

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ**  
**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ І КОМП'ЮТЕРНОЇ ТЕХНІКИ**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

До кваліфікаційної роботи бакалавра на тему:

**Проектування мережі 4G у місті Конотоп**

Завідувач кафедри

Керівник кваліфікаційної роботи

Студент гр. ТК-61

Опанасюк А.С.

Гриненко В.В.

Шевченко В.В.

Суми 2020 р.

# Сумський Державний Університет

Факультет ЕЛІТ

Кафедра електроніки і комп'ютерної техніки

Напрямок підготовки: 6.050903 “Телекомунікації та радіотехніка”

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри Опанасюк А.С.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу бакалавра

студенту **Шевченку Владиславу Віталійовичу**

1. Тема проекту: **“Проектування мережі 4G у місті Конотоп”**

затверджено наказом по кафедрі від «21» 04 20 20 р. № 0544-III

2. Термін здачі студентом закінченого роботи 12.06.2020

3. Вихідні дані до роботи проектування мережі у м. Конотоп, населення – 86000 чол., площа міста – 43,78 км<sup>2</sup>, густина населення - 1970 чок/км<sup>2</sup>, висота над рівнем моря 162 м.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

1. Літературний огляд. 2. Постановка задачі. 3. Проектування мережі. 4. Проведення розрахунків. 5. Моделювання мережі LTE.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

---

---

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Огляд літератури відповідно до теми дослідження	30.04.2020	
2	Збір інформації і загальний опис технології LTE	03.05.2020	
3	Проведення аналізу технічної сторони LTE	10.05.2020	
4	Розрахунок необхідних для проектування параметрів	14.05.2020	
5	Моделювання засобами програми Atoll	22.05.2020	
6	Узагальнення результатів і кінцеве оформлення роботи	05.06.2020	
9	Здача кваліфікаційної роботи на рецензію	12.06.2020	

Студент-дипломник \_\_\_\_\_ Шевченко В.В.

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_ Гриненко В.В.

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 р.

## РЕФЕРАТ

У зміст кваліфікаційної роботи бакалавра покладено аналіз основних принципів мережі LTE та її проектування на певній території, прикладом буде використано місто Конотоп Сумської області.

Мета кваліфікаційної роботи: дослідження мережі, опис її особливостей, проведення розрахунків, необхідних для подальшого проектування, знаходження оптимальної для розгортання місцевості, використовуючи відповідне ПЗ створити модель мережі.

Попри неспинний рух розвитку технологій, LTE мережа все ще залишається однією з найважливіших і найперспективніших варіантів для покриття зв'язком території країни. Доцільність її проектування ґрунтується на можливості знаходити необхідну інформацію про обладнання і ресурси необхідні для такого моделювання.

Кваліфікаційна робота бакалавра містить 55 сторінок тексту, 25 малюнків, 2 таблиці.

## ЗМІСТ

СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК.....	4
ВСТУП.....	5
1.Технологія LTE. Загальні відомості Про мобільний зв'язок.....	7
1.1.Загальний опис стандартів стільникового зв'язку і поширення їх у світі. ..	7
1.2. LTE та поширення його на території України. ....	14
1.3. Об'єкт проектування.....	19
2. Аналіз технічної сторони LTE та особливості проектування мережі .....	21
2.1. Перша фаза стандарту LTE .....	21
2.2. Технологія OFDMA .....	23
2.3. Технологія передачі даних MIMO .....	25
2.3. Аспекти проектування.....	29
3. Розрахунки параметрів мережі LTE, що проектується.....	38
3.1. Попередня оцінка трафіку і кількості каналів в мережі .....	38
3.2. Розрахунок покриття мережі .....	42
4. Проєтування у програмі Atoll .....	45
4.1. Програма Atoll.....	45
4.2. Моделювання LTE мережі .....	47
ВИСНОВКИ.....	53
ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА .....	54

					<b>ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ</b>			
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розроб.</i>		<i>Шевченко В.В.</i>			<i>Проектування мережі 4G у місті Конотоп Пояснювальна записка</i>	<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Гриненко В.В.</i>				3		
<i>Реценз.</i>						<i>СумДУ, гр. ТК-61</i>		
<i>Н. Контр.</i>		<i>Гриненко В.В.</i>						
<i>Затвердж.</i>		<i>Опанасюк А.С.</i>						

## СПИСОК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК

- LTE - Long Term Evolution (англ. *Long Term Evolution* — «довготерміновий розвиток»);
- 3G – третє покоління мобільних мереж;
- 3GPP - 3rd Generation Partnership Project – асоціація груп телекомунікаційних компаній, що займається стандартом 3G
- UTRAN – UMTS Terrestrial radio access network – збірне поняття, що описує мережу радіодоступу UMTS
- MIMO - Multiple Input Multiple Output, багатоантенна система
- OFDMA – Orthogonal Frequency-Division Multiplexing – мультиплексування шляхом ортогональних несучих
- БС – базова станція

					ЕліТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адкт	№ докum.	Підпис	Дата		4

## ВСТУП

Початок 21 століття показав наскільки стрімко можуть змінюватися засоби доставки телекомунікаційних послуг. Вистачило декількох років щоб мобільний зв'язок з стрімкою швидкістю поширився по усьому світу і разом з безпроводним доступом до персональних комп'ютерів, став основним видом зв'язку. Під кінець першого десятиліття мобільний зв'язок і безпроводний доступ почали розглядати як підмережі єдиної мережі радіодоступу (RAN – Radio Access network), що взаємодіють між собою. Усі стандарти мережі 3-го покоління: GERAN (GSM EDGE RAN), UTRAN(UMTS Terrestrial RAN), IMT2000-MC (CDMA-2000), Wi-Fi(Wireless Local Area Network), це і є мережі радіодоступу.

Не зважаючи на те що напрям розвитку мережевих технологій зв'язку вже прямує до розробки і впровадження по світу мереж 5G – п'ятого покоління мереж, актуальність 3G і 4G LTE залишається як ніколи високою. Навіть через стільки років після створення перших вже готових для використання технологій цих поколінь, для операторів мобільного зв'язку України повне покриття території країни сучасними видами передачі даних поки що не вдалося. Так, у більшості великих міст, обласних і районних центрах вже є LTE покриття. Але якщо брати 4G за міжнародними стандартами, оператори мобільного зв'язку ще не змогли розвинути мережу до такого рівня.

