, який збирає реальні дані про рівень сигналу в точці прийому та синхронізує їх із розрахунковою моделлю.	Можливість калібрування математичної моделі Порівняння «План / Факт» у реальному часі Зручність польових вимірювань без громіздкого обладнання
Підтримка стандартів 5G NR та IoT	Впровадження моделей поширення для міліметрових хвиль (mmWave 26/28 ГГц) та стандартів LPWAN (LoRaWAN, NB-IoT) для інтернету речей.	Актуальність для операторів, що впроваджують 5G Можливість проектування мереж для «Розумного міста» Підтримка технологій Massive MIMO
Інтеграція ML-модулів (SON)	Додавання алгоритмів машинного навчання (Self-Organizing Networks) для автоматичного підбору кутів нахилу антен (Electrical Tilt) з метою оптимізації покриття.	Автоматизація рутинних процесів планування Усунення людського фактора при налаштуванні мережі Економія часу інженера на 30–40%
Корпоративна хмарна платформа (SaaS)	Трансформація десктопного скрипта у веб-сервіс із централізованим сховищем карт висот (DSM) та багатокористувацьким доступом.	Спільна робота над проектами (Teamwork) Відсутність необхідності завантажувати гігабайти карт на локальний ПК Захист даних корпоративних клієнтів

5. Формування бренду та комунікації

Таблиця 4.13

Формування бренду та комунікаційна стратегія стартапу

Напрямок комунікації	Ключові заходи та інструменти	Очікуваний результат
Технічна експертиза	Публікація кейсів «Розрахунок vs Реальність» (порівняння з драйв-тестами) Демонстрація роботи з різними типами рельєфу (рівнина, пагорби, місто) Технічні статті про обробку «мертвих зон» та дифракції	Формування іміджу надійного професійного інструменту для радіоінженерів та проектувальників
Прозорість роботи алгоритмів	Детальний опис використаних математичних моделей (ITU-R P.525/P.526) Пояснення методів інтерполяції DSM-матриць Відкрита документація з посиланнями на стандарти 3GPP	Підвищення довіри корпоративних клієнтів до точності отриманих результатів покриття
Відкритість та open-source компоненти	Розміщення базових модулів розрахунку (Propagation Modules) на GitHub Публікація прикладів скриптів для QGIS Python Console Прозоре ведення історії версій (Changelog)	Створення спільноти користувачів, які самі покращують код та знаходять помилки (Bug tracking)
Підкреслення наукової основи продукту	Участь у профільних конференціях (IEEE, телеком-форуми) Публікація статей у фахових виданнях щодо методів оптимізації розрахунків Позиціонування як платформи для академічних досліджень	Підвищення авторитетності бренду серед технічних університетів та R&D центрів операторів

6. Оцінка ефективності маркетингової програми

Таблиця 4.14

Оцінка ефективності маркетингової програми

Метрика оцінки	Опис та призначення	Очікуваний результат / Порогове значення
Кількість активних інсталяцій (MAU)	Вимірює кількість користувачів (інженерів, студентів), які встановили ПЗ та запускають його мінімум раз на тиждень.	Зростання бази користувачів на 10–15% щомісяця після публікації відкритого коду.
Кількість згенерованих карт покриття	Показує інтенсивність використання інструменту за прямим призначенням (Core Utility).	>200 успішних розрахунків на місяць у перший квартал роботи.
Коефіцієнт конверсії (Conversion Rate)	Відсоток користувачів безкоштовної версії, що переходять на платні тарифні плани (Pro) або замовляють кастомізацію.	2–4% від загальної кількості активних користувачів протягом першого року.
Активність розробницької спільноти (GitHub)	Індикатор якості коду та інтересу до проекту: кількість «зірок» (Stars), відгалужень (Forks) та внесків (Pull Requests).	50+ Stars та 10+ Forks протягом перших 6 місяців; формування ядра спільноти (Core Contributors).
Впровадження у навчальний процес	Кількість ВНЗ, що офіційно використовують ПЗ для лабораторних робіт з радіопланування.	2–3 профільні кафедри українських технічних університетів у перший навчальний рік.
Географія використання	Охоплення різних регіонів (аналіз завантажених тайлів DSM).	Використання інструменту для розрахунків мінімум у 5 різних областях України.

