

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:
«Проектування мережі 4G на території Глухівської громади»

Завідувач кафедри ЕКТ

А. С. Опанасюк

Керівник роботи

В. В. Гриненко

Студент групи ТК -91

С. М. Іващенко

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота бакалавра містить аналіз основних принципів мережі LTE та її проектування на прикладі Глухівської громади, Сумської області.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження мережі, детальний опис її особливостей, виконання необхідних розрахунків для подальшого проектування, виявлення оптимальної території для розгортання мережі та створення моделі за допомогою відповідного програмного забезпечення.

Незважаючи на постійний прогрес у сфері телекомунікацій, мережа LTE продовжує виконувати ключову роль у забезпеченні зв'язком більшості країн. Проектування LTE мережі є актуальним завданням, оскільки воно надає можливість збирати необхідну інформацію про обладнання та ресурси, необхідні для успішного моделювання мережі. Це дозволяє ефективно планувати та розгортати мережу LTE з урахуванням специфіки території і забезпечити високу якість послуг зв'язку для користувачів.

Кваліфікаційна робота містить 46 сторінок, 19 рисунків, 2 таблиці, 9 джерел літератури.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедрою Опанасюк О.А.

«___» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТА
Іващенко Святослава Миколайовича

1. Тема роботи: «**Проектування мережі 4G на території Глухівської громади**»
Затверджена наказом по університету від "31" березня 2023 р. № 0316 - VI
2. Термін здачі студентом закінченої роботи: 05.06.2023 р;
3. Вихідні дані до роботи: проектування мережі на території Глухівської громади, частотні діапазони – 1800 та 900 МГц для міської та заміської забудови, населення – 38553 чол., площа – 453,6 км², густота населення – 85 чол/км², висота над рівнем моря – 166 м.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що належить розробити):
1. Огляд літератури та поставлення задачі роботи; 2. Детальний огляд технології LTE; 3. Розрахунок параметрів проєктованої мережі; 4. Моделювання мережі LTE.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

6. Дата видачі завдання: 31.03.2023 р;

Керівник _____
(підпис)

Гриненко В. В.
(прізвище, ім'я, по-батькові)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис)

Іващенко С. М.
(прізвище, ім'я, по-батькові)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування етапів курсового проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Огляд літератури згідно з темою дослідження	20.04.2023	
2	Узагальнення інформації та опис технології LTE	30.04.2023	
3	Розрахунок необхідних для проектування мережі параметрів	17.05.2023	
4	Моделювання мережі з використанням програмного забезпечення Atoll	24.05.2023	
5	Узагальнення результатів та оформлення остаточної роботи	31.05.2023	
6	Підготовка кваліфікаційної роботи до захисту	05.06.2023	

Студент

Іващенко С. М.

Керівник

Гриненко В. В.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ	4
ВСТУП	5
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ.....	6
1.1. Розвиток стандартів стільникового зв'язку від 1G до 5G	6
1.2. Поширення мобільного зв'язку на території України.....	9
1.3. Загальні відомості про об'єкт проектування.....	12
2 РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ ТЕХНОЛОГІЇ LTE	14
2.1. Розвиток стандарту LTE та його технічні параметри	14
2.2. Архітектура мережі стандарту LTE	16
2.3. Радіоінтерфейс LTE та аналіз його особливостей	18
2.4. Фізичний рівень та канална структура LTE	19
2.5. Огляд технології OFDMA та її використання в стандарті LTE	22
2.6. Аналіз технології MIMO та її вплив на якість передачі даних	24
3 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ LTE.....	26
3.1. Алгоритм проектування мережі LTE	26
3.2. Розрахунок пропускної здатності мережі LTE	27
3.3. Розрахунок зон радіопокриття проектованої мережі LTE.....	31
4 МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ LTE В ПРОГРАМІ ІМІТАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ.....	36
4.1. Огляд програмних засобів для моделювання мережі LTE	36
4.2. Детальний опис програми імітації передачі сигналів	37
4.3. Результати моделювання мережі LTE в програмі	38
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	45

					<i>ЕлІТ 6.172.00.02.004 ПЗ</i>		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Іващенко</i>			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гриненко</i>				3	
<i>Реценз.</i>					СумДУ, гр. ТК-91		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затверд.</i>		<i>Опанасюк</i>					

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

LTE – Long Term Evolution (довгостроковий розвиток);

3GPP – 3rd Generation Partnership Project (проект партнерства третього покоління);

E-UTRAN – Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network (наземна мережа радіодоступу стандарту UMTS);

eNB – Evolved-NodeB (базова станція з підтримкою LTE);

FDD – Frequency Division Duplex (дуплекс з частотним розділенням);

TDD – Time Division Duplex (дуплекс з часовим розділенням);

MIMO – Multiple Input Multiple Output (множинний вхід – множинний вихід, декілька передавальних і декілька приймальних антен);

OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів);

HSDPA – High-Speed Downlink Packet Access (високошвидкісна пакетна передача даних від базової станції до мобільного телефону);

БС – базова станція.

					ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Зв'язок на базі бездротових технологій є одним з найбільш швидко зростаючих напрямів інформаційно-комунікаційних технологій сучасного світу. За останні десятиліття було досягнуто значних успіхів у розробці та удосконаленні бездротових технологій. Однією з найбільш розповсюджених бездротових технологій є 4G, що забезпечує високошвидкісний доступ до Інтернету та інших сервісів передачі даних на мобільних пристроях.

Розвиток 4G був можливий завдяки використанню технології LTE. Основними перевагами стандарту LTE є висока швидкість передачі даних, краща надійність зв'язку та менше затримки, що призвело до появи нових сервісів та додатків на мобільних пристроях, таких як онлайн-ігри, потокове відео та медіа-стрімінг. До інших переваг стандарту LTE належать підтримка міжнародних стандартів та розширене покриття зв'язку в порівнянні з попередніми стандартами. Зазначені переваги зробили LTE одним з основних стандартів мобільного зв'язку та забезпечили значний розвиток мобільного зв'язку та мобільної інтернет-технології, що дозволило користувачам знаходитися в постійному зв'язку та використовувати широкий спектр сервісів та додатків на мобільних пристроях.

Однак у Глухівській громаді поточна телекомунікаційна інфраструктура є обмеженою і застарілою, що призводить до слабкого покриття мобільної мережі. Тому існує потреба у проектуванні та впровадженні мережі 4G, яка зможе охопити всю територію громади, забезпечуючи надійне, швидке та доступне мобільне підключення до Інтернету.

Дослідження спрямоване на визначення найбільш прийнятної архітектури мережі 4G, технології та обладнання, необхідних для забезпечення безперебійного покриття всієї громади. Зрештою, результати цього дослідження сприятимуть покращенню покриття мережі мобільного зв'язку та підключення до Інтернету в Глухівській громаді, дозволяючи її мешканцям користуватися перевагами сучасних телекомунікаційних технологій та покращувати якість життя.

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

1.1. Розвиток стандартів стільникового зв'язку від 1G до 5G

Розвиток стандартів стільникового зв'язку є важливим історичним процесом, який відображає технологічний прогрес сучасного бездротового зв'язку. Його аналіз створює можливість поглибитися в історію та еволюцію мобільних комунікаційних систем, розкриваючи ключові інновації та виклики, з якими стикалися дослідники і розробники на кожному етапі розвитку.

Перше покоління (1G) мобільних стільникових мереж було представлено на початку 1980-х років і стало значним проривом у мобільних телекомунікаціях. До розробки 1G мобільний зв'язок обмежувався системами двостороннього радіозв'язку, що використовувалися екстреними службами, а кілька комерційних систем, які існували, базувалися на громіздкому та дорогому обладнанні.

Мережі 1G характеризувалися використанням аналогових технологій для передавання голосу. Хоча вони відкрили нові можливості мобільного зв'язку, дозволивши користувачам вперше здійснювати телефонні дзвінки під час руху, проте, не обійшлося без недоліків. Таких як: відсутність шифрування, обмежені пропускні здатності, низька якість зв'язку та розбіжності систем через недостатню єдність міжнародних стандартів [1].

Друге покоління (2G) мобільних стільникових мереж з'явилося на початку 1990-х років і базувалося на цифрових технологіях, забезпечуючи передачу голосу та даних. Перехід від аналогової до цифрової технології дозволив забезпечити кращу якість зв'язку, знизити шум та перешкоди та підвищити надійність.

Іншою важливою особливістю 2G стало впровадження міжнародного роумінгу, який дозволив мобільним користувачам користуватися своїми телефонами під час подорожей за кордон. Це стало можливим завдяки встановленню глобального стандарту для мереж 2G, Глобальної системи мобільного зв'язку (GSM), яка забезпечила взаємодію між різними мережами

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

по всьому світу. 2G також мала значний вплив на розвиток мобільних телефонів. Використання цифрових технологій дозволило розробити менші та легші телефони, що зробило мобільний зв'язок доступнішим і зручнішим для користувачів. Поява менших, більш енергоефективних компонентів також проклала шлях до більш просунутих функцій, таких як кольорові екрани та камери [1].

Перехід від технології 2G до 3G був поступовим, і багато операторів мобільного зв'язку пропонували послуги GPRS, які класифікується як 2,5G і використовує технології комутації пакетів і каналів GSM. Однією з ключових особливостей технології 2.5G було те, що вона використовує ту ж інфраструктуру, що й мережі 2G, але з оновленим апаратним і програмним забезпеченням. Це дозволило економічно вигідно та відносно легко оновити технологію 2G до 2,5G і підготувати мережі для підтримки технологій 3G, не вимагаючи повної реконструкції існуючої інфраструктури.

Третє покоління (3G) мобільних стільникових мереж стало значним прогресом у порівнянні зі своїми попередниками, пропонуючи високу швидкість передачі даних, покращену якість голосу та низку мультимедійних послуг. Стандартизація технології 3G почалася в 1990-х роках, а перші комерційні мережі були запуснені в 2001 році. Розвиток технології 3G був зумовлений необхідністю задовольнити зростаючий попит на послуги мобільного передавання даних, таких як доступ до Інтернету та використання мультимедійних послуг.

Хоча технологія 3G стала великим кроком уперед у мобільному зв'язку, вона не обійшлася без обмежень. Однією з найбільших проблем була висока вартість розгортання мереж 3G, що вимагало значних інвестицій у нову інфраструктуру. Крім того, мережі 3G не завжди були надійними, і в деяких областях виникали проблеми з покриттям.

Еволюція мобільних широкопasmових бездротових технологій свідчила про появу проміжних технологій, таких як 3.5G або HSPA (високошвидкісний пакетний доступ). HSPA було представлено, щоб подолати розрив між 3G і 4G,

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

пропонуючи більш високу швидкість передачі даних і покращену пропускну здатність мережі. HSPA досягає цих переваг завдяки використанню вдосконалених методів модуляції та кодування, кількох антен і групування каналів, розширених алгоритмів планування та методів розподілу ресурсів, а також передової архітектури мережі.

Четверте покоління (4G) мобільних стільникових мереж з'явилося в 2008 році та є однією з найбільш швидких та доступних технологій бездротового зв'язку на сьогоднішній день. 4G забезпечує значно вищу швидкість передачі даних та має дуже малий час затримки передачі даних. Це дозволяє використовувати мобільний Інтернет з високою швидкістю та якістю для стрімінгу, відеодзвінків, завантаження великих файлів та взагалі використання Інтернету на мобільних пристроях. 4G також став важливою технологією для розвитку "розумних" міст та "розумних" домівок, де мобільний Інтернет є базовим елементом інфраструктури.

П'яте покоління (5G) технології мобільного зв'язку є новітнім етапом розвитку мобільних комунікаційних мереж. Розгортання технології 5G є однією з найбільш очікуваних подій у сфері бездротового зв'язку за останні роки, завдяки обіцянкам забезпечити користувачів неперевершеною швидкістю передачі даних, майже нульовою латентністю та високою надійністю зв'язку, забезпечуючи підтримку великого обсягу підключених пристроїв та відкриваючи нові перспективи для розвитку і впровадження розширеної реальності, інтернету речей та інших інновацій [2].

У загальному контексті, технологія 5G відіграє важливу роль у подальшому розвитку сучасного суспільства та економіки, сприяючи створенню нових продуктів та послуг, які ґрунтуються на широкомасштабному використанні мережі з підвищеними характеристиками. Однак 4G залишається важливою технологією, особливо в районах з незадовільним покриттям мережі 5G.

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2. Поширення мобільного зв'язку на території України

Мобільний зв'язок є найважливішим сегментом телекомунікаційної галузі, який має стратегічне значення для конкурентоспроможності України у глобальному контексті. Історично мобільний зв'язок українського ринку почав розвиватися в 1991 році після отримання незалежності країною. У цей період на ринку були присутні декілька операторів, але розвиток був повільним через відсутність необхідних фінансових та технічних ресурсів.

Протягом 2000-х років спостерігалася значна експансія мобільного зв'язку в Україні. Введення нових технологій, зокрема стандарту GSM, сприяло поширенню мобільних послуг по всій країні. Оператори мобільного зв'язку активно розширювали свою мережеву інфраструктуру, що призвело до покращення покриття та якості зв'язку.

У сучасний період, поширення мобільного зв'язку в Україні продовжує активно розвиватися. Стандарт зв'язку четвертого покоління 4G LTE є найпоширенішим серед трьох провідних мобільних операторів в Україні – Київстар, Vodafone Ukraine та Lifecell. Упродовж впровадження 4G в Україні, оператори отримали ліцензії на використання стандарту LTE на частотах 1800 МГц, 2600 МГц і 900 МГц. Україна використовує дуплексний режим FDD для 4G мережі.

Базові станції, що працюють на частоті 900 МГц (LTE-900), мають радіус дії приблизно 26 км і призначені для покриття великих територій з відносно низькою густиною користувачів. Тому їх встановлюють у сільській місцевості та вздовж доріг національного і місцевого значення, де необхідно забезпечити широке покриття, але кількість користувачів значно менша, ніж у великих містах.

Базові станції, що працюють на частоті 1800 МГц (LTE-1800) встановлюються як у сільській місцевості, так і у невеликих і великих містах. Ці станції мають зону покриття приблизно 13,5 км і достатню пропускну

					ЕЛІТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатність для одночасного підключення великої кількості користувачів як у невеликих населених пунктах, так і в містах з мільйонною кількістю жителів.

Базові станції, що працюють на частоті 2600 МГц (LTE-2600) мають невеликий радіус дії (до 2,5-3 км), але найвищу пропускну здатність. Тому їх встановлюють у великих містах з великою концентрацією користувачів [3].

Щодо покриття мобільного зв'язку на території України, воно зазвичай виражається в термінах наявності мережі та якості сигналу. Великі міста та населені пункти мають добре розвинену мережеву інфраструктуру зі стабільним сигналом. Однак, в окремих віддалених районах або сільській місцевості можуть виникати проблеми з покриттям, що пов'язані з технічними обмеженнями та віддаленістю від мережевих інфраструктур. Для порівняння розглянемо останні доступні карти покриття 4G основних операторів мобільного зв'язку (рис. 1.1-1.4).

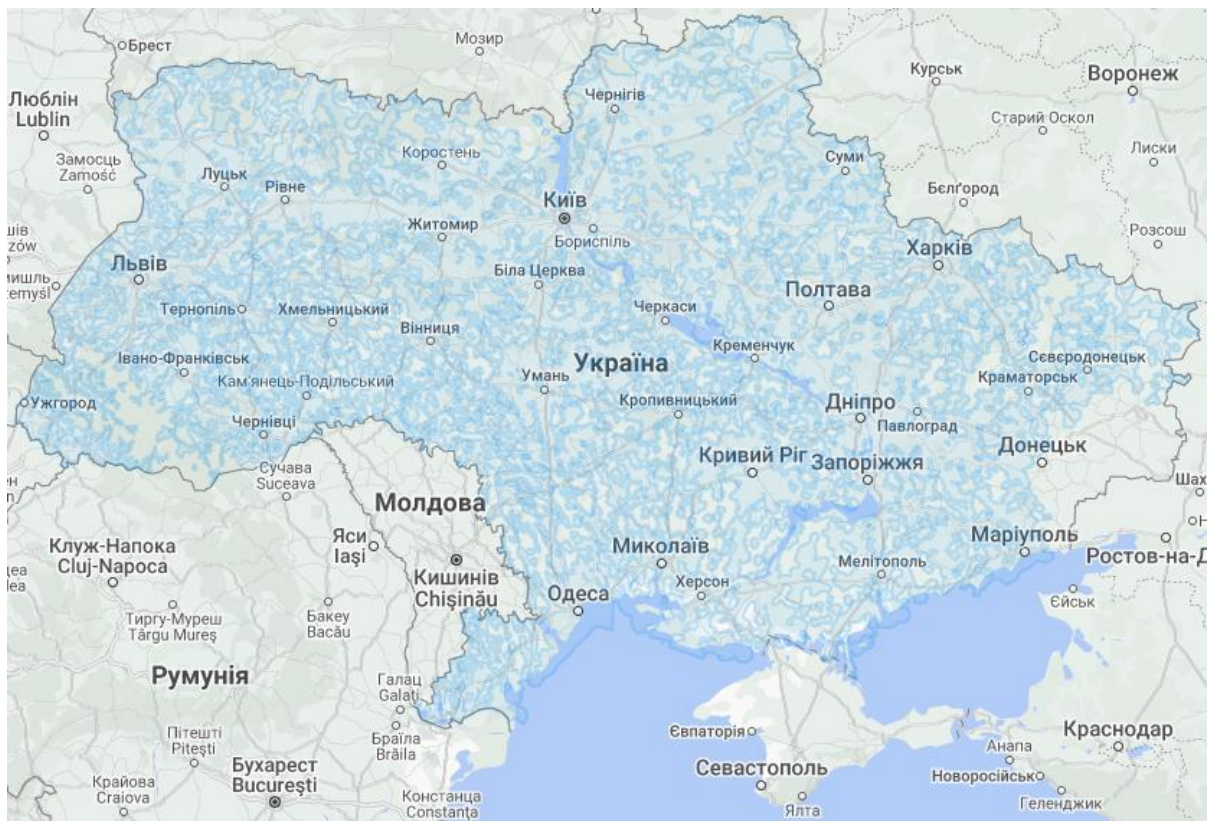


Рисунок 1.1 – Карта мережевого покриття 4G компанією Київстар

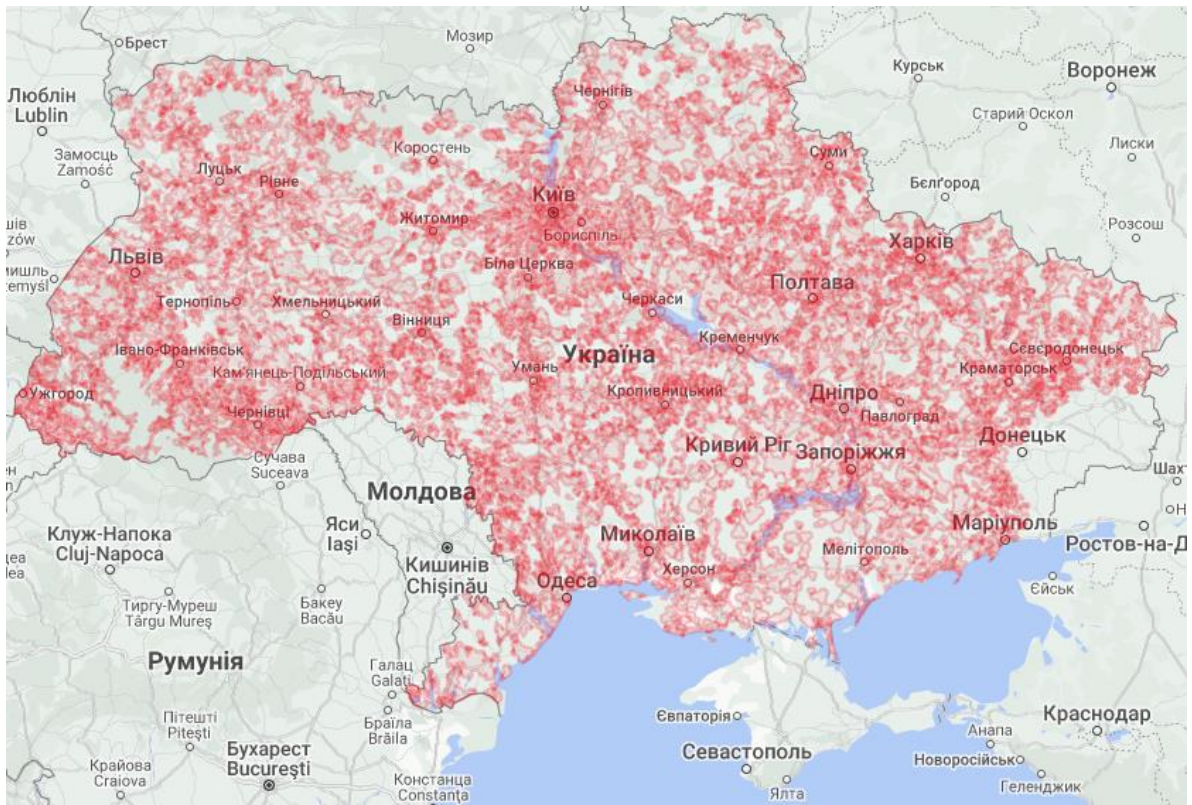


Рисунок 1.2 – Карта мережевого покриття 4G компанією Vodafone

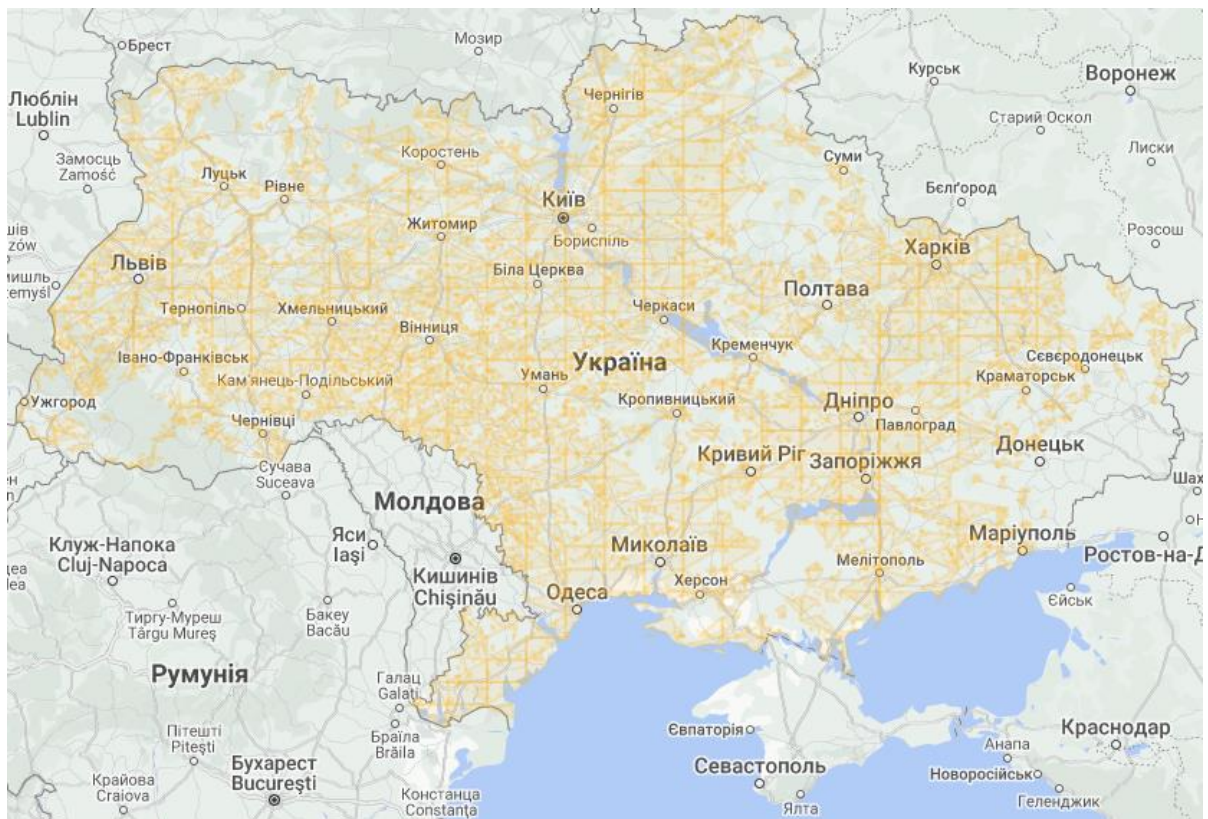


Рисунок 1.3 – Карта мережевого покриття 4G компанією Lifecell

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

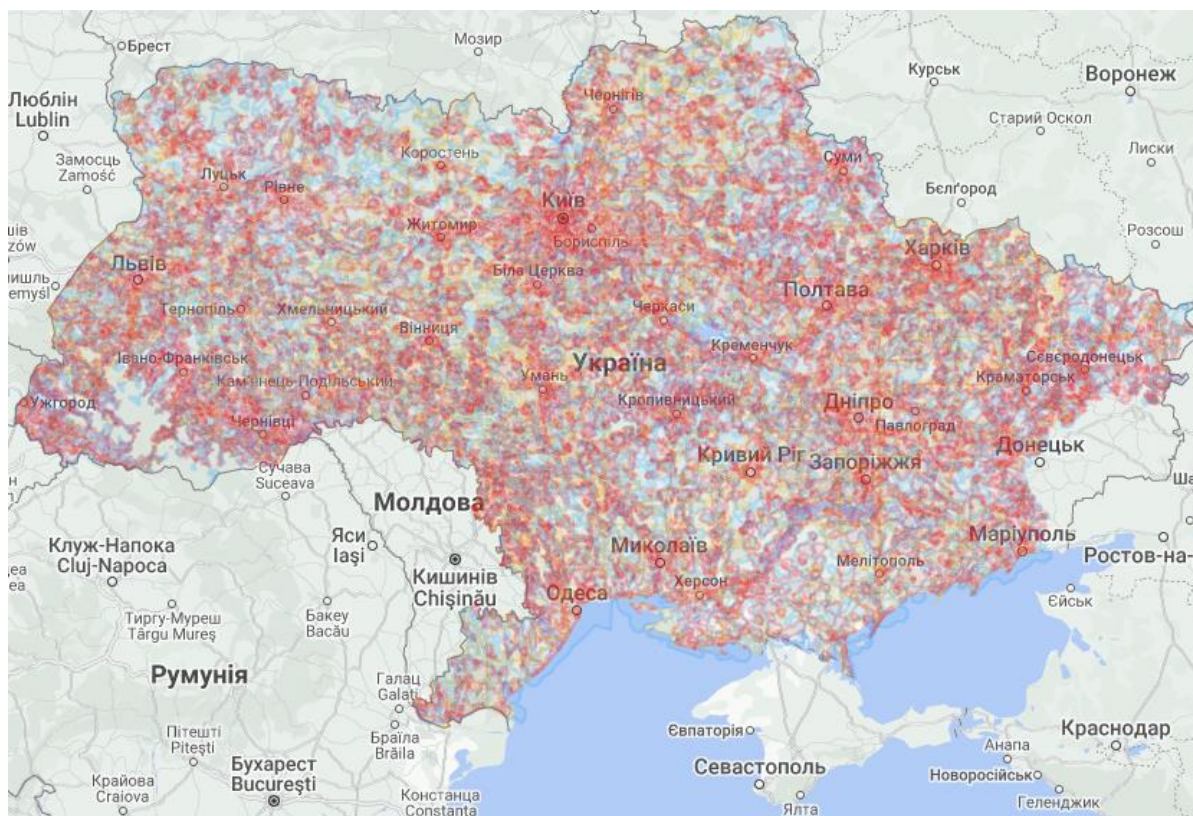


Рисунок 1.4 – Загальне покриття мережею 4G на території України

1.3. Загальні відомості про об’єкт проектування

Глухівська громада є адміністративно-територіальною одиницею, розташованою в Сумській області. Вона входить до складу Шосткинського району і є однією з громад, сформованих у рамках децентралізаційної реформи, спрямованої на покращення управління та надання якісних послуг населенню. До складу Глухівської громади входять 1 місто та 24 села. Територія Глухівської громади зображена на рис. 1.5.

Населення громади – 38553 мешканці, площа територіальної громади: становить 453,6 квадратних кілометрів, густина населення 85 осіб/км², висота над рівнем моря – 166 метри (м. Глухів) [4].

Через територію Глухівської громади пролягають декілька регіональних та територіальних автомобільних доріг, а саме Р-47 (М02), Т-18-18, Т-18-16.

Комунікаційні системи включають телефонну мережу, щонайменше 4 Інтернет-провайдерів, теле- та радіокомпаній, редакції газет.

					<i>ЕЛІТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Соціальна та освітня сфери включають заклади вищої та професійно-технічної освіти, школи, дитячі садки, культурні центри, бібліотеки, спортивні майданчики, парки та інші установи.

Медична інфраструктура включає 6 медичних закладів та 5 аптек.

Комунальна інфраструктура включає системи водопостачання, каналізації, електропостачання, вивезення твердих побутових відходів та інші комунальні послуги.

Основними галузями економіки в громаді є сільське та лісове господарство. Також функціонують промислові підприємства МП «Мобус», «Сател-ЕЛ», завод «Електропанель», хлібокомбінат, фабрика по переробці вторинної сировини, філія ТОВ «Корпорація Гумотекс», філія науково-виробничої фірми "Модуль" та інші.

Тому, враховуючи наявну розвинену інфраструктуру, можна визначити потребу громади в сучасних засобах масового зв'язку. Забудова на території громади характеризується середньою поверховістю, переважно складається з низькоповерхових будівель.

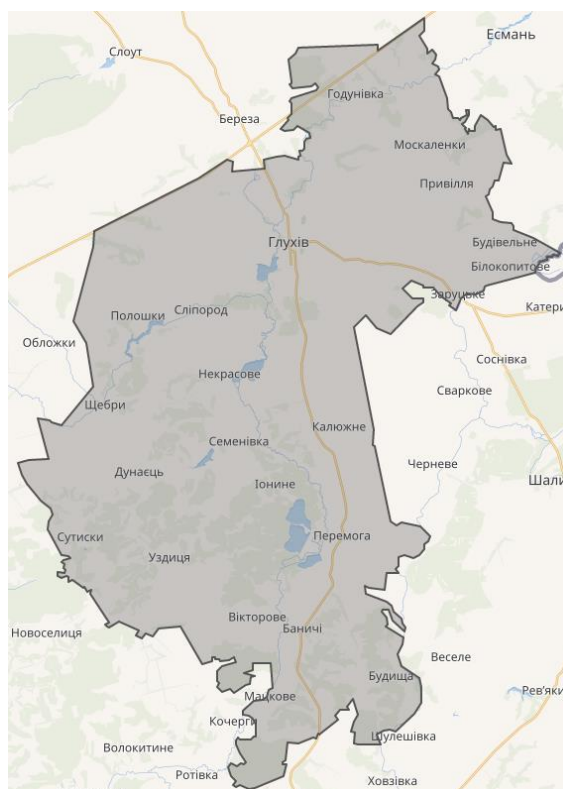


Рисунок 1.5 – Карта Глухівської територіальної громади

					<i>ЕЛІТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

2. РОЗГЛЯД ТЕХНІЧНИХ АСПЕКТІВ ТЕХНОЛОГІЇ LTE

2.1. Розвиток стандарту LTE та його технічні параметри

LTE (Long-Term Evolution) є бездротовим стандартом передачі даних, який використовується у мобільних телефонних мережах для забезпечення високошвидкісного передавання даних та доступу до Інтернету. Розвиток стандарту LTE був об'єктом інтенсивних досліджень та робіт в галузі бездротових комунікацій, що призвели до значного вдосконалення ефективності та продуктивності цієї технології.

Перший випуск стандарту LTE був представлений у 2008 році Інститутом стандартів зв'язку (3GPP) і визначався як 3GPP Release 8. Він включав в себе важливі функції, такі як передача даних з високою швидкістю до 300 Мбіт/с на станцію базового зв'язку (eNB) та до 75 Мбіт/с на мобільний пристрій. Велика увага була приділена підтримці пакетної комутації, високій якості обслуговування та зменшенню затримки передачі даних.

Протягом наступних релізів стандарту LTE, таких як Release 9, Release 10 і Release 11, були внесені значні поліпшення. Одним із ключових аспектів було впровадження технології Carrier Aggregation, яка дозволяє об'єднувати кілька несучих частот для підвищення пропускну здатності та досягнення ще вищих швидкостей передачі даних. Також були введені підтримка голосового зв'язку через LTE (VoLTE), підтримка малих станцій базового зв'язку (small cells) для поліпшення покриття та підвищення пропускну здатності в густонаселених областях, а також підтримка підключення до нестационарних пристроїв (мобільних зв'язку на великих швидкостях) та інші поліпшення.

Release 12, який був представлений у 2015 році, вніс додаткові розширення та функції до стандарту LTE. Одним з найважливіших було впровадження можливостей мережі п'ятого покоління (5G) в рамках стандарту LTE, що називається LTE-Advanced Pro. Це дозволило поєднати переваги LTE з потужністю та продуктивністю 5G. Крім того, були введені поліпшені технології множинного введення та множинного виходу (MIMO), що

					ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

дозволяють використовувати більше антен для збільшення пропускної здатності та зниження затримки.

У майбутніх релізах, таких як Release 13, Release 14 та Release 15, були внесені ще більші поліпшення до стандарту LTE. Серед них можна виділити впровадження системи масивного введення та масивного виходу (Massive MIMO), що дозволяє використовувати значну кількість антен для покращення якості сигналу та пропускної здатності. Також були розширені можливості Carrier Aggregation, підтримка низької затримки (Low Latency), покращення енергоефективності та багато інших інновацій [5].

У загальному, розвиток стандарту LTE здійснювався шляхом систематичних досліджень та покрокових удосконалень, що дозволило досягти значного покращення технічних параметрів стандарту. Основними з них є:

1. Пропускна здатність: LTE забезпечує високу пропускну здатність для передачі даних. Максимальна теоретична пропускна здатність досягає значень від 100 Мбіт/с у пікових умовах до 1 Гбіт/с у випадку використання LTE-Advanced Pro.

2. Ширина смуги: LTE використовує різні ширини смуги для передачі даних. Поширені ширини смуги включають 1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц та 20 МГц. Більша ширина смуги дозволяє досягати вищої пропускної здатності.

3. Затримка: LTE прагне до зниження затримки передачі даних, що є важливим параметром для реалізації послуг реального часу. Затримка може бути зменшена до 10 мілісекунд за допомогою оптимізації протоколів та використання низької затримки (Low Latency) технологій.

4. Мінімальна швидкість передачі даних: Стандарт LTE має мінімальну швидкість передачі даних, яка забезпечує стабільний зв'язок. Мінімальна швидкість зазвичай становить 0,5 Мбіт/с, але може змінюватися в залежності від умов зв'язку та налаштувань мережі.

					<i>ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

5. Використання частот: Стандарт LTE може використовувати різні частотні діапазони, включаючи діапазони з низькою частотою (700 МГц), середньої частоти (1,8 ГГц) та високої частоти (2,6 ГГц). Це забезпечує більшу гнучкість в налаштуванні мережі та дозволяє використовувати стандарт LTE в різних регіонах світу.

6. Множинне введення та множинний вихід (MIMO): MIMO є важливою технологією LTE, яка використовує багатоантенні системи для покращення якості сигналу та збільшення пропускної здатності. Він дозволяє використовувати різні конфігурації, включаючи 2x2, 4x2 та 8x8 MIMO, що залежить від використовуваного обладнання.

7. Мобільність: LTE забезпечує високу рівень мобільності, що означає здатність мобільних пристроїв ефективно переміщуватись між різними станціями базового зв'язку без втрати зв'язку.

8. Безпека: LTE має механізми безпеки, такі як аутентифікація, шифрування та інші заходи, щоб забезпечити конфіденційність та цілісність передачі даних.

Ці технічні параметри стандарту LTE відображають різні аспекти його функціональності, продуктивності та здатності задовольняти різноманітні вимоги телекомунікаційних мереж. Вони слугують основою для побудови швидких, надійних та масштабованих мобільних комунікаційних систем.

2.2. Архітектура мережі стандарту LTE

Архітектура мережі стандарту LTE (рис. 2.1) складається з трьох головних компонентів: удосконалена універсальна наземна мережа радіодоступу (E-UTRAN), удосконалене пакетне ядро мережі та обладнання користувача [6].

1. Удосконалена універсальна наземна мережа радіодоступу (E-UTRAN): ця структура містить eNodeB, яка є базовою радіостанцією, яка

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

специфікації 3GPP і не розглядаються в цьому розділі. Архітектура мережі стандарту LTE розроблена таким чином, щоб забезпечити високу швидкість передачі даних, низький рівень затримок та стійкість мережі у разі навантаження. Окрім того, вона має гнучку структуру, що дозволяє змінювати розмір мережі та додавати нові елементи залежно від потреб користувачів.

2.3. Радіоінтерфейс LTE та аналіз його особливостей

У мережі LTE і TDD, і FDD використовуються як дуплексні режими для забезпечення роботи радіоінтерфейсу. Основні відмінності між FDD LTE і TDD LTE підсумовані в таблиці 2.1 [7]:

Таблиця 2.1 – Відмінності між FDD LTE і TDD LTE

Параметр	LTE-TDD	LTE-FDD
Парний спектр	Не потребує парного спектру, оскільки і передача, і прийом відбуваються на одному каналі.	Потребує парного спектру із достатнім розділенням частот, щоб забезпечити одночасну передачу та прийом
Вартість обладнання	Менша вартість, оскільки для ізоляції передавача та приймача не потрібен дуплексер	Дуплексер потрібен, що впливає на вартість.
Взаємність каналу	Розповсюдження по каналу однакове в обох напрямках, що дозволяє використовувати передачу та отримання за набором параметрів	Характеристики каналу відрізняються в обох напрямках в результаті використання різних частот
Асиметрія UL/DL	Є можливість динамічно змінювати співвідношення потужності UL і DL відповідно до попиту.	Потужність не змінюється, оскільки вона визначається розподілом частот регулюючими органами.
Захисні інтервали /захисна смуга	Захисний інтервал, необхідний для того, щоб передачі по висхідній і низхідній лініях зв'язку не конфліктували. Впливає на пропускну здатність.	Захисна смуга, необхідна для забезпечення достатньої ізоляції між висхідною та низхідною лініями зв'язку. Велика захисна смуга не впливає на ємність.

Продовження таблиці 2.1

1	2	3
Безперервна передача	Переривчаста передача необхідна для забезпечення як висхідної, так і низхідної передач. Впливає на продуктивність радіочастотного підсилювача потужності передавача.	Потрібна безперервна передача.
Перехресна інтерференція	Базові станції повинні бути синхронізовані щодо часу передачі по висхідній і низхідній лінії зв'язку.	Не застосовується

Оскільки вимоги та обладнання послуг DL (від eNB до UE) і UL (від UE до eNB) відрізняються, технологія, що використовується, також відрізняється. Забезпечення множинного доступу у напрямку DL досягається використанням методу з ортогональним частотним поділом (OFDMA), у напрямку UL – з частотним поділом каналів на одній несучій (SC-FDMA). Частотна область дозволила підвищити спектральну ефективність і мінімізувати міжсимвольні перешкоди. На рис. 2.2 можна спостерігати дві схеми OFDMA DL і SC-FDMA UL, що дозволяє зрозуміти різницю частот [6].

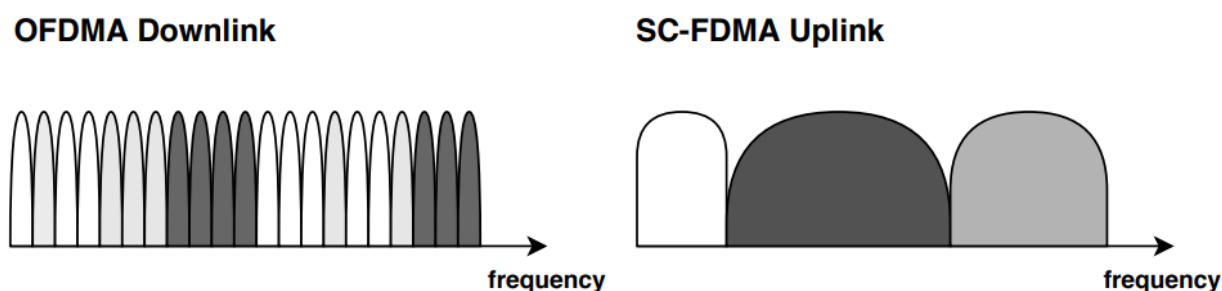


Рисунок 2.2 – Порівняння частот технологій множинного доступу

2.4. Фізичний рівень та канална структура LTE

Фізичний рівень є однією з ключових складових системи LTE і виконує важливі функції для забезпечення передачі даних у бездротовій мережі. Він

відповідає за передачу даних через радіоканал між базовою станцією і абонентським пристроєм. В архітектурі LTE використовуються такі фізичні канали [8]:

- Фізичний ширококомовний канал (PBCH): транспортні блоки відображаються на чотири підкадри в межах 40-мсекундного інтервалу, а потім декодуються без спеціальної сигналізації. Цей канал використовується для корекції мобільних частот, структури каналу керування, кадрової синхронізації тощо.

- Канал індикатора формату фізичного керування (PCFICH): цей канал передається в кожному підкадрі та вказує кількість символів OFDMA, що використовуються для PDCCH.

- Фізичний канал керування низхідним каналом зв'язку (PDCCH): цей канал передає інформацію про планування висхідної лінії зв'язку та інформує UE про розподіл ресурсів і гібридний автоматичний запит на повторення (HARQ) для каналу пейджингового зв'язку (PCH) і каналу синхронізації низхідного зв'язку (DL-SCH).

- Фізичний гібридний канал індикатора ARQ (PHICH): цей канал передає HARQ підтвердження/непідтвердження (ACK/NACK) для передач висхідної лінії зв'язку.

- Фізичний спільний канал низхідної/вихідної лінії зв'язку (PDSCH/PUSCH): цей канал передає канал синхронізації DL (SCH) і UL-SCH, а також інформацію PCH.

- Фізичний багатоадресний канал (PMCH): цей канал передає багатоадресну інформацію.

- Фізичний канал керування висхідною лінією зв'язку (PUCCH): цей канал передає HARQ для передачі низхідної лінії зв'язку, а також запити на планування та звіти індикатора якості каналу (CQI).

- Фізичний канал довільного доступу (PRACH): Цей канал містить преамбулу довільного доступу.

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

На фізичному рівні надаються три основні процедури: пошук комірки, керування потужністю та адаптація каналу. Під час пошуку стільника синхронізація DL та опорні сигнали відстежуються для отримання синхронізації частоти та часу, а також ідентифікатора стільника. Керування потужністю використовується для керування спектральною щільністю вихідної потужності з UE. Нарешті, адаптація каналу вирішить, які схеми модуляції та кодування (несучі) слід використовувати на основі виконаних вимірювань каналу та даних, що надходять від eNB.

Фізичний рівень відображає фізичні канали на транспортні канали для обробки рівня 2. Рівень 2 поділяється на три підрівні: керування доступом до середовища (MAC), керування радіоканалом (RLC) і протокол конвергенції пакетних даних (PDCP), які можемо бачити на стеці протоколів LTE на рис. 2.3. Підрівень MAC відповідає за відображення між транспортними та логічними каналами, планування звітів, виправлення помилок, обробку пріоритетів і доповнення. Підрівень RLC виконує виправлення помилок ARQ, відновлення RLC, передачу блоків даних протоколу (PDU) на верхні рівні, а також конкатенацію, сегментацію та повторну збірку блоків службових даних (SDU). PDCP відповідає за стиснення заголовків, шифрування та дешифрування, передачу даних і доставку PDU/SDU [8].

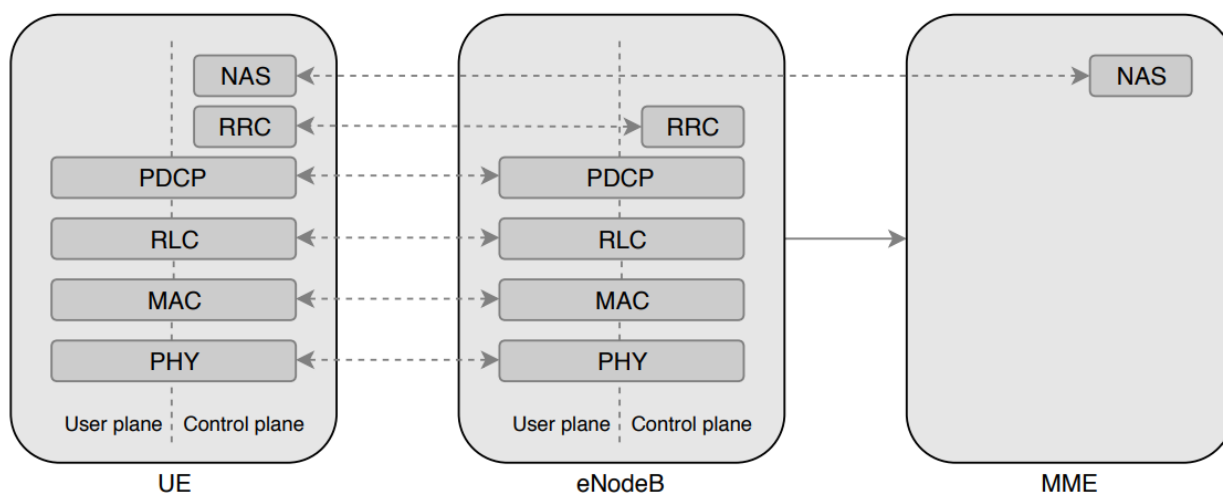


Рисунок 2.3 – Архітектура протоколу мережі радіодоступу

В системі LTE відсутні виділені канали, як це було в UMTS. Замість цього, використовуються загальні транспортні канали, які встановлюють

зв'язок між рівнем MAC і фізичним рівнем. Кожен транспортний канал відображається на відповідний фізичний канал. Цей процес включає сегментацію даних на блоки, додавання необхідної контрольної інформації та формування пакетів для передачі.

У випадку низхідного напрямку зв'язку, фізичний спільний канал низхідної лінії зв'язку використовується як фізичний канал, а ширококомовний канал відображається на фізичному ширококомовному каналі. У висхідному напрямку використовується фізичний спільний канал висхідної лінії зв'язку, а фізичний канал довільного доступу використовується для передачі каналу довільного доступу. Спостереження відображення від транспортних каналів низхідної лінії зв'язку до фізичних каналів можна побачити на рис. 2.4, а відображення від висхідних транспортних каналів до фізичних каналів представлено на рис. 2.5 [6].

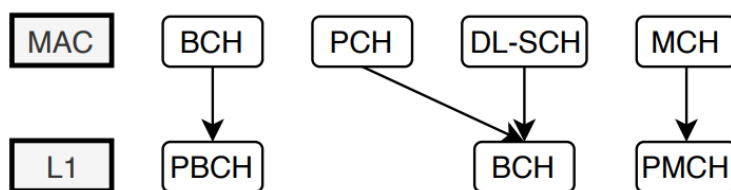


Рисунок 2.4 – Відображення транспортних каналів низхідної лінії зв'язку з фізичним рівнем.

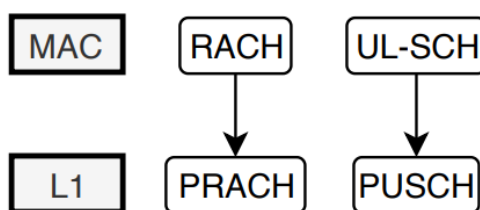


Рисунок 2.5 – Відображення транспортних каналів висхідної лінії на фізичний рівень.

2.5. Огляд технології OFDMA та її використання в стандарті LTE

OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) є технологією бездротового зв'язку, що знаходить широке застосування у стандарті LTE.

OFDMA використовує методику розділення каналу, яка полягає в тому, що спектральний діапазон розбивається на багато піднесучих частотних каналів (subcarriers), кожен з яких може бути незалежно модульований з використанням різних модуляційних схем та рівнів потужності, забезпечуючи адаптивність та оптимальну використання ресурсів. Принцип дії цього методу зображено на рисунку 2.6. Крім того, OFDMA використовує метод ортогонального розділення сигналів в частотному домені, що дозволяє уникнути міжсимвольних та міжканальних перешкод, забезпечуючи високу надійність передачі даних.

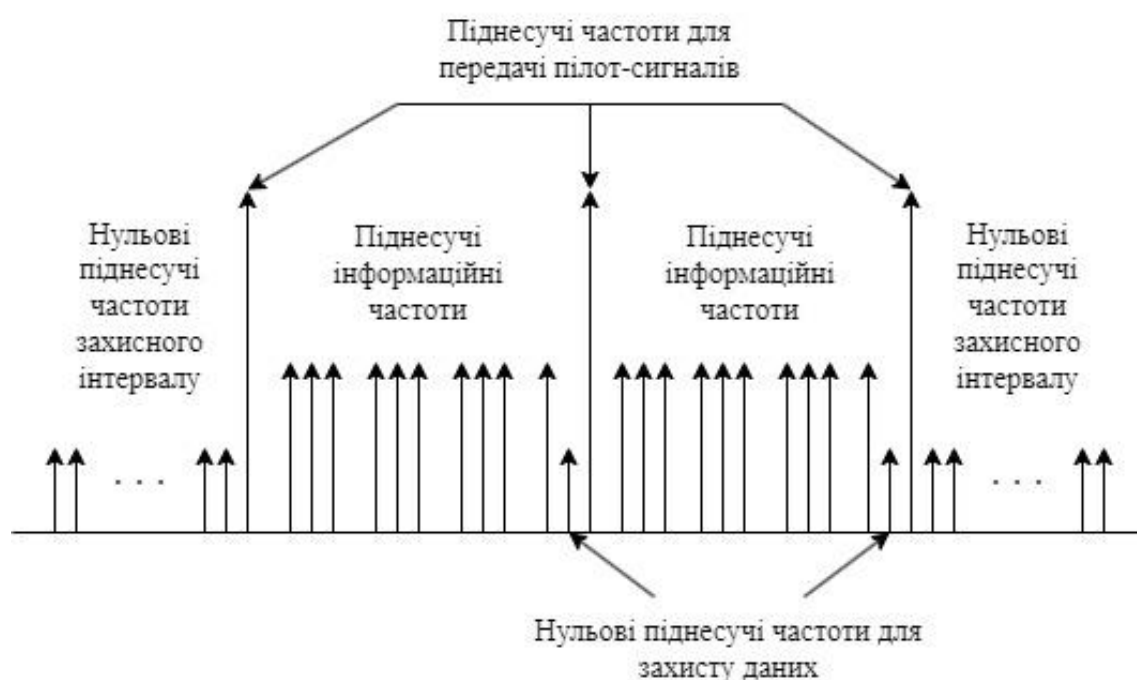


Рисунок 2.6 – Розподіл піднесучих частот

OFDMA має декілька переваг, які роблять його привабливим для використання у стандарті LTE. По-перше, він дозволяє ефективно використовувати частотний спектр, дозволяючи одночасну передачу даних на різних піднесучих каналах. Це підвищує пропускну здатність системи та дозволяє обробляти більше користувачів одночасно. По-друге, OFDMA є гнучкою технологією, що дозволяє адаптуватись до змінних умов зв'язку, включаючи зміну каналових характеристик та варіювання потужності сигналу. Це дозволяє забезпечити стабільну та якісну передачу даних у різних середовищах.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

У стандарті LTE OFDMA використовується для передачі даних в каналі радіодоступу (RACH), каналі наступництва (PUCCH), каналі наступництва з використанням широкосмугової модуляції (PUSCH), а також для забезпечення мультіплексування даних різних користувачів на одному фізичному каналі. OFDMA дозволяє розділяти доступ до ресурсів між користувачами шляхом призначення окремих піднесучих каналів та керування розміщенням та потужністю сигналів. Це забезпечує високу пропускну здатність системи та дозволяє підтримувати багатокористувацьку середовище.

2.6. Аналіз технології MIMO та її вплив на якість передачі даних

Технологія MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) є важливою складовою стандарту LTE (Long-Term Evolution) і відіграє значну роль у поліпшенні якості передачі даних у бездротових мережах. MIMO використовує принцип одночасної передачі та прийому декількох сигналів з використанням багатьох антен як на стороні передавача, так і на стороні приймача. Приклад True MIMO (2x2) зображено на рис. 2.7

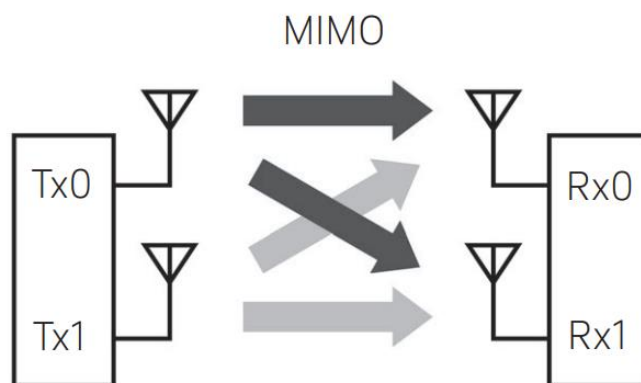


Рисунок 2.7 –MIMO з двома передавачами та двома приймачами з незалежним вмістом даних

Одним із основних принципів MIMO є використання просторового розбиття каналу на незалежні підканали, що формуються за допомогою різних антенних елементів. Це дозволяє використовувати мультіплексування сигналів у просторовому домені, забезпечуючи одночасну передачу більшої кількості даних. Крім того, MIMO використовує техніки балансування завад

та підсилення сигналу, такі як просторова рознесеність (спрямованість сигналів) та каналовий розклад (використання різних шляхів передачі сигналу), що сприяють зниженню помилок передачі та підвищенню надійності зв'язку [9].

Одна з важливих переваг MIMO полягає в покращенні пропускної здатності системи. Завдяки одночасній передачі декількох сигналів та використанню просторового розбиття каналу, MIMO дозволяє забезпечити високу пропускну здатність, що особливо важливо у високонавантажених мережах. Збільшення пропускної здатності MIMO досягається шляхом підвищення кількості передавачів та приймачів, а також оптимального розміщення антен.

Крім того, MIMO впливає на покращення якості передачі даних. Завдяки використанню різних шляхів передачі сигналу та покращенню стійкості до завад, MIMO дозволяє знизити помилки передачі, підвищити рівень сигнал-шум і поліпшити якість прийому. Це особливо корисно у середовищах зі значним розповсюдженням сигналу та присутністю перешкод.

Однак, використання технології MIMO може мати певні обмеження. Наприклад, збільшення кількості антен на базовій станції може призвести до збільшення вартості обладнання та споживання енергії. Також, деякі обмеження можуть виникнути при роботі в приміщеннях, де може бути обмежена доступність сигналу.

У цілому, технологія MIMO є важливим елементом стандарту LTE, яка дозволяє забезпечити більшу швидкість передачі даних та покращену якість обслуговування користувачів. За умови правильної конфігурації та роботи, технологія MIMO може знизити вплив шумів та спотворень сигналу, що допомагає забезпечити надійну та стійку роботу мережі з високою якістю обслуговування.

					<i>ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

3. РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ LTE

3.1. Алгоритм проектування мережі LTE

Проектування мережі LTE (Long-Term Evolution) є надзвичайно важливим процесом у сучасному телекомунікаційному середовищі та дозволяє досягти оптимальної продуктивності, ефективного використання ресурсів та задоволення високих вимог до якості обслуговування. Загалом алгоритм проектування мережі LTE може бути описаний таким чином:

1. Збір вхідних даних та аналіз вимог: на початковому етапі необхідно зібрати вхідні дані, які включають в себе географічну інформацію про територію, на якій буде розгорнута мережа, технічні характеристики обладнання, характеристики сигналу, що передається, потенційну кількість користувачів, що можуть бути обслуговані мережею та інші параметри.

2. Планування: на основі вхідних даних, а також аналізу території, в якій буде розгорнута мережа, визначаються місця розташування базових станцій, параметри передачі сигналу, такі як потужність передачі, частотний діапазон та інші параметри.

3. Моделювання: на цьому етапі вибирається програмне забезпечення для моделювання мережі LTE. Необхідно також побудувати географічну модель мережі, включаючи розташування БС, місцезнаходження користувачів та інші фізичні параметри; встановити параметри моделювання, такі як модуль каналу зв'язку, модель поширення сигналу тощо.

4. Оцінка продуктивності: на останньому етапі проводиться аналіз результатів моделювання, включаючи вимоги до пропускної здатності з урахуванням можливостей розширення мережі, збільшення трафіку та інших факторів, що можуть вплинути на продуктивність; проводяться симуляції з різними параметрами, щоб знайти оптимальні конфігурації мережі.

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

3.2. Розрахунок пропускної здатності мережі LTE

Відповідно до викладеного в розділі 1, при проектуванні мережі LTE територію Глухівської громади можна вважати середньою за розміром, проте за рахунок переважно сільської місцевості щільність абонентів є невисокою. Тому у даному випадку буде доречним застосувати наступні бенди (діапазони частот):

1. Band 3 (1800 МГц): Цей бенд має помірну щільність абонентів і використовується як у міських, так і у сільських районах. Його раціональніше використовувати в умовах міської забудови міста Глухова

2. Band 8 (900 МГц): Цей бенд має великий радіус дії і використовується для забезпечення зв'язку у віддалених та сільських районах з низькою щільністю населення. Його раціональніше використовувати для забезпечення покриття решти території громади.

Вибір такого радіочастотного спектру в поєднанні з оптимальним розташуванням базових станцій дозволить досягти більш широкого покриття та ефективної роботи мережі в Глухівській громаді.

Площа територіальної громади складає 453,6 квадратних кілометрів, населення цієї території приблизно 39000 мешканців. За допомогою наданої інформації можна провести розрахунки щодо потенційного обсягу трафіку. Для досягнення більшої точності розрахунків необхідно врахувати кількість фактичних абонентів, що користуються послугами зв'язку. Зазвичай це значення може становити від 30% до 60% від загальної кількості абонентів. Таким чином, можливо визначити потенційну кількість абонентів, які виявляють інтерес до використання послуг проекрованої мережі. Для розрахунку цього значення використаємо формулу:

$$N_{аб} = N_{нас} \times 0,4 = 39000 \times 0,4 = 15600 \text{ чол.} \quad (3.2.1)$$

Наступним етапом є визначення пропускної здатності або ємності мережі. У конкретних сценаріях ці показники залежать від середніх значень спектральної ефективності. Спектральна ефективність, в свою чергу, визначає

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

швидкість передачі даних відповідних частотних діапазонах. Вона розраховується як відношення швидкості передачі даних 1 Гц смуги частот (біт/с/Гц). У випадку різних варіантів MIMO, ширина смуги частот для частотного виду дуплексу (FDD) становить 20 МГц.

У таблиці 3.1 приведені середні значення спектральної ефективності для мережі LTE в залежності від різних конфігурацій MIMO.

Таблиця 3.1 – Середні значення спектральної ефективності в мережі LTE

Лінія	Схема MIMO	Середня спектральна ефективність (біт/с/Гц)
Uplink (UL)	1×2	1,254
	1×4	1,829
Downlink (DL)	2×2	2,93
	4×2	3,43
	4×4	4,48

Схема 2x2 MIMO, яка використовує два антенних елементи на передавачі та приймачі, є базовим рішенням для більшості мереж LTE і забезпечує покращення продуктивності та покриття порівняно зі стандартною однією антеною. У нашому випадку, зважаючи на розміри території та кількість населення, схема 2x2 MIMO може бути ефективною і відповідати потребам мережі LTE на цій території.

Шляхом перемноження значень спектральної ефективності та ширини каналу можна визначимо необхідну середню пропускну здатність одного сектора базової станції (eNB) у системі FDD:

$$R = S \times W \quad (3.2.2)$$

де S представляє собою середню спектральну ефективність, що вимірюється в (біт/с/Гц); W вказує на ширину каналу, яка становить 20 МГц.

Отже:

- 1) Для лінії «вгору» (UL): $R_{UL} = 1,254 \times 20 = 25,08$ Мбіт/с;
- 2) Для лінії «вниз» (DL): $R_{DL} = 2,93 \times 20 = 58,6$ Мбіт/с.

Розрахуємо середню пропускну здатність базової станції R_{eNB} , перемноживши пропускну здатність одного сектора на кількість секторів

базової станції. Значення кількості секторів візьмемо дорівнює 3, тоді формула для розрахунку приймає вигляд:

$$R_{eNB} = R_{UL/DL} \times 3 \quad (3.2.3)$$

Отже:

1) Для лінії «вгору» (UL): $R_{eNB,UL} = 25,08 \times 3 = 75,24$ Мбіт/с;

2) Для лінії «вниз» (DL): $R_{eNB,DL} = 58,6 \times 3 = 175,8$ Мбіт/с.

Наступним важливим етапом є визначення необхідної кількості базових станцій для проєктованої мережі. Це вимагає обчислення загальної кількості каналів, які потрібно виділити для розгортання мережі. Для цього скористаємося формулою:

$$N_k = \left[\frac{\Delta F}{\Delta F_k} \right], \quad (3.2.4)$$

де ΔF вказує на смугу частот, яку призначають для функціонування мережі, $\Delta F = 75$ МГц; ΔF_k відображає смугу частот одного радіоканалу, який для мереж LTE відповідає ресурсному блоку (БК) шириною 180 кГц.

$$N_k = \left[\frac{75 \times 10^6}{180 \times 10^3} \right] \approx 417$$

Наступним кроком визначимо потрібну кількість каналів в одному секторі одного стільника для забезпечення обслуговування користувачів за формулою:

$$N_{k.сек} = \left[\frac{N_k}{N_{кл} \times M_{сек}} \right], \quad (3.2.5)$$

де N вказує на загальну кількість каналів; $N_{кл}$ – розмірність кластера, обирається з урахуванням кількості секторів eNB, що дорівнює трьом; $M_{сек}$ – кількість секторів eNB і також дорівнює трьом

$$N_{k.сек} = \left[\frac{417}{3 \times 3} \right] \approx 47 \text{ (каналів)}$$

Наступним етапом є визначення кількості каналів трафіку, які потрібно виділити в одному секторі одного стільника. Зробити це можна за формулою:

$$N_{кт.сек} = N_{кт1} \times N_{k.сек} \quad (3.2.6)$$

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де $N_{\text{кт1}}$ – кількість каналів трафіку в одному радіоканалі, визначається відповідно до стандарту радіодоступу OFDMA і може бути в діапазоні від 1 до 3. Для даного проектування мережі LTE ми приймаємо значення $N_{\text{кт1}}$ рівним одиниці.

$$N_{\text{кт.сек}} = 1 \times 47 = 47 \text{ (каналів)}$$

Далі проводиться розрахунок допустимого навантаження в секторі одного стільника ($A_{\text{сек}}$) з використанням таблиці Ерланга при заданому значенні ймовірності блокування, яке становить 1%, та розрахованої кількості каналів трафіку $N_{\text{кт.сек}}$. Результатом розрахунку є значення $A_{\text{сек}}$, яке складає 35,21 Ерл.

Кількість абонентів, яку може обслуговувати одна базова станція, розраховується за формулою:

$$N_{\text{аб.еNB}} = M_{\text{сек}} \times \left[\frac{A_{\text{сек}}}{A_1} \right], \quad (3.2.7)$$

де A_1 – середнє абонентське навантаження від одного абонента для всіх видів трафіку. Значення A_1 зазвичай знаходиться в діапазоні від 0,04 до 0,2 Ерл. У проєктованій мережі, яка призначена для високошвидкісної передачі даних, ми встановлюємо значення A_1 рівним 0,1 Ерл. Таким чином, отримуємо:

$$N_{\text{аб.еNB}} = 3 \times \left[\frac{35,21}{0,1} \right] \approx 1057 \text{ (абонентів)}.$$

Для визначення необхідної кількості базових станцій проєктованої мережі LTE використовується наступна формула:

$$N_{\text{еNB}} = \left[\frac{N_{\text{аб}}}{N_{\text{аб.еNB}}} \right] + 1 = \left[\frac{15600}{1057} \right] + 1 \approx 15 \quad (3.2.8)$$

Виконаємо розрахунок середньої планової пропускної здатності мережі (R_N) за формулою:

$$R_N = (R_{\text{еNB,UL}} + R_{\text{еNB,DL}}) \times N_{\text{еNB}}, \quad (3.2.9)$$

Отже:

$$R_N = (75,24 + 175,8) \times 15 = 3765,6 \text{ (Мбіт/с)} = 3,7656 \text{ (Гбіт/с)}.$$

					ЕЛІТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Далі здійснюється оцінка ємності проекрованої мережі шляхом порівняння з розрахованою значенням. Для цього, спершу визначимо середній трафік одного абонента в час найбільшого навантаження (ЧНН):

$$R_{т.чнн} = \frac{T_t \times q}{N_{чнн} \times N_d}, \quad (3.2.10)$$

де T_t позначає середній обсяг трафіку одного користувача за місяць, що становить 25 Гбайт/міс; q представляє коефіцієнт, який враховує тип місцевості і має значення 2; $N_{чнн}$ показує кількість ЧНН в день, яка дорівнює 7; N_d відображає кількість днів у місяці, що становить 30.

$$R_{т.чнн} = \frac{25 \times 2}{7 \times 30} = 0,238 \text{ (Мбіт/с)}.$$

Тепер можемо обчислити загальний обсяг трафіку мережі під час пік-години найбільшого навантаження ($R_{заг/чнн}$) за допомогою наступної формули:

$$R_{заг/чнн} = R_{т.чнн} \times N_{акт.аб}, \quad (3.2.11)$$

де $N_{акт.аб}$ – кількість активних абонентів мережі, що становить 70% від загальної кількості потенційних абонентів $N_{аб}$, тому $N_{акт.аб}$ становить 10920 абонентів.

$$R_{заг/чнн} = 0,238 \times 10920 = 2598,96 \text{ (Мбіт/с)} = 2,59896 \text{ (Гбіт/с)}.$$

Таким чином, після порівняння результатів R_N та $R_{заг/чнн}$ ($R_N > R_{заг/чнн}$) ми можемо зробити висновок, що проектована мережа не буде перевантажена.

3.3. Розрахунок зон радіопокриття проекрованої мережі LTE

Початковим етапом визначення рівня покриття є розрахунок максимально припустимого рівня втрат (МПР). Як було вказано раніше, при проектуванні використовуються різні частоти, тому для вибраних діапазонів можна визначитися з такими значеннями запасу на проникнення як:

- для бенду 8 (900 МГц) рекомендоване значення запасу на проникнення може бути близько -8 дБ
- для бенду 3 (1800 МГц) рекомендоване значення може бути близько -20 дБ

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Також у процесі розрахунків для проектованої мережі будуть застосовані такі параметри:

1. Конфігурація MIMO: В проектованій мережі використовується режим MIMO 2×2, що означає наявність двох антенних елементів для передачі та прийому сигналу на базовій станції (БС) і кінцевих пристроях.

2. Системна полоса: В проектованій мережі використовується системна полоса шириною 20 МГц. Для режиму FDD розмежування полоси здійснюється на рівні 10 МГц для вхідного (UL) та вихідного (DL) напрямків передачі.

Для розрахунку максимально допустимих втрат використаємо наступну формулу:

$$L_{\text{мпд}} = P_{\text{евп.прд}} - S_{\text{ч.пр}} + G_{\text{А.прд}} - L_{\text{ф.прд}} - M_{\text{прон}} - M_{\text{зав}} - M_{\text{зат}} + G_{\text{хо}}, \quad (3.3.1)$$

де $P_{\text{евп.прд}}$ – еквівалентна випромінювана потужність передавача; $S_{\text{ч.пр}}$ – чутливість приймача; $G_{\text{А.прд}}$ – коефіцієнт посилення антени передавача, для UL дорівнює 0 дБ, для DL дорівнює 18 дБ; $L_{\text{ф.прд}}$ – втрати в фідерному тракті передавача, для DL дорівнює 0,3 дБ; $M_{\text{прон}}$ – запас на проникнення сигналу; $M_{\text{зав}}$ – запас на завади, для UL дорівнює 2,6 дБ, для DL дорівнює 6,6 дБ; $M_{\text{зат}}$ дорівнює 8,2 дБ – запас на затінення; $G_{\text{хо}}$ дорівнює 1,7 дБ – вигравш від хендовера.

Для визначення еквівалентної випромінюваної потужності передавача ($P_{\text{евп.прд}}$) використовується наступна формула:

$$P_{\text{евп.прд}} = P_{\text{вих.прд}} + G_{\text{А.прд}} - L_{\text{ф.прд}}, \quad (3.2.2)$$

де $P_{\text{вих.прд}}$ – вихідна потужність передавача, яка залежить від напрямку передачі сигналу: "вниз" (DL) або "вгору" (UL) в мережі LTE. Для DL, вихідна потужність може варіюватися залежно від ширини смуги частот стільників, яка може бути в діапазоні від 1,4 до 20 МГц. У випадку, коли ширина смуги становить до 5 МГц, рекомендується використовувати передавачі TRX з потужністю 20 Вт (34 дБм), а для ширини смуги понад 5 МГц – 40 Вт (46 дБм). Для DL, значення вихідної потужності становить 46 дБм, а для UL – 30 дБм.

										Арк.
										32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ					

З використанням наведених значень, ми можемо обчислити еквівалентну випромінювану потужність передавача. Результат обчислення буде наступним:

1) Для лінії «вгору» (UL): $P_{\text{евп.прд}} = 30$ (дБм).

2) Для лінії «вниз» (DL): $P_{\text{евп.прд}} = 46 + 18 - 0,3 = 63,7$ (дБм).

Визначимо значення чутливості приймача ($S_{\text{ч.пр}}$). Це можна зробити за допомогою наступної формули:

$$S_{\text{ч.пр}} = P_{\text{тш.пр}} + M_{\text{всш.пр}} + L_{\text{пр}}, \quad (3.3.3)$$

де $P_{\text{тш.пр}}$ – потужність теплового шуму приймача, при DL вона дорівнює -173,9 дБм, а при UL дорівнює -104,1 дБм; $M_{\text{всш.пр}}$ – відношення сигнал/шум приймача, при DL воно становить -0,25, а при UL - 0,62; $L_{\text{пр}}$ – коефіцієнт шуму приймача, при DL воно дорівнює 6,9 дБ, а при UL - 2,6 дБ.

Отже:

1) Для лінії UL: $S_{\text{ч.пр}} = -104,1 + 0,62 + 2,6 = -100,88$ (дБм);

2) Для лінії DL: $S_{\text{ч.пр}} = -173,9 + (-0,25) + 6,9 = -167,25$ (дБм);

Враховуючи попередні розрахунки, обчислимо гранично допустимі втрати. Оскільки при проектуванні було обрано два бенди, потрібно провести додаткові розрахунки з різними значеннями запасу на проникнення сигналу.

Отже, для бенду 8:

1) На лінії «вгору» (UL):

$$L_{\text{мпд}} = 30 + 100,88 - 8 - 2,6 - 8,2 + 1,7 = 113,78 \text{ (дБ)};$$

2) На лінії «вниз» (DL):

$$L_{\text{мпд}} = 63,7 + 167,25 - 0,3 - 8 - 6,6 - 8,2 + 1,7 = 209,55 \text{ (дБ)}.$$

Також, для бенду 3:

1) На лінії «вгору» (UL):

$$L_{\text{мпд}} = 30 + 100,88 - 20 - 2,6 - 8,2 + 1,7 = 101,78 \text{ (дБ)};$$

2) На лінії «вниз» (DL):

$$L_{\text{мпд}} = 63,7 + 167,25 - 0,3 - 20 - 6,6 - 8,2 + 1,7 = 197,55 \text{ (дБ)};$$

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

Для подальших розрахунків дальності зв'язку та радіусу стільників обирається менше значення з двох отриманих МДП для ліній DL і UL. Зазвичай, обмежувальною лінією по дальності зв'язку є лінія вгору. Меншими значеннями є 113,78 (дБ) в діапазоні 900 МГц та 101,78 (дБ) в діапазоні 1800 МГц.

За допомогою моделей поширення радіохвиль Okumura-Nata та Cost-Nata, які є узагальненням досліджених фактів і враховують різні умови та середовища, можна визначити середнє загасання радіосигналу в міських та сільських умовах. Моделі може бути застосована у випадку, коли частотний діапазон радіосигналів складає від 150 до 1500 МГц для Okumura-Nata та від 1500 до 2000 МГц для Cost-Nata. Додатково, вимоги до висоти базової станції (H_{BC}) становлять від 30 до 200 метрів, тоді як висота антени стільникового абонентського обладнання (H_{AC}) повинна бути в межах від 1 до 10 метрів.

Таким чином, використаємо вираз з моделі Okumura-Nata для визначення середнього загасання радіосигналу в сільських умовах:

$$L_R = 69,55 + 26,16 \log F - 13,821 \log H_{BC} - a(H_{AC}) + \\ + (44,9 - 6,55 \log H_{BC}) \log R - 4,78(\log F)^2 + 18,331 \log F - 40,94,$$

де H_{BC} – ефективна висота підйому антени базової станції, м; H_{AC} – висота антени мобільної станції над рівнем землі, м; R – радіус стільника, км; F – частота сигналу, МГц; $a(H_{AC})$ – коригувальний фактор.

Аналогічно використаємо вираз з моделі Cost-Nata для визначення середнього загасання радіосигналу в міських умовах (для малих і середніх міст):

$$L_R = 46,33 + 33,9 \log F - 13,821 \log H_{BC} - a(H_{AC}) + \\ + (44,9 - 6,55 \log H_{BC}) \log R + C_S,$$

де H_{BC} – ефективна висота підйому антени базової станції, м; H_{AC} – висота антени мобільної станції над рівнем землі, м; R – радіус стільника, км; F – частота сигналу, МГц; C_S – константа, яка дорівнює 3 дБ для центрів великих міст і 0 дБ – для середніх міст та приміських районів і сільської

						<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
							34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

місцевості; $a(H_{AC})$ – коригувальний фактор. Для малих і середніх міст –
 $a(H_{AC}) = (1,11 \log F - 0,7)H_{AC} - (1,561 \log F - 0,8)$.

Додатково визначимось з величинами, що задовольняють умови використання обраних моделей поширення радіохвиль: висоту базової станції (H_{BC}) – 30 метрів, висоту антени стільникового абонентського обладнання (H_{AC}) – 5 метрів.

Спочатку розрахуємо коригувальний фактор для не щільно заселеної території в діапазоні 900 МГц за формулою:

$$a(H_{AC}) = (1,11 \log 900 - 0,7) \times 5 - (1,561 \log 900 - 0,8) = 9,08$$

А також в діапазоні 1800 МГц:

$$a(H_{AC}) = (1,11 \log 1800 - 0,7) \times 5 - (1,561 \log 1800 - 0,8) = 10,29$$

Для отримання остаточного результату необхідно визначити радіус стільника з формули середнього загасання радіосигналу, отримуємо значення $R \approx 1$ км в діапазоні 1800 МГц та $R \approx 3$ км в діапазоні 900 МГц. Використовуючи отримані значення обчислимо площу покриття стільників за формулою:

$$S_{eNB} = 9 \frac{\sqrt{3}}{8} \times R^2$$

Отже,

$$S_{eNB,1800} = 9 \frac{\sqrt{3}}{8} \times 1^2 = 1,95(\text{км}^2)$$

$$S_{eNB,900} = 9 \frac{\sqrt{3}}{8} \times 3^2 = 17,54(\text{км}^2)$$

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

4. МОДЕЛЮВАННЯ МЕРЕЖІ LTE В ПРОГРАМІ ІМІТАЦІЇ ПЕРЕДАЧІ СИГНАЛІВ

4.1. Огляд програмних засобів для моделювання мережі LTE

Моделювання мережі LTE є важливим інструментом для дослідження та вдосконалення бездротових комунікаційних систем. Воно дозволяє оцінити продуктивність та ефективність мережі LTE в різних умовах, таких як різні алгоритми ресурсного розподілу, рівень завантаження мережі та розташування базових станцій. Даний процес вимагає потужних програмних засобів, що надають широкий набір функцій та можливостей. NS-3, OPNET, MATLAB та Atoll є одними з популярних програмних засобів, які забезпечують засоби для моделювання та аналізу мережі LTE. Вибір конкретного програмного засобу залежить від потреб дослідження та характеристик, які необхідно моделювати.

NS-3 (Network Simulator 3) є потужним інструментом для моделювання мережевих протоколів і систем. Він надає розширений набір функцій для моделювання мереж, в тому числі LTE, включаючи підтримку фізичного та каналного рівнів, алгоритми доступу до каналу, ресурсний розподіл, моделювання мультиплексування та багато іншого. NS-3 надає можливості для налаштування різних параметрів мережі та проведення експериментів з різними сценаріями.

OPNET (Optimized Network Engineering Tool) є інтегрованою платформою для моделювання та аналізу будь-якого типу мережі. Основна відмінність OPNET від інших симуляторів полягає в його потужності та універсальності, надаючи готові моделі протоколів і пристроїв. Це дозволяє створювати та симулювати різні види мереж, в тому числі LTE, включаючи можливість створення детальних моделей базових станцій, мобільних терміналів та інших компонентів мережі. OPNET також підтримує аналіз продуктивності мережі та оцінку параметрів, таких як пропускна здатність, затримка, втрати пакетів тощо.

					ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

MATLAB є потужним середовищем для чисельного моделювання та аналізу сигналів та систем. Воно надає багато функцій та пакетів для моделювання бездротових комунікаційних систем, включаючи мережу LTE. MATLAB дозволяє створювати моделі каналу передачі даних, моделі множинного доступу, аналізувати результати моделювання та проводити різноманітні експерименти.

Atoll є потужним програмним засобом для моделювання мереж LTE із значними можливостями для аналізу та оптимізації. Він надає комплексні інструменти для проектування, визначення місць розташування базових станцій, планування потужності та розрахунку покриття мережі.

Усі ці програмні засоби мають свої переваги та обмеження, і вибір залежить від конкретних потреб дослідження та моделювання мережі LTE. Необхідно проводити детальний аналіз можливостей кожного з програмних засобів та їх сумісності з іншими інструментами, щоб забезпечити ефективне моделювання мережі LTE і отримати цінні результати, що сприятимуть подальшому розвитку та вдосконаленню бездротових комунікаційних систем.

4.2. Детальний опис програми імітації передачі сигналів

У ході виконання роботи було обрано для моделювання мережі LTE програму Atoll. Цей вибір для дослідження мережі LTE є обґрунтованим з точки зору його потужних можливостей та широкого спектру функцій, спрямованих на аналіз та оптимізацію мережевої інфраструктури. Atoll є програмним засобом, розробленим для проектування та моделювання мереж LTE з високою точністю та реалістичністю.

Atoll забезпечує засоби для планування розташування базових станцій, визначення оптимальної потужності передавачів та розрахунку покриття мережі. Він враховує різні фактори, такі як рельєф місцевості, побудови та інтерференція, для досягнення точних результатів моделювання.

					<i>ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

Однією з ключових особливостей Atoll є його здатність до точного вимірювання сигналу в різних умовах. Він враховує різні параметри передачі сигналу, такі як сила сигналу, шум, перешкоди, втрати на шляху сигналу та інші фактори. Це дозволяє інженерам моделювати реалістичні сценарії та прогнозувати продуктивність мережі LTE з високою точністю.

Крім того, Atoll надає розширені інструменти для візуалізації та аналізу результатів моделювання. Він дозволяє інженерам відображати покриття мережі на картах, відслідковувати інтерференцію, аналізувати пропускну здатність та інші метрики продуктивності мережі. Це допомагає зрозуміти потенційні проблеми та виявляти шляхи для їх вирішення.

Враховуючи всі ці особливості, Atoll є цінним інструментом для наукових досліджень у сфері мереж LTE. Його потужність, точність та розширені можливості аналізу дозволяють інженерам та дослідникам глибоко досліджувати та оптимізувати мережеву інфраструктуру з метою покращення продуктивності та якості обслуговування.

4.3. Результати моделювання мережі LTE в програмі

Для практичного моделювання важливим кроком є використання рельєфної карти Глухівської громади для отримання більш точних результатів. Її застосування допоможе врахувати терен та його вплив на поширення радіосигналів, забезпечуючи більш реалістичні та точні результати моделювання.

У ході виконання роботи для отримання рельєфної карти використаємо спеціалізоване програмне забезпечення, таке як GlobalMapper. Воно широко застосовується у багатьох галузях, пов'язаних з картографією і обробкою картографічних даних. За допомогою GlobalMapper можна отримати чимало різнотипних карт, однією з яких є SRTM Worldwide Elevation Data (1-arc-second Resolution, SRTM Plus V3) – геоінформаційний набір даних про географічні висоти, який надає детальну інформацію про рельєф поверхні

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

Землі. Цей набір даних базується на геопросторових даних, зібраних за допомогою космічного місіонера Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). І забезпечує висотні дані з роздільною здатністю 1-аркової секунди (приблизно 30 метрів на екваторі) для всієї земної поверхні.

Проміжним кроком для отримання рельєфної карти є вибір необхідної ділянки на карті. Для цього скористаємось будь-якою картою світу, наприклад OpenStreetMap, вона дозволить точніше виділити межі Глухівської громади (рис.4.1).

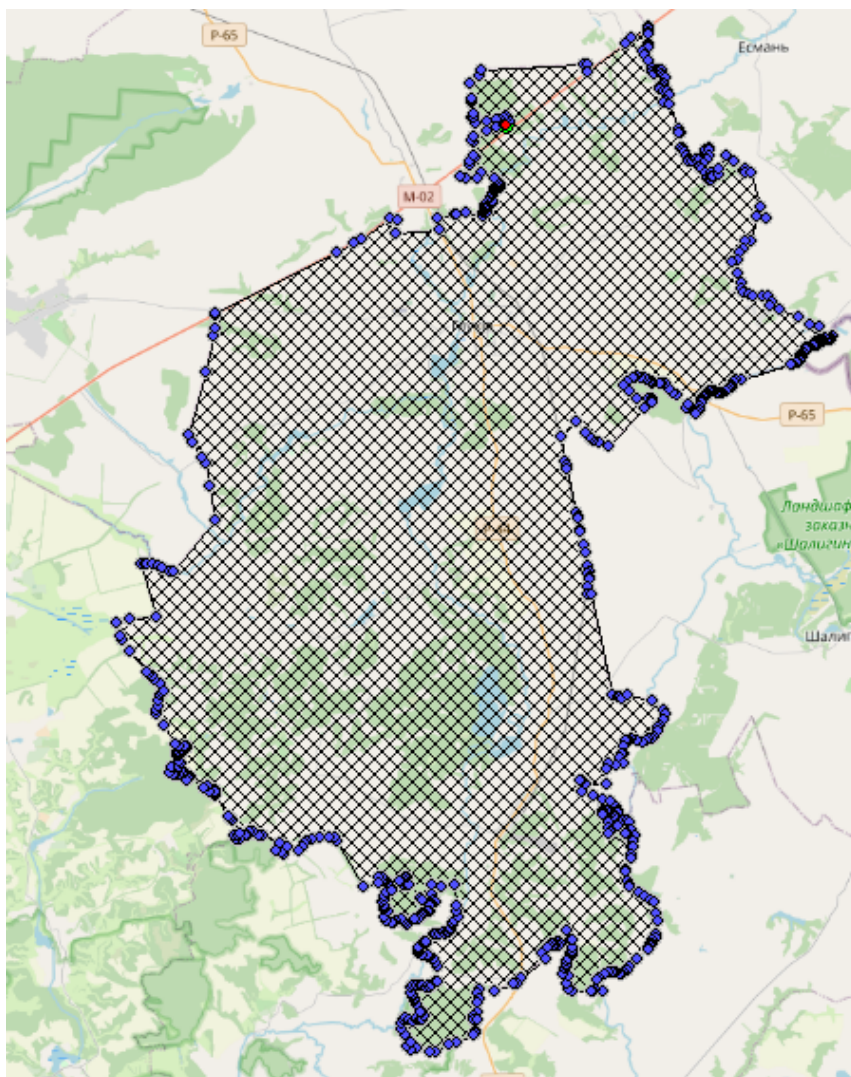


Рисунок 4.1 – Вибір необхідної ділянки

Обравши межі території, завантажуюмо рельєфну карту (рис. 4.2) та експортуємо її в форматі, що підтримується програмою Atoll (.grd).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 4.2 – Рельєфна карта Глухівської громади

Перейдемо до моделювання мережі LTE, що включає налаштування широкого спектра параметрів, починаючи від висоти антен до потужності передавачів. Обираємо необхідні значення цих параметрів на основі відповідних розрахунків та аналізу попередніх розділів. Приклад вікна налаштування базової станції, що працює на частоті 1800 МГц можемо бачити на рисунку 4.3.

Sectors:	<input type="text" value="3"/>	Hexagon Radius:	<input type="text" value="1 000 m"/>
Transmitter Type:	<input type="text" value="Intra-network (Server and Interferer)"/>		
Antennas			
Height/Ground:	<input type="text" value="30 m"/>		
Main Antenna			
Model:	<input type="text" value="65deg 17dBi 0Tilt 1800MHz"/>		
1st Sector Azimuth:	<input type="text" value="0 °"/>	Mechanical Downtilt:	<input type="text" value="0 °"/>
		Additional Electrical Downtilt:	<input type="text" value="0 °"/>
Number of Antenna Ports			
Transmission:	<input type="text" value="2"/>	Reception:	<input type="text" value="2"/>
Propagation			
Main Matrix		Extended Matrix	
Propagation Model:	<input type="text" value="Cost-Hata"/>	Propagation Model:	<input type="text" value="(none)"/>
Radius:	<input type="text" value="1 000 m"/>	Radius:	<input type="text" value="m"/>
Resolution:	<input type="text" value="50 m"/>	Resolution:	<input type="text" value="m"/>

Рисунок 4.3 – Вікно конфігурації БС

Після налаштування всіх параметрів, ми можемо приступити до розміщення базових станцій (рис. 4.4) з метою оптимального охоплення території громади. Наша мета полягає у максимальному покритті та досягненні оптимальної пропускної здатності.

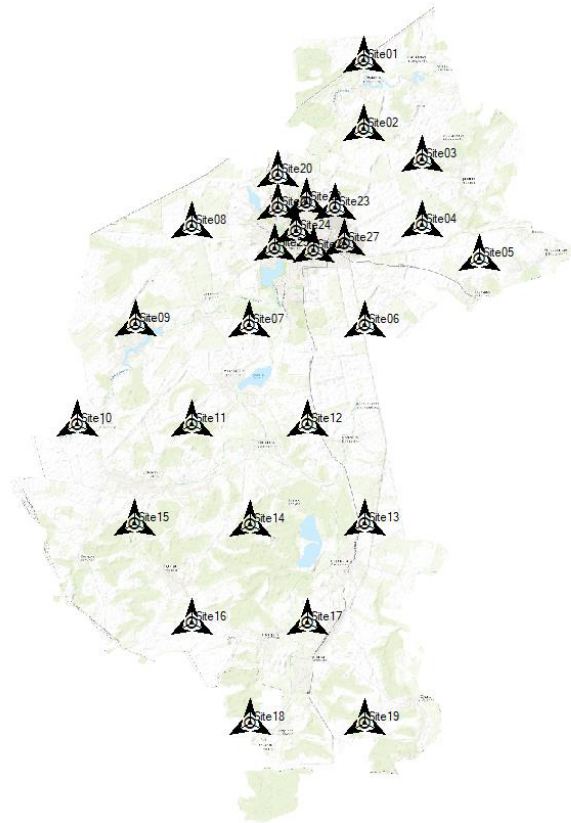


Рисунок 4.4 – Розташування БС та рівень покриття

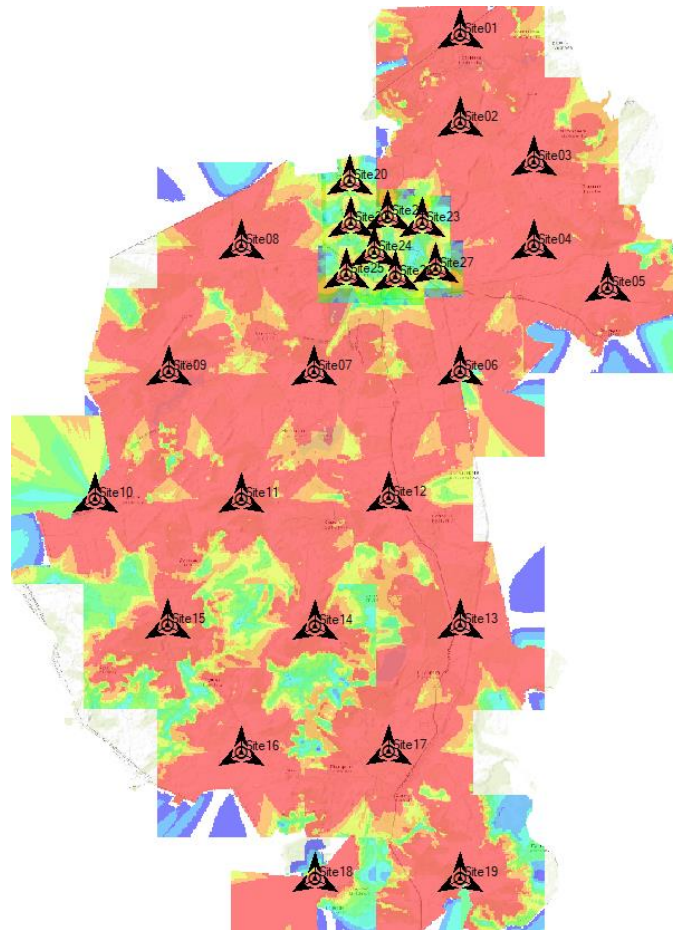


Рисунок 4.3.5 – Розташування БС та рівень покриття

Отже, як видно на рисунку 4.3.5, сигнал має високий рівень на всій території місцевості. Навіть при подальшому зростанні населення, ця мережа з поточним обладнанням може забезпечити достатній рівень сигналу протягом багатьох років. Проте, в реальних умовах рідко досягається настільки велика кількість базових станцій, оскільки оператори мобільного зв'язку повинні урахувати фінансові обмеження, які впливають на проектування мережі. У нашому випадку, створюється майже ідеальна модель мережі, орієнтована на досягнення максимальної пропускнуої здатності та оптимального покриття, без обмежень фінансового характеру.

Для перевірки рівня сигналу ми можемо скористатись функцією аналізу у вигляді гістограм, яка надає необхідну інформацію в зручному форматі. Результати цього аналізу можна побачити на рисунках 4.5 та 4.6.

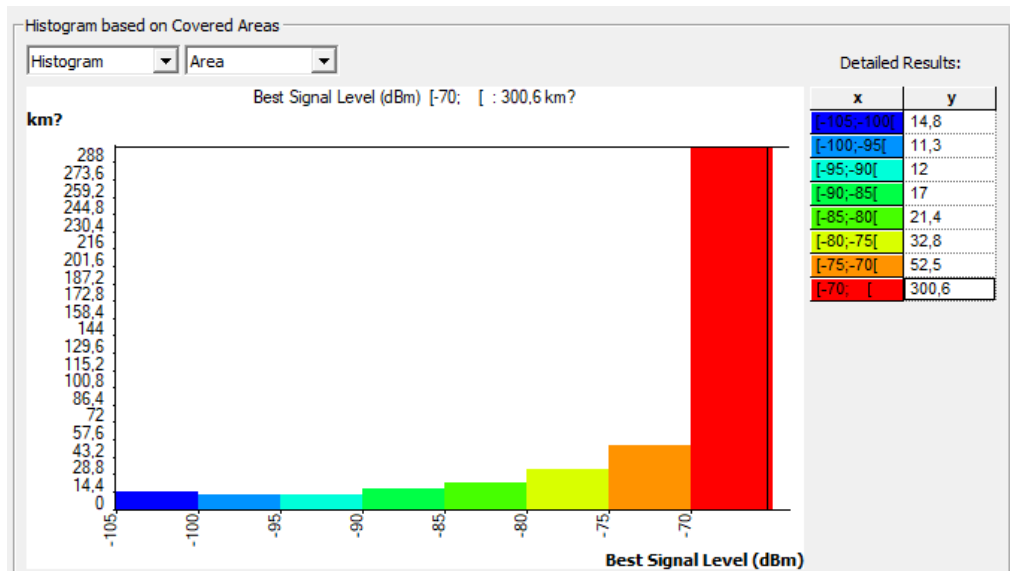


Рисунок 4.5 – Гістограма рівня сигналу в сільській місцевості

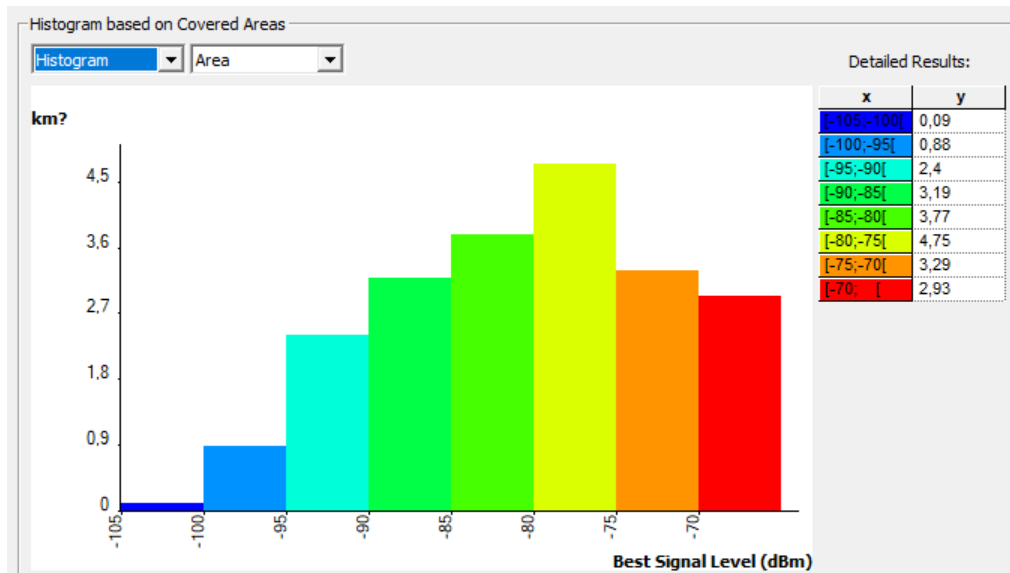


Рисунок 4.6 – Гістограма рівня сигналу на території м. Глухів

На основі гістограм бачимо, що на території міста та поза межами рівень сигналу знаходиться в діапазоні припустимих значень, що є високим результатом. Хоча рівень сигналу можна покращити, він забезпечує всі потреби у засобах зв'язку для невеликого міста і унеможливорює перевантаження системи.

ВИСНОВКИ

LTE є важливим стандартом зв'язку четвертого покоління, який відіграє ключову роль у сучасних мобільних комунікаціях. Його впровадження має велике значення в багатьох аспектах.

У даній роботі було проведено літературний огляд, розрахунок та моделювання мережі LTE на території Глухівської громади. Для досягнення цієї мети було виконано ряд кроків, які включали збір та аналіз вихідних даних, створення географічної моделі, планування базових станцій та параметрів мережі, оцінку покриття та ємності.

Під час проектування мережі LTE було враховано особливості території Глухівської громади, такі як її розмір, густина населення, типи забудови та перешкоди. Були застосовані програми Atoll та Global Mapper для створення точної географічної моделі та виконання прогнозування покриття та ємності мережі.

Результати проектування показали, що застосування мережі LTE на території Глухівської громади є доцільною та сприятиме покращенню якості зв'язку та задоволенню потреб користувачів зв'язку. Використання програмного засобу Atoll дозволило досягти заданих показників покриття та ємності мережі, забезпечити належну якість зв'язку та задоволення потреб користувачів. Окрім того, проектування мережі LTE засобами Atoll дозволило виявити потенційні проблемні зони, які можуть впливати на якість зв'язку. З цими виявленими проблемами можна буде працювати в подальшому, впроваджуючи відповідні заходи для поліпшення покриття та якості зв'язку.

					<i>ЕліТ 6.172.02.004 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Solyman A., Yahya K. Evolution of wireless communication networks: from 1G to 6G and future perspective. International journal of electrical and computer engineering. 2022. Vol. 12, no. 4. P. 3943-3950. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i4.pp3943-3950> (date of access: 06.06.2023).
2. Іващенко С. М. Перспективи впровадження технологій стандарту 5G. Фізика, електроніка, електротехніка : Міжнар. наук. конф. молодих вчен., м. Суми, 25 квіт. 2023 р. Суми, 2023. С. 90-91.
3. Діапазони частот 4G LTE (LTE Bands), що використовуються в Україні. Мобітек. URL: <https://mobitech.com.ua/ua/articles/diapazonu-chastot-4g-lte-lte-bands-ispolzuetuye-v-ukraine> (дата звернення: 06.06.2023).
4. Глухівська територіальна громада. Децентралізація. URL: <https://decentralization.gov.ua/newgromada/4543> (дата звернення: 06.06.2023).
5. Releases. 3GPP. URL: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases> (date of access: 06.06.2023).
6. Cortesão R. R. d. L. Efficient cloud-based cellular planning algorithms for 3G and 4G networks: master's thesis. 2019. URL: <http://hdl.handle.net/10071/22212> (date of access: 06.06.2023).
7. LTE network planning and optimizing - Hebron, Ramallah and Nablus / A. A. Rayyan et al. URL: <https://scholar.ppu.edu/handle/123456789/6755> (date of access: 06.06.2023).
8. M. S. Sharawi, "RF Planning and Optimization for LTE Network," in LTE Planning and Optimization, Boca Raton Florida, CRC Press, 2010, pp. 399-431
9. MIMO in LTE operation and measurement - excerpts on LTE test. Keysight. URL: <https://www.keysight.com/en/en/assets/7018-02324/application-notes/5990-4760.pdf> (date of access: 06.06.2023).

					ЕлІТ 6.172.02.004 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45