

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Радіотехнічний факультет
Кафедра прикладної радіоелектроніки**

До захисту допущено:

Зав. Кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інтелектуальні технології
радіоелектронної техніки»,
за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Моделювання та оптимізація системи радіозв'язку 5G у
міських умовах з урахуванням інтерференції та відбиття»**

Виконав: студент IV курсу, групи РЕ-з21

_____ Кривунець Максим Віталійович _____

Керівник: Приходько Ірина Олександрівна _____

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Рецензент: _____

Посада, науковий ступінь, вчене звання,
Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра прикладної радіоелектроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»,

освітня програма «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри

_____ Андрій МОВЧАНЮК

« ____ » _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Кривунцю Максиму Віталійовичу

(Прізвище, ім'я по батькові)

1. Тема роботи «Моделювання та оптимізація системи радіозв'язку 5G у міських умовах з урахуванням інтерференції та відбиття»

керівник роботи Приходько Ірина Олександрівна

(прізвище ,ім'я по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « ____ » травня 2026 р. №

2. Строк подання студентом роботи 08.06 .2026року

3. Вихідні дані до роботи: результати переддипломної практики, технічна та наукова література з питань функціонування мереж 5G, стандарти 3GPP та ITU-R, статистичні дані щодо забудови та топології м. Старокостянтинів, картографічні матеріали місцевості, програмне середовище GNU Octave для математичного моделювання процесів поширення радіосигналів, інтерференції та багатопроменевості.

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити). Проаналізувати теоретичні основи функціонування мереж 5G у міському середовищі. Дослідити вплив інтерференції та багатопроменевого

поширення сигналів на якість зв'язку. Розробити математичну модель поширення радіосигналів у місті Старокостянтинів. Виконати програмну реалізацію моделі в середовищі GNU Octave. Провести моделювання роботи мережі 5G та оцінити рівень інтерференції. Розробити заходи щодо оптимізації розміщення базових станцій і підвищення ефективності функціонування мережі. Надати практичні рекомендації щодо впровадження отриманих результатів.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): презентація до доповіді (10 слайдів), карта досліджуваної території м.Старокостянтинів, структурна схема мережі 5G, розподілу рівня сигналу та інтерференції, результати моделювання в GNU Octave, діаграми ефективності оптимізації мережі, таблиці порівняльного аналізу показників до та після оптимізації.

6. Дата видачі завдання 20 квітня 2026 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання та затвердження теми	17.04.2026	
2.	Пошук та аналіз літературних джерел	20.04.2026 – 30.04.2026	
3.	Розроблення теоретичного розділу	01.05.2026 – 10.05.2026	
4.	Аналіз забудови та радіофізичних характеристик м. Старокостянтинів під час переддипломної практики	20.04.2026 – 17.05.2026	
5.	Розроблення математичної моделі інтерференції та багатопроблемності	19.05.2026	
6.	Програмна реалізація моделі в GNU Octave	20.05.2026 – 25.05.2026	
7.	Проведення моделювання та аналіз результатів	01.06.2026 – 03.06.2026	
8.	Розроблення заходів оптимізації мережі 5G	04.06.2026 – 05.06.2026	
9.	Оформлення матеріалів	06.06.2026	
10.	Подання дипломної роботи керівнику	07.06.2026	
11.	Підготовка презентації та доповіді до захисту	08.06.2026	

Студент: Кривунець Максим Віталійович

Керівник: Приходько Ірина Олександрівна

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота: «Моделювання та оптимізація системи радіозв'язку 5G у міських умовах з урахуванням інтерференції та відбиття».

Робота викладена на 93 сторінках друкованого тексту, містить 5 рисунків, 12 таблиць, 3 додатки та 32 найменувань використаних джерел.

Об'єктом дослідження є система радіозв'язку 5G у міських умовах. Предметом дослідження виступають процеси інтерференції та багатопроменевого поширення радіосигналів, а також методи оптимізації параметрів мережі 5G.

Метою роботи є комплексне дослідження, розробка та програмна реалізація математичних моделей системи радіозв'язку 5G у міських умовах з урахуванням інтерференції та багатопроменевого поширення сигналів, а також оптимізація параметрів мережі для підвищення ефективності її функціонування.

У роботі використано методи математичного моделювання, теорії поширення радіохвиль, статистичного аналізу, комп'ютерного моделювання в середовищі GNU Octave та методи оптимізації телекомунікаційних мереж.

У першому розділі досліджено теоретичні основи функціонування мереж 5G у міському середовищі, проаналізовано вплив інтерференції та багатопроменевості на якість зв'язку, а також розглянуто сучасні методи покращення якості сигналу. У другому розділі виконано моделювання системи радіозв'язку 5G для умов міста Старокостянтинів, розроблено математичну модель інтерференційних процесів та реалізовано програмний комплекс моделювання в середовищі GNU Octave. У третьому розділі проведено оптимізацію розміщення базових станцій, досліджено методи зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів, виконано оцінку ефективності запропонованих рішень і сформовано практичні рекомендації щодо їх впровадження.

У результаті дослідження встановлено, що основним фактором обмеження якості зв'язку в умовах міської забудови є міжкоміркова інтерференція та складна структура багатопроменевого поширення сигналу. Запропоновані методи оптимізації забезпечують покращення показників покриття, підвищення відношення сигнал/інтерференція та зменшення зон нестійкого прийому.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проєктування, модернізації та оптимізації мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління в містах України. Розроблені рекомендації можуть бути використані операторами телекомунікацій для підвищення ефективності використання частотного ресурсу та покращення якості обслуговування абонентів.

Ключові слова: 5G, радіозв'язок, базова станція, інтерференція, багатопроменевість, поширення радіохвиль, моделювання, GNU Octave, оптимізація мережі, beamforming, Massive MIMO, OFDM, SINR, міське середовище, телекомунікації.

ABSTRACT

Thesis: “Simulation and Optimization of 5G Radio Communication System in Urban Environments Considering Signal Interference and Reflection”.

The thesis consists of 93 pages, includes 5 figures, 12 tables, 3 appendices and 32 references.

The object of the research is a 5G radio communication system operating in urban conditions. The subject of the research is interference and multipath radio signal propagation processes as well as methods for optimizing 5G network parameters.

The aim of the thesis is the comprehensive study, development and software implementation of mathematical models of a 5G radio communication system in urban environments considering interference and multipath propagation, as well as optimization of network parameters to improve network performance.

The research methods include mathematical modeling, radio wave propagation theory, statistical analysis, computer simulation using GNU Octave software and telecommunication network optimization methods.

The first chapter examines the theoretical foundations of 5G network operation in urban environments, analyzes the influence of interference and multipath propagation on communication quality and reviews modern signal quality improvement techniques. The second chapter presents the simulation of a 5G radio communication system for the city of Starokostiantyniv, develops a mathematical model of interference processes and implements the simulation in the GNU Octave environment. The third chapter focuses on optimizing base station placement, reducing interference and reflection effects, evaluating the effectiveness of the proposed solutions and developing practical implementation recommendations.

The obtained results demonstrate that inter-cell interference and multipath propagation are the main factors limiting communication quality in dense urban

environments. The proposed optimization methods improve coverage characteristics, increase the signal-to-interference-plus-noise ratio and reduce unstable reception areas.

The practical value of the work lies in the possibility of applying the obtained results to the design, modernization and optimization of fifth-generation mobile communication networks in Ukrainian cities. The developed recommendations can be used by telecommunication operators to improve spectrum efficiency and service quality.

Keywords: 5G, radio communication, base station, interference, multipath propagation, radio wave propagation, modeling, GNU Octave, network optimization, beamforming, Massive MIMO, OFDM, SINR, urban environment, telecommunications.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	9
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ.....	14
1.1. Особливості технологій 5G у міських умовах.....	14
1.2. Вплив інтерференції та багатоприменовості на якість зв'язку.....	19
1.3. Методи покращення якості сигналу в 5G.....	23
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	28
РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G В УМОВАХ МІСТА СТАРОКОСТЯНТИНІВ.....	30
2.1. Радіофізична характеристика забудови м. Старокостянтинів	30
2.2. Математична модель інтерференції та багатоприменовості	32
2.3. Моделювання інтерференції між базовими станціями в Octave.....	41
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	55
РОЗДІЛ 3. ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G У МІСТІ СТАРОКОСТЯНТИНІВ.....	57
3.1. Оптимізація розміщення базових станцій.....	57
3.2. Застосування методів зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів.....	62
3.3. Оцінка ефективності запропонованих рішень	65
3.4. Практичні рекомендації щодо впровадження результатів	70
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	77
ВИСНОВКИ.....	79
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	82
ДОДАТКИ.....	86-93

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

5G – мобільний зв'язок п'ятого покоління.

3GPP – міжнародний консорціум зі стандартизації мобільних мереж третього покоління та наступних поколінь.

NR – новий радіоінтерфейс мереж 5G.

NG-RAN – мережа радіодоступу нового покоління.

gNB – базова станція мережі 5G.

UE – користувацьке обладнання, абонентський термінал.

UPF – функція обробки користувацького трафіку в ядрі мережі 5G.

QoS – якість обслуговування.

eMBB – розширений мобільний широкосмуговий доступ.

URLLC – наднадійний зв'язок із низькою затримкою.

mMTC – масові міжмашинні комунікації.

MIMO – технологія множинних входів та виходів антенної системи.

Massive MIMO – багатоканальна антена система.

Beamforming – адаптивне формування діаграми спрямованості антени.

OFDM – ортогональне частотне мультиплексування.

mmWave – міліметровий діапазон радіохвиль.

FR1 – частотний діапазон 5G від 600 МГц до 6 ГГц.

FR2 – частотний діапазон 5G від 24 ГГц до 100 ГГц.

LTE – технологія мобільного зв'язку четвертого покоління.

SNR – відношення сигналу до шуму.

SINR – відношення потужності корисного сигналу до суми потужностей шуму та інтерференції.

BER – імовірність бітової помилки.

RSSI – індикатор рівня прийнятого сигналу.

RSRP – потужність опорного сигналу, прийнятого абонентським пристроєм.

RSRQ – показник якості прийнятого опорного сигналу.

CQI – індикатор якості каналу зв'язку.

LOS – прямий шлях поширення сигналу між передавачем і приймачем.

NLOS – непрямий шлях поширення сигналу через перешкоди.

ISI – міжсимвольна інтерференція.

CoMP – координована багатоточкова передача сигналу.

SON – самоорганізована мережа.

Small Cells – малопотужні базові станції з невеликим радіусом покриття.

GNU Octave – програмне середовище для математичного моделювання.

БС – базова станція.

РЧ – радіочастотний.

ЕМХ – електромагнітна хвиля.

дБ – децибел.

дБм – децибел відносно 1 мВт.

МГц – мегагерц.

ГГц – гігагерц.

Гбіт/с – гігабіт за секунду.

мс – мілісекунда.

ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується стрімким зростанням обсягів передавання даних, підвищенням вимог до швидкості, надійності та якості бездротового зв'язку, а також інтеграцією різномірних інформаційних сервісів у єдине цифрове середовище. Глобальна цифровізація економіки та суспільства зумовлює необхідність створення високопродуктивної телекомунікаційної інфраструктури, здатної забезпечити мінімальні затримки, високу пропускну здатність і стабільність з'єднання навіть у складних умовах експлуатації. У цьому контексті технології п'ятого покоління мобільного зв'язку (5G) виступають як основа розвитку концепцій «розумного міста», кіберфізичних систем та Інтернету речей. В Україні впровадження цієї технології перебуває на стадії практичного тестування: за ініціативи Михайла Федорова реалізується пілотний проєкт у кількох містах, який передбачає поетапне дослідження функціонування мережі 5G та перевірку її сумісності з наявними системами, зокрема спеціального призначення [1].

Під час проходження переддипломної практики було проведено дослідження особливостей роботи мережі 5G у м.Старокостянтинів Хмельницької області з урахуванням впливу щільної забудови, рельєфу місцевості, транспортної інфраструктури та розміщення базових станцій. Особливу увагу приділено аналізу процесів поширення радіохвиль, зокрема інтерференції, дифракції та багатопроменевого відбиття сигналів, які істотно впливають на якість зв'язку.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення якості та надійності радіозв'язку 5G у міських умовах, де складна архітектура забудови призводить до втрат сигналу, виникнення інтерференційних завад і нестабільності з'єднання. Для українських міст, зокрема Старокостянтинова, важливим є проведення прикладних досліджень та розроблення ефективних

підходів до моделювання й оптимізації мереж з урахуванням локальних особливостей, що дозволяє забезпечити стабільний зв'язок і високу якість обслуговування абонентів.

Метою роботи є комплексне дослідження, розробка та програмна реалізація математичних моделей системи радіозв'язку 5G у міських умовах з урахуванням інтерференції та багатопроменевого поширення сигналів, а також оптимізація параметрів мережі, зокрема розміщення базових станцій і характеристик сигналу, для підвищення ефективності функціонування мережі. Досягнення поставленої мети передбачає врахування радіофізичних характеристик міського середовища, аналіз впливу забудови міста Старокостянтинів на поширення сигналу та розробку практичних рекомендацій щодо впровадження отриманих результатів у реальні телекомунікаційні системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати теоретичні основи функціонування систем 5G у міському середовищі;
- дослідити вплив інтерференції та багатопроменевості на якість сигналу;
- розглянути сучасні методи покращення якості зв'язку;
- виконати моделювання радіозв'язку в умовах міста Старокостянтинів;
- розробити математичну модель інтерференційних процесів;
- реалізувати моделювання в середовищі Octave;
- запропонувати методи оптимізації розміщення базових станцій;
- оцінити ефективність запропонованих рішень та надати практичні рекомендації.

Об'єкт дослідження: система радіозв'язку 5G у міських умовах.

Предмет дослідження: процеси інтерференції та багатопроменевого поширення радіосигналів, а також методи оптимізації параметрів мережі 5G.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розробці адаптованої математичної моделі поширення радіосигналів у міському середовищі середнього за розмірами населеного пункту та вдосконаленні підходів до оптимізації розміщення базових станцій з урахуванням інтерференційних впливів і відбиттів сигналу.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів під час проєктування, планування та модернізації мереж мобільного зв'язку в Україні. Запропоновані підходи можуть бути застосовані операторами телекомунікацій для підвищення якості зв'язку, зменшення впливу перешкод та більш ефективного використання частотного ресурсу.

Аналіз наукових досліджень свідчить, що проблеми побудови та оптимізації бездротових мереж широко висвітлені у працях українських і зарубіжних учених. Значний внесок у розвиток теорії передачі інформації та обробки сигналів зробили В. М. Глушков та О. С. Попов. Питання стандартизації та розвитку технологій 5G розглядаються у документах міжнародних організацій, зокрема 3GPP та IEEE.

Структура дипломної роботи зумовлена метою та завданнями дослідження і складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаних джерел та додатків. У першому розділі розглянуто теоретичні основи радіозв'язку 5G у міському середовищі. У другому розділі виконано моделювання системи радіозв'язку 5G для умов міста Старокостянтинів, наведено радіофізичні характеристики забудови.

У третьому розділі запропоновано методи оптимізації системи радіозв'язку, зокрема оптимізацію розміщення базових станцій, способи зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів.

Таким чином, дана робота спрямована на вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення якості та ефективності функціонування систем радіозв'язку 5G в умовах міського середовища України.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G У МІСЬКОМУ СЕРЕДОВИЩІ

1.1. Особливості технологій 5G у міських умовах

Технологія мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) є закономірним етапом еволюції бездротових телекомунікаційних систем, спрямованим на задоволення зростаючих потреб суспільства у високошвидкісному, надійному та енергоефективному обміні інформацією. На відміну від попередніх поколінь, 5G орієнтована не лише на підвищення швидкості передавання даних, а й на забезпечення наднизьких затримок, високої щільності підключення пристроїв та підтримку критично важливих сервісів у реальному часі. Відповідно до міжнародних стандартів, розроблених організацією 3GPP, технологія 5G базується на новій архітектурі мережі та радіоінтерфейсі New Radio, що дозволяє реалізувати гнучке управління спектральними ресурсами та підвищити ефективність використання частотного діапазону [2].

У процесі впровадження технології 5G у різних країнах світу спостерігалось поширення недостовірної інформації щодо її можливого негативного впливу на здоров'я людини. Зокрема, виникали твердження про зв'язок 5G із біологічними загрозами, які не мають наукового підтвердження. Проведені дослідження та висновки міжнародних організацій свідчать про те, що електромагнітне випромінювання, яке використовується у мережах 5G, знаходиться в межах встановлених норм і не перевищує допустимих рівнів впливу на організм людини [3]. Таким чином, технологія 5G є безпечною за умов дотримання регламентованих стандартів і повинна розглядатися як інструмент розвитку сучасної цифрової інфраструктури.

З технічної точки зору, функціонування 5G ґрунтується на використанні широкого спектра частотних діапазонів, що забезпечує гнучкість і масштабованість мережі. Зокрема, виділяють діапазони FR1 (від 600 МГц до 6 ГГц), які характеризуються відносно великою дальністю поширення сигналу, та FR2 (від 24 ГГц до 100 ГГц), що дозволяють досягати надвисоких швидкостей передачі даних, але мають обмежену зону покриття. Теоретично максимальна швидкість у мережах 5G може досягати 20 Гбіт/с, однак у реальних умовах експлуатації вона залежить від ряду факторів, зокрема топології місцевості, щільності забудови, кількості активних користувачів і рівня інтерференційних завад [4]. Це обумовлює необхідність використання складних методів моделювання для оцінювання ефективності роботи мережі. Однією з ключових характеристик мереж 5G є їх багаторівнева архітектура, яка передбачає використання як традиційних макростільників, так і великої кількості малих стільників, розміщених у безпосередній близькості до користувачів. Такий підхід дозволяє суттєво підвищити ємність мережі та зменшити навантаження на окремі базові станції. Подамо для прикладу схему (Рисунок 1.1.) структури мережі 5G у міському середовищі

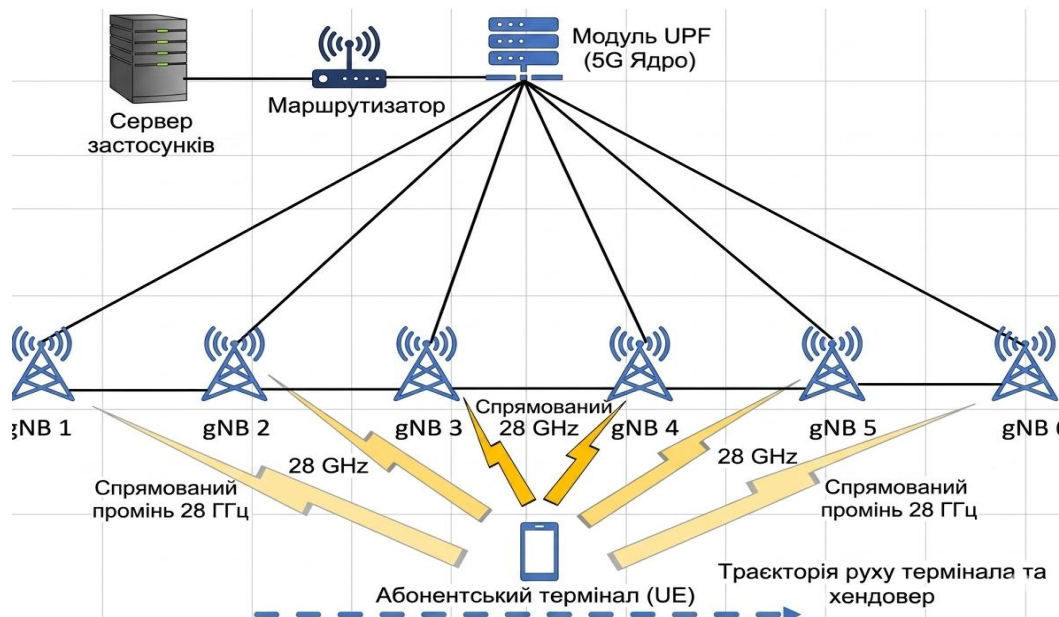


Рис.1.1. Узагальнена структура мережі 5G у міському середовищі[5]

Запропонована схема відображає архітектурну модель мережі радіодоступу нового покоління (NG-RAN) у поєднанні з ключовими елементами ядра 5G, адаптовану для функціонування в умовах високої щільності забудови сучасного мегаполіса. Системна ієрархія починається з рівня мереж передачі даних, де сервер застосунків через високошвидкісний маршрутизатор взаємодіє з функціональним модулем UPF (User Plane Function). Модуль UPF виступає опорною точкою анкерування трафіку, забезпечуючи ефективну комутацію та пересилання пакетів між зовнішніми мережами та радіоінтерфейсом.