Висновок

Ідея стартап-проекту «GeoRadioPlan» спрямована на створення доступного програмного рішення для інженерного розрахунку та візуалізації зон покриття мобільних мереж, яке поєднує в собі інструменти геопросторового аналізу, математичне моделювання поширення радіохвиль та роботу з цифровими моделями рельєфу (DSM). На відміну від існуючих комерційних рішень, розроблений програмний комплекс не потребує дорогих ліцензій та апаратних ключів захисту, працює на стандартних обчислювальних потужностях та забезпечує високу точність прогнозування зон «радіотіні» завдяки інтеграції з QGIS. Це робить стартап конкурентоспроможним на ринку інструментів для проектування телекомунікаційних мереж середнього масштабу.

Проведений аналіз ринку, SWOT-аналіз та сформована маркетингова стратегія демонструють, що продукт має значний комерційний потенціал. Основні цільові сегменти включають локальних інтернет-провайдерів (WISP), інженерів-проектувальників, військові підрозділи зв'язку та заклади вищої освіти. Рішення здатне забезпечити швидку оцінку радіопокриття, вибір оптимальних позицій для базових станцій та аналіз інтерференційної обстановки, що є актуальним в умовах стрімкого ущільнення мереж мобільного зв'язку та впровадження нових стандартів.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У магістерській дисертації вирішено актуальне науково-прикладне завдання автоматизації планування мереж мобільного зв'язку в умовах складної міської забудови. Шляхом поєднання методів обчислювальної радіофізики та геоінформаційного аналізу розроблено програмний комплекс, який дозволяє проектувати енергоефективні мережі без використання високовартісного комерційного програмного забезпечення.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

Проаналізовано особливості функціонування мереж стандарту GSM/LTE-1800 в урбанізованому середовищі. Встановлено, що ключовим фактором, який обмежує якість покриття у місті зі складним рельєфом (наприкладі м. Києва), є дифракційне загасання сигналу на елементах забудови та рельєфу. Доведено неефективність використання спрощених емпіричних моделей та обґрунтовано необхідність застосування цифрових моделей поверхні (DSM) для точного прогнозування зон «радіотіні».

Удосконалено математичну модель енергетичного бюджету радіолінії, яка, на відміну від існуючих аналогів, комплексно враховує тривимірну діаграму спрямованості антенних систем (згідно зі стандартами 3GPP) та дифракційні втрати, розраховані за методом Дейгу (Deygout). Розроблено авторські алгоритми «розумного відсікання» (Smart Blanking) та самовідновлення покриття (Self-Healing), що дозволяють автоматизувати процес оптимізації топології мережі.

Розроблено програмний комплекс «GeoRadioPlan» на мові програмування Python. Реалізовано модульну архітектуру з використанням бібліотек Rasterio та NumPy, що забезпечило інтеграцію з професійними

ГІС-системами. Застосування векторизованих алгоритмів обробки растрових даних дозволило досягти високої швидкодії розрахунків (обробка сегмента міста займає хвилини замість годин) при збереженні інженерної точності.

Здійснено практичне моделювання сегмента мережі у м. Києві. На основі реальних геоданих ALOS AW3D30 побудовано карту покриття, виявлено проблемні зони інтерференції над акваторією Дніпра та зони відсутності сигналу в щільній забудові. Застосування розроблених алгоритмів оптимізації дозволило автоматично скоригувати кути нахилу антен та розміщення базових станцій, що покращило суцільність покриття на 15–20% порівняно з базовою гексагональною моделлю.