Якщо описувати що в собі містить поняття LTE (від англ. Long Term Evolution - еволюція в довгостроковій перспективі) – це сучасна технологія розробки і побудов мереж мобільного та бездротового зв'язку, створенням якої було проектом сумісної праці груп телекомунікаційних компаній у рамках 3GPP (3G Partnership Project) для покращення технологій третього покоління, і планувалося як новий ступінь в розвитку CDMA і UMTS. Тобто спочатку LTE не мав ніякого відношення до мереж четвертого покоління. Необхідність створення покращеної технології ґрунтувалася на тому що в стільниковому

									Адк
									5
Змн.	Адкт	№ докцм.	Підпис	Дата	ЕлІТ 6.172.432 ПЗ				

зв'язку 3 покоління, такому як стандарти UMTS та IMT2000-МС, були досягнуті швидкості передачі даних у розмірі одиниць мегабіт в секунду. Але сучасний світ потребував більшого. Тому для отримання швидкостей вище було необхідно розширити робочу смугу до 10, 20 і більше мегагерц, що і призвело до появи стандартів 4-го покоління (4G): LTE (E-UTRAN) і WiMAX (Broadband Wireless Access System)

Стандарт LTE став новим кроком в ланцюгу стандартів стільникового зв'язку GSM (GERAN) – UMTS – LTE. Він орієнтований на технології високошвидкісної пакетної передачі даних, вперше реалізованої в мережах UMTS (технологія HSPA) і IMT2000-МС (технологія 1xEV-DO). Трафік в мережі LTE передається блоками тривалістю 1 мс, при цьому використовується адаптивне управління форматом передачі у реальному часі, так само як і при використанні технології HSPA.

В LTE було досягнуто швидкості передачі даних понад 300 Мбіт/секунду а час затримки пересилання пакетів зменшена до 5 мс. Також, у порівнянні з існуючими стандартами бездротового мобільного доступу третього покоління, значно вища спектральна ефективність.

Перший же дійсний запуск LTE відбувся у містах Стокгольм та Осло, під керівництвом шведської компанією телекомунікаційних послуг TeliaSonera спільно з Ericsson 14 грудня 2009 року.

У дипломній роботі, на прикладі міста Конотоп з населенням 86000, буде розглянуто варіант розгортання мережі бездротового доступу до мобільного зв'язку та мережі Інтернет для жителів міста, та людей що його відвідують.

Проводячи розрахунки, буде вирішуватися питання забезпечення необхідної ємності мережі, створення оптимальної території покриття для досягнення мети – а саме модернізація мережі мобільного зв'язку у місті Конотоп шляхом впровадження технології LTE.

											Адк
Змн.	Адкт	№ док.м.	Підпис	Дата							6

ЕлІТ 6.172.432 ПЗ



# 1.ТЕХНОЛОГІЯ LTE. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО МОБІЛЬНИЙ ЗВ'ЯЗОК

## 1.1.Загальний опис стандартів стільникового зв'язку і поширення їх у світі.

**Стандарти 1-го покоління 1G.** Ще приблизно 40 років тому почали з'являтися перші системи радіотелефонного зв'язку між рухомими об'єктами. Проте сигнали що передавалися займали широку смугу частот і зв'язок відбувався тільки на певних фіксованих частотах. Такі умови призвели до проблем для розвитку технології пов'язані з обмеженим частотним ресурсом та низькою пропускнуою здатністю таких систем.

Основою для майбутнього стільникового зв'язку став принцип розбивання потрібної зони покриття на невеликі зони (стільники), у кожній з яких розташовувалася б хоча б одна базова станція. Таким чином, за рахунок повторного використання один і тих частот в різних стільниках, можна було покращити якість зв'язку і збільшити кількість абонентів.

В другій половині ХХ століття, а точніше на початку 80-х ,на територіях деяких країн були розгорнуті комерційні системи зв'язку, що використовували аналогову частотну модуляцію для передачі мовлення. Однією з перших такі послуги почала надавати система NMT-450 (Nordic Mobile Telephone), створена в 1981 році країнами Скандинавії. Слідуючи за ними почали з'являтися й інші системи, що працювали в діапазоні частот 400-500 МГц. Наприклад, такими системами були Radiocom-2000 (Франція), RTMS-101Н (Італія), С-450 (Німеччина).

Але справжній прогрес у розробці нових систем мобільного радіозв'язку відбувся після інтенсивного освоєння частот у діапазоні 800-900 МГц. Початок ери систем мобільного зв'язку (СМСС) почався NMT-900(країни Скандинавії), TACS і ETACS(Англія), AMPS (США), HSCMTS, J-TACS(Японія). Всі

					ЕлІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адкт	№ докцм.	Підпис	Дата		7



схожим за технічними характеристиками на D-AMPS цифровий стандарт з'явився в Японії у 1993 році - PDC (Personal Digital Cellular – буквально «персональний цифровий стільниковий зв'язок»).

Стандарт D-AMPS став повністю цифровим тільки у версії IS-136, яку почали експлуатувати в 1996 році. Щодо стандарту GSM, в 1989 році почалось освоєння нового частотного діапазону – 1800 МГц. Більша ширина робочої смуги і менші розміри стільників дали змогу проектувати та розгортати мережі значно більшої ємності.

**Проміжні стандарти 2,5G.** Наступною віхою розвитку мобільного зв'язку була розробка певної надбудови над технологією GSM, і нею став пакетний радіозв'язок загального користування GPRS (англ. General Packet Radio Service). Цей режим дає змогу користувачу мобільного телефона обмінюватися даними не тільки з іншими пристроями в мережі GSM, а й з зовнішніми мережами такими як Інтернет. На відміну від попередніх стандартів, GPRS пропонує тарифікацію за об'ємами переданої та отриманої інформації, а не за часом.

Подальший розвиток GPRS – технологія EDGE (англ. Enhanced Data rates for GSM Evolution). Основною різницею є тільки спосіб кодування даних, що дає змогу передавати більший об'єм даних за одну одиницю часу. Інколи цю технологію називають 2,75G.

Також є технологія яка офіційно відноситься до стандартів третього покоління, проте її нерідко ставлять в рамки поколінь 2,5G і 2,75G, з якими вона має багато подібних моментів. Це мобільна технологія передачі цифрових даних 1xRTT(One Times Radio Transmission Technology), що базується на CDMA-технології.

**Стандарти 3-го покоління 3G.** Метод множинного доступу CDMA заклав фундамент для цифрових систем третього покоління.

Ще в 1992-1993 роках в США був розроблений стандарт IS-95 (діапазон 800 МГц), перший стандарт серед третього покоління. Він набув поширення в 1995-1996 роках на територіях США, Південної Кореї, Гонконгу. А в США

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
						9
Змн.	Адкт	№ док.м.	Підпис	Дата		



Щодо стандарту WiMAX, часто його не відносять до стандартів четвертого покоління, адже на відміну від інших він не інтегрований з попередніми поколіннями, такими як 3G та 2G. Більш того оператори що розгортали мережу WiMAX не могли надати такі звичні послуги зв'язку як голосові дзвінки та SMS, хоча можливість ними користуватись все ж була при використанні різних VoIP сервісів.

Мережам HSPA+ також було надано дозвіл називатися 4G, тому що вони забезпечують відповідні для цього покоління швидкості передачі даних.