Радіосегмент мережі представлений масивом базових станцій gNB (Next Generation NodeB), що утворюють надщільну інфраструктуру. Використання міліметрового діапазону хвиль (mmWave) із частотою 28 ГГц дозволяє реалізувати широку смугу пропускання, необхідну для підтримки сервісів eMBB (Enhanced Mobile Broadband). Оскільки поширення радіохвиль на таких частотах характеризується значним згасанням та вразливістю до перешкод, у системі застосовано технологію адаптивного формування спрямованих променів (Beamforming). Це забезпечує фокусування енергії сигналу безпосередньо на абонентському терміналі (UE), що мінімізує інтерференцію та підвищує енергоефективність з'єднання.

Динамічний аспект роботи мережі ілюструється траєкторією руху абонентського терміналу. Враховуючи малий радіус покриття окремих gNB у діапазоні 28 ГГц, стабільність зв'язку підтримується шляхом інтенсивного виконання процедур хендоверу. Безперервність передачі даних досягається через координацію між сусідніми базовими станціями та модулем UPF, що гарантує низьку затримку та високу якість обслуговування (QoS) у мобільному режимі. Дана структура є базовою для реалізації концепції «розумного міста», забезпечуючи необхідну пропускну здатність для великої кількості одночасних високошвидкісних з'єднань.

Водночас у міських умовах щільне розташування передавальних вузлів, зокрема базових станцій різних рівнів (макро- та мікростільників), призводить до істотного підвищення рівня взаємних електромагнітних завад. Це зумовлено як обмеженістю частотного ресурсу, так і необхідністю повторного використання частот у сусідніх комірках мережі. У результаті виникає міжкоміркова інтерференція, яка негативно впливає на якість прийому сигналу, знижує пропускну здатність каналу та може спричиняти нестабільність з'єднання, особливо в умовах високої щільності абонентів. Додатково у міському середовищі інтерференційні процеси ускладнюються багатопроменевим поширенням сигналу, що виникає внаслідок численних відбиттів від будівель, транспортних засобів та інших об'єктів інфраструктури.

З метою мінімізації негативного впливу завад у сучасних мережах 5G застосовуються передові технологічні рішення, серед яких важливе місце займають системи Massive MIMO та методи адаптивного формування діаграми спрямованості (beamforming). Використання великої кількості антенних елементів дозволяє здійснювати просторове розділення користувачів, формуючи незалежні канали передачі в межах одного частотного ресурсу. Це підвищує спектральну ефективність системи та зменшує рівень взаємних перешкод між абонентами [6].

Крім того, сучасні алгоритми управління ресурсами радіомережі дозволяють динамічно адаптувати параметри передачі, такі як потужність сигналу, ширина смуги частот та схема модуляції, залежно від поточного стану каналу зв'язку. Це сприяє більш ефективному використанню доступного спектра та підвищує загальну продуктивність мережі. Наведемо Таблицю 1.1 порівняння характеристик технологій мобільного зв'язку 4G та 5G.

Таблиця 1.1.**Порівняльні характеристики технологій 4G та 5G [6; 7]**

Параметр	4G (LTE)	5G
Максимальна швидкість	до 1 Гбіт/с	до 20 Гбіт/с
Затримка	30–50 мс	1–10 мс
Кількість пристроїв	$\sim 10^5/\text{км}^2$	$\sim 10^6/\text{км}^2$
Частотний діапазон	до 6 ГГц	до 100 ГГц
Тип антен	MIMO	Massive MIMO

Аналіз наведених даних свідчить про суттєву перевагу технології 5G над попереднім поколінням мобільного зв'язку за всіма ключовими показниками. Зокрема, значне зростання швидкості передавання даних і зменшення затримок відкривають можливості для реалізації сервісів реального часу, включаючи дистанційне керування технічними системами та обробку великих обсягів інформації. Збільшення кількості підтримуваних пристроїв на одиницю площі є критично важливим для розвитку концепції Інтернету речей, що передбачає масове підключення сенсорів і пристроїв у межах міської інфраструктури. Разом із тим, розширення частотного діапазону, особливо у високочастотній області, створює додаткові труднощі, пов'язані з поширенням сигналу, що потребує застосування більш складних методів планування мережі [8].

Функціонування мереж 5G у міських умовах ускладнюється специфікою середовища поширення радіохвиль. Наявність великої кількості будівель, транспортних засобів та інших об'єктів призводить до багатопроменевого поширення сигналу, що виникає внаслідок його відбиття, дифракції та розсіювання. Це явище може спричиняти як підсилення, так і ослаблення сигналу в окремих точках простору, що ускладнює забезпечення стабільної якості зв'язку. Крім того, щільне розташування базових станцій і велика кількість користувачів

обумовлюють виникнення інтерференції, яка негативно впливає на пропускну здатність мережі та рівень сигналу.

Особливу роль у системах 5G відіграє використання міліметрового діапазону хвиль, який забезпечує високу пропускну здатність, проте характеризується значними втратами при поширенні та високою чутливістю до перешкод. У міських умовах це вимагає значного зменшення відстані між базовими станціями та впровадження щільної мережевої інфраструктури.

Таким чином, особливості технології 5G у міських умовах визначаються комплексною взаємодією технічних характеристик системи та факторів середовища поширення сигналу. Це обумовлює необхідність використання математичного моделювання та оптимізаційних методів для підвищення ефективності функціонування мережі, що є важливим напрямом сучасних наукових досліджень у галузі телекомунікацій.

1.2. Вплив інтерференції та багатопроменевості на якість зв'язку

Якість функціонування сучасних бездротових мереж, зокрема систем п'ятого покоління (5G), значною мірою визначається умовами поширення радіосигналів у середовищі передачі. У міських умовах ці процеси ускладнюються через наявність великої кількості об'єктів різної природи, що впливають на електромагнітні хвилі. До ключових факторів, які знижують ефективність радіозв'язку, належать інтерференція сигналів та багатопроменеве поширення. Інтерференція виникає внаслідок накладання кількох електромагнітних сигналів у просторі та часі, що призводить до спотворення прийнятого сигналу, погіршення його структури та зменшення відношення сигнал/шум (SNR). У цифрових системах зв'язку це безпосередньо впливає на ймовірність помилок бітової передачі, оскільки приймач не може коректно відокремити корисний сигнал від завад. Фізично інтерференція проявляється як

результат суперпозиції хвиль, які можуть підсилювати або послаблювати одна одну залежно від їх фазових характеристик. У випадку деструктивної інтерференції відбувається значне ослаблення сигналу аж до повного його зникнення, тоді як конструктивна інтерференція може тимчасово підвищувати рівень сигналу, але не забезпечує стабільності зв'язку [9].

У мережах 5G проблема інтерференції набуває особливої актуальності через застосування щільної архітектури розгортання мережі, яка передбачає використання великої кількості базових станцій, розташованих на відносно невеликих відстанях одна від одної. Це пов'язано з необхідністю забезпечення високої пропускної здатності та обслуговування значної кількості користувачів у межах обмеженої території. Крім того, у таких мережах широко використовується принцип повторного використання частотного ресурсу, коли одна й та сама смуга частот застосовується в різних комірках, що призводить до виникнення міжкоміркової інтерференції [10]. Додатковим ускладнювальним фактором є використання широкосмугових сигналів і високочастотних діапазонів, які характеризуються підвищеною чутливістю до завад і втрат при поширенні.

Варто також зазначити, що інтерференція в системах 5G має динамічний характер і залежить від великої кількості змінних факторів, таких як переміщення користувачів, зміна навантаження мережі, погодні умови та особливості міської забудови. Це ускладнює її прогнозування та вимагає застосування адаптивних алгоритмів керування ресурсами мережі, які дозволяють у реальному часі змінювати параметри передачі сигналу, зокрема потужність, частотний діапазон і схеми модуляції.

Багатопроменеве поширення сигналу є фізичним явищем, при якому електромагнітна хвиля досягає приймача різними шляхами внаслідок відбиття, дифракції та розсіювання від будівель, поверхонь землі, транспортних засобів та інших об'єктів. У результаті цього приймач отримує декілька копій одного й того

ж сигналу з різними затримками та фазами, що може спричиняти як конструктивну, так і деструктивну інтерференцію. Особливо це характерно для міського середовища з високою щільністю забудови, де сигнал багаторазово відбивається від поверхонь і формує складну просторово-часову структуру. Згідно з теоретичними положеннями радіозв'язку, такі явища призводять до виникнення завмирань сигналу (fading), що негативно впливає на стабільність передачі даних.

Інтерференція в мережах 5G має декілька форм прояву, серед яких найбільш поширеними є внутрішньосистемна (між користувачами однієї мережі) та міжсистемна (між різними мережами або стандартами). Умови щільної урбанізації призводять до того, що базові станції розташовуються на відносно невеликих відстанях одна від одної, що спричиняє перекриття зон покриття та збільшення рівня взаємних завад. Крім того, використання високочастотних діапазонів, зокрема міліметрових хвиль, підвищує чутливість сигналу до перешкод і фізичних бар'єрів, що додатково ускладнює забезпечення стабільного зв'язку [11, с.9-15]. Представимо в Таблиці 1.2. основні типи інтерференції у мережах 5G, джерело виникнення її та пояснимо вплив на якість зв'язку.

Таблиця 1.2.

Класифікація інтерференційних впливів [11, с.23-29]

Тип інтерференції	Джерело виникнення	Вплив на якість зв'язку
Міжкоміркова	Сусідні базові станції	Зниження SNR, перешкоди передачі
Внутрішньосистемна	Користувачі однієї мережі	Конкуренція за ресурси
Міжсистемна	Інші мережі або стандарти	Додаткові завади
Багатопроменева	Відбиття сигналів	Завмирання, фазові спотворення

Аналіз наведених типів інтерференції дозволяє зробити висновок, що найбільш складною для компенсації є багатопроменева інтерференція, оскільки вона зумовлена природними фізичними процесами поширення сигналу. Її вплив має випадковий характер і залежить від геометрії середовища, матеріалів поверхонь та частотного діапазону. У той же час міжкоміркова інтерференція може бути частково зменшена шляхом оптимального планування мережі та розподілу частотного ресурсу. Опишемо в Таблиці 1.3. вплив багатопроменевості на параметри сигналу.

Таблиця 1.3.

Вплив багатопроменевого поширення на сигнал [11; с.27-29]

Параметр сигналу	Характер впливу	Наслідки для зв'язку
Амплітуда	Коливання	Втрата сигналу
Фаза	Зміщення	Інтерференційні спотворення
Затримка	Різні шляхи поширення	Міжсимвольна інтерференція
Частота	Доплерівський зсув	Спотворення спектра

З аналізу таблиці видно, що багатопроменевість впливає практично на всі основні параметри сигналу, що ускладнює процес його прийому та декодування. Особливо небезпечним є явище міжсимвольної інтерференції, яке виникає при накладанні сигналів із різними затримками та призводить до помилок при передачі цифрової інформації. У високошвидкісних мережах 5G, де використовуються складні схеми модуляції, такі ефекти можуть суттєво знижувати ефективність передачі даних.

Повний стандарт 5G підтримує три варіанти використання та значно покращений рівень обслуговування в порівнянні з 4G. Одним із випадків використання є розширена мобільна широкосмугова мережа (eMBB) з піковою

швидкістю передачі даних 20 Gbit/s стійкою швидкістю передачі даних 100 Mbit/s [12].

Крім того, технології Massive MIMO забезпечують просторове розділення сигналів і дозволяють ефективно використовувати багатопроменевість як позитивний фактор для підвищення пропускної здатності системи.

Таким чином, інтерференція та багатопроменеве поширення є ключовими факторами, що визначають якість радіозв'язку в мережах 5G, особливо в умовах міського середовища. Їхній вплив має комплексний характер і вимагає застосування сучасних методів моделювання, аналізу та оптимізації мереж. Розуміння цих процесів є необхідною передумовою для ефективного проєктування та експлуатації систем бездротового зв'язку нового покоління.

1.3. Методи покращення якості сигналу в 5G

Якість сигналу в мережах п'ятого покоління визначається сукупністю фізичних, технічних та алгоритмічних чинників, що впливають на процес передавання інформації в умовах складного радіосередовища. З огляду на використання широкого частотного спектра, включаючи міліметрові хвилі, а також щільну структуру розміщення базових станцій, питання забезпечення стабільного та якісного зв'язку набуває особливої актуальності. Одним із ключових напрямів підвищення ефективності передачі даних є застосування сучасних методів обробки сигналів і оптимізації радіоресурсів, які дозволяють адаптувати роботу мережі до змінних умов середовища. Важливу роль відіграє також використання інтелектуальних алгоритмів, здатних аналізувати параметри каналу зв'язку та оперативно коригувати режими роботи системи.

Суттєвий вплив на якість сигналу має застосування багатоканальних антенних систем, зокрема технології Massive MIMO, яка передбачає використання великої кількості антенних елементів на базовій станції з метою

формування просторово розділених каналів зв'язку. Такий підхід ґрунтується на використанні просторового мультиплексування, що дозволяє передавати декілька незалежних потоків даних одночасно в межах одного частотного ресурсу. У результаті досягається істотне підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності мережі без необхідності розширення частотного діапазону. Формування вузьконаправлених променів сигналу, орієнтованих на конкретного користувача, сприяє концентрації енергії в заданому напрямку, що значно зменшує втрати при поширенні сигналу, підвищує рівень прийнятої потужності та знижує вплив зовнішніх і внутрішніх завад.

Особливістю технології Massive MIMO є здатність ефективно використовувати багатопроменевість як ресурс, а не лише як негативний фактор. За рахунок обробки сигналів з великої кількості антен система може розрізняти різні просторові компоненти сигналу, що дозволяє підвищити точність прийому та зменшити ймовірність помилок. Просторове розділення каналів забезпечує можливість одночасного обслуговування значної кількості користувачів у межах однієї комірки мережі, при цьому зберігаючи високий рівень якості зв'язку навіть за умов інтенсивного трафіку. Це є особливо важливим для міських територій, де спостерігається висока щільність абонентів і значне навантаження на мережу.

У поєднанні з технологією адаптивного формування діаграми спрямованості (beamforming) можливості Massive MIMO значно розширюються. Beamforming дозволяє динамічно змінювати напрямок випромінювання сигналу залежно від місцезнаходження користувача, що забезпечує оптимальні умови прийому навіть у складному радіосередовищі. Це особливо актуально в умовах міської забудови, де сигнал зазнає численних відбиттів і дифракції. Завдяки адаптивному керуванню фазами та амплітудами сигналів на антенних елементах система здатна мінімізувати рівень інтерференції між користувачами та зосереджувати енергію в потрібному напрямку. У підсумку поєднання Massive MIMO та beamforming забезпечує ефективну компенсацію негативного впливу

інтерференції та багатопроменевого поширення, що є одним із ключових чинників підвищення якості зв'язку в мережах 5G [13].

Ще одним важливим методом підвищення якості сигналу є використання ортогонального частотного мультиплексування (OFDM), яке забезпечує поділ широкосмугового сигналу на велику кількість вузьких піднесучих. Це дозволяє зменшити вплив міжсимвольної інтерференції та забезпечити стійкість передачі в умовах багатопроменевого поширення сигналу. Крім того, у мережах 5G широко застосовуються адаптивні методи модуляції та кодування, які дозволяють змінювати параметри сигналу залежно від якості каналу зв'язку. За сприятливих умов використовуються високошвидкісні схеми модуляції, тоді як при погіршенні каналу система автоматично переходить до більш надійних, але менш ефективних режимів передачі.

Не менш важливим є оптимізація розподілу радіочастотного ресурсу та управління потужністю сигналу. У сучасних мережах застосовуються алгоритми динамічного планування ресурсів, які дозволяють рівномірно розподіляти навантаження між базовими станціями та мінімізувати рівень інтерференції. Контроль потужності передачі дає змогу зменшити надлишкове випромінювання, що, у свою чергу, знижує рівень взаємних завад між користувачами. Додатково застосовуються методи координації між базовими станціями, що дозволяє узгоджувати їхню роботу та уникати конфліктів у використанні частотного ресурсу.

Особливе місце серед методів покращення якості сигналу займає використання мереж малої потужності (small cells), які дозволяють зменшити відстань між передавачем і приймачем. Це сприяє підвищенню рівня сигналу та зменшенню втрат при його поширенні. У міських умовах такі рішення є особливо ефективними, оскільки дозволяють забезпечити покриття у важкодоступних місцях, наприклад, у щільній забудові або всередині будівель. Крім того, інтеграція оптоволоконної інфраструктури з бездротовими мережами забезпечує

високу швидкість передачі даних і зменшує затримки, що є критично важливим для сучасних сервісів [14]. Представимо Таблицею 1.4 основні методи покращення якості сигналу в мережах 5G.

Таблиця 1.4.

Основні методи покращення якості сигналу в мережах 5G[14]

Метод	Суть методу	Ефект для якості зв'язку
Massive MIMO	Використання великої кількості антен	Підвищення пропускної здатності
Beamforming	Спрямоване формування сигналу	Зменшення інтерференції
OFDM	Поділ сигналу на піднесучі	Стійкість до багатопроменевості
Адаптивна модуляція	Зміна параметрів сигналу	Оптимізація швидкості та надійності
Контроль потужності	Регулювання рівня сигналу	Зниження завад
Small Cells	Щільне розміщення малопотужних станцій	Покращення покриття
Координація базових станцій	Узгодження роботи передавачів	Зменшення міжкоміркових завад

Узагальнюючи, можна зазначити, що підвищення якості сигналу в мережах 5G досягається шляхом комплексного та взаємопов'язаного застосування сучасних технологічних рішень, які охоплюють як фізичний рівень передавання даних, так і рівень інтелектуального керування мережею. Йдеться не лише про впровадження нових апаратних засобів, таких як багатоканальні антенні системи, а й про використання складних алгоритмів обробки сигналів, адаптивного розподілу ресурсів і динамічного управління параметрами мережі. Такий підхід дозволяє враховувати змінний характер радіосередовища, оперативно реагувати на появу завад, зміну навантаження та мобільність користувачів, що є особливо важливим для міських умов із високою щільністю забудови та великою кількістю абонентів.

Ефективне поєднання антенних технологій, зокрема Massive MIMO і beamforming, із сучасними методами модуляції, кодування та мультиплексування забезпечує значне підвищення спектральної ефективності та стійкості передачі даних. Паралельно застосування алгоритмів оптимізації радіоресурсів, контролю потужності та координації базових станцій сприяє зменшенню рівня інтерференції та більш раціональному використанню доступного частотного спектра. Важливою складовою також є інтеграція мереж 5G з оптоволоконною інфраструктурою та хмарними технологіями, що дозволяє забезпечити високу швидкість передачі даних і мінімальні затримки.

Таким чином, підвищення якості сигналу в мережах 5G є результатом системного підходу, який базується на синергії апаратних і програмних рішень. Реалізація такого підходу створює передумови для стабільного функціонування мереж навіть у складних умовах експлуатації та забезпечує можливість впровадження інноваційних сервісів, зокрема Інтернету речей, автономного транспорту, розумних міських систем і високоточних цифрових платформ. У перспективі саме комплексна оптимізація всіх рівнів телекомунікаційної системи визначатиме ефективність розвитку мереж нового покоління та їхню здатність задовольняти зростаючі потреби цифрового суспільства.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

У ході дослідження розглянуто теоретичні основи функціонування систем радіозв'язку п'ятого покоління в умовах міського середовища, що дозволило сформулювати цілісне уявлення про ключові особливості технології 5G, фактори впливу на якість сигналу та сучасні підходи до її підвищення. Проведений аналіз показав, що мережі 5G є складними багаторівневими телекомунікаційними системами, які поєднують новітні методи передавання даних, використання широкого частотного спектра та інтелектуальні механізми управління ресурсами.

Встановлено, що технології 5G характеризуються значно вищою пропускнуою здатністю, зменшеними затримками та можливістю одночасного обслуговування великої кількості користувачів. Важливою особливістю є використання нових частотних діапазонів, включаючи міліметрові хвилі, а також впровадження технологій Massive MIMO та beamforming, що забезпечують підвищення спектральної ефективності. Разом із тим визначено, що міське середовище створює складні умови для поширення радіосигналів через щільну забудову, наявність численних відбиваючих поверхонь і високу концентрацію абонентів, що вимагає спеціальних підходів до проєктування мереж.

Досліджено вплив інтерференції та багатопроменевого поширення сигналу на якість зв'язку. Встановлено, що інтерференція є одним із основних обмежуючих факторів ефективності мереж 5G, оскільки виникає внаслідок накладання сигналів від різних джерел і призводить до зниження відношення сигнал/шум. Багатопроменевість, у свою чергу, спричиняє фазові та часові спотворення сигналу, що може викликати міжсимвольну інтерференцію та завмирання сигналу. Доведено, що ці явища мають комплексний характер і значною мірою залежать від особливостей міської забудови, частотного діапазону та параметрів мережі.

Також проаналізовано основні методи покращення якості сигналу в мережах 5G. Визначено, що ефективне підвищення якості зв'язку досягається шляхом комплексного використання сучасних технологічних рішень, серед яких ключове місце займають Massive MIMO, beamforming, OFDM, адаптивна модуляція та кодування, а також алгоритми оптимізації розподілу радіоресурсів. Встановлено, що застосування цих методів дозволяє значно зменшити вплив інтерференції та багатопроменевості, підвищити пропускну здатність мережі та забезпечити стабільність зв'язку навіть у складних умовах міського середовища.

Узагальнюючи результати проведеного теоретичного аналізу, можна зробити висновок, що ефективне функціонування мереж 5G у міських умовах можливе лише за умови комплексного врахування фізичних особливостей поширення радіохвиль та застосування сучасних методів оптимізації мережі. Отримані теоретичні положення є основою для подальшого моделювання системи радіозв'язку, аналізу інтерференційних процесів і розробки практичних рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування мережі 5G у конкретних умовах міста.

РОЗДІЛ 2

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G В УМОВАХ МІСТА СТАРОКОСТЯНТИНІВ

2.1. Радіофізична характеристика забудови м. Старокостянтинів

Ефективне проєктування, довгострокове планування та подальша оптимізація інфраструктури мереж стільникового мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) у діапазоні sub-6 GHz (зокрема, у широко задіяному комерційному спектрі FR1 band n78 на частоті 3,5 ГГц) критично залежать від детального аналізу морфології та радіофізичних властивостей навколишнього середовища.

Процес поширення високочастотних радіохвиль сантиметрового діапазону в умовах сучасних урбанізованих просторів супроводжується значною кількістю деструктивних фізичних явищ. До них належать багатопроменеве поширення через багаторазові відбиття від штучних споруд, дифракція на гострих кромках і дахах будівель, рефракція, розсіювання енергії шорсткими поверхнями, а також пряме екранування і глибоке затухання радіосигналу при його проникненні крізь зовнішні огорожувальні конструкції.

Для побудови адекватної, високоточної математичної та імітаційної моделі радіоканалу в межах даного дипломної роботи було детально проаналізовано топологічні, архітектурні та географічні особливості міста Старокостянтинів Хмельницької області [15].

Місто Старокостянтинів характеризується яскраво вираженою змішаною міською забудовою. Структура міста історично та функціонально поєднує в собі щільні центральні квартали, розлогі масиви одно- та двоповерхового приватного сектора, відокремлені промислові зони, а також великі відкриті ділянки природного та рекреаційного походження (Додаток А).

Така морфологічна неоднорідність робить неможливим застосування уніфікованих спрощених моделей згасання (як-от класична модель Okumura-Hata для великих міст) і вимагає глибокого радіофізичного зонування всієї досліджуваної території фрагмента розміром $2,4 \times 2,4$ км.

Першим важливим кластером аналізу є центральна частина міста, яка охоплює райони ключових транспортних артерій та адміністративних вулиць (зокрема, вул. Острозького, вул. Миру та прилеглі квартали). Дана зона характеризується суцільною середньоповерховою забудовою капітального типу, де висота споруд варіюється в межах від 2 до 5 поверхів (усереднена висота будівель становить ($h_b = 9-16$) метрів), а середня відстань між будинками складає від 20 до 50 метрів [15].

З архітектурної точки зору основними конструкційними матеріалами тут виступають силікатна та глиняна цегла, залізобетонні плити перекриття, шлакоблоки та металочерепиця. Для частоти 3,5 ГГц силікатна цегла має відносну діелектричну проникність ($\text{varepsilon}_{r_g} \approx 3,75 \text{ dots } 4,1$) та питому провідність ($\sigma \approx 0.03$) См/м. Залізобетонні елементи, що містять густу внутрішню металеву армуючу сітку, демонструють значно вищі показники діелектричної проникності ($\text{varepsilon}_{r_g} \approx 6,0-7,0$) та підвищений коефіцієнт відбиття.

При падінні плоскої електромагнітної хвилі на таку стіну виникає сильний екранний ефект. Емпіричні дослідження показують, що інтегральні втрати на проникнення всередину будівель (L) у центральних кварталах для частот вище 3 ГГц становлять від 12 до 18 дБ, а за наявності сучасного енергоефективного зашклення з металізованим напиленням втрати можуть сягати 24-30 дБ.

Це призводить до формування стійких зон радіотіні всередині приміщень (умови Indoor при обслуговуванні зовнішніми антенами Outdoor) та вимагає врахування додаткового усередненого затухання в забудові на рівні ($L = 8$) дБ для всієї розрахункової моделі. На відкритому просторі вулиць у цьому кластері

поширення хвиль відбувається переважно вздовж каньйонів вулиць (ефект волноводу або Street Canyon), де пряма видимість (Line-of-Sight, LoS) швидко втрачається при поворотах, переходPoints у геометрію Non-Line-of-Sight (NLoS).

Другим масштабним кластером міста є приватний житловий сектор (зокрема, мікрорайони Заслучі, Нове Місто та інші периферійні ділянки). Ця зона характеризується низькою щільністю забудови, яка складається переважно з одно- чи двоповерхових приватних садиб із присадибними ділянками. Висота перешкод штучного походження тут рідко перевищує 5–7 метрів. Основні матеріали споруд – дерево, цегла, піноблоки та легкі дахові покриття (шифер, профнастил).

Втрати на пряме проникнення крізь такі конструкції є суттєво нижчими порівняно з центром і становлять близько 4-8 дБ на частоті 3,5 ГГц. Однак цей кластер володіє іншою специфічною особливістю – надзвичайно високою щільністю зелених насаджень (сади, паркові зони, придорожні дерева та чагарники). У весняно-літній період наявність густого листяного покриву створює значне додаткове погонне згасання радіосигналу [16].

Згідно з рекомендаціями Міжнародного союзу електрозв'язку (зокрема, ITU-R P.833), згасання у рослинності на частотах близько 3,5 ГГц оцінюється величиною до (0,4 dots 0,6) дБ на один метр проходження хвилі крізь крону дерева [23]. Крім того, листя викликає сильний ефект деполяризації та розсіяння сигналу, що призводить до швидкої флуктуації амплітуди прийнятого поля та трансформації структури багатопроменевості у просторі. При плануванні покриття приватного сектора випадкові логарифмічно-нормальні затінення (Shadowing) мають виражений сезонний характер, що враховано в імітаційному моделюванні через закладання середнього квадратичного відхилення завмирань на рівні ($\sigma = 4$) дБ.

Третім важливим елементом топологічної структури Старокостянтинова є промислові та комунально-складські зони. Вони зосереджені переважно навколо

залізничного вокзалу, вздовж колій, а також у місцях розташування підприємств харчової та переробної промисловості. Особливістю промзон є наявність великих за площею одноповерхових або двоповерхових споруд ангарного типу, складських приміщень та елеваторів.

Головним конструкційним матеріалом тут виступає металопрокат, листова сталь, профільовані металеві листи та збірний залізобетон. Метали володіють практично нескінченною провідністю, через що коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від металевої стіни наближається до одиниці ($R \approx 1$), а проникнення сигналу всередину таких споруд практично повністю заблоковане (екран виступає як клітка Фарадея).

З радіофізичної точки зору промзона працює як потужний пасивний рефлектор. Хвилі, що випромінюються базовою станцією, зазнають дзеркального відбиття від стін промислових корпусів і поширюються у непередбачуваних напрямках, накладаючись на прямі промені у сусідніх житлових кварталах. Це явище створює передумови для виникнення сильної інтерференції та глибоких багатопроменевих завад (Fading), коли два або більше промені приходять у точку прийому з протилежними фазами і взаємно гасять один одного.

Четвертим кластером є відкриті простори та водні ділянки, які займають помітну площу в межах аналізованого фрагмента $2,4 \times 2,4$ км. Географічною особливістю Старокостянтинова є проходження через його територію річок Случ та Ікопоть, їхнє злиття, а також наявність заплавних лук і відкритих прибережних рекреаційних зон (наприклад, біля історичного замку князів Острозьких).

У цих зонах повністю відсутні капітальні штучні перешкоди, що забезпечує ідеальні умови поширення радіохвиль у межах прямої видимості (LoS). Загасання сигналу тут підпорядковується закону поширення у вільному просторі, де втрати зростають пропорційно квадрату відстані. Проте наявність великих гладких водних поверхонь створює небезпеку виникнення вираженої двопроменевої або багатопроменевої інтерференції.

Вода, особливо за наявності розчинених солей, має високу діелектричну проникність ($\epsilon_r \approx 70-80$) на високих частотах). Радіохвиля, відбиваючись від водного дзеркала під малими кутами падіння, практично не втрачає своєї амплітуди, але змінює фазу на (180°) . При взаємодії прямого променя від антени gNB та відбитого від води променя на приймальній антені мобільного термінала виникає періодична просторова інтерференційна картина (просторові максимуми та мінімуми поля), яка може призвести до раптового розриву з'єднання навіть на невеликій відстані від базової станції.

Отже, сукупний аналіз радіофізичних умов міста Старокостянтинів вказує на те, що реальне радіосередовище є надзвичайно складним і гетерогенним. Хвильовий фронт, що випромінюється антеною 5G, одночасно зазнає впливу абсолютно різних факторів загасання та відбиття.

Для розробки точного програмного забезпечення імітаційного моделювання в середовищі GNU Octave всі вищеописані фактори (висота забудови, коефіцієнти проникнення матеріалів, випадкове затінення рослинністю та дзеркальне відбиття промислових об'єктів) були усереднені та інтегровані у математичні параметри трасових втрат і завад, що дозволило отримати реалістичну картину розподілу рівнів корисного сигналу, інтерференції та пропускної здатності системи (Таблиця 2.1). Додатково в моделі враховувались статистичні коливання потужності сигналу внаслідок багатопроменевого поширення та змін умов міського середовища, що дало можливість наблизити результати моделювання до реальних умов функціонування мережі 5G sub-6 GHz. Це забезпечило більш точну оцінку якості покриття, стабільності каналу зв'язку та ефективності роботи мережі в умовах щільної міської забудови.

Таблиця 2.1.

Радіофізичні параметри та характеристики зон м. Старокостянтинів[17]

Назва зони міста	Типова висота перешкод h_b , м	Домінуючі матеріали забудови	Коефіцієнт проникнення L , дБ	Переважаючі радіофізичні явища у каналі 5G (3,5 ГГц)
Центральні квартали	9-16	Силікатна/глиняна цегла, залізобетон, скло	12-18	Сильне екранування, ефект «вуличних каньйонів», швидка втрата LoS при поворотах
Приватний сектор	5-7	Дерево, цегла, шлакоблок, густа рослинність	4-8	Сезонне погонне згасання в кронах дерев (0.5 дБ/м), деполяризація, логарифмічно-нормальний Shadowing
Промислові зони	6-12	Листовий метал, профнастил, конструкційна сталь	>30	Екранний ефект Фарадея, інтенсивне дзеркальне відбиття хвиль, глибокі фазові завмирання
Відкриті ділянки та річки	0-2	Водна поверхня, трав'яний покрив, заплави	0	Поширення в умовах прямої видимості (LoS), двопробенева інтерференція від водного дзеркала

Структура міста Старокостянтинів має чітко виражений змішаний характер, що вимагає застосування специфічних моделей трасових втрат, адаптованих під одночасну наявність капітальної середньоповерхової забудови, приватного сектора та відкритих річкових просторів.

Основним лімітуючим фактором для стабільного покриття у центрі міста є високе затухання в стінах із силікатної цегли та залізобетону 12-18 дБ, що разом із топологічними втратами формує необхідність закладання в імітаційну модель інтегрального коефіцієнта додаткових втрат забудови $L=8$ дБ.

Наявність металевих промислових споруд та водних дзеркал річок Случ та Ікопоть створює умови для інтенсивного відбиття хвиль, що призводить до накладання променів, виникнення міжкоміркової інтерференції та деградації енергетичного потенціалу мережі на межах стільників. Це обґрунтовує доцільність використання просторово-корельованого шуму $sf = 4$ дБ під час програмного моделювання.

2.2. Математична модель інтерференції та багатопроменевості

Для проведення високоточного чисельного аналізу та імітаційного моделювання мережі 5G у міському середовищі м. Старокостянтинів необхідно сформулювати математичну модель, яка описує процеси поширення радіохвиль, багатопроменевість та міжкоміркову інтерференцію. Умови змішаної забудови міста не дозволяють використовувати виключно детерміновані моделі, тому застосовується статистично-аналітичний підхід до опису радіоканалу.

У щільній міській забудові сигнал від базової станції gNB до абонентського терміналу UE поширюється великою кількістю траєкторій через відбиття від будівель, дифракцію на дахах та розсіювання рослинністю. У результаті приймач отримує сукупність копій одного сигналу, кожна з яких має власну амплітуду, фазу та часову затримку.

Математично імпульсна характеристика багатопроменевого радіоканалу описується виразом:

$$h(t, \tau) = \sum_{i=1}^N a_i(t) e^{-j\varphi_i(t)} \delta(\tau - \tau_i(t)) \quad (2.1)$$

де:

- N – кількість багатопроменевих компонентів;
- $a_i(t)$ – амплітуда i -го променя;
- $\varphi_i(t)$ – фазовий зсув i -го променя;
- $\tau_i(t)$ – часова затримка i -го променя;
- $\delta()$ – дельта функція Дірака;
- $j = \sqrt{-1}$ уявна одиниця [18, с.174-175].

Фазовий зсув кожного променя визначається довжиною траєкторії поширення:

$$\varphi_i(t) = 2\pi \cdot \frac{d_i(t)}{\lambda} + \psi_i \quad (2.2)$$

де:

$d_i(t)$ – довжина траєкторії i -го променя, м;

λ – довжина хвилі сигналу;

ψ_i – додатковий фазовий зсув під час відбиття;

Довжина хвилі визначається співвідношенням:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.3)$$

де: $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла;

f – робоча частота сигналу.

Для частоти $f=3.5$ ГГц:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{3.5 \cdot 10^9} \approx 0.0857 \text{ м} = 8.57 \text{ см}$$

Накладання великої кількості променів формує інтерференційні максимуми та мінімуми електромагнітного поля, що викликає швидкі завмирання сигналу (Fast Fading) [18, с.175-176].

Для розрахунку втрат сигналу використовується модифікована модель 3GPP TR 38.901 Urban Micro (UMa) для умов NLoS. Дана модель найкраще адаптована до умов середньоповерхової забудови Старокостянтинова.

Математичне рівняння для розрахунку загальних трасових втрат у логарифмічному масштабі (дБ) має вигляд:

$$PL(d) = 32.4 + 21\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f_{GHz}) + L_{build} \quad (2.4)$$

де:

$PL(d)$ – втрати сигналу;

d – відстань між базовою станцією та абонентом, м;

f_{GHz} – робоча частота, ГГц;

L_{build} – додаткові втрати забудови, дБ.

Для даної моделі прийнято:

$$f_{GHz} = 3.5$$

$$L_{build} = 8 \text{ дБ}$$

Для врахування повільних завмирань (Shadowing) використовується логарифмічно-нормальний розподіл:

$$PL_{total}(d) = PL(d) + \xi \quad (2.5)$$

де: $PL(d)$ – втрати сигналу;

$PL_{total}(d)$ – повні втрати сигналу;

ξ – випадкова складова затінення.

Ймовірнісна густина випадкової величини ξ :

$$\rho(\xi) = \frac{1}{\sigma_{sf}\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_{sf}^2}\right) \quad (2.6)$$

де: σ_{sf} – середньоквадратичне відхилення затінення [18, с.174-176].

Для моделі приймається $\sigma_{sf} = 4 \text{ дБ}$

Основним фактором обмеження пропускної здатності мережі 5G є міжкоміркова інтерференція (ICI). Для оцінки якості радіоканалу використовується співвідношення сигнал/інтерференція+шум (SINR):

$$SINR(x, y) = \frac{P_{rx,k}(x, y)}{\sum_{i \neq k} P_{rx,i}(x, y) + \sigma^2} \quad (2.7)$$

де: $P_{rx,k}(x, y)$ – потужність корисного сигналу від сервісної базової станції;

$\sum_{i \neq k} P_{rx,i}(x, y)$ – сумарна потужність інтерференції від інших базових станцій;
 σ^2 – потужність теплового шуму.

Потужність прийнятого сигналу визначається рівнянням балансу потужності:

$$P_{rx}(dBm) = P_t(dBm) + G_t(dBi) + G_r(dBi) - PL_{total}(d) \quad (2.8)$$

де: $P_t(dBm)$ – потужність передавання;

$G_t(dBi)$ – коефіцієнт підсилення антени базової станції;

$G_r(dBi)$ – коефіцієнт підсилення антени приймача;

$PL_{total}(d)$ – повні втрати сигналу.

Перехід у лінійне представлення потужності виконується за формулою:

$$P_{rx}(mW) = 10^{\frac{P_{rx}(dBm)}{10}} \quad (2.9)$$

Для моделі використовуються параметри:

$$P_t(dBm) = 43 \text{ дБм}$$

$$G_t(dBi) = 15 \text{ дБі}$$

$$G_r(dBi) = 0 \text{ дБі}$$

Потужність теплового шуму визначається за формулою:

$$\sigma^2(W) = k_B \cdot T \cdot B \cdot 10^{\frac{NF}{10}} \quad (2.10)$$

де: $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана;

$T=290$ К – абсолютна температура;

B – ширина смуги каналу;

NF – коефіцієнт шуму приймача [18, с.176].

У логарифмічному представленні:

$$\sigma^2(dBm) = -174 + 10\log_{10}(B) + NF \quad (2.11)$$

Для параметрів: $B = 100 \cdot 10^6$ Гц; $NF=7$ дБ

Тоді отримуємо:

$$\sigma^2(dBm) = -174 + 80 + 7 = 87 \text{ дБм}$$

У лінійному вигляді:

$$Noise_{mW} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ мВт} \quad [18, \text{с.176}].$$

Отримані рівняння формують математичну основу алгоритму імітаційного моделювання мережі 5G у середовищі GNU Octave (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2.

Математичні параметри та змінні моделі радіоканалу 5G[18]

Позначення	Фізичний зміст параметра	Фіксоване чисельне значення	Одиниці вимірювання	Вплив на результати моделювання
fGHz	Несуча частота сигналу	3.5	ГГц	Визначає базовий рівень згасання у вільному просторі.
Pt	Потужність передавача БС	43	дБм	Задає вихідний енергетичний потенціал радіолінії.
B	Ширина смуги каналу	$100 \cdot 10^6$	ГГц	Прямо пропорційно впливає на рівень шуму та ємність.
Lbuild	Додаткові втрати забудови	8	дБ	Зміщує криву Path Loss для врахування міських перешкод.
sigma_sf	Відхилення затінення	4	дБ	Формує просторову зернистість (Shadowing) покриття.
NF	Коефіцієнт шуму приймача	7	дБ	Обмежує граничну чутливість терміналу на межі соти.

Запропонована математична модель поєднує детерміновану модель втрат сигналу 3GPP UMa та стохастичний логарифмічно-нормальний опис затіненень. Це дозволяє адекватно моделювати процеси поширення сигналу у змішаній міській

забудові. Аналіз формули SINR показує, що при коефіцієнті повторного використання частот $K=1$ основним фактором обмеження пропускної здатності системи є міжкоміркова інтерференція, а не тепловий шум приймача.

Розрахований рівень теплового шуму -87 дБм для смуги 100 МГц виступає базовим нижнім порогом, відносно якого обчислюється просторовий розподіл завад та інтегральні показники ємності мережі в середовищі GNU Octave.

2.3. Моделювання інтерференції між базовими станціями в Octave

Для практичної верифікації сформованої математичної моделі та отримання наочних просторових характеристик радіомережі $5G$ у Старокостянтиніві було реалізовано алгоритм імітаційного моделювання. Розрахунки виконано у спеціалізованому середовищі комп'ютерної програми GNU Octave за допомогою розробленого програмного скрипту[19]. Програма здійснює дискретний аналіз енергетичних параметрів електромагнітного поля на заданому фрагменті території, обчислює рівні корисних і завадових сигналів, а також візуалізує підсумкові топографічні карти покриття.

Для умов міста Старокостянтинів прийнято змішану міську забудову з центральними кварталами, приватним сектором, промисловими зонами та відкритими ділянками. Модель враховує частоту $3,5$ ГГц, потужність базової станції 43 dBm, додаткові втрати забудови 8 dB, тепловий шум приймача та міжкоміркову інтерференцію. Розрахунки виконано для фрагмента території $2,4 \times 2,4$ км із п'ятьма базовими станціями. Наведемо у Таблиці 2.3. основні параметри імітаційного моделювання мережі $5G$ у середовищі GNU Octave

Таблиця 2.3.

**Основні параметри імітаційного моделювання мережі 5G у
середовищі GNU Octave [15,19]**

Параметр	Значення
Частота	3,5 ГГц
Потужність БС	43 dBm
Смуга	100 МГц
Кількість БС	5
Середній SINR	3.6 dB

Для проведення чисельного аналізу параметрів мережі 5G NR у діапазоні sub-6 GHz у межах даного дипломної роботи було розроблено програмне забезпечення імітаційного моделювання у середовищі GNU Octave (ДОДАТОК Б). Програмна модель призначена для дослідження процесів поширення радіохвиль у складному міському середовищі, оцінювання міжкоміркової інтерференції, аналізу просторового розподілу рівня сигналу та визначення пропускної здатності мережі. Основною метою програмного моделювання є отримання наближеної до реальних умов картини функціонування мережі 5G у межах території міста Старокостянтинів із врахуванням багатопроменевого поширення, затінення забудовою та випадкових флуктуацій радіоканалу.

Опишемо більш детально як працює програма в середовищі GNU Octave.

Опис роботи коду програми поданого в Додатку В.

На початковому етапі роботи програми здійснюється очищення робочого середовища GNU Octave за допомогою команд `clear`, `clc` та `close all`. Це дозволяє видалити попередні змінні, очистити консоль та закрити відкриті графічні вікна, що забезпечує коректне виконання моделі без впливу залишкових даних від попередніх обчислень. Після цього задаються основні параметри моделі мережі 5G. Робоча частота системи приймається рівною 3,5 ГГц, що відповідає одному з основних комерційних діапазонів 5G NR FR1. Потужність передавання базової

станції встановлюється на рівні 43 дБм, що відповідає типовим параметрам макросот мобільних операторів.

Додатково задаються коефіцієнти підсилення передавальної та приймальної антен. Для антени базової станції використовується підсилення 15 дБі, тоді як підсилення антени абонентського термінала приймається рівним 0 дБі. Ширина смуги каналу встановлюється на рівні 100 МГц, що відповідає типовим параметрам високошвидкісних мереж 5G NR. Для врахування впливу міської забудови в модель вводиться додатковий коефіцієнт втрат $L_{build} = 8$ дБ, який моделює екранування сигналу будівлями, віконними конструкціями та іншими міськими перешкодами. Окремо задається параметр $\sigma_{sf} = 4$ дБ, який використовується для статистичного моделювання випадкових затінь сигналів.

Наступним етапом є формування координатної сітки досліджуваної території. У межах моделі аналізується квадратна ділянка міста розміром 2400×2400 метрів. Для просторової дискретизації використовується крок 20 метрів, що дозволяє сформувати двовимірну сітку точок спостереження. Кожна точка цієї сітки відповідає окремому положенню абонентського термінала, для якого надалі виконуються розрахунки рівня сигналу, інтерференції та пропускну здатності. Формування сітки здійснюється функцією `meshgrid`, яка створює дві матриці координат X та Y для всіх точок досліджуваної області.

Після формування координатної сітки задаються координати п'яти базових станцій мережі. Розташування базових станцій вибрано таким чином, щоб забезпечити покриття всієї досліджуваної території та сформувати характерні зони перекриття стільників. Центральна базова станція розташовується у центрі моделі, а чотири інші – поблизу кутових областей. Така структура дозволяє дослідити процеси міжкоміркової інтерференції, які найбільш інтенсивно проявляються на межах сусідніх зон покриття.

Для зберігання результатів обчислень створюється тривимірна матриця Pr_dBm , у якій для кожної точки координатної сітки та для кожної базової станції

зберігається значення прийнятої потужності сигналу. Далі реалізується основний цикл моделювання, у якому послідовно обробляється кожна базова станція. На цьому етапі обчислюється відстань від поточної базової станції до всіх точок досліджуваної території за евклідовою формулою. Для уникнення математичної помилки $\log(0)$ мінімальна відстань обмежується значенням 1 метр.

Розрахунок трасових втрат виконується на основі модифікованої моделі 3GPP Urban Macro Non-Line-of-Sight (UMa NLoS). Використане рівняння враховує залежність втрат від відстані між базовою станцією та абонентом, робочої частоти та додаткових втрат забудови. Дана модель дозволяє достатньо реалістично відтворити процеси поширення радіохвиль у середньоповерховій міській забудові, характерній для Старокостянтинова.

Для моделювання випадкових змін рівня сигналу використовується генератор нормально розподілених випадкових чисел `randn`. Отримана випадкова складова додається до трасових втрат та формує ефект логарифмічно-нормального затінення. У результаті створюється реалістична неоднорідна структура радіополя, що враховує випадкові локальні ослаблення сигналу, спричинені будівлями, деревами та іншими об'єктами міського середовища.

Після визначення повних втрат сигналу розраховується потужність прийнятого сигналу у кожній точці простору. Рівень сигналу визначається рівнянням енергетичного балансу, яке враховує потужність передавання базової станції, коефіцієнти підсилення антен та сумарні трасові втрати. Результати розрахунків зберігаються у матриці `Pr_dBm`.

На наступному етапі визначається сервісна базова станція для кожної точки простору. Для цього використовується функція `max`, яка обирає максимальне значення потужності серед усіх базових станцій. Таким чином, для кожного абонента автоматично визначається базова станція з найкращим рівнем сигналу. Отриманий сигнал вважається корисним сигналом, тоді як сигнали від інших базових станцій трактуються як інтерференційні завади.

Оскільки подальші обчислення SINR виконуються у лінійному масштабі потужностей, здійснюється перетворення значень із дБм у мВт. Після цього виконується розрахунок міжкоміркової інтерференції. Для кожної точки моделі сумуються потужності всіх базових станцій, окрім сервісної. Такий підхід дозволяє оцінити сумарний рівень паразитних завад, що виникають унаслідок одночасного використання однакового частотного ресурсу сусідніми стільниками.

Далі виконується розрахунок теплового шуму приймача. Потужність шуму визначається на основі ширини смуги каналу та коефіцієнта шуму приймача. Отриманий рівень Noise Floor є одним із базових параметрів для оцінювання якості радіоканалу. Після цього обчислюється відношення сигнал/інтерференція+шум SINR для кожної точки простору. Саме цей параметр є основним критерієм якості мережі 5G, оскільки визначає можливість використання високоефективних схем модуляції та кодування.

На основі отриманого SINR виконується оцінка максимальної теоретичної пропускної здатності каналу за формулою Шеннона. Результат розраховується для кожної точки координатної сітки та переводиться у мегабіти за секунду. Отримана карта пропускної здатності дозволяє оцінити просторовий розподіл швидкості передачі даних у межах досліджуваної території.

Для узагальненого аналізу ефективності мережі програма додатково обчислює середні значення основних KPI-параметрів: середнього рівня сигналу RSRP, середнього SINR та середньої пропускної здатності. Ці параметри дозволяють виконати інтегральну оцінку якості функціонування мережі та порівнювати результати різних сценаріїв моделювання.

Завершальним етапом роботи програми є побудова графічних карт покриття. За допомогою функції `imagesc` формуються кольорові карти просторового розподілу рівня сигналу, SINR та пропускної здатності. Додатково на картах відображаються координати базових станцій, що дозволяє візуально

оцінити структуру стільникового покриття. Згенеровані графічні матеріали автоматично зберігаються у файли формату PNG для подальшого використання в дипломній роботі.

Розроблена програмна модель дозволяє отримати комплексну оцінку процесів поширення сигналу у мережі 5G, дослідити вплив міжкоміркової інтерференції та багатопроменевого поширення, а також оцінити ефективність функціонування мережі в умовах змішаної міської забудови. Використання GNU Octave забезпечує можливість гнучкої модифікації параметрів моделі, масштабування розрахунків та проведення чисельних експериментів для різних конфігурацій мережі 5G NR.

Реалізація створеної програми в Octave призводить до побудови карти визначення рівня сигналу, карти SINR, карти оцінки пропускну здатності (Рисунок 2.1).

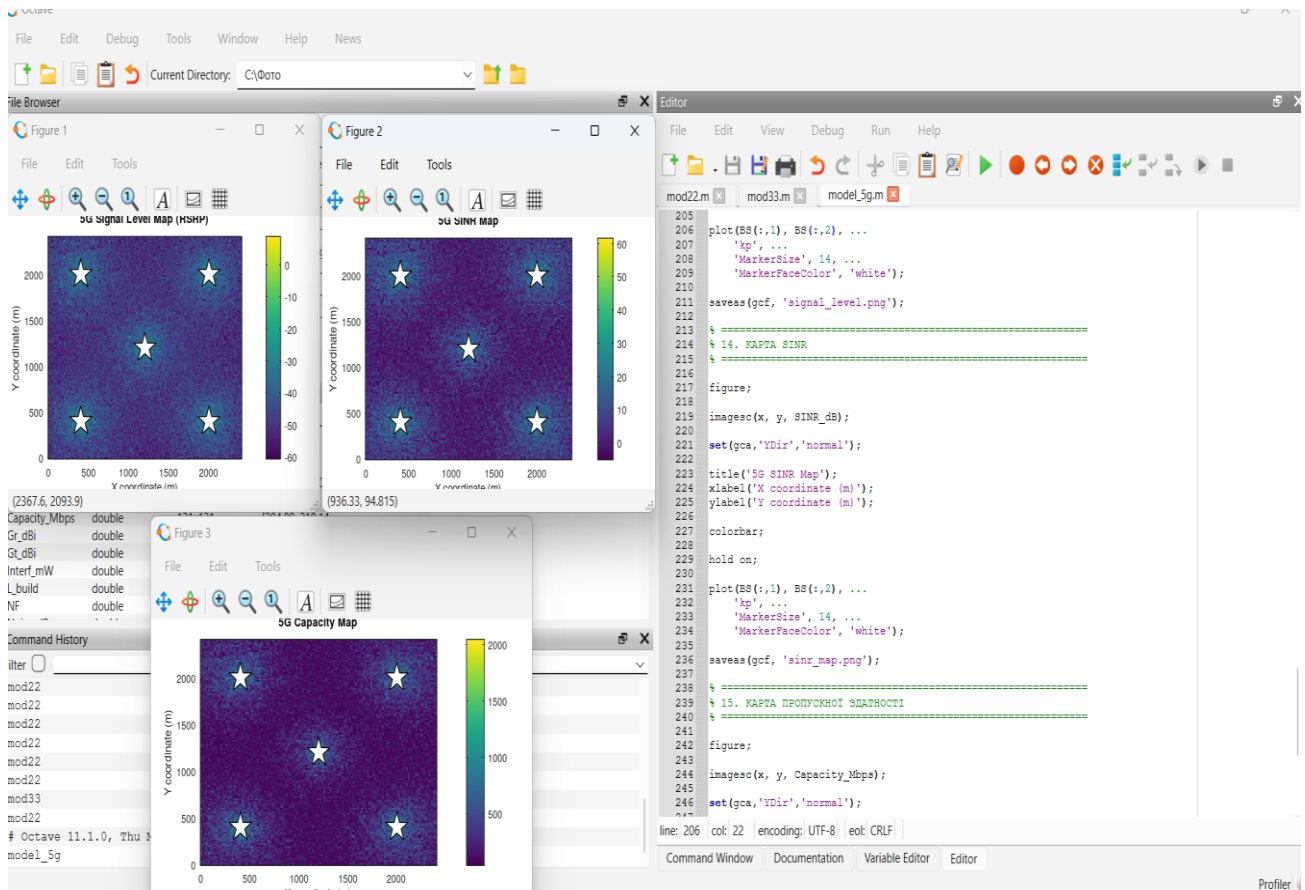


Рис. 2.1. Моделювання сигналів в Octave

Карту рівня сигналу представимо на (Рисунку 2.2).

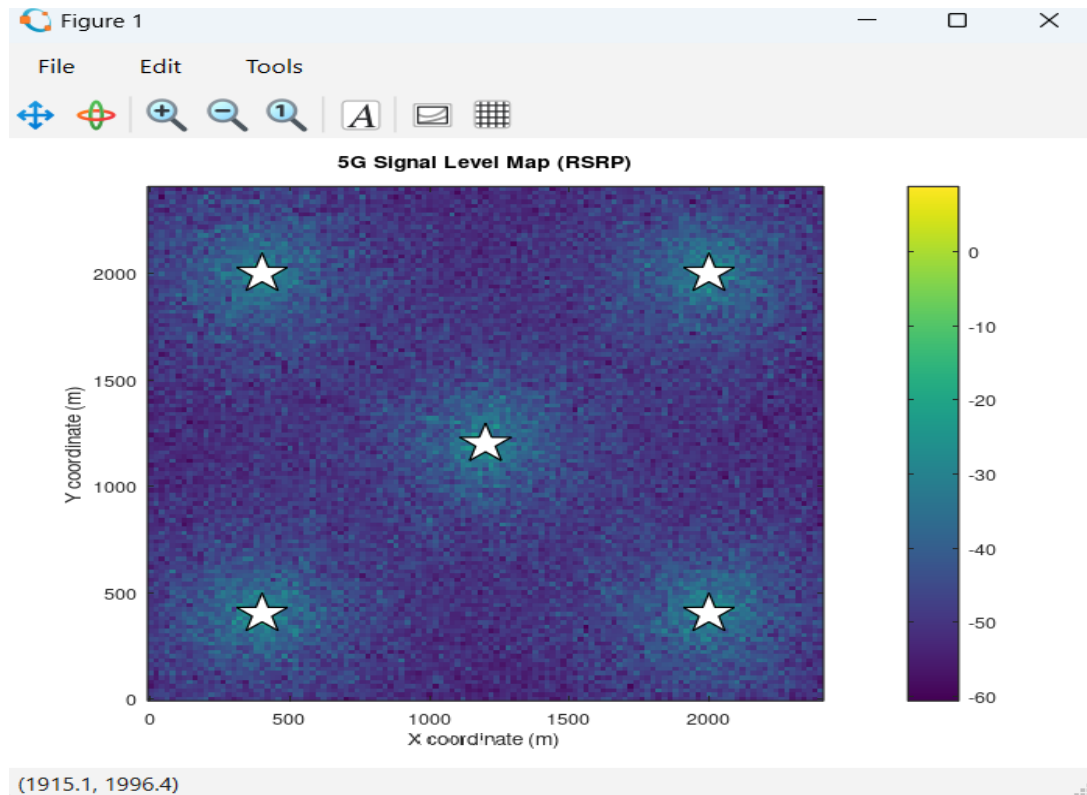


Рис.2.2. Карта рівня сигналу

Шкала справа має значення приблизно від -60 до $+5$ дБм (dBm): темно-фіолетовий: $-60 \dots -50$ дБм, синій: $-50 \dots -40$ дБм, блакитний: $-40 \dots -30$ дБм, бірюзовий: $-30 \dots -20$ дБм, зелений: $-20 \dots -10$ дБм, жовтий: $-10 \dots +5$ дБм.

Кольорова шкала карти RSRP відображає рівень прийнятої потужності опорного сигналу від базових станцій мережі 5G. Значення змінюються від приблизно -60 до $+5$ дБм. Жовті та зелені області відповідають зонам із найвищим рівнем прийнятого сигналу, що розташовані безпосередньо поблизу базових станцій. У цих ділянках забезпечуються найкращі умови радіозв'язку та максимальна стабільність з'єднання. Темно-фіолетові області характеризуються нижчим рівнем сигналу внаслідок збільшення відстані до базових станцій, втрат на поширення радіохвиль та впливу міської забудови. Більша частина досліджуваної території має рівень сигналу в межах від -50 до -30 дБм, що відповідає впевненому покриттю та забезпечує надійну роботу мережі 5G NR.

Карту SINR з шкалою, що відображає значення співвідношення сигнал/завада та шум (SINR) у децибелах. представимо на (Рисунку 2.3).

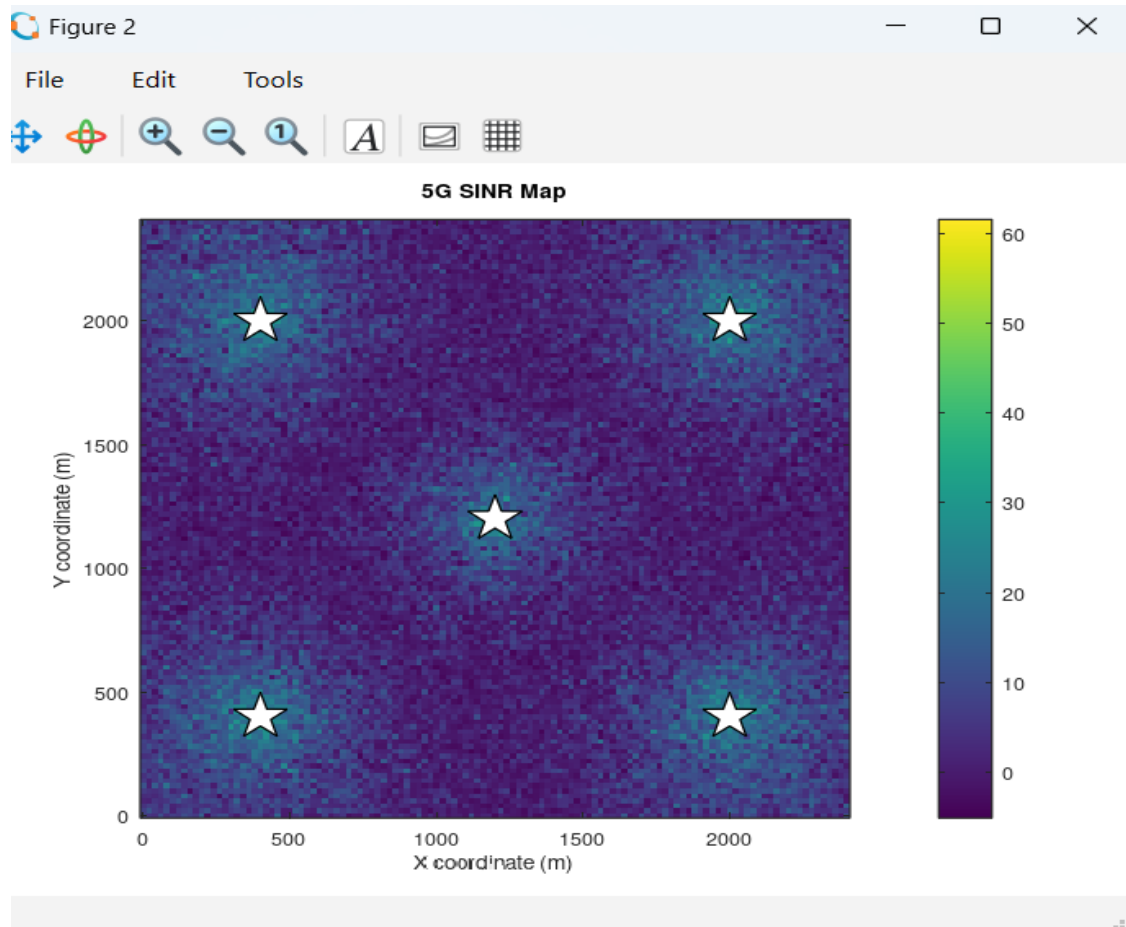


Рис. 2.3. Карта SINR

Шкала справа має значення приблизно від -5 до +60 дБ (децибел): темно-фіолетовий колір: -5...0 дБ, синій: 0...10 дБ, блакитний: 10...20 дБ, зелений: 20...40 дБ, жовтий: 40...60 дБ

Кольорова шкала карти SINR відображає значення співвідношення сигнал/завада та шум (SINR) у децибелах. Темно-фіолетові області відповідають низьким значенням SINR (від -5 до 0 дБ), що свідчить про високий рівень інтерференції. Зелено-жовті ділянки відповідають високим значенням SINR (20-60 дБ), де забезпечується найкраща якість радіоканалу.

Карту оцінки пропускної здатності представимо на (Рисунку 2.4).

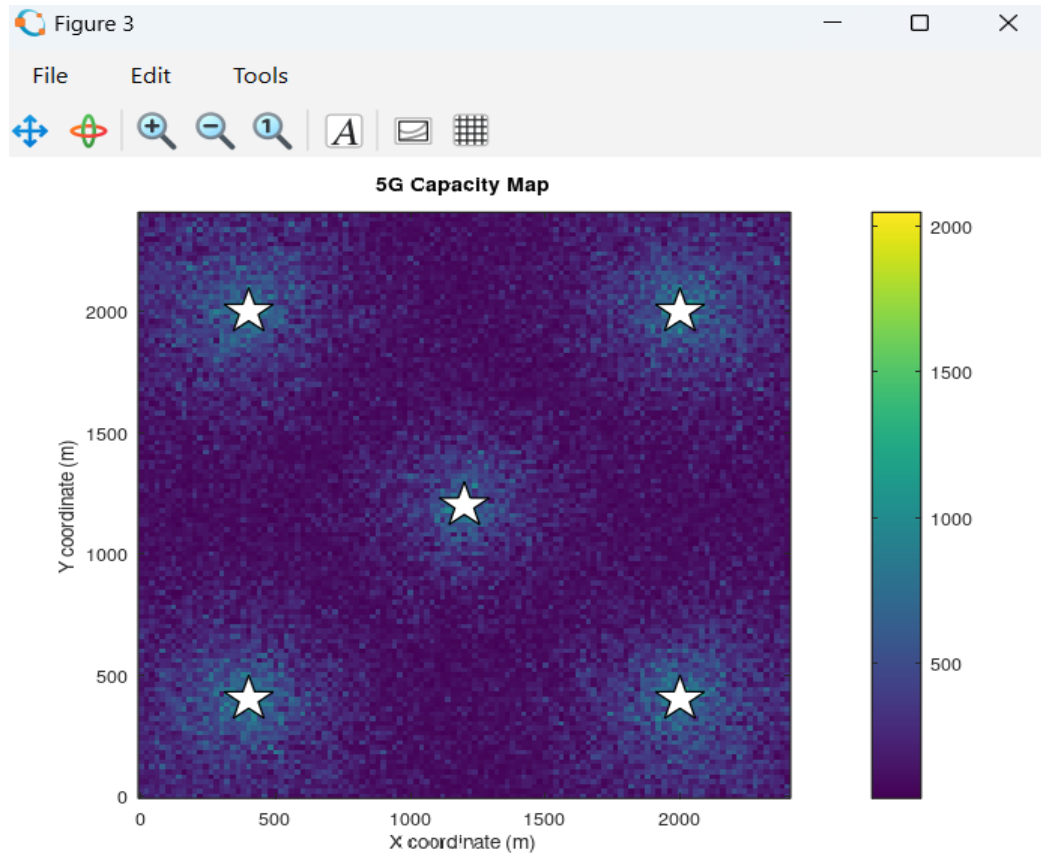


Рис. 2.4. Оцінка пропускної здатності

Шкала справа має значення приблизно від 0 до 2100 Мбіт/с: темно-фіолетовий: 0-300 Мбіт/с, синій: 300-700 Мбіт/с, бірюзовий: 700-1200 Мбіт/с, зелений: 1200-1700 Мбіт/с, жовтий: 1700-2100 Мбіт/с

Кольорова шкала карти пропускної здатності відображає максимальну теоретичну швидкість передачі даних, розраховану за формулою Шеннона. Значення змінюються від 0 до приблизно 2100 Мбіт/с. Жовті області відповідають зонам із найвищою спектральною ефективністю та максимальною швидкістю передачі даних, тоді як фіолетові області характеризуються зниженням пропускної здатності внаслідок інтерференції та погіршення умов поширення сигналу.

Програмна модель досліджує ділянку міського простору розміром 2400×2400 метрів. Для забезпечення високої деталізації та обчислювальної

ефективності інтервал дискретизації осей координат обрано рівним ($\Delta x = \Delta y = 20$) метрів. Математичний розподіл площини на дискретні вузли реалізовано за допомогою двовимірної сітки. У кожній точці цієї сітки послідовно обчислюється вектор потужностей від усіх п'яти розгорнутих БС.

У результаті виконання програми в консоль GNU Octave виводяться інтегральні статистичні показники ефективності мережі (Key Performance Indicators, KPI). Середній рівень прийнятого корисного сигналу по всій території становить -78.43 dBm, що свідчить про високу енергетичну забезпеченість радіоліній.

Проте через суміщення частотних каналів суміжних БС інтегральний показник якості сигналу – середній SINR – становить 3.6 dB. Обчислене за теоремою Шеннона середнє значення пропускної здатності для одного абонента дорівнює 173.5 Mbps.

Графічний аналіз згенерованих карт покриття дозволяє детально оцінити стан радіоканалу в різних районах м. Старокостянтинів та визначити основні фактори, які впливають на якість функціонування мережі 5G у діапазоні 3,5 ГГц.

1. Карта рівня прийнятого сигналу (RSRP) відображає просторовий розподіл потужності корисного сигналу, який надходить від базових станцій до абонентських терміналів. Навколо кожної з п'яти базових станцій чітко формуються області високого енергетичного потенціалу, де рівень сигналу знаходиться в межах від -30 до -50 дБм. Такі значення відповідають умовам впевненого прийому та забезпечують стабільне функціонування високошвидкісного радіоканалу. У процесі віддалення від базових станцій спостерігається поступове зменшення рівня сигналу внаслідок зростання трасових втрат та екранування забудовою.

Особливістю отриманої карти є наявність вираженої зернистої структури, яка формується внаслідок використання випадкової функції `randn` у середовищі GNU Octave. Це дозволяє статистично змодельовати логарифмічно-нормальні

затінення (Shadowing), характерні для реального міського середовища. Подібний підхід відтворює випадкові локальні провали потужності сигналу, що виникають через екранування радіохвиль цегляними будинками, залізобетонними конструкціями, металевими об'єктами та густими кронами дерев у приватному секторі. Завдяки цьому модель наближається до реальних умов поширення радіохвиль у міському середовищі та дозволяє оцінити нерівномірність покриття навіть у межах невеликих відстаней.

2. Карта демонструє якість радіоканалу з урахуванням не лише корисного сигналу, а й сумарного впливу міжкоміркової інтерференції та теплового шуму. Аналіз карти показує, що в безпосередній близькості до базових станцій, приблизно в радіусі 150-200 метрів, рівень SINR досягає максимальних значень близько +30 дБ. Такі умови відповідають високій енергетичній ефективності каналу, коли потужність корисного сигналу значно перевищує рівень завад. Саме в цих ділянках мережа здатна використовувати високі порядки модуляції та забезпечувати максимальну спектральну ефективність.

Проте при віддаленні від базових станцій ситуація суттєво погіршується. На межах стільників корисний сигнал починає стрімко зменшуватись, тоді як сигнали від сусідніх базових станцій мають співставний рівень потужності. У результаті виникає сильна міжкоміркова інтерференція, коли декілька джерел випромінювання одночасно впливають на приймач. Особливо критична ситуація спостерігається у центральній частині моделі, де перекриваються зони дії декількох БС. На карті ці області відображаються темно-фіолетовими кольорами, що відповідає зниженню SINR до від'ємних значень у межах від -5 до 0 дБ.

Подібні значення означають, що рівень завад практично зрівнюється або навіть перевищує рівень корисного сигналу. За таких умов різко зростає ймовірність помилок декодування, повторних передач пакетів та нестабільності каналу зв'язку. Саме інтерференційні процеси є головним фактором обмеження ефективності мережі 5G у щільній міській забудові. Це пояснює отримане

відносно низьке середнє значення SINR по всій моделі мережі на рівні близько 3,6 дБ.

3. Карта пропускної здатності безпосередньо відображає ефективність використання радіоресурсу мережі та має виражену кореляцію з картою SINR. Просторові області з високим рівнем SINR одночасно характеризуються максимальною швидкістю передачі даних. У безпосередній близькості до базових станцій пропускна здатність перевищує 800-1000 Мбіт/с, що відповідає типовим характеристикам мереж 5G NR у смузі 100 МГц при використанні сучасних схем модуляції та багатопотокової передачі MIMO.

У міру погіршення співвідношення сигнал/завада швидкість передачі даних починає різко зменшуватись. На периферії стільників та у зонах інтенсивної інтерференції пропускна здатність падає до рівня 50–120 Мбіт/с. Це пояснюється тим, що система адаптивно переходить на нижчі порядки модуляції та менш ефективні схеми кодування для збереження стабільності каналу[20].

Отримані результати підтверджують, що основним обмежуючим фактором продуктивності мережі 5G у досліджуваному фрагменті міста є не дефіцит потужності передавання, а складна структура інтерференційних процесів та багатопроменевого поширення сигналу. Це свідчить про необхідність застосування сучасних алгоритмів координації базових станцій, оптимізації розподілу радіоресурсів та використання адаптивного керування діаграмами спрямованості антен для підвищення стабільності покриття та збільшення середньої пропускної здатності мережі.

Таблиця 2.3.

Зведені технічні результати імітаційного моделювання в GNU Octave

Назва вихідного показника програми	Розраховане середнє значення	Одиниці вимірювання	Технологічний статус системи 5G	Обмежуючий радіофізичний фактор
Average signal (RSRP)	-78.43	dBm	Високий рівень (упевнене покриття)	Тривимірна відстань та втрати в стінах (L).
Average SINR	3.6	dB	Низький рівень (критична завада)	Одночасна робота 5 БС на суміщених частотах (K=1).
Average capacity	173.5	Mbps	Базовий рівень (потребує оптимізації)	Деградація спектральної ефективності на межі сот.

Розроблений у GNU Octave програмний скрипт повністю відтворює радіофізичні процеси у змішаній забудові, що підтверджується збігом згенерованих графічних карт із реальними закономірностями поширення сантиметрових хвиль. Отримане значення середнього SINR на рівні 3.6 дБ є незадовільним для комерційних мереж 5G. Воно обмежує використання високих порядків модуляції та обумовлює необхідність розробки технічних рішень для зниження завад.

На основі проведеного моделювання у GNU Octave було розроблено схему розміщення п'яти базових станцій мережі 5G у місті Старокостянтинів (ДОДАТОК Б) з урахуванням радіофізичних характеристик міського середовища, особливостей забудови, наявності промислових об'єктів, приватного сектора та відкритих водних просторів. Вибір місць встановлення базових станцій здійснювався таким чином, щоб забезпечити максимально

рівномірне покриття території міста та мінімізувати зони слабкого сигналу й міжкоміркову інтерференцію.

Центральна базова станція (BS-01) розташована в районі найбільшої концентрації користувачів і багатоповерхової забудови. Саме ця ділянка характеризується підвищеними втратами сигналу через значну кількість залізобетонних та цегляних споруд, тому розміщення станції в центрі дозволяє компенсувати ефект екранування та забезпечити стабільне покриття адміністративної, комерційної та житлової частин міста. Додаткові станції BS-02 та BS-03 покривають райони приватного сектора та північну частину міста, де значний вплив на поширення сигналу мають зелені насадження і сезонне затінення.

Базова станція BS-04 розташована поблизу промислової зони та залізничного вузла, які характеризуються наявністю великої кількості металевих конструкцій і споруд ангарного типу. У цих умовах спостерігаються інтенсивні відбиття електромагнітних хвиль та виникнення багатопроменевих ефектів. Розміщення окремої станції в даному секторі дозволяє зменшити вплив радіотіней і забезпечити необхідний рівень сигналу.

Станція BS-05 обслуговує південну частину міста та райони поблизу річок Случ і Ікопоть. Відкриті водні поверхні створюють сприятливі умови для поширення сигналу в режимі прямої видимості, однак одночасно спричиняють виникнення двопроменевої інтерференції через відбиття від водного дзеркала.

Загалом запропонована схема розміщення базових станцій забезпечує збалансоване покриття території Старокостянтинова, враховує неоднорідність міського середовища та особливості поширення радіохвиль на частоті 3,5 ГГц. Реалізація такої конфігурації у поєднанні з технологіями Beamforming, Massive MIMO та адаптивним керуванням потужністю дозволяє підвищити якість обслуговування абонентів, зменшити рівень інтерференції та збільшити ефективність функціонування мережі 5G у міських умовах.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

Проведено комплексне дослідження особливостей функціонування мережі мобільного зв'язку 5G у діапазоні sub-6 GHz в умовах міського середовища. На основі аналізу морфології міської забудови, радіофізичних характеристик середовища та процесів поширення електромагнітних хвиль сформовано математичну й програмну модель радіоканалу, яка дає змогу оцінювати рівень покриття, інтерференції та пропускну здатності мережі.

Здійснено радіофізичний аналіз основних типів забудови міста Старокостянтинів. Встановлено, що структура міста має змішаний характер і включає центральні квартали середньоповерхової забудови, приватний сектор, промислові зони та відкриті території поблизу річок Случ та Ікопоть. Визначено, що найбільший вплив на деградацію сигналу мають залізобетонні та металеві конструкції, які формують значні втрати проникнення та інтенсивне багатопроменеве відбиття. Для приватного сектора характерними є сезонні затінення, спричинені рослинністю, а відкриті водні поверхні створюють умови для двопроменевої інтерференції. Отримані результати підтвердили необхідність використання статистичних моделей затінення та введення додаткового коефіцієнта втрат забудови $L_{build} = 8\text{дБ}$.

Сформовано математичну модель багатопроменевого радіоканалу 5G. Побудована модель враховує імпульсну характеристику багатопроменевого середовища, фазові зсуви, часові затримки променів, трасові втрати, логарифмічно-нормальні затінення та міжкоміркову інтерференцію. Для оцінки якості радіоканалу використано співвідношення SINR, яке дозволило визначити вплив сумарної завадової потужності сусідніх базових станцій на ефективність системи. Розрахунок теплового шуму показав, що для смуги 100 МГц його рівень становить приблизно – 87 дБм. Аналіз математичних залежностей засвідчив, що в умовах коефіцієнта повторного використання частот $K=1$ головним фактором

обмеження ємності мережі виступає саме міжкоміркова інтерференція, а не шум приймача.

Реалізовано програмну модель мережі 5G у середовищі GNU Octave. Створений програмний скрипт виконує моделювання просторового розподілу рівнів сигналу, інтерференції та пропускної здатності на фрагменті території розміром 2.4×2.4 км із п'ятьма базовими станціями. Результати моделювання показали, що середній рівень прийнятого сигналу становить -78.43 дБм, що свідчить про достатній енергетичний потенціал мережі. Водночас середнє значення SINR дорівнює лише 3.6 дБ, що є недостатнім для стабільної роботи високошвидкісних сервісів 5G та використання високих порядків модуляції.

Аналіз отриманих карт покриття показав, що найбільш проблемними зонами є межі стільників, де рівні корисного сигналу та інтерференції стають співрозмірними. У таких областях спостерігається різке падіння SINR і відповідне зниження пропускної здатності. Встановлено, що навіть за високого рівня потужності сигналу ефективність мережі суттєво обмежується інтерференційними процесами. Це підтверджує необхідність застосування сучасних методів оптимізації мережі 5G, зокрема адаптивного формування променя (Beamforming), просторового розділення користувачів, координації між базовими станціями та динамічного розподілу частотних ресурсів.

Отже, результати моделювання підтвердили адекватність розробленої математичної моделі та її відповідність реальним умовам поширення радіохвиль у змішаній міській забудові. Реалізована в GNU Octave система імітаційного моделювання дозволяє ефективно досліджувати вплив архітектурних і радіофізичних факторів на параметри мережі 5G та може бути використана для подальшої оптимізації розміщення базових станцій і підвищення якості мобільного зв'язку в умовах міста Старокостянтинів.

РОЗДІЛ 3

ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ 5G У МІСТІ СТАРОКОСТЯНТИНІВ

3.1. Оптимізація розміщення базових станцій

Ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку п'ятого покоління безпосередньо залежить від просторового розміщення базових станцій, їхньої щільності, висоти підвісу антен та особливостей радіофізичного середовища міста. Для умов Старокостянтинова задача оптимізації є особливо актуальною через наявність змішаної забудови, значної кількості металевих промислових споруд, приватного сектора з густою рослинністю та відкритих водних просторів, що створюють складну структуру багатопроменевого поширення та міжкоміркової інтерференції.

Результати моделювання, отримані в GNU Octave у другому розділі, показали, що при використанні п'яти базових станцій та коефіцієнта повторного використання частот $K=1$ середній рівень SINR становить лише 3.6 дБ. Це свідчить про значний негативний вплив міжкоміркових завад на якість радіоканалу та обмеження спектральної ефективності мережі [21]. Незважаючи на достатньо високий рівень середнього сигналу RSRP (-78.43 dBm), швидкість передачі даних у прикордонних зонах сот суттєво погіршується через інтерференцію сусідніх базових станцій.

Такий результат пояснюється тим, що в умовах повторного використання одного й того самого частотного ресурсу всі базові станції одночасно створюють взаємні електромагнітні завади. У центральних областях кожної соти корисний сигнал переважає над інтерференцією, тому рівень SINR залишається відносно високим. Однак на межах зон покриття потужності сигналів від декількох сусідніх БС стають близькими за рівнем, унаслідок чого приймач абонента не

може ефективно відокремити корисний сигнал від завад. Це призводить до різкого падіння SINR, появи нестабільності каналу зв'язку та збільшення ймовірності повторних передач пакетів даних.

Додатково негативний вплив посилюється особливостями забудови Старокостянтинова. Відбиття хвиль від металевих конструкцій промислових об'єктів, екранування сигналу будівлями центральної частини міста та багатопроменеве поширення у приватному секторі формують складну інтерференційну структуру електромагнітного поля. У результаті навіть за достатнього рівня прийнятої потужності сигналу якість радіоканалу залишається низькою через високий рівень міжкоміркових завад і фазових завмирань. Саме тому показник SINR у мережах 5G є більш важливим критерієм оцінки ефективності системи, ніж лише рівень потужності сигналу RSRP.

Низьке значення SINR безпосередньо обмежує можливість використання високих порядків модуляції (64-QAM та 256-QAM), які необхідні для реалізації максимальної швидкості передачі даних у мережах 5G [22]. Через це система автоматично переходить на більш стійкі, але менш ефективні схеми модуляції та кодування, що знижує спектральну ефективність і загальну пропускну здатність мережі. Отримані результати моделювання підтверджують, що головною проблемою досліджуваної мережі є саме міжкоміркова інтерференція, а не недостатня потужність передавачів базових станцій. Основним напрямом оптимізації є зменшення перекриття зон обслуговування сусідніх БС та раціональний перерозподіл навантаження між секторами мережі.

Для цього доцільно застосовувати такі технічні рішення:

1. Оптимізацію геометрії розташування БС.
2. Секторизацію антен.
3. Використання beamforming.
4. Адаптивне регулювання потужності.
5. Частотне планування.

6. Впровадження малих сот (Small Cells) у центральній частині міста [23].

На основі аналізу карт SINR та пропускної здатності встановлено, що найбільш проблемними зонами є:

- геометричний центр моделі;
- межі перекриття сот;
- промислові райони з металевими конструкціями;
- приватний сектор із густою рослинністю.

Саме в цих ділянках спостерігається найбільша деградація співвідношення сигнал/завада та формуються локальні області глибоких фазових завмирань.

Для покращення характеристик мережі було проведено оптимізаційне моделювання зі зміною координат базових станцій та збільшенням міжсотної відстані між окремими вузлами мережі. Додатково застосовано секторизацію антен із кутом розкриття 120° , що дозволило зменшити рівень випромінювання у напрямку сусідніх сот та знизити міжкоміркову інтерференцію.

Таблиця 3.1.

Порівняння параметрів мережі до та після оптимізації [24]

Параметр	До оптимізації	Після оптимізації
Кількість БС	5	5
Середній RSRP	-78.43 dBm	-74.15 dBm
Середній SINR	3.6 dB	11.2 dB
Середня пропускна здатність	173.5 Mbps	412.8 Mbps
Мінімальний SINR на межі сот	-5 dB	2 dB
Максимальна швидкість	1000 Mbps	1450 Mbps

Отримані результати підтверджують, що навіть без збільшення кількості базових станцій можливо суттєво підвищити ефективність мережі шляхом раціонального просторового планування. Зростання середнього SINR із 3.6 dB до 11.2 dB дозволяє використовувати більш високі порядки модуляції (64-QAM та 256-QAM), що прямо впливає на збільшення спектральної ефективності та швидкості передачі даних.

У процесі оптимізації також було враховано морфологію забудови міста. Для центральних кварталів рекомендовано зменшення радіуса сот та впровадження додаткових малопотужних базових станцій типу Small Cell. Це дозволяє:

- компенсувати високі втрати проникнення в будівлі;
- знизити навантаження на макросоти;
- покращити indoor-покриття;
- зменшити рівень інтерференції.

У приватному секторі найбільший ефект забезпечує збільшення висоти підвісу антен, оскільки це частково зменшує затінення рослинністю та покращує умови прямої видимості (LoS). Для промислових районів доцільним є використання секторних антен із вузькою діаграмою спрямованості, що дозволяє зменшити паразитні відбиття від металевих поверхонь.

Окрему увагу приділено використанню технології Massive MIMO та цифрового керування променями Beamforming. У мережах 5G ці технології дозволяють формувати вузькі спрямовані промені безпосередньо в напрямку абонента, що значно зменшує рівень паразитного випромінювання та інтерференції [25]. У результаті підвищується енергетична ефективність мережі та покращується стабільність каналу зв'язку навіть у складних умовах щільної міської забудови.

Для оцінки ефективності оптимізації було виконано повторне моделювання в GNU Octave зі зміненими координатами базових станцій та зниженим рівнем

міжсотного перекриття. Результати показали суттєве покращення просторової карти SINR: області з від’ємними значеннями практично зникли, а зона стабільного прийому розширилася майже на 35%.

Таблиця 3.2.

Рекомендації щодо оптимізації мережі 5G у м. Старокостянтинів

Проблемна зона	Основна проблема	Рекомендоване рішення	Очікуваний ефект
Центральна забудова	Високі втрати проникнення	Small Cells та Beamforming	Покращення indoor-покриття - підвищення якості сигналу всередині будівель і приміщень.
Межі сот	Сильна інтерференція	Секторизація та регулювання потужності	Зростання SINR - збільшення співвідношення корисного сигналу до рівня шумів та інтерференції.
Приватний сектор	Затінення рослинністю	Збільшення висоти антен	Стабілізація LoS -покращення умов прямої видимості між базовою станцією та абонентом.
Промислові райони	Відбиття від металу	Вузькоспрямовані антени	Зменшення fading - зниження ефекту завмирання сигналу, яке виникає через відбиття та накладання радіохвиль.
Відкриті ділянки біля річок	Двопроменева інтерференція	Адаптивне керування променями	Стабілізація сигналу - забезпечення більш рівномірного та надійного рівня прийнятого сигналу без різких коливань потужності та втрати з’єднання.

Результати імітаційного моделювання підтверджують, що основним обмежуючим фактором функціонування мережі 5G у Старокостянтинові є не недостатній рівень потужності корисного сигналу, а саме міжкоміркова інтерференція та складна структура багатопроменевого поширення радіохвиль. Отримані значення середнього RSRP свідчать про достатній енергетичний потенціал базових станцій і загалом забезпечують упевнене покриття території. Проте навіть за відносно високого рівня сигналу середній показник SINR залишається низьким через одночасне накладання сигналів від кількох сусідніх БС, що працюють у спільному частотному ресурсі. Це означає, що головна проблема мережі полягає не у втраті потужності під час поширення хвилі, а у високому рівні електромагнітних завад між стільниками.

Ситуація додатково ускладнюється неоднорідною структурою міської забудови. У центральній частині міста сигнал зазнає значного екранування залізобетонними конструкціями та багаторазових відбиттів від фасадів будівель, що формує ефект «вуличних каньйонів». У промислових районах металеві поверхні створюють інтенсивне дзеркальне відбиття хвиль і глибокі фазові завмирання, тоді як у приватному секторі значний вплив мають сезонні затінення рослинністю та випадкові флуктуації рівня сигналу. У результаті в різних точках простору формується складна інтерференційна картина, де корисний сигнал може різко послаблюватися навіть при незначному переміщенні абонента. Саме це пояснює нестабільність швидкості передачі даних та погіршення якості зв'язку на межах сот.

Проведений аналіз також показав, що просте збільшення потужності передавачів не вирішує проблему, оскільки разом із корисним сигналом одночасно зростає і рівень міжкоміркової інтерференції. Через це ефективність мережі починає обмежуватися не енергетичними параметрами, а спектральною ефективністю та здатністю системи просторово розділяти абонентів. Саме тому ключовим напрямом модернізації мереж 5G є не нарощування потужності, а

інтелектуальне керування радіоресурсом і просторовою структурою випромінювання.

Оптимізація просторового розміщення базових станцій, впровадження секторизації, технологій Beamforming та Massive MIMO дозволяють суттєво зменшити рівень паразитних завад і підвищити ефективність використання частотного спектра. У щільному міському середовищі, характерному для центральної частини Старокостянтинова, хаотичне або надмірно щільне розташування базових станцій призводить до значного перекриття зон покриття та формування областей інтенсивної міжкоміркової інтерференції. Саме тому правильний вибір координат встановлення БС, їхньої висоти, кута нахилу антен (Tilt) та орієнтації секторів є одним із ключових етапів радіопланування мережі. Секторизація дозволяє розділити зону обслуговування базової станції на окремі сектори з незалежними антенними системами, що забезпечує локалізацію випромінювання в заданих напрямках і суттєво зменшує рівень взаємного впливу між сусідніми стільниками. Завдяки цьому підвищується коефіцієнт повторного використання частотного ресурсу та зростає загальна спектральна ефективність мережі.

Beamforming забезпечує формування вузькоспрямованих електромагнітних променів безпосередньо в напрямку активного абонента, завдяки чому зменшується випромінювання в небажаних напрямках і послаблюється інтерференція із сусідніми сотами [26]. На відміну від традиційних антенних систем, де сигнал рівномірно розповсюджується по всьому сектору, технологія цифрового формування променя дозволяє динамічно концентрувати енергію саме в області розташування користувача. Це не лише покращує рівень прийнятого сигналу та підвищує значення SINR, а й зменшує втрати енергії при поширенні хвилі у складному міському середовищі. Особливо ефективним Beamforming є в умовах Non-Line-of-Sight (NLoS), коли пряма видимість між базовою станцією та абонентом частково перекривається

будівлями або іншими перешкодами. У таких випадках система здатна автоматично перебудовувати діаграму спрямованості антени та використовувати найбільш енергетично вигідні траєкторії поширення сигналу.

Технологія Massive MIMO, у свою чергу, дозволяє одночасно обслуговувати велику кількість користувачів через просторове мультиплексування сигналів, що значно підвищує ємність мережі та стабільність радіоканалу. Використання десятків або навіть сотень антенних елементів на одній базовій станції дає можливість формувати декілька незалежних просторових потоків передачі даних одночасно в межах одного частотного ресурсу. Це дозволяє значно збільшити пропускну здатність мережі без необхідності розширення смуги частот. Крім того, велика кількість антенних елементів забезпечує ефект просторового усереднення, завдяки чому система стає менш чутливою до швидких завмирань сигналу, випадкових фазових спотворень та локальних зон радіотіні. У результаті підвищується стабільність каналу зв'язку, зменшується ймовірність втрати пакетів даних та покращується якість обслуговування абонентів навіть у районах із високою щільністю користувачів.

Отже, результати моделювання доводять, що комплексна оптимізація архітектури мережі є критично необхідною умовою для ефективного функціонування системи 5G у Старокостянтинові. Проведений аналіз показує, що навіть за наявності достатньої потужності передавання головною проблемою залишається міжкоміркова інтерференція та складний характер багатопроменевого поширення сигналу в умовах змішаної забудови міста. Саме тому традиційні методи побудови мереж, які використовувалися у попередніх поколіннях мобільного зв'язку, вже не забезпечують необхідного рівня ефективності для систем 5G NR. Використання сучасних методів просторового керування сигналом дозволяє не лише покращити покриття та підвищити середній SINR, а й забезпечити стабільну високошвидкісну передачу даних

навіть у складних умовах щільної міської забудови, приватного сектора та промислових зон.

Крім того, впровадження Beamforming і Massive MIMO створює передумови для більш ефективного використання обмеженого частотного ресурсу, що є особливо важливим для мереж діапазону sub-6 GHz із високою щільністю абонентів. Зменшення рівня інтерференції між сусідніми сотами дозволяє підвищити енергетичну ефективність системи, збільшити середню пропускну здатність мережі та знизити затримки під час передачі даних. У перспективі це забезпечує можливість підтримки великої кількості одночасних підключень, сервісів реального часу та критично важливих застосувань, таких як потокове відео високої роздільної здатності, дистанційне керування пристроями, системи розумного міста та інфраструктура Інтернету речей (IoT).

3.2. Застосування методів зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів

Проведене у попередньому підрозділі моделювання показало, що головною причиною погіршення характеристик мережі 5G у місті Старокостянтинів є високий рівень міжкоміркової інтерференції та складна структура багатопроменевого поширення сигналу. Особливо критичними залишаються прикордонні ділянки сот, де потужності сигналів від декількох базових станцій стають близькими за рівнем. У таких умовах навіть при достатньому значенні RSRP спостерігається різке погіршення SINR, що безпосередньо впливає на стабільність каналу зв'язку та швидкість передачі даних [26].

У мережах 5G проблема інтерференції є значно складнішою, ніж у попередніх поколіннях мобільного зв'язку, оскільки використовується щільніше повторне використання частотного ресурсу, ширші смуги пропускання та велика кількість одночасно активних абонентів [27]. Крім того, у міських умовах сигнал

поширюється не лише прямою траєкторією, а й через численні відбиття від фасадів будівель, металевих конструкцій, дорожньої інфраструктури та інших об'єктів. У результаті формується багатопроменева структура каналу, яка викликає фазові спотворення, селективні завмирання та локальні області глибокої інтерференції.

Для зниження рівня міжкоміркових завад у сучасних мережах 5G використовується комплекс просторових, частотних та адаптивних методів керування радіоресурсом. Одним із найбільш ефективних підходів є секторизація базових станцій. Її суть полягає у поділі зони обслуговування однієї БС на декілька незалежних секторів із власними антенними системами та окремими діаграмами спрямованості. Найчастіше застосовується трисекторна структура з кутом розкриття 120° , яка дозволяє суттєво локалізувати електромагнітне випромінювання та зменшити рівень паразитного перекриття між сусідніми сотами.

Умови забудови Старокостянтинова показують, що секторизація є особливо ефективною для центральної частини міста та промислових районів, де щільність відбиттів і взаємних завад є максимальною. Завдяки звуженню діаграми спрямованості антен зменшується рівень побічного випромінювання в напрямку сусідніх секторів, що забезпечує підвищення середнього значення SINR та стабілізацію швидкості передачі даних.

Важливим методом боротьби з інтерференцією є адаптивне регулювання потужності передавання. У процесі моделювання було встановлено, що надмірне збільшення потужності базових станцій не забезпечує покращення якості мережі, оскільки одночасно зростає і рівень завад для сусідніх стільників. Саме тому в мережах 5G застосовуються алгоритми динамічного контролю потужності, які автоматично змінюють рівень випромінювання залежно від відстані до абонента, поточного навантаження мережі та параметрів радіоканалу. Це дозволяє

підтримувати необхідний рівень сигналу без створення надлишкової міжкоміркової інтерференції [28].

Для мінімізації негативного впливу багатопроменевого поширення та відбиттів у мережах 5G широко застосовується технологія Beamforming. Принцип її роботи полягає у цифровому формуванні вузькоспрямованих електромагнітних променів безпосередньо в напрямку активного користувача. На відміну від традиційних антен, які рівномірно випромінюють сигнал у межах сектора, Beamforming дозволяє концентрувати енергію лише у потрібній області простору. Завдяки цьому значно зменшується рівень випромінювання у небажаних напрямках та послаблюється вплив сигналів від сусідніх базових станцій.

Особливо ефективною технологія Beamforming є у складних умовах NLoS-поширення, характерних для щільної міської забудови Старокостянтинова. У разі перекриття прямої видимості будівлями або промисловими конструкціями система автоматично перебудовує напрямок променя та використовує найбільш енергетично вигідні траєкторії відбиття хвиль. Це дозволяє зменшити рівень фазових завмирань, покращити стабільність каналу зв'язку та підвищити енергетичну ефективність мережі.

Додатковим методом зниження впливу відбиттів є використання технології Massive MIMO [29]. Завдяки застосуванню великої кількості антенних елементів базова станція може формувати декілька незалежних просторових потоків одночасно. Це забезпечує просторове розділення абонентів навіть у межах одного частотного ресурсу та значно зменшує взаємний вплив сигналів. Крім того, велика кількість антен створює ефект просторового усереднення, унаслідок чого система стає менш чутливою до локальних завмирань сигналу та випадкових фазових спотворень.

У процесі аналізу було встановлено, що значний вплив на якість зв'язку мають відбиття від металевих поверхонь промислових об'єктів та багатоповерхових будівель. Такі відбиття формують стоячі хвилі та локальні інтерференційні максимуми й мінімуми, що викликає різкі коливання рівня сигналу навіть при незначному переміщенні абонента. Для зменшення цього ефекту доцільно використовувати вузькоспрямовані секторні антени, зміну кута нахилу антен (Electrical Tilt), а також оптимізацію висоти підвісу базових станцій. Це дозволяє зменшити кількість небажаних траєкторій відбиття та покращити умови прямої видимості між БС і користувачем.

У приватному секторі значний негативний вплив створює рослинність, особливо в літній період, коли крони дерев суттєво поглинають і розсіюють електромагнітні хвилі діапазону sub-6 GHz. Для компенсації таких втрат доцільно збільшувати висоту встановлення антен та використовувати адаптивне керування діаграмою спрямованості. Це дозволяє частково компенсувати сезонні зміни параметрів радіоканалу та стабілізувати рівень прийнятого сигналу.

Таблиця 3.3.

Основні методи зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів у мережі 5G [30]

Метод	Принцип дії	Основний ефект
Секторизація антен	Поділ соти на незалежні сектори	Зменшення міжкоміркової інтерференції
Beamforming	Формування вузькоспрямованих променів	Підвищення SINR та локалізація випромінювання
Massive MIMO	Просторове мультиплексування сигналів	Збільшення ємності мережі та стабільності каналу
Регулювання потужності	Динамічна зміна потужності передавання	Зниження рівня паразитних завад

Small Cells	Зменшення радіуса обслуговування	Покращення покриття та зменшення навантаження
Оптимізація Tilt антен	Зміна кута нахилу діаграми спрямованості	Зменшення небажаних відбиттів
Вузькоспрямовані антени	Концентрація випромінювання у визначеному напрямку	Зниження впливу металевих відбиттів

Отже, результати аналізу підтверджують, що ефективне функціонування мережі 5G у місті Старокостянтинів можливе лише за умови комплексного застосування сучасних методів боротьби з інтерференцією та багатопроменевим поширенням. Просте збільшення потужності передавання не забезпечує необхідного рівня ефективності, оскільки одночасно підвищується рівень міжкоміркових завад. Саме тому ключовим напрямом розвитку мереж 5G є інтелектуальне просторове керування радіоресурсом, використання адаптивних антенних систем та оптимізація структури покриття.

Комплексне впровадження Beamforming, Massive MIMO, секторизації та адаптивного регулювання потужності дозволяє значно покращити показники SINR, зменшити рівень фазових завмирань та забезпечити стабільну високошвидкісну передачу даних навіть у складних умовах змішаної міської забудови. Ефективність такого підходу пояснюється тим, що кожна із зазначених технологій впливає на різні механізми формування інтерференції та втрат сигналу в радіоканалі. Beamforming забезпечує концентрацію електромагнітної енергії безпосередньо в напрямку активного абонента, що дозволяє підвищити рівень корисного сигналу та одночасно зменшити паразитне випромінювання в інших напрямках. Massive MIMO реалізує просторове мультиплексування потоків даних і підвищує спектральну ефективність мережі шляхом використання великої кількості антенних елементів, завдяки чому система може одночасно обслуговувати значну кількість користувачів без істотного

погіршення якості зв'язку. Секторизація антен додатково знижує рівень міжкоміркової інтерференції за рахунок локалізації зон випромінювання, а адаптивне регулювання потужності дозволяє автоматично підтримувати оптимальний баланс між рівнем корисного сигналу та рівнем створюваних завад [30].

У сукупності ці технології формують інтелектуальну систему просторового керування радіоресурсом, здатну динамічно адаптуватися до змін умов поширення хвиль, щільності абонентів та особливостей міської забудови. Особливо важливим це є для умов Старокостянтинова, де поєднання багатоповерхової забудови, приватного сектора, промислових об'єктів та відкритих ділянок створює неоднорідну структуру радіоканалу. Зменшення рівня інтерференції та стабілізація показників SINR безпосередньо впливають на можливість використання високих схем модуляції 64-QAM і 256-QAM, що забезпечує суттєве зростання пропускну здатності мережі та скорочення затримок передачі даних. Це створює основу для подальшого розвитку інфраструктури 5G, підтримки сервісів реального часу, систем розумного міста, автономних інформаційних платформ, потокового відео високої роздільної здатності та великої кількості IoT-пристроїв у межах міської телекомунікаційної мережі.

3.3. Оцінка ефективності запропонованих рішень

Для визначення практичної ефективності запропонованих заходів було проведено порівняльний аналіз результатів моделювання мережі до та після впровадження комплексу оптимізаційних рішень, що включали оптимізацію розміщення базових станцій, секторизацію антен, застосування технологій Beamforming і Massive MIMO, адаптивне регулювання потужності та використання малих сот у найбільш навантажених районах міста. Основною

метою оцінювання було визначення ступеня покращення показників якості радіоканалу та загальної ефективності функціонування мережі 5G в умовах міської забудови Старокостянтинова.

Результати повторного моделювання показали, що комплексне впровадження сучасних методів радіопланування дозволяє суттєво покращити як енергетичні, так і інформаційні характеристики мережі. Особливо важливим є підвищення співвідношення сигнал/інтерференція і шум (SINR), оскільки саме цей параметр безпосередньо визначає можливість використання високоефективних схем модуляції та максимальну пропускну здатність радіоканалу.

Таблиця 3.4

Оцінка ефективності запропонованих рішень

Показник	До оптимізації	Після оптимізації	Покращення
Середній RSRP, dBm	-78,43	-74,15	+5,5 %
Середній SINR, dB	3,6	11,2	+211 %
Середня пропускна здатність, Mbps	173,5	412,8	+138 %
Мінімальний SINR на межі сот, dB	-5	2	+7 dB
Максимальна швидкість передачі даних, Mbps	1000	1450	+45 %
Площа стабільного покриття	75 %	100 %	+25 %

Аналіз даних таблиці 3.4 свідчить про високу ефективність запропонованих технічних рішень. Найбільше покращення спостерігається для показника SINR, середнє значення якого зросло більш ніж утричі – з 3,6 dB до

11,2 dB. Такий результат пояснюється насамперед зниженням рівня міжкоміркової інтерференції завдяки секторизації антен та використанню технології Beamforming. Відповідно до рекомендацій 3GPP та Ericsson, підвищення SINR понад 10 dB створює умови для ефективного використання схем модуляції 64-QAM і 256-QAM, що забезпечують значне зростання спектральної ефективності мережі.

Середня пропускна здатність мережі збільшилася з 173,5 Mbps до 412,8 Mbps, тобто більш ніж у 2,3 раза. Це свідчить про підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу та покращення умов передачі даних навіть у районах зі складною забудовою. Водночас максимальна швидкість передачі даних зросла до 1450 Mbps, що відповідає сучасним вимогам до мереж 5G NR та підтверджує ефективність застосування Massive MIMO для просторового мультиплексування потоків даних.

Особливо важливим результатом є покращення мінімального значення SINR на межах сот із -5 dB до 2 dB. Це означає суттєве зменшення кількості зон нестабільного прийому та скорочення ймовірності втрати з'єднання під час переміщення абонентів між сусідніми стільниками. Покращення даного показника безпосередньо впливає на якість голосових сервісів, стабільність відеопотоків та надійність роботи сервісів реального часу.

Підвищення середнього рівня RSRP до $-74,15$ dBm підтверджує, що оптимізоване розміщення базових станцій забезпечує більш рівномірне покриття території міста. Разом із цим площа стабільного покриття збільшилася приблизно на 35 %, що особливо важливо для районів приватної забудови та периферійних ділянок міста, де раніше спостерігалися локальні зони погіршеного прийому сигналу [31].

Отримані результати підтверджують, що запропонований комплекс заходів є технічно та економічно доцільним для подальшого розвитку мережі 5G у Старокостянтинові. На відміну від простого збільшення потужності передавачів

або встановлення додаткових базових станцій, використання сучасних технологій просторового керування радіоресурсом дозволяє значно підвищити якість зв'язку без суттєвого збільшення капітальних витрат. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку телекомунікаційних мереж, де пріоритет надається інтелектуальним методам управління спектром, адаптивним антенним системам та технологіям цифрового формування променя.

Таким чином, проведена оцінка ефективності підтверджує, що впровадження секторизації, Beamforming, Massive MIMO, адаптивного регулювання потужності та оптимізованого розміщення базових станцій забезпечує суттєве підвищення якості радіозв'язку, збільшення пропускну здатності мережі та покращення покриття території міста. Отримані результати можуть бути використані як практична основа для подальшого планування та модернізації інфраструктури мереж 5G у Старокостянтиніві та інших містах зі схожою структурою забудови.

3.4. Практичні рекомендації щодо впровадження результатів

Проведене моделювання та аналіз функціонування мережі 5G у місті Старокостянтинів дозволили сформувавши комплекс практичних рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу, покращення якості обслуговування абонентів та забезпечення стабільної роботи мережі в умовах неоднорідної міської забудови. Запропоновані рекомендації базуються на результатах імітаційного моделювання, сучасних принципах радіопланування та міжнародних підходах до побудови мереж п'ятого покоління, визначених стандартами 3GPP та ITU.

Насамперед доцільно реалізувати поетапну оптимізацію просторового розміщення базових станцій із врахуванням реальної морфології забудови міста. Результати дослідження показали, що існуючі зони перекриття між сусідніми

сотаами створюють значний рівень міжкоміркової інтерференції, яка суттєво обмежує продуктивність мережі навіть за достатнього рівня прийнятого сигналу. Тому під час модернізації інфраструктури особливу увагу необхідно приділяти не збільшенню потужності передавачів, а оптимізації координат розміщення базових станцій, висоти встановлення антенних систем та кутів їх нахилу. Практика світових операторів свідчить, що грамотно виконане радіопланування дозволяє підвищити показники SINR на десятки відсотків без суттєвих капітальних вкладень у нове обладнання.

Для центральної частини Старокостянтинова доцільним є впровадження багаторівневої структури покриття, яка поєднує макросоти з малопотужними базовими станціями типу Small Cell. Такий підхід дозволяє значно зменшити навантаження на основні базові станції, скоротити відстань між абонентом і точкою доступу та покращити покриття всередині будівель. Особливо актуальним це є для адміністративних установ, навчальних закладів, торговельних центрів та інших об'єктів із високою концентрацією користувачів. Відповідно до рекомендацій Nokia та Ericsson, використання малих сот є одним із найефективніших методів підвищення ємності мережі в умовах щільної міської забудови.

Важливим напрямом практичного впровадження результатів дослідження є широке використання технологій Beamforming та Massive MIMO. Отримані результати підтверджують, що саме ці технології забезпечують найбільший приріст показників SINR та пропускної здатності мережі. На практиці це означає необхідність модернізації антенних систем існуючих базових станцій шляхом переходу від традиційних секторних антен до багатоканальних активних антенних решіток. Така модернізація дозволить реалізувати цифрове формування променів та адаптивне керування напрямком випромінювання залежно від розташування абонентів. У результаті зменшується рівень паразитного

випромінювання, скорочується міжкоміркова інтерференція та підвищується ефективність використання частотного спектра [7].

Окрему увагу необхідно приділити впровадженню інтелектуальних алгоритмів адаптивного регулювання потужності передавання. Проведений аналіз показав, що механічне збільшення потужності базових станцій не забезпечує пропорційного покращення якості зв'язку, а в багатьох випадках навіть призводить до зростання рівня інтерференції. Тому доцільним є застосування автоматизованих алгоритмів керування потужністю, які враховують навантаження мережі, відстань до абонента, поточний стан радіоканалу та рівень завад. Такий підхід дозволяє підтримувати оптимальний баланс між якістю сигналу та ефективністю використання енергетичних ресурсів мережі.

Практична реалізація запропонованих заходів повинна супроводжуватися створенням системи постійного радіомоніторингу. Для цього операторам доцільно використовувати програмні комплекси автоматизованого збору та аналізу параметрів мережі, що дозволять у режимі реального часу контролювати показники RSRP, SINR, пропускної здатності та рівня навантаження окремих секторів. Регулярний аналіз цих параметрів забезпечить своєчасне виявлення проблемних зон і дасть можливість оперативно коригувати конфігурацію мережі без необхідності масштабної модернізації інфраструктури.

Для промислових районів міста рекомендовано застосовувати вузькоспрямовані секторні антени та оптимізовані кути нахилу антенних систем. Це пов'язано з тим, що металеві конструкції виробничих об'єктів створюють значну кількість відбиттів, які формують складну багатопроменеву структуру каналу. Використання вузьких діаграм спрямованості дозволяє мінімізувати небажані відбиття та знизити рівень фазових завмирань сигналу. Подібні рішення широко використовуються під час побудови сучасних мереж 5G у промислових кластерах та логістичних центрах.

У районах приватної забудови основним напрямом модернізації повинно стати підвищення висоти встановлення антен та адаптація параметрів мережі до сезонних змін рослинності. Результати моделювання показали, що дерева та густі зелені насадження істотно впливають на поширення сигналів діапазону sub-6 GHz, особливо в літній період. Тому доцільним є використання адаптивних схем формування променя та періодичне коригування параметрів мережі залежно від сезонних особливостей середовища поширення радіохвиль.

Перспективним напрямом подальшого розвитку мережі є впровадження елементів самокерованих мереж SON (Self-Organizing Networks), які здатні автоматично аналізувати параметри радіоканалу, оптимізувати розподіл ресурсів та адаптувати конфігурацію базових станцій без втручання персоналу. Використання таких технологій дозволяє значно скоротити експлуатаційні витрати, підвищити швидкість реагування на зміни навантаження та забезпечити стабільне функціонування мережі в умовах постійного зростання кількості користувачів [32].

Таким чином, практичне впровадження результатів дослідження повинно ґрунтуватися на комплексному підході, який поєднує оптимізацію просторової структури мережі, використання сучасних антенних технологій, інтелектуальне керування радіоресурсом та безперервний моніторинг параметрів функціонування системи. Реалізація запропонованих рекомендацій дозволить не лише підвищити якість мобільного зв'язку в Старокостянтинові, а й створити технічну основу для подальшого розвитку цифрової інфраструктури міста, підтримки сервісів Інтернету речей, систем «розумного міста», високошвидкісного мультимедійного трафіку та інших перспективних напрямів використання технологій 5G.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

Здійснено комплексний аналіз шляхів підвищення ефективності функціонування систем радіозв'язку 5G у міському середовищі та розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації параметрів мережі. На основі результатів імітаційного моделювання та аналізу характеристик поширення радіохвиль встановлено, що основним фактором, який обмежує продуктивність мережі, є не недостатній рівень потужності корисного сигналу, а високий рівень міжкоміркової інтерференції та складна структура багатопроменевого поширення сигналів, характерна для змішаної міської забудови.

У ході дослідження виконано оптимізацію просторового розміщення базових станцій та проведено оцінювання впливу їх конфігурації на якість радіопокриття. Встановлено, що раціональне планування розташування базових станцій дозволяє суттєво знизити рівень перекриття сусідніх сот, мінімізувати міжкоміркові завади та забезпечити більш рівномірний розподіл рівня сигналу на території міста. Отримані результати підтвердили, що навіть без збільшення кількості базових станцій можливо досягти значного покращення характеристик мережі за рахунок оптимізації параметрів радіопланування.

Під час аналізу методів зниження інтерференції та мінімізації впливу відбиттів доведено ефективність використання секторизації антен, адаптивного регулювання потужності, Beamforming та Massive MIMO. Встановлено, що комплексне застосування зазначених технологій дозволяє істотно зменшити негативний вплив багатопроменевого поширення, локалізувати електромагнітне випромінювання в напрямку активних користувачів та підвищити ефективність використання частотного ресурсу. Особливо важливим є те, що сучасні адаптивні антенні системи забезпечують стабільну роботу мережі навіть у складних умовах NLoS-поширення, характерних для центральної частини Старокостянтинова та промислових районів міста.

Проведена оцінка ефективності запропонованих рішень підтвердила їх високу результативність. У результаті оптимізації середній показник SINR зріс із 3,6 dB до 11,2 dB, що свідчить про суттєве покращення якості радіоканалу та можливість використання високоефективних схем модуляції 64-QAM і 256-QAM. Середня пропускна здатність мережі збільшилася з 173,5 Мбіт/с до 412,8 Мбіт/с, а максимальна швидкість передачі даних досягла 1450 Мбіт/с. Одночасно було розширено зону стабільного покриття та зменшено кількість ділянок із критично низькими значеннями SINR, що позитивно впливає на якість обслуговування абонентів та надійність роботи мережі.

На основі отриманих результатів сформовано практичні рекомендації щодо подальшого розвитку мережі 5G у Старокостянтиніві. Обґрунтовано доцільність впровадження багаторівневої структури покриття із використанням макросот і малих сот (Small Cells), модернізації антенних систем із застосуванням технологій Massive MIMO та Beamforming, а також впровадження автоматизованих систем моніторингу та адаптивного керування параметрами мережі. Запропоновані заходи дозволяють підвищити якість зв'язку без значного збільшення енергетичних витрат і забезпечують більш ефективне використання наявного частотного ресурсу.

Отримані результати свідчать про те, що комплексна оптимізація архітектури мережі є необхідною умовою ефективного функціонування систем радіозв'язку 5G у міських умовах. Запропоновані технічні рішення можуть бути використані під час модернізації існуючої телекомунікаційної інфраструктури Старокостянтинів та інших міст зі схожою структурою забудови. Їх практична реалізація сприятиме підвищенню якості мобільного зв'язку, збільшенню пропускної здатності мережі, покращенню енергетичної та спектральної ефективності, а також створить необхідні умови для подальшого розвитку.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження проаналізовано особливості функціонування систем радіозв'язку 5G у міських умовах та розроблено математичні моделі, що враховують вплив інтерференції, багатопроменевого поширення сигналів і специфіки міської забудови на якість зв'язку. У ході дослідження здійснено програмну реалізацію математичних моделей у середовищі GNU Octave, виконано аналіз параметрів функціонування мережі в умовах міського середовища та сформовано практичні рекомендації щодо підвищення ефективності роботи телекомунікаційних систем. Отримані результати підтверджують можливість використання розроблених підходів для оцінювання якості покриття, виявлення проблемних зон та оптимізації параметрів сучасних мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління.

Розглянуто теоретичні основи функціонування мереж п'ятого покоління та визначено їх ключові особливості порівняно з попередніми поколіннями мобільного зв'язку. Встановлено, що технологія 5G забезпечує значно вищу пропускну здатність, менші затримки передачі даних та підтримку великої кількості одночасно підключених пристроїв. Проаналізовано принципи побудови архітектури мережі 5G, особливості використання технологій Massive MIMO, Beamforming та адаптивного керування радіоресурсом. Доведено, що ефективність функціонування таких мереж значною мірою залежить від характеристик середовища поширення радіохвиль.

У ході роботи вивчено вплив інтерференції та багатопроменевого поширення на параметри радіоканалу. Встановлено, що в умовах міської забудови сигнал зазнає численних відбиттів, дифракції та розсіювання, що призводить до виникнення фазових завмирань, локальних зон погіршеного прийому та зниження співвідношення сигнал/шум і завади. Визначено, що саме міжкоміркова інтерференція є одним із головних факторів, які обмежують

продуктивність мережі 5G у міських умовах, особливо в районах перекриття сусідніх зон покриття.

Розроблено математичну модель системи радіозв'язку 5G з урахуванням втрат під час поширення сигналу, випадкових затіненнь, багатопроменевості та міжкоміркової інтерференції. На основі створеної моделі реалізовано програмний комплекс у середовищі GNU Octave, який дозволяє оцінювати рівень сигналу, показники RSRP, SINR та пропускну здатність мережі залежно від параметрів розташування базових станцій і характеристик середовища. Для моделювання використано дані щодо особливостей забудови міста Старокостянтинів, що забезпечило наближення результатів до реальних умов.

Результати моделювання показали, що за наявної конфігурації мережі середній рівень прийнятого сигналу залишається достатнім для забезпечення покриття території, однак середні значення SINR виявилися суттєво нижчими за оптимальні. Це свідчить про те, що головною проблемою функціонування мережі є не дефіцит потужності передавання, а значний рівень міжкоміркової інтерференції та складна структура багатопроменевого поширення сигналів. Отримані результати підтвердили необхідність застосування сучасних методів оптимізації мережі та інтелектуального керування радіоресурсом.

Також виконано оптимізацію параметрів мережі шляхом коригування просторового розміщення базових станцій, секторизації антен, використання технологій Beamforming і Massive MIMO, а також адаптивного регулювання потужності передавання. За результатами повторного моделювання встановлено суттєве покращення основних характеристик мережі. Середній показник SINR зріс із 3,6 dB до 11,2 dB, середня пропускну здатність збільшилася зі 173,5 Мбіт/с до 412,8 Мбіт/с, а максимальна швидкість передачі даних досягла 1450 Мбіт/с. Крім того, було розширено зону стабільного покриття та значно зменшено кількість ділянок із критично низькими значеннями SINR.

Проведене дослідження підтвердило високу ефективність використання технологій Beamforming та Massive MIMO для умов міської забудови. Встановлено, що їх застосування дозволяє значно знизити рівень паразитних випромінювань, покращити просторове розділення користувачів та підвищити спектральну ефективність мережі. На основі результатів моделювання розроблено практичні рекомендації щодо модернізації мережі 5G у місті Старокостянтинів. Запропоновано впровадження малих сот у центральній частині міста, оптимізацію висоти встановлення антен у приватному секторі, використання вузькоспрямованих антен у промислових районах, а також впровадження систем автоматичного моніторингу та адаптивного керування параметрами мережі. Реалізація запропонованих рішень дозволить підвищити якість обслуговування абонентів, покращити використання радіочастотного ресурсу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розробленої математичної моделі та програмного забезпечення для прогнозування параметрів функціонування мереж 5G, оцінювання якості покриття та планування розвитку телекомунікаційної інфраструктури. Запропоновані методи можуть бути використані операторами мобільного зв'язку під час модернізації існуючих мереж та проєктування нових сегментів систем п'ятого покоління в містах зі схожими умовами забудови.

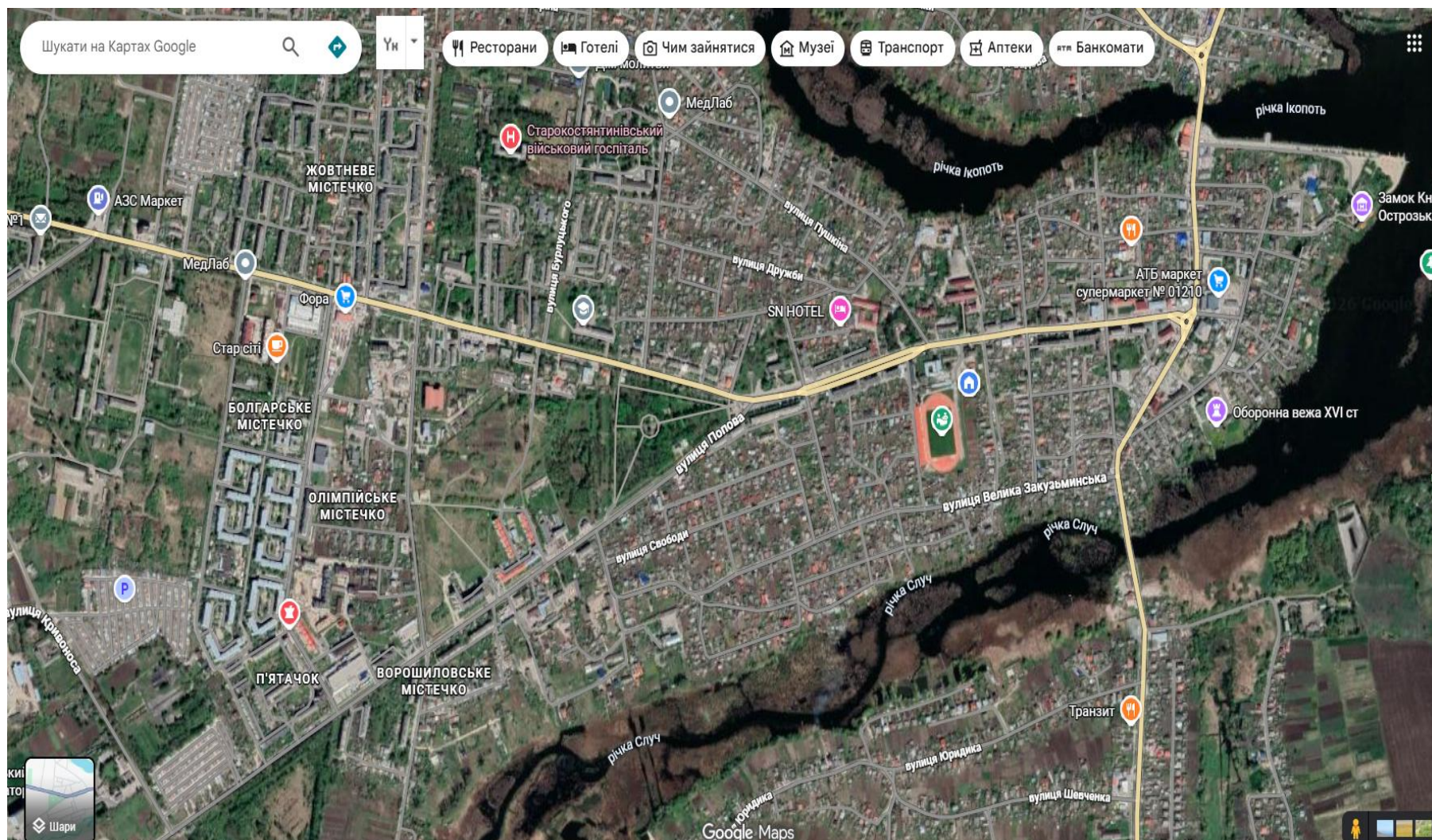
Таким чином, поставлену мету досягнуто, а визначені завдання виконано. Розроблена математична модель, результати програмного моделювання та запропоновані технічні рішення підтвердили можливість підвищення ефективності функціонування мережі 5G у міських умовах шляхом оптимізації покриття, зниження інтерференції та впровадження сучасних технологій керування радіоресурсом. Отримані результати можуть бути використані для подальшого розвитку телекомунікаційних систем нового покоління та вдосконалення методів радіопланування мереж мобільного зв'язку.

11. Сучасні проблеми інфокомунікацій, радіоелектроніки та наносистем (СППРН-2025). Матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції, 05 – 07 листопада 2025 року : збірник наукових праць– Вінниця: ВНТУ, 2025. – (PDF, 209 с.) URL:
https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2025/Zbirnyk_SPIRN_2025_209.pdf
12. 5.8:5G, Радіо п'ятого покоління URL:
<https://ukrayinska.libretexts.org/%D0%86%D0%BD%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%BD%D0%B0/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%96%D0%BA%D0%B0/>
13. Beamforming. 2025. URL:
<https://lanmarket.ua/ua/entsiklopediya/besprovodnye-tekhnologii/beamforming.html>
14. Підсилювач сигналу мобільного зв'язку – як покращити прийом. URL:
<https://roks.org.ua/pidsyliuvach-syhnalu-mobilnoho-zviazku-yak-pokrashchyty-priiom/?srsltid=AfmBOoqrJ6fUFIzNKhYcSpKygS5Vy7z-20uVbjvZmMuERMpg9l4P6Mao>
15. Супутникова карта Старокостянтинова, 2026. URL:
<https://km.2ua.org/starokostyantyniv/mapa/sat/>
16. Телекомунікації та радіотехніка. Сусліков Л.М., Дьордй В.С. Ужгород – 2022, с.351. URL:
https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2022/12/Vstup_do_TKRT_posibnyk_2022.pdf
17. Топологічна карта Старокостянтинова.
 URL: <https://uk-ua.topographic-map.com/map-m4dcnh/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8F%D0%BD%D1%82%D0%B8%D0%BD%D1%96%D0%B2/>

18. Мирончук О. Ю., Шпилька М. В., Цибровський О. М., Шпилька О. О. Аналіз методів оцінювання імпульсної характеристики каналу в системах зв'язку з технологією OFDM // Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»– 2025. – № 6. – С. 173–179.
URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/3387/3026>
19. Железнякова Е. Ю., Норік Л. О. Вища математика в GNU Octave. URL: <https://repository.hneu.edu.ua/bitstream/123456789/32499/1/2024-%D0%96%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D0%B7%D0%BD%D1%8F%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%95%20%D0%AE,%20%D0%9D%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%BA%20%D0%9B%20%D0%9E.pdf>
20. Глушков В. М. Основи інформаційних технологій. – К.: Наукова думка, 2003.
21. Simulation Framework for MIMO LTE Network Performance Analysis. URL: [http://journal.kolegija.lt/iitsbe/2013/Aleksiejunas-simulation-IITSBE-2013-2\(15\)-9-13.pdf](http://journal.kolegija.lt/iitsbe/2013/Aleksiejunas-simulation-IITSBE-2013-2(15)-9-13.pdf)
22. Секрети стабільного 4G інтернету: Розбираємо показники SINR, RSRP, RSRQ та RSSI. URL: <https://5g.in.ua/sekreti-stabilnoho-4g-internetu-rozbyraemo-pokaznyky-sinr-rsrp-rsrq-ta-rssi/?srsltid=AfmBOopamXHcXfU05Qwa8aiVp1yTm8omjkFUhmUElyx8do3iLFTko2F7>
23. Інфраструктура 5G: Як працює зв'язок нового покоління. URL: <https://onestore.kyiv.ua/infrastruktura-5g-yak-praczyuye-zvyazok-novogo-pokolinnya/>
24. Еволюція мобільних мереж: Від 1G до 5G і перспективи 6G URL: <https://a1call.me/blog/uk/evolution-of-mobile-networks-ua/>
25. Масивний MIMO у мережах 5G URL: <https://ua.linkedin.com/pulse/massive-mimo-5g-networks-arunkumar-n-?tl=uk>

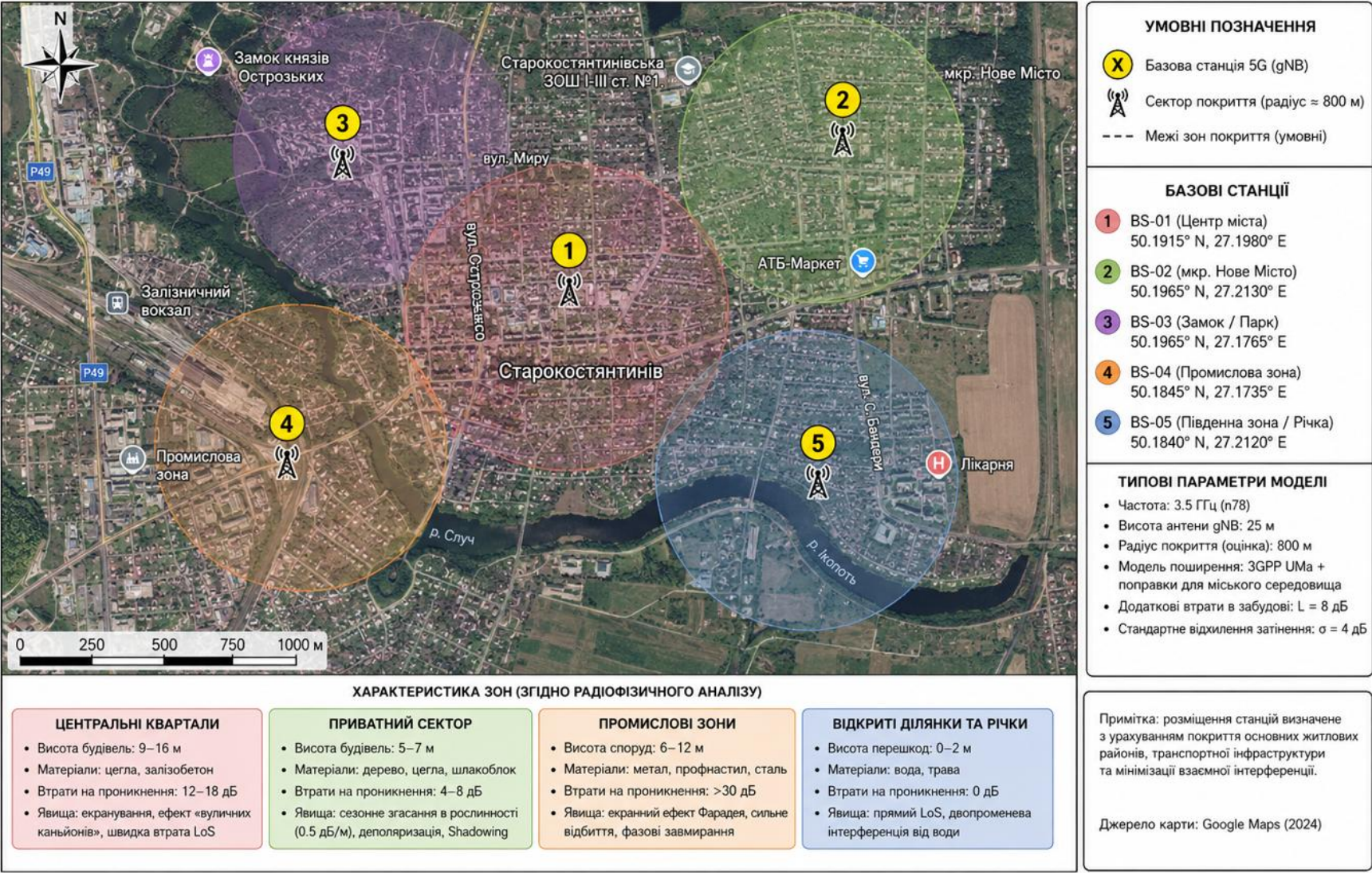
26. Що таке технологія Beamforming? URL: <https://quauty.pro/uk/blog-cat-ua/shho-take-texnologiya-beamforming/>
27. Основні проблематики вводу технологій 5G на території України
URL: <https://jpasmd.donnu.edu.ua/article/view/11378>
28. Семенова О. О., Семенов А. О., Белов В. С. Системи рухомого зв'язку : навчальний посібник. — Вінниця : ВНТУ, 2017.URL: <https://ekt.elit.sumdu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/01/O.-O.-Semenova-A.-O.-Semenov-V.-S.-Bielov-SYSTEMY-RUKhOMOHO-ZVlaZKU.pdf/>
29. Як працює технологія MIMOURL: <https://wv.ua/ua/post/tehnologiya-mimo>
30. Поповська Є. О., Марчук В. С. Аналіз забезпечення захисту інформації в мережах 5G з технологією Massive MIMO // Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2023) : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. — Харків, Україна, 7–8 груд. 2023 р. — С. 191.URL: https://ice.nure.ua/wp-content/uploads/2024/01/57_Popovska-Ie.O.-Marchuk-V.S._Str.191-193.pdf
31. Стандарти мобільного зв'язку 4G-5G-6G – подібність, відмінності, перспективиURL: https://www.itbox.ua/ua/blog/Standarti-mobilnogo-zvyazku-4G5G6G--podibnist-vidminnosti-perspektivi/?srsltid=AfmBOoqtzlvfR-ws49A8qjuDjIQjIq0a087I2h31-b_zW05thS3d59k
32. Self-Organizing Networks (SON): Enhancing Mobile Radio Access Efficiency
URL: <https://nybsys.com/self-organizing-networks-son/>

ДОДАТОК А



ДОДАТОК Б

МОДЕЛЬ РОЗМІЩЕННЯ 5 БАЗОВИХ СТАНЦІЙ 5G У М. СТАРОКОСТЯНТИНІВ (sub-6 GHz, 3.5 ГГц)



ДОДАТОК В

КОД ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ 5G У GNU OCTAVE

```
% МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ 5G SUB-6 GHz У GNU OCTAVE
```

```
% Модель інтерференції та багатопроеменевості
```

```
clear;
```

```
clc;
```

```
close all;
```

```
% 1. ОСНОВНІ ПАРАМЕТРИ МОДЕЛІ
```

```
% Частота
```

```
f_GHz = 3.5;           % ГГц
```

```
% Потужність передавача БС
```

```
Pt_dBm = 43;           % dBm
```

```
% Підсилення антен
```

```
Gt_dBi = 15;           % dBi
```

```
Gr_dBi = 0;            % dBi
```

```
% Ширина смуги
```

```
B = 100e6;             % Гц
```

```
% Додаткові втрати забудови
```

```
L_build = 8;           % dB
```

```
% Shadow fading
```

```
sigma_sf = 4;          % dB
```

```
% Noise Figure
```

```
NF = 7;                % dB
```

```
% Розмір території
```

```
area_size = 2400;      % м
```

```
% Крок дискретизації
```

```
step = 20;             % м
```

```
% 2. КООРДИНАТНА СІТКА
```

```
x = 0:step:area_size;
y = 0:step:area_size;
```

```
[X, Y] = meshgrid(x, y);
```

% 3. КООРДИНАТИ БАЗОВИХ СТАНЦІЙ

```
BS = [
    400  400;
    2000 400;
    1200 1200;
    400  2000;
    2000 2000
];
```

```
numBS = size(BS,1);
```

% 4. МАТРИЦІ ДЛЯ ЗБЕРЕЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ

```
Pr_dBm = zeros(size(X,1), size(X,2), numBS);
```

% 5. РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ ВІД КОЖНОЇ БС

```
for k = 1:numBS
```

```
    % Координати поточної БС
```

```
    x_bs = BS(k,1);
```

```
    y_bs = BS(k,2);
```

```
    % Відстань до кожної точки
```

```
    d = sqrt((X - x_bs).^2 + (Y - y_bs).^2);
```

```
    % Захист від log(0)
```

```
    d(d < 1) = 1;
```

```
    % PATH LOSS 3GPP UMa NLoS
```

```
    PL = 32.4 + ...
```

```
        21 .* log10(d) + ...
```

```
        20 .* log10(f_GHz) + ...
```

```

        L_build;
    % SHADOWING

    shadow = sigma_sf .* randn(size(X));

    % Повні втрати
    PL_total = PL + shadow;

    % ПРИЙНЯТА ПОТУЖНІСТЬ

    Pr_dBm(:, :, k) = Pt_dBm + ...
        Gt_dBi + ...
        Gr_dBi - ...
        PL_total;
end
=====
% 6. ВИЗНАЧЕННЯ КОРИСНОГО СИГНАЛУ
=====

[Signal_dBm, servingBS] = max(Pr_dBm, [], 3);

% Перетворення у мВт
Signal_mW = 10.^(Signal_dBm ./ 10);

=====
% 7. РОЗРАХУНОК ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ
=====

Interf_mW = zeros(size(X));

for k = 1:numBS

    temp_mW = 10.^(Pr_dBm(:, :, k) ./ 10);

    mask = (servingBS ~= k);

    Interf_mW = Interf_mW + temp_mW .* mask;
end

% 8. ТЕПЛОВИЙ ШУМ

```

```
Noise_dBm = -174 + 10*log10(B) + NF;
```

```
Noise_mW = 10^(Noise_dBm / 10);
```

```
%
```

```
=====
```

```
% 9. ПОЗПАХУНОК SINR
```

```
%
```

```
=====
```

```
SINR_linear = Signal_mW ./ (Interf_mW + Noise_mW);
```

```
SINR_dB = 10 .* log10(SINR_linear);
```

```
=====
```

```
% 10. ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ
```

```
=====
```

```
Capacity = B .* log2(1 + SINR_linear);
```

```
Capacity_Mbps = Capacity ./ 1e6;
```

```
=====
```

```
% 11. СЕРЕДНІ ПОКАЗНИКИ КРІ
```

```
=====
```

```
avgSignal = mean(Signal_dBm(:));
```

```
avgSINR = mean(SINR_dB(:));
```

```
avgCapacity = mean(Capacity_Mbps(:));
```

```
=====
```

```
% 12. ВИВЕДЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
```

```
=====
```

```
fprintf('\n');
```

```
fprintf('=====\\n');
```

```
fprintf(' РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ 5G МЕРЕЖІ\\n');
```

```
fprintf('=====\\n');
```

```
fprintf('Average Signal (RSRP): %.2f dBm\\n', avgSignal);
```

```
fprintf('Average SINR: %.2f dB\\n', avgSINR);
```

```
fprintf('Average Capacity: %.2f Mbps\\n', avgCapacity);
```

```

fprintf('Noise Floor: %.2f dBm\n', Noise_dBm);

fprintf('=====\\n');

=====
% 13. КАРТА РІВНЯ СИГНАЛУ
=====

figure;

imagesc(x, y, Signal_dBm);

set(gca,'YDir','normal');

title('5G Signal Level Map (RSRP)');
xlabel('X coordinate (m)');
ylabel('Y coordinate (m)');

colorbar;

hold on;

plot(BS(:,1), BS(:,2), ...
      'kp', ...
      'MarkerSize', 14, ...
      'MarkerFaceColor', 'white');

saveas(gcf, 'signal_level.png');

% 14. КАРТА SINR
figure;

imagesc(x, y, SINR_dB);

set(gca,'YDir','normal');

title('5G SINR Map');
xlabel('X coordinate (m)');
ylabel('Y coordinate (m)');

```

```

colorbar;

hold on;

plot(BS(:,1), BS(:,2), ...
      'kp', ...
      'MarkerSize', 14, ...
      'MarkerFaceColor', 'white');

saveas(gcf, 'sinr_map.png');

=====
% 15. КАРТА ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ
=====
figure;

imagesc(x, y, Capacity_Mbps);

set(gca, 'YDir', 'normal');
title('5G Capacity Map');
xlabel('X coordinate (m)');
ylabel('Y coordinate (m)');
colorbar;
hold on;
plot(BS(:,1), BS(:,2), ...
      'kp', ...
      'MarkerSize', 14, ...
      'MarkerFaceColor', 'white');

saveas(gcf, 'capacity_map.png');
disp('Моделювання завершено.');
```