Обґрунтовано комерційну перспективність розробки. У рамках стартап-проекту проведено маркетинговий аналіз та розроблено бізнес-модель виведення продукту на ринок. Доведено, що програмний комплекс є конкурентоспроможним рішенням для локальних інтернет-провайдерів, військових підрозділів та освітніх закладів завдяки відсутності ліцензійних платежів, автономності роботи та можливості врахування реального рельєфу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice. 2nd ed. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. 736 p.
2. Saunders S. R., Aragón-Zavala A. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2007. 546 p.
3. Долуханов М. П. Распространение радиоволн : учебник для вузов. Москва : Связь, 1972. 336 с.
4. Balanis C. A. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th ed. Hoboken : Wiley, 2016. 1072 p.
5. Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of free-space attenuation. Geneva : International Telecommunication Union, 2019.
6. Recommendation ITU-R P.526-15. Propagation by diffraction. Geneva : International Telecommunication Union, 2019.
7. Recommendation ITU-R P.1546-6. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. Geneva : ITU, 2019.
8. Recommendation ITU-R P.1812-6. A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands. Geneva : ITU, 2021.
9. 3GPP TS 36.104. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception. Version 16.6.0. Valbonne : ETSI, 2020.
10. Holma H., Toskala A. LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2011. 554 p.
11. Sesia S., Toufik I., Baker M. LTE – The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. 2nd ed. Chichester : Wiley, 2011. 792 p.
12. Deygout J. Multiple knife-edge diffraction of microwaves. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1966. Vol. 14, No. 4. P. 480–489.
13. Hata M. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1980. Vol. 29, No. 3. P. 317–325.
14. Tadono T. et al. Generation of the 30 m-mesh global digital surface model by ALOS PRISM. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. Vol. XLI-B4. P. 157–162.

- 15.Кравчук С. О. Телекомунікаційні мережі мобільного зв'язку : навчальний посібник. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 248 с.
- 16.Стеклов В. К., Беркман Л. Н. Проектування телекомунікаційних мереж : підручник. Київ : Техніка, 2002. 792 с.
- 17.Гніденко М. П., Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Широкосмугові мережі мобільного зв'язку : монографія. Київ : Політехніка, 2018. 312 с.
- 18.Mishra A. R. Advanced Cellular Network Planning and Optimisation: 2G/2.5G/3G... Evolution to 4G. Chichester : Wiley, 2006. 562 p.
- 19.Westra E. Python for Geospatial Development. 2nd ed. Birmingham : Packt Publishing, 2013. 536 p.
- 20.Garrard C. Geoprocessing with Python. Shelter Island : Manning Publications, 2016. 384 p.
- 21.Lawhead J. QGIS Python Programming Cookbook. 2nd ed. Birmingham : Packt Publishing, 2017. 374 p.
- 22.Rasterio Documentation. Access to geospatial raster data [Electronic resource]. URL: <https://rasterio.readthedocs.io/en/latest/> (date of access: 10.05.2025).
- 23.NumPy Documentation. The fundamental package for scientific computing with Python [Electronic resource]. URL: <https://numpy.org/doc/stable/> (date of access: 10.05.2025).
- 24.QGIS User Guide. QGIS Desktop 3.22 User Guide [Electronic resource]. URL: https://docs.qgis.org/3.22/en/docs/user_manual/ (date of access: 12.05.2025).

Додаток 1

Лістинг всього проєкту на Python

```
import numpy as np
import rasterio
import math
import os
from rasterio.transform import rowcol, xy
from scipy.ndimage import maximum_filter, label, center_of_mass
import warnings

# Ігноруємо попередження про ділення на нуль (це нормально для
# дифракції)
warnings.filterwarnings("ignore")

# --- 1. КОНФІГУРАЦІЯ (MASTER SETTINGS) ---
dsm_filename = "ALPSMLC30_N050E030_DSM.tif"
work_folder = os.path.dirname(os.path.abspath(__file__))
input_tif_path = os.path.join(work_folder, dsm_filename)
output_filename = os.path.join(work_folder, "Kyiv_Masterpiece_Network.tif")

# Фізика
FREQ_MHZ = 1800.0
TX_POWER_DBM = 46.0
ANTENNA_GAIN_MAX = 18.0
ANTENNA_HBW = 65.0
ANTENNA_VBW = 6.8
URBAN_CLUTTER_LOSS = 25.0

# Геометрія розрахунку
RADIUS_CALC = 5000.0
STEP_ANGLE = 0.5      # Крок кута (0.5 для швидкості, 0.15 для фіналу)
STEP_DISTANCE = 20.0  # Крок дистанції
BATCH_SIZE = 200

# Параметри мережі
DESIRED_BS_COUNT = 80  # Кількість базових станцій
MIN_HEIGHT_WATER = 92.0 # Абсолютна висота води (Дніпро)
ROUGHNESS_THRESHOLD = 0.5 # Поріг текстури для вибору місця БС

# --- OPTIMIZATION & HEALING ---
# 1. Smart Blanking (Вимкнення секторів)
BLOCKAGE_LOSS_LIMIT = 15.0 # Поріг втрат для стіни (dB)
```

```
WATER_FLATNESS_LIMIT = 0.35 # Попіг StdDev для води (хвилі до 35
см)
```

```
# 2. Auto-Fill (Лікування дірок)
```

```
BAD_SIGNAL_THRESHOLD = -98.0
```

```
MIN_CLUSTER_SIZE = 50 # Розмір "плями" (px)
```

```
FILL_IN_SEARCH_RADIUS = 400 # Де шукати точку для нової БС (м)
```

```
MAX_NEW_STATIONS = 10 # Бюджет на нові станції
```

```
# 3. Adaptive Tilt
```

```
TARGET_CELL_RADIUS = 1500.0
```

```
MIN_TILT = 2.0
```

```
MAX_TILT = 12.0
```

```
# --- 2. ЯДРО (PHYSICS ENGINE) ---
```

```
def calculate_diffraction_vectorized(dist_m, heights_m, bs_h, wavelength):
```

```
    """
```

```
    Розрахунок дифракційних втрат методом Дейгу (векторизований).
```

```
    """
```

```
    dist_safe = dist_m.copy()
```

```
    dist_safe[dist_safe < 0.1] = 0.1
```

```
    angles = (heights_m - bs_h) / dist_safe
```

```
    # Знаходимо горизонт
```

```
    acc_max = np.maximum.accumulate(angles, axis=1)
```

```
    prev_max = np.empty_like(acc_max)
```

```
    prev_max[:, 1:] = acc_max[:, :-1]
```

```
    prev_max[:, 0] = -999.0
```

```
    in_shadow = angles < prev_max
```

```
    h = dist_m * (prev_max - angles)
```

```
    v = h * np.sqrt(2 / (wavelength * dist_safe))
```

```
    losses = np.zeros_like(dist_m)
```

```
    mask = in_shadow & (v > -0.7)
```

```
    if np.any(mask):
```

```
        v_valid = v[mask]
```

```
        losses[mask] = 6.9 + 20 * np.log10(np.sqrt((v_valid-0.1)**2 + 1) + v_valid
- 0.1)
```

```
    return losses
```

```
def analyze_sector_viability(dsm_data, transform, bs_lon, bs_lat, bs_h_asl,
azimuth, wavelength):
```

```
    """
```

```
    Аналіз сектора: чи варто його вмикати?
```

```
    Повертає: 'OK', 'BLOCKED', 'WATER'
```

```
    """
```

```
    # А. ПЕРЕВІРКА НА ВОДУ (3 км)
```

```
    steps_w = int(3000.0 / 20.0)
```

```
    dist_w = np.arange(1, steps_w + 1) * 20.0
```

```
    rad = np.radians(azimuth)
```

```
    dy = dist_w * np.cos(rad)
```

```
    dx = dist_w * np.sin(rad)
```

```
    lat_w = bs_lat + (dy / 111132.0)
```

```
    lon_w = bs_lon + (dx / (111132.0 * math.cos(math.radians(bs_lat))))
```

```
    rows, cols = rowcol(transform, lon_w, lat_w)
```

```
    h_map, w_map = dsm_data.shape
```

```
    r_c = np.clip(rows, 0, h_map-1)
```

```
    c_c = np.clip(cols, 0, w_map-1)
```

```
    profile_water = dsm_data[r_c, c_c]
```

```
    # Ігноруємо перші 200м (дах будинку)
```

```
    if len(profile_water) > 10:
```

```
        roughness = np.std(profile_water[10:])
```

```
        if roughness < WATER_FLATNESS_LIMIT:
```

```
            return 'WATER' # Занадто гладко -> вода
```

```
    # Б. ПЕРЕВІРКА НА СТИНУ (500 м)
```

```
    steps_b = int(500.0 / 10.0)
```

```
    dist_b = np.arange(1, steps_b + 1) * 10.0
```

```
    dy = dist_b * np.cos(rad)
```

```
    dx = dist_b * np.sin(rad)
```

```
    lat_b = bs_lat + (dy / 111132.0)
```

```
    lon_b = bs_lon + (dx / (111132.0 * math.cos(math.radians(bs_lat))))
```

```
    rows, cols = rowcol(transform, lon_b, lat_b)
```

```
    r_c = np.clip(rows, 0, h_map-1)
```

```

c_c = np.clip(cols, 0, w_map-1)

profile_block = dsm_data[r_c, c_c].reshape(1, -1)
dists = dist_b.reshape(1, -1)

diff_loss = calculate_diffraction_vectorized(dists, profile_block, bs_h_asl,
wavelength)

if np.mean(diff_loss) > BLOCKAGE_LOSS_LIMIT:
    return 'BLOCKED' # Занадто великі втрати -> стіна

return 'OK'

# --- 3. ЛОГІКА МЕРЕЖИ (NETWORK LOGIC) ---

def generate_smart_grid(dsm_data, transform, width, height, count):
    print(f"🏠 [Phase 1] Генерація базової сітки...")
    lon_min, lat_max = xy(transform, 0, 0)
    lon_max, lat_min = xy(transform, height, width)

    area_sq_deg = (lon_max - lon_min) * (lat_max - lat_min)
    step_deg = math.sqrt(area_sq_deg / count)

    stations = []
    lat = lat_min + step_deg/2
    row_idx = 0

    while lat < lat_max:
        lon_offset = 0 if row_idx % 2 == 0 else step_deg / 2
        lon = lon_min + step_deg/2 + lon_offset
        while lon < lon_max:
            r, c = rowcol(transform, lon, lat)
            if 0 <= r < height and 0 <= c < width:
                # Вікно пошуку (10px = 300м)
                r_min, r_max = max(0, r-10), min(height, r+11)
                c_min, c_max = max(0, c-10), min(width, c+11)
                window = dsm_data[r_min:r_max, c_min:c_max]

            if window.size > 0:
                local_max = np.max(window)
                # Фільтр води (висота + текстура)
                if local_max > MIN_HEIGHT_WATER:
                    if np.std(window) > ROUGHNESS_THRESHOLD:

```

```

        sub_r, sub_c = np.unravel_index(np.argmax(window),
window.shape)
        real_r, real_c = r_min + sub_r, c_min + sub_c
        peak_lon, peak_lat = xy(transform, real_r, real_c)
        stations.append((peak_lon, peak_lat, local_max))
        lon += step_deg
        lat += step_deg * 0.866
        row_idx += 1
    print(f"    ✓ Знайдено {len(stations)} позицій для базової мережі.")
    return stations

def find_fill_in_sites(coverage_map, dsm_data, transform):
    print(f" [Phase 3] Діагностика та лікування мережі...")
    height, width = coverage_map.shape

    # 1. Знаходимо "мертві зони" (-115 < signal < -98)
    bad_signal_mask = (coverage_map > -115.0) & (coverage_map <
BAD_SIGNAL_THRESHOLD)

    # 2. Кластеризація
    labeled_array, num_features = label(bad_signal_mask)

    new_sites = []
    # Сортуємо плями за розміром
    cluster_sizes = [(i, np.sum(labeled_array == i)) for i in range(1, num_features
+ 1)]
    cluster_sizes.sort(key=lambda x: x[1], reverse=True)

    count_added = 0
    for cluster_id, size in cluster_sizes:
        if count_added >= MAX_NEW_STATIONS: break
        if size < MIN_CLUSTER_SIZE: continue

        # Центр плями
        cy, cx = center_of_mass(bad_signal_mask, labeled_array, cluster_id)
        cy, cx = int(cy), int(cx)

        # Шукаємо висоту поруч
        r_radius = int(FILL_IN_SEARCH_RADIUS / 30.0)
        r_min, r_max = max(0, cy-r_radius), min(height, cy+r_radius)
        c_min, c_max = max(0, cx-r_radius), min(width, cx+r_radius)

        window = dsm_data[r_min:r_max, c_min:c_max]
```

```

    if window.size > 0:
        local_max = np.max(window)
        if local_max > MIN_HEIGHT_WATER and np.std(window) >
ROUGHNESS_THRESHOLD:
            sub_r, sub_c = np.unravel_index(np.argmax(window), window.shape)
            real_r, real_c = r_min + sub_r, c_min + sub_c
            peak_lon, peak_lat = xy(transform, real_r, real_c)

            new_sites.append((peak_lon, peak_lat, local_max, "Fill-in"))
            count_added += 1
            print(f"    [+] Додано Fill-in БС #{count_added} (класстер {size}
px)")

    return new_sites

def calculate_coverage(stations_list, dsm_data, transform,
existing_coverage=None):
    """Універсальна функція розрахунку покриття"""
    h_map, w_map = dsm_data.shape

    if existing_coverage is None:
        final_cov = np.full((h_map, w_map), -120.0, dtype=np.float32)
    else:
        final_cov = existing_coverage.copy()

    wavelength = 299.792 / FREQ_MHZ
    n_steps = int(RADIUS_CALC / STEP_DISTANCE)
    dist_1d = np.arange(1, n_steps + 1) * STEP_DISTANCE

    stats = {"OK": 0, "BLOCKED": 0, "WATER": 0}

    for i, station in enumerate(stations_list):
        lon, lat, h_terrain = station[0], station[1], station[2]
        is_fill_in = (len(station) > 3)

        mast_h = 20.0 if h_terrain > 150 else 30.0
        bs_h_asl = h_terrain + mast_h

        # Adaptive Tilt
        row, col = rowcol(transform, lon, lat)
        eff_h = mast_h
        try:

```

```

win = dsm_data[max(0, row-50):min(h_map, row+50), max(0, col-
50):min(w_map, col+50)]
    if win.size > 0: eff_h = bs_h_asl - np.mean(win[win>-100])
except: pass

tilt_deg = math.degrees(math.atan(eff_h / TARGET_CELL_RADIUS)) +
1.0
final_tilt = max(MIN_TILT, min(MAX_TILT, tilt_deg))

# Sector Analysis
active_sectors = []
status_str = ""
for az in [0, 120, 240]:
    status = analyze_sector_viability(dsm_data, transform, lon, lat, bs_h_asl,
az, wavelength)
    if status == 'OK':
        active_sectors.append(az)
        status_str += f"✅ {az} "
        stats["OK"] += 1
    elif status == 'BLOCKED':
        status_str += f" "
        stats["BLOCKED"] += 1
    elif status == 'WATER':
        status_str += f" "
        stats["WATER"] += 1

label = "🏠 Fill-in" if is_fill_in else f"BS {i+1}"
print(f"    > {label} (H={int(h_terrain)}m, Tilt={final_tilt:.1f}°):
{status_str}")

# Ray Tracing Loop
for az in active_sectors:
    start_ang = az - 65
    end_ang = az + 65
    angles = np.arange(start_ang, end_ang, STEP_ANGLE)

    for k in range(0, len(angles), BATCH_SIZE):
        batch_ang = angles[k : k + BATCH_SIZE]
        curr_batch = len(batch_ang)

        dists = np.tile(dist_1d, (curr_batch, 1))
        rads = np.radians(batch_ang).reshape(-1, 1)

```

```

dy = dists * np.cos(rads)
dx = dists * np.sin(rads)

lat_n = lat + (dy / 111132.0)
lon_n = lon + (dx / (111132.0 * math.cos(math.radians(lat))))

r_n, c_n = rowcol(transform, lon_n.ravel(), lat_n.ravel())
r_n, c_n = np.array(r_n), np.array(c_n)

valid = (r_n >= 0) & (r_n < h_map) & (c_n >= 0) & (c_n < w_map)
if not np.any(valid): continue

r_cl = np.clip(r_n, 0, h_map-1)
c_cl = np.clip(c_n, 0, w_map-1)
prof_h = dsm_data[r_cl, c_cl].reshape(curr_batch, -1)

# Втррати
diff = calculate_diffraction_vectorized(dists, prof_h, bs_h_asl,
wavelength)
fspl = 32.44 + 20*np.log10(FREQ_MHZ) +
20*np.log10(dists/1000.0)

# Діаграми
h_diff = np.abs(batch_ang - az).reshape(-1, 1)
h_pat = np.clip(12 * (h_diff / ANTENNA_HBW)**2, 0, 30)

delta_h = bs_h_asl - prof_h
v_ang = np.degrees(np.arctan(delta_h / dists))
v_diff = np.abs(v_ang - final_tilt)
v_pat = np.clip(12 * (v_diff / ANTENNA_VBW)**2, 0, 30)

pr = TX_POWER_DBM + ANTENNA_GAIN_MAX - fspl - diff -
h_pat - v_pat - URBAN_CLUTTER_LOSS

# Запис
r_f, c_f, p_f = r_n[valid], c_n[valid], pr.ravel()[valid]
np.maximum.at(final_cov, (r_f, c_f), p_f)

return final_cov, stats

def fill_gaps_final(array):
    filled = maximum_filter(array, size=3)
    mask = (array == -120.0) & (filled > -120.0)

```

```

    res = array.copy()
    res[mask] = filled[mask]
    return res

# --- 4. ГОЛОВНИЙ ЗАПУСК (MAIN) ---

def main():
    print(f"\nKYIV NETWORK MASTERPIECE ")
    print(f"  Фільтри: Стіна(>15dB),
Вода(Std<{WATER_FLATNESS_LIMIT})")
    print(f"  Auto-Fill: Сигнал < {BAD_SIGNAL_THRESHOLD} dBm")

    if not os.path.exists(input_tif_path):
        print(" ✕ Помилка: Файл DSM не знайдено.")
        return

    with rasterio.open(input_tif_path) as src:
        dsm_data = src.read(1)
        transform = src.transform
        height, width = src.height, src.width
        profile = src.profile.copy()

        # Етап 1: Генерація
        base_stations = generate_smart_grid(dsm_data, transform, width, height,
        DESIRED_BS_COUNT)

        # Етап 2: Перший прохід
        print(f"\n [Phase 2] Розрахунок покриття...")
        cov_map, stats = calculate_coverage(base_stations, dsm_data, transform)

        # Етап 3: Лікування
        new_stations = find_fill_in_sites(cov_map, dsm_data, transform)

        # Етап 4: Інтеграція
        if new_stations:
            print(f"\n 🚀 [Phase 4] Інтеграція нових станцій...")
            cov_map, stats_fill = calculate_coverage(new_stations, dsm_data,
            transform, existing_coverage=cov_map)

            # Об'єднуємо статистику
            for k in stats: stats[k] += stats_fill[k]

        # Фіналізація

```

```

cov_map = fill_gaps_final(cov_map)

print(f"\nФІНАЛЬНИЙ ЗВІТ:")
print(f"  Всього секторів 'OK': {stats['OK']}")
print(f"  Зекономлено (Стіна): {stats['BLOCKED']} ")
print(f"  Зекономлено (Вода): {stats['WATER']} ")

print(f"Збереження: {output_filename}")
profile.update(dtype=rasterio.float32, count=1, nodata=-120,
compress='lzw')
with rasterio.open(output_filename, 'w', **profile) as dst:
    dst.write(cov_map, 1)

print("ГОТОВО!")

if __name__ == "__main__":
    main()

```