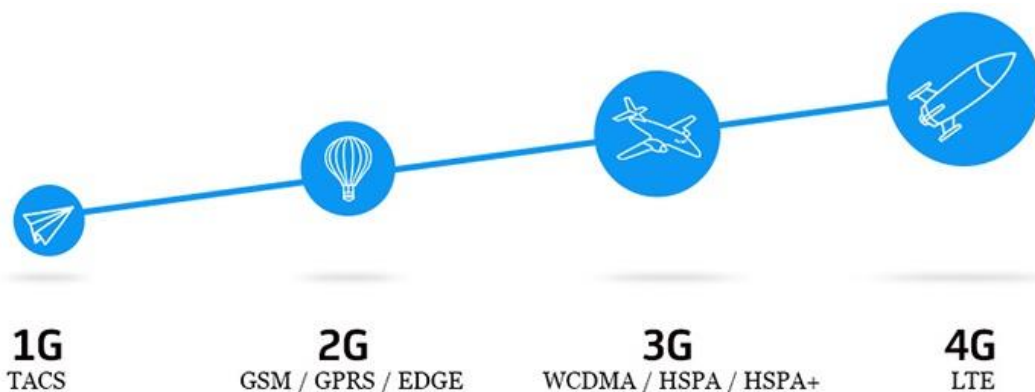
**Стандарти 5-го покоління 5G.** На сьогодні загальноприйнятих стандартів для розгортання таких мереж не існує. П'яте покоління розробляється на базі стандартів телекомунікацій що йдуть після стандартів 4G/IMT-Advanced.

Якщо прослідкувати за тенденцією зміни поколінь стільникового зв'язку, то вони з'являлися в середньому через кожні 10 років. Опираючись на те що перший стандарт 1G був створений у 1981 році (NMT), 2G в 1992(GSM) 3G в 2001(WCDMA/FDMA), 4G в 2010 (3GPP LTE, WiMax), можна очікувати що поширення стандартів 5-ого покоління можна очікувати в районі 2020 року. Перші спроби розгортати такі мережі уже почалися ще в 2018-2019 роках. В деяких країнах Європи, таких як Велика Британія, Німеччина, Італія та декількох інших, в США та в розвинутих країнах Азії вже були розгорнуті перші такі мережі, в основному по великих містах і столицях. Якщо згадувати розвиток 5G в Україні, то в 2019 році почалося розроблення проекту розвитку мобільних мереж цього покоління у майбутньому. Справжнє поширення мереж цього покоління очікується до 2025 року.

					<i>ЕлІТ 6.172.432 ПЗ</i>	<i>Адк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адкт</i>	<i>№ докцм.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>11</i>

Вважається, що технології 5G зможуть забезпечувати більш високу швидкість, порівняно з попередніми поколіннями. Це має забезпечити більшу доступність широкосмугового мобільного зв'язку, а також:

- наднадійні масштабні системи комунікації між пристроями;
- використання режимів device-to-device (англ. «пристрій з пристроєм»);
- більш короткий час затримки;
- менший рівень електроспоживання.



*Рисунок 1 – Ланцюг розвитку поколінь стільникового зв'язку*

Якщо взяти основні параметри усіх існуючих стандартів поколінь стільникового зв'язку їх можна узагальнити у вигляді Таблиці 1.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адкт	№ докцм.	Підпис	Дата		12

Таблиця 1.

Покоління	1G	2G	2,5G	3G	3,5G	4G
Початок розроблення	1970 р.	1980 р.	1985 р.	1990 р.	До 2000 р.	2000 р.
Реалізація	1984 р.	1991 р.	1999 р.	2002 р.	2006-2007 рр.	2008-2010 рр.
Сервіси	Аналоговий стандарт, мовні повідомлення	Цифровий стандарт, короткі повідомлення	Більша ємність, пакетна передача даних, збільшення швидкості	Ще більша ємність, швидкості до 2 Мбіт/с	Збільшення швидкості мереж третього покоління	Велика ємність, мережа орієнтована на IP, підтримка мультимедії, швидкість до сотен мегабіт на секунду
Швидкість передачі даних	1,9 кбіт/с	9,6-14,4 кбіт/с	115 кбіт/с (1 фаза) 384 кбіт/с(2 фаза)	До 3,6 Мбіт/с	До 42 Мбіт/с	100 Мбіт/с – 1 Гбіт/с
Стандарти	AMPS, TACS, NMT	D-AMPS, cdma-One, GSM, PDC	GPRS, EDGE(2,75G), 1xRTT	W-CDMA, CDMA-2000, UMTS	HSDPA, HSUPA, HSPA, HSPA+	LTE-Advanced, WiMax Release 2 (IEEE 802.16m), Wireless MAN-Advanced
Мережа	PSTN	PSTN	PSTN, мережа пакетної передачі даних	Мережа пакетної передачі даних	Мережа пакетної передачі даних	Мережа пакетної передачі даних





- багатоантенні системи MIMO (Multiple Input Multiple Output).

Для всіх технологій доступу в архітектурі LTE базовими є загальна опорна точка а також вузол шлюзу (Gateway Node, GW). Основою для всіх інтерфейсів є реалізація на них протоколів IP. Робота технологій доступу, що не пов'язані з 3GPP, реалізуються на базі IP, як в мережі так і у клієнта. (Рисунок 2).

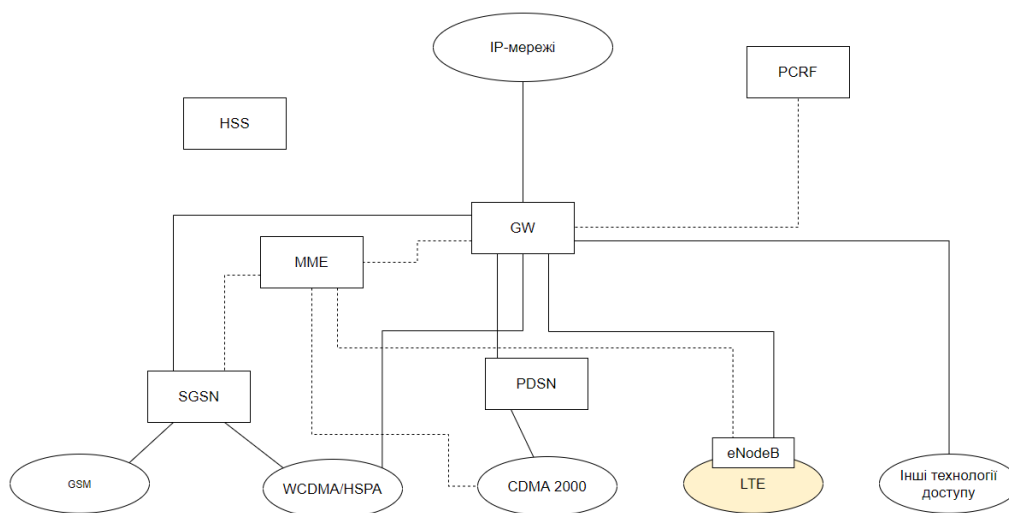


Рисунок 2 – Архітектура мережі LTE

Архітектура надає можливість переходу зменшити кількість вузлів, а саме залишити з чотирьох вузлів два (базові станції та шлюзи). Також відбувається поділ функцій інтерфейсу в мережі радіодоступу RAN-CN, так само як і в WCDMA/HSPA. Відбувається розділення площини управління і площини користувача між системою управління мобільністю (MME) та шлюзом. Шлюз в свою чергу може використовуватися в двох конфігураціях: як виконавець функцій пристрою мережі пакетних даних (PDN), так і функції сервісного шлюзу. Для всіх технологій доступу PDN-шлюз є загальною опорною точкою. Таким чином в не залежності від мобільності, в межах однієї або декількох технологій доступу забезпечується стабільна точка присутності для усіх користувачів на основі IP.

Якщо розглянути топологію мережі, то не буде складним прослідкувати за основними принципами організації послуг (рисунок 3).

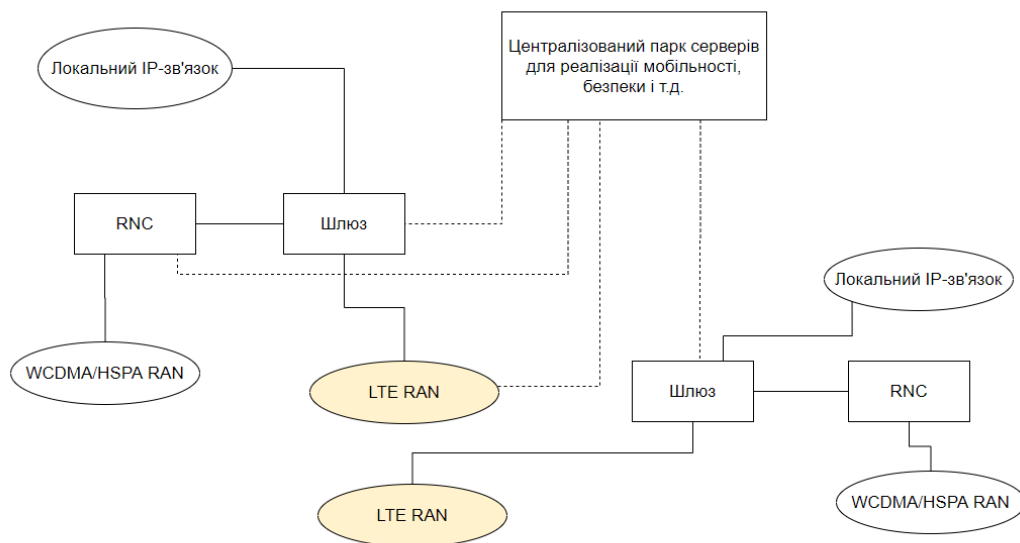


Рисунок 3 – Топологія мережі LTE

Сервісний шлюз в рамках 3GPP-системи – опорна точка для мобільності. Для того щоб досягти максимально гнучкої можливості змінити масштаби пропускної здатності, для полегшення розгортки мережі та для переходів на незалежні технології функціональність MME відділена від шлюзів.

Системи GSM і WCDMA/HSPA вбудовуються в удосконалену систему засобами стандартизованих інтерфейсів, що поєднують між собою вузол SGSN (сервісний вузол підтримки GPRS) і удосконалене ядро мережі. Також сюди входять інтерфейси MME для передачі контексту і встановлення каналів для переміщення між технологіями доступу. Додатково сюди входить і шлюз для встановлення IP-з'єднання з обладнанням користувача (UE). Виходить, для терміналів GSM і WCDMA/HSPA вузол шлюзу функціонує в якості вузла GGSN (вузла підтримки шлюзу GPRS).

Що стосується рівня покриття мережею LTE на території України, то для користувачів такі послуги організуються основними операторами країни, а

саме Київстар, Vodafone, Lifecell. На сайтах цих операторів та в інших відкритих джерелах можна знайти карти покриття України. (Рисунки 4-6)



Рисунок 4 – Покриття 4G компанією Київстар

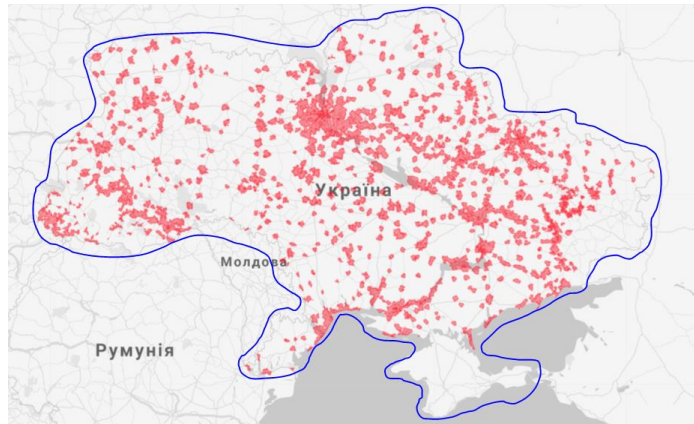
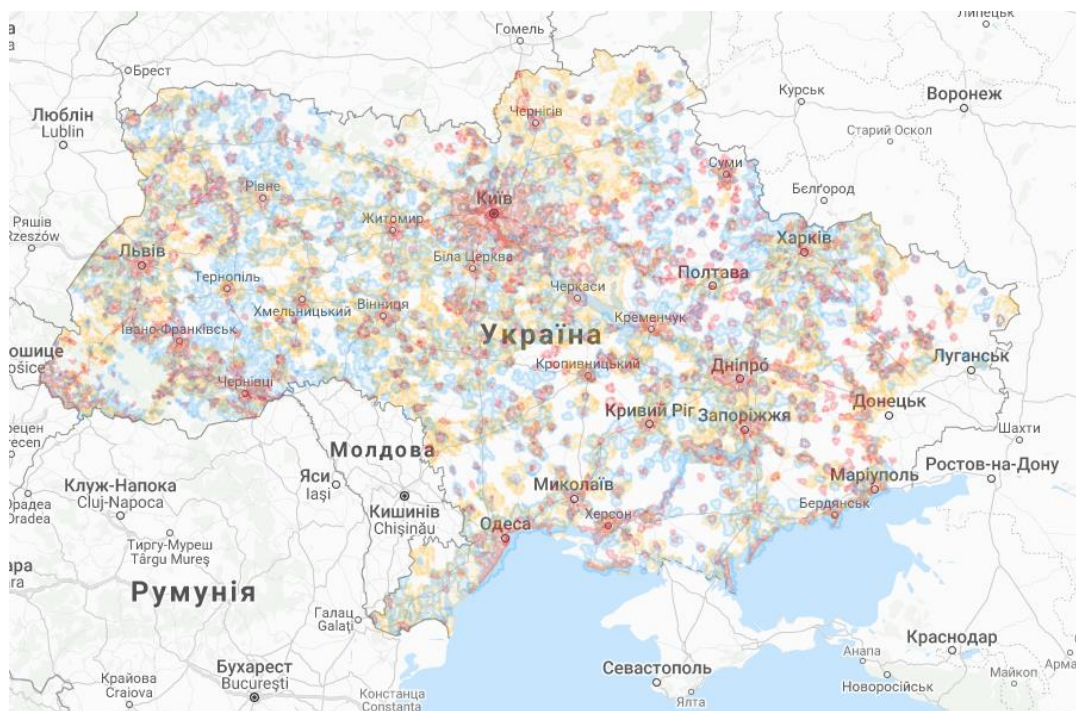


Рисунок 5 – Покриття 4G компанією Vodafone



Рисунок 6 – Покриття 4G компанією Lifecell

Вже доволі велика частина країни має покриття мережею четвертого покоління. Якщо сумістити покриття всіх операторів то отримаємо наступний результат (Рисунок 7)



*Рисунок 7 – Загальне покриття мережею 4G території України*

Все важче знайти міста та села де ще немає покриття LTE. Проте для повного 100% забезпечення країни сучасним зв'язком ще треба багато працювати. Не дивлячись на площі розповсюдження, інколи зв'язок залишає бажати кращого, тому що по багатьом параметрам до рівня міжнародного стандарту LTE-Advanced ще є куди розвивати обладнання. Але покращення рівня мобільного зв'язку не зупиняється. З початку розповсюдження мережі четвертого покоління використовувалися частоти 1800 МГц та 2600 МГц, та на початку 2020 року влада дозволила основним операторам мобільного зв'язку почати опановувати частоти 900 МГц. Цей дозвіл спрямований на розширення і покращення покриття і використання таких частот дозволить використовувати менше базових станцій при більшій зоні покриття, що дасть змогу розповсюджувати зв'язок на територію сільських громад і міст, в яких дана технологія ще не доступна.

### 1.3. Об'єкт проектування.

Цілю цієї роботи є проектування на території міста Конотоп сучасної мережі мобільного зв'язку 4G, а саме технологію стандарту LTE. Це місто знаходиться на півночі України, в Сумській області.

Конотоп – друге за значенням і населенням місто в Сумській області, а також важливий залізничний вузол, що забезпечує вантажні та пасажирські перевезення в семи напрямках: Київському, Московському, Харківському, Гомельському, Курському, Полтавському, Вітебському.

У місті проживає приблизно 86000 осіб, густина населення 1970 осіб/км<sup>2</sup>, площа міста становить 43,78 квадратних кілометрів, висота над рівнем моря – 142 метри.

Крізь місто пролягають регіональні та територіальні автомобільні дороги Р60, Р61, Т1910, Т1925.

Інфраструктура міста складається з:

А) Освітня сфера: 10 загальноосвітніх та спеціалізованих шкіл, 1 гімназія, 6 закладів вищої освіти та 3 заклади професійно-технічної освіти;

Б) Сфера охорони здоров'я: 12 лікарень, поліклінік, відділів надавання медичних послуг;

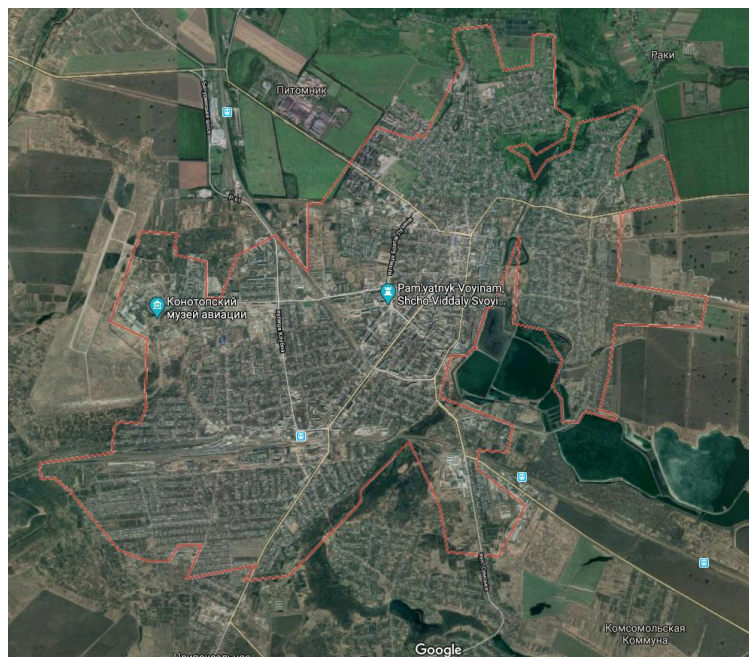
В) До культурної сфери належать: 4 міських бібліотеки, 1 палац культури, 2 міських будинка культури, 2 музичні школи, центр культури и дозвілля.

Г) Серед телекомунікаційних послуг: ЗМІ у вигляді газет, теле- та радіокомпаній, послуги операторів «великої трійці».

Д) Промисловість представлена: заводом «Мотордеталь», Конотопським арматурним заводом, Конотопським вагоноремонтним заводом, авіаремонтним заводом «Авіакон», механічним заводом, швейною фабрикою, м'ясокомбінатом, хлібокомбінатом, молокозаводом.

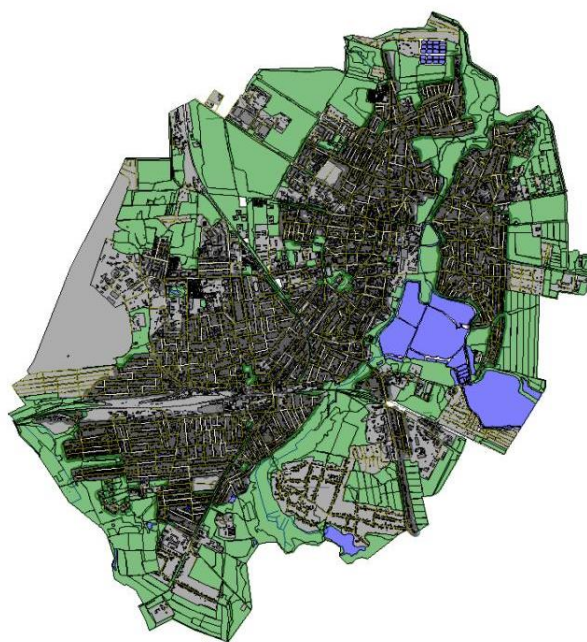
Аналізуючи інфраструктуру міста не важко зрозуміти, що необхідність у сучасних засобах зв'язку є безперечною. У Конотопі переважає низька і невисока ступінь поверховості будівель.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адкт	№ докцм.	Підпис	Дата		19



*Рисунок 8 – Супутникова карта міста Конотоп*

Також у наявності є схемотехнічна карта міста (Рис.9):



*Рисунок 9 – Схемотехнічна карта міста Конотоп*

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адкт	№ докцм.	Підпис	Дата		20

## 2. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОЇ СТОРОНИ LTE ТА ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ МЕРЕЖІ

### 2.1. Перша фаза стандарту LTE

Перша фаза стандарту LTE була завершена у 2008 році. До її появи попередником було розвиток технології HSPA в стандарті UMTS, а також поява нового стандарту широкосмугового безпроводного радіодоступу IEEE802.16e – мобільного WiMAXa. Подібно до WiMAX, на фізичному рівні LTE застосовується технологія OFDM і додатково із HSPA було перенесено адаптивне управління пакетною передачею, що керується в реальному часі. Між інших використовуються ще й немало протоколів рівня L2 і L3. Дивлячись на вищесказане можна стверджувати що LTE це насправді продовження розвитку стандартів 3GPP. Головною ж відмінністю між LTE та UMTS являється збільшення ширини робочої смуги. Так в UMTS вона дорівнювала приблизно 5 МГц, а вже в LTE – від 10 до 20 МГц. Це і є основною причиною збільшення швидкості передачі в кілька разів.

На відміну від GSM, технологія LTE забезпечує кожному БС мережі корисною можливістю, а саме здатність вибірково обирати смуги частот и підлаштовувати потужність під користувача, в залежності від того в якій частині стільника він знаходиться. Для збільшення пропускну здатності стільника застосовуються моделі повторного використання смуг частот, що є умовою для якості радіозв'язку в умовах доволі обмежених ресурсів БС.

Моделі повторного використання смуг частот розподіляються на:

- жорстке повторне використання смуг частот каналів;
- м'яке повторне використання смуг частот каналів;
- повне повторне використання смуг частот каналів;
- дрібне повторне використання смуг частот каналів.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата		21

Жорстким повторним використанням смуг частот називають такий варіант, коли відбувається поділ смуги частот на фіксовану кількість смуг, що надається стільникам в залежності від деякої визначеної моделі повторного використання. Кожен сегмент обслуговується особистим для нього передавачем з невисокою вихідною потужністю та кількістю каналів, що необхідна в потрібних випадках. Це дозволяє використовувати між сегментами частоти каналів повторно без завад, не зважаючи на велику відстань між ними. Теоретично такі передавачі можна використовувати і в сусідніх сегментах.

М'яким повторним використанням смуг частот називають такий випадок, коли усю смугу частот розподіляють на одну фіксовану кількість смуг. Так для кожного стільника одну з цих смуг надають абонентам, що знаходяться на межі стільника, і усі інші смуги направлені абонентам, що знаходяться поруч з базовою станцією. Приклад такого повторного використання смуг частот показаний на рис. 10.

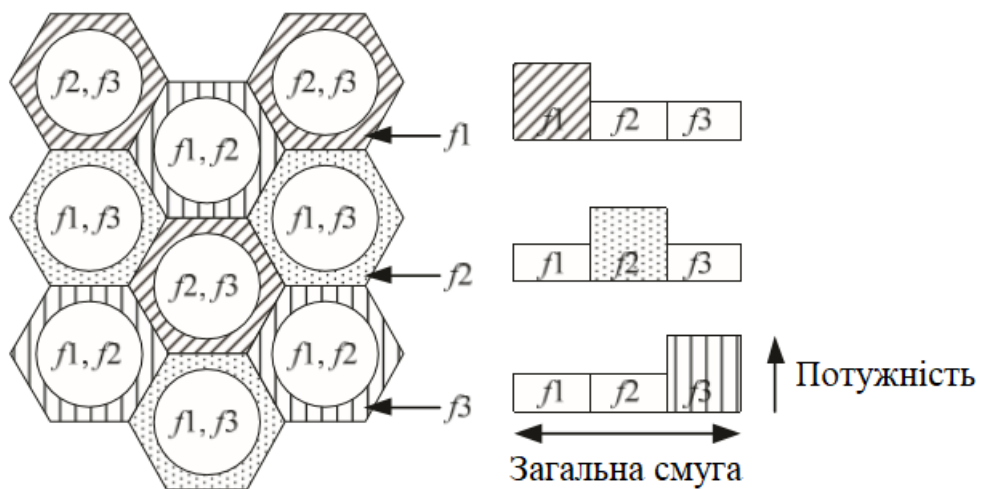


Рисунок 10 – М'яке повторне використання смуг частот каналів

Ще одним варіантом є повне повторне використання смуг частот каналів. У цьому випадку смугу частот використовується кожним стільником повністю незалежно від місця де знаходиться абонент в стільнику. Планувальник БС займається розподіленням ресурсних блоків. Розклад про те як розподіляти ресурси БС повідомляються по спеціальному керуючому каналі. Проте при цьому може з'явитися проблема з міжстільниковою інтерференцією. В LTE



застосовують динамічну координацію назначення смуг частот, що призводить до зменшення інтерференційного зв'язку. Застосування повного повторного використання смуг частот не є доцільним з точки зору абонентної ємності, оскільки об'єм службової інформації, необхідної для динамічної диспетчеризації.

При дрібному повторному використанні смуги частот каналів для обслуговування абонентів, котрі розташовані поруч з БС, використовується загальна смуга частот. Інші ж можливі смуги використовуються абонентами, що знаходяться на межах стільника.

У мережах LTE використовують тільки дрібне та м'яке повторне використання смуг частот. Це обумовлено тим що данні технології при правильному планування можуть значно збільшити ємність мережі.

## 2.2. Технологія OFDMA

OFDM (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing, рис. 11) – методика мультиплексування, що розподіляє смугу каналу на множину піднесучих частот, і яка стала базою для ортогонального багатостанційного доступу з частотним розподілом каналів OFDMA.

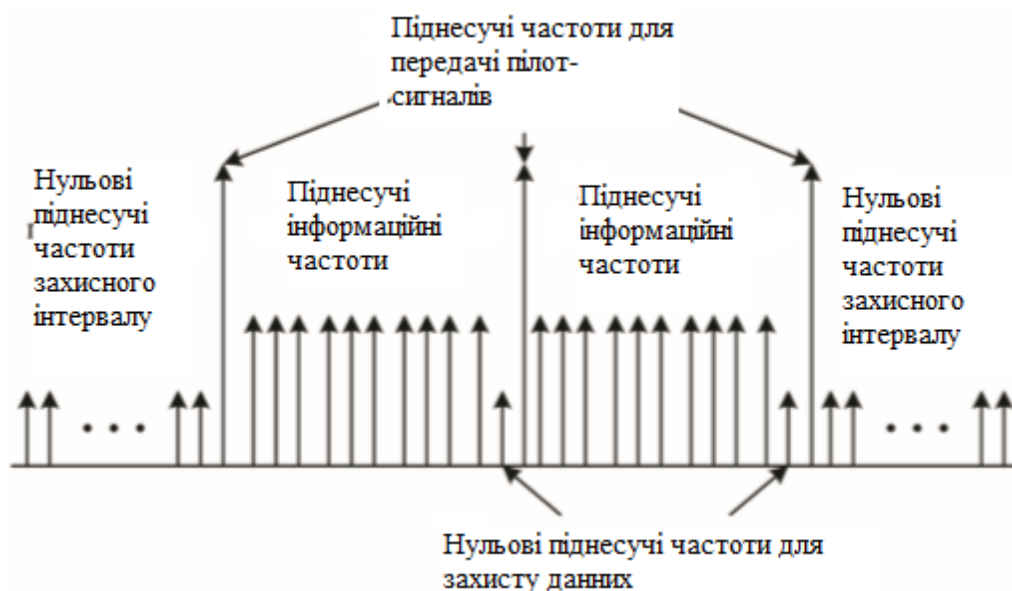


Рисунок 11 – Розподіл піднесучих частот

Змн.	Авк	№ док.м.	Підпис	Дата

У системі OFDM вхідний потік даних розподілений на декілька паралельних підпотоків, швидкість передачі яких знижена (за рахунок збільшення тривалості кожного знаку, що передається на цій частоті). Так кожен потік передається і модулюється на окремій ортогональній піднесучій частоті (рис. 12).

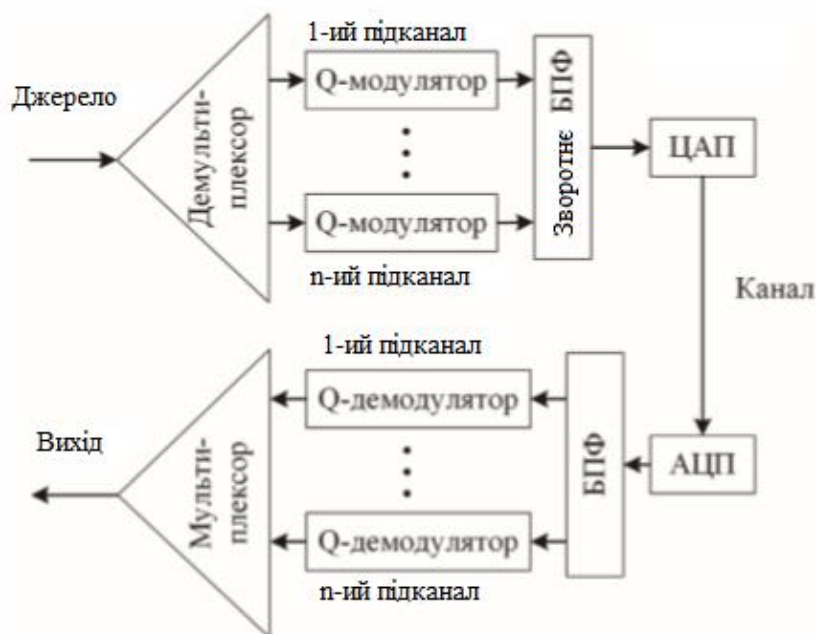


Рисунок 12 – Модуляція з декількома несучими

Символ – протокольна одиниця, що передається за допомогою однієї несучої. Збільшуючи тривалість символу покращується стабільність роботи OFDM, що і зменшує максимальний діапазон між тривалістю символів, які передаються за допомогою різних несучих.

Для кожного підканалу виділена своя несуча частота. Якщо дати першій несучій частоті значення  $\omega$ , то наступна несуча буде мати частоту  $2\omega$ , і так далі до значення  $n$ -ого каналу для якого частота буде рівна  $n\omega$ .

Якщо для кожного із  $n$  підпотоків виконати квадратурну модуляцію, то ми отримаємо  $n$  квадратурних (ортогональних) функцій типу  $a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t$

А якщо просумувати функції всіх підканалів, то отримаємо функцію, що подібна до ряду Фур'є:

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{N-1} [a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t].$$

Суттєва відмінність від ряду Фур'є це те що отримана функція має кінець. Деякі ж значення ряду Фур'є взяті як «префікс», доповнення що допомагає збільшити точність обробки та виключення взаємного впливу в реальній функції. Ці значення додаються перед послідовністю квадратурних сигналів. Це дає змогу збільшити точність отримання функції  $x(t)$  і дозволяє більш точно відділяти підканали один від одного.

Отримана в результаті модуляції сума функцій «згортається» за допомогою зворотного перетворення Фур'є в одну функцію  $x(t)$ , котра перетворюється в цифрову форму і передається в лінію.

На стороні приймача відбувається перетворення із цифрової форми в аналогову, виконується теж саме пряме перетворення Фур'є, на кожному каналі демодулюються квадратурні функції, які потім збираються в одну послідовність. Для уникнення міжсимвольної інтерференції вводиться циклічний префікс (CP). Він додається в початок кожного OFDM-символа і являє собою циклічне повторення закінчення символу. Наявність циклічного префіксу призводить до створення часових пауз між окремими символами, і якщо тривалість «захисного» інтервалу буде більше ніж максимальний час затримки сигналу в результаті багатопробеневого розповсюдження, то міжсимвольна інтерференція буде відсутня.

Так, циклічний префікс знижує корисну (інформаційну) швидкість, і є надлишковою інформацією, але як раз він і являється тим захистом від міжсимвольної інтерференції. Вказана надлишкова інформація додається до передаваного символу в передавачі і відкидається під час прийому в приймачу.

### **2.3. Технологія передачі даних MIMO**

Системи з багатьма антенами MIMO і OFDMA це основа для четвертого покоління стільникового зв'язку.

Технологія інтелектуальної (smart) антени включає в себе доволі складні алгоритми управління множиною антен, що функціонують як векторним так і

						<i>ЕлІТ 6.172.432 ПЗ</i>	<i>Адк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			25

матричним принципом ( антени з переключенням, решітчасті антени і т.п.) OFDMA підходить для підтримки таких технологій.

Для цього використовуються такі процедури:

- *формування діаграми направлення.* Шляхом формування діаграми направленості система використовує багато антен для передачі сигналів, що покращують охоплення і ємність системи а також зменшують вірогідність порушення зв'язку;
- *коди простір-час.* Забезпечують оптимальний запас для замирання та просторове рознесення.
- *Просторове мультиплексування.* Збільшує швидкість і пропускну здатність. Просторове мультиплексування основане на передачі множини потоків по множині антен. Такий шлях дає змогу досягнути високої пропускну здатності, особливо якщо приймач має множину антен і може відділити окремі потоки. Використання системи MIMO 2×2 з просторовим мультиплексуванням збільшує пікову швидкість передачі даних удвічі, завдяки передачі двох потоків даних. У напрямку «вверх» кожен користувач має тільки одну антену-передавач. Таким чином два користувача можуть передавати сигнал в одному і тому ж слоті – так ніби два потоки просторово-мультиплексовані від двох антен того ж самого користувача. Такий спосіб має назву сумісного просторового мультиплексування «вверх».

Адаптивний перемикач інтелектуальної антени відображено на рис. 13.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата		26

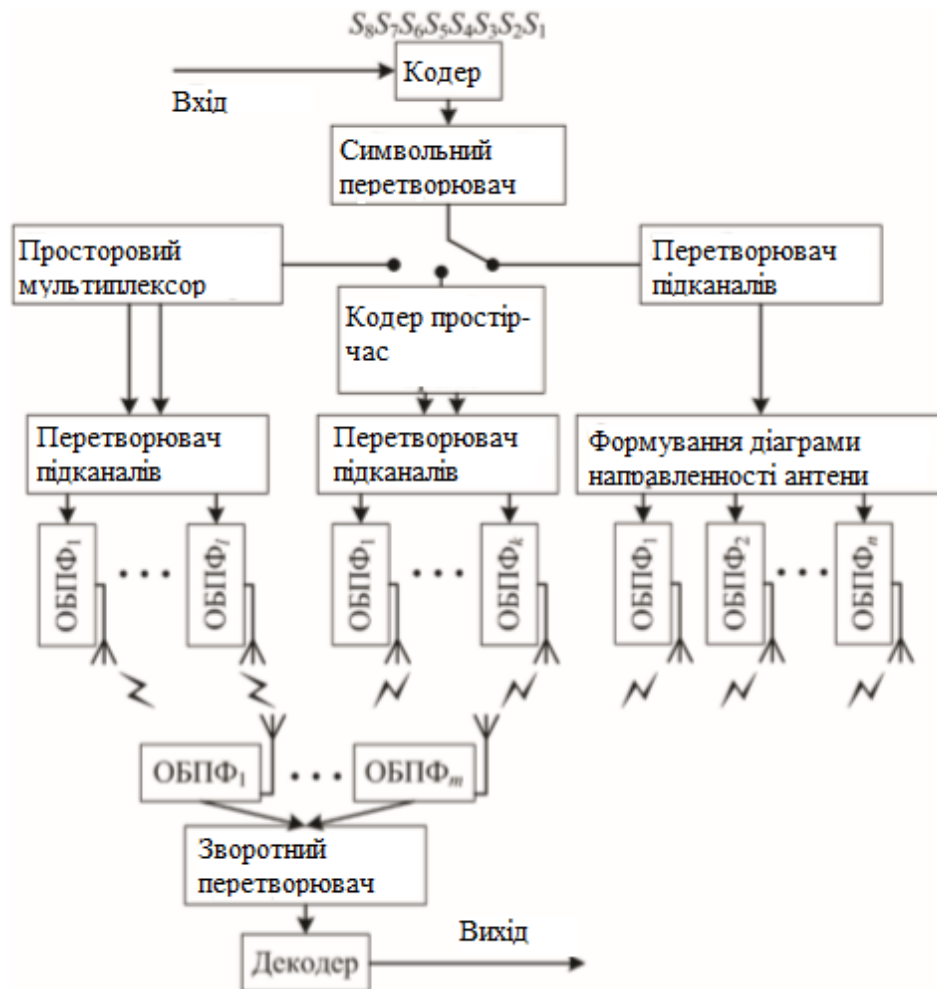


Рисунок 13 – Адаптивний перемикач інтелектуальної антени

Послідовність символів, що поступає на кодер, перетворюється символьним перетворювачем в просторову форму або мультиплексується для передачі по підканалам. В залежності від програми, що закладена в адаптивний перетворювач, і в залежності від нинішнього стану каналів, сигнали передаються по різним підканалам. Вони також можуть використовуватись для перетворення підканалів (наприклад, змінювати діаграму направленості елементів адаптивної антени), що дозволяє змінювати параметри середовища передачі з ціллю покращення якості відповідно до поточного стану каналів. Вони дають можливість також формувати окремі пучки сигналу для кожного абоненту з точністю в декілька десятків метрів. Завдяки цьому реалізується SDMA (Space Division Multiple Access) – так названий просторовий метод множинного доступу, що знижує загальний рівень інтерференції в радіоефірі і значно розширити ємність мережі.

Отримані сигнали розповсюджуються далі за певним законом ( послідовно або відповідно до заданої матриці) в пристрій зворотного перетворення Фурьє для просторово-розподіленої передачі по радіоінтерфейсу. На стороні приймача просторові сигнали об'єднуються , і відбувається зворотне перетворення і декодування. Просторове мультиплексування покращує пікову пропускну здатність.

Канали створюються за принципом часткового використання піднесучих. Використання режиму з декількома антенами 2×2 MIMO в напрямку «вниз» пікова швидкість теоретично подвоюється. При сумісному просторовому мультиплексуванню за напрямком «вверх» пікова швидкість від поєданого пристрою (секторна швидкість) подвоюється, в той час коли швидкість передачі від кожного користувача залишається незмінною. Таким чином є змога адаптувати пропускну здатність каналу, використовуючи різні відношення «вниз/вверх» за напрямками.

Для боротьби з замиранням фізичний рівень OFDMA за допомогою адаптивного набору антен забезпечує різні варіанти рознесення за різними напрямками слідування (другого і четвертого порядку), тобто організацію декількох каналів (двох, чотирьох і т. п.) для передачі і прийому тієї ж самої інформації.

Шляхом використання декількох антен для передачі інформації збільшується зона покриття і пропускну здатність системи. При цьому, завдяки формуванню діаграми направленості променів і нульовому перекриттю сигналів що передаються, зводяться до мінімуму перерви в роботі системи зв'язку.

Варіанти рознесення включають набір методів, основаних на рознесенні другого і четвертого порядків у напрямку «вниз», рознесення другого порядку у напрямку «вверх», котрі можуть варіюватися в залежності від необхідної ємності та зони покриття.

						ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата			28

Існує декілька варіантів алгоритмів управління адаптивною антенною системою, забезпечені фізичним рівнем OFDMA: сканування масиву розподілу та метод прямої сигналізації.

Сканування масиву розподілу підтримує всі методи розподілу піднесучих. Метод прямої сигналізації забезпечує регулювання розподілу несучих на піднесучі за допомогою сигналів управління, призначених для точного налаштування антен БС на МС в даному підканалі. У результаті, виконав усі необхідні налаштування, БС і МС встановлюють з'єднання, під час якого відбувається обмін даних.

OFDMA може забезпечити рознесення четвертого порядку у напрямку «вниз» і другого порядку у напрямку «вверх». В основу рознесення покладено принцип просторово-часового кодування і код зі стрибкоподібною перестройкою частоти.

Алгоритм Аламоуті покладено в основу просторового кодування. Цей алгоритм призначений для передачі потоків сигналів по двох антенах. Потoki передаються по чергово по кожній із антен. Механізм коду зі стрибкоподібною перестройкою частоти полягає в тому, що при переході до іншої антени потік може бути переданим по іншому шляху за зміною набору піднесучих. При цьому використовується інформація закладена в матрицю.

## **2.3. Аспекти проектування**

### **2.3.1. Архітектура мережі стандарту LTE**

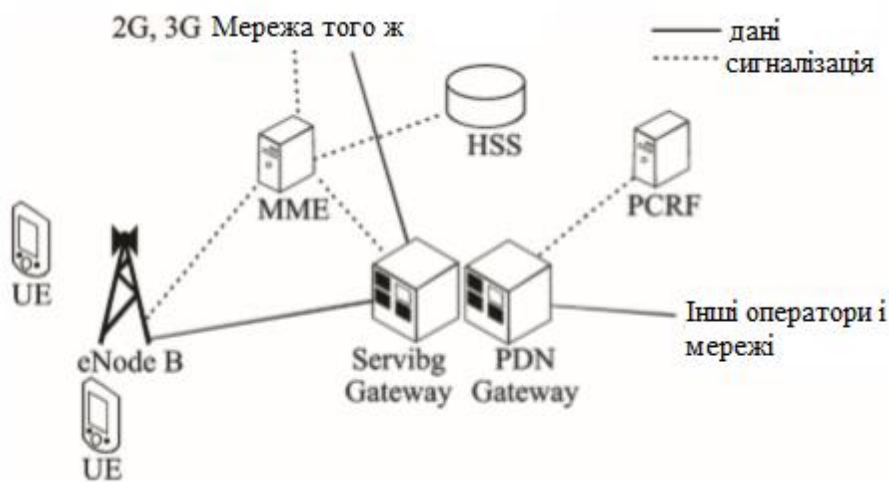
Розроблюючи архітектуру мережі LTE мають бути прийнятими до уваги наступні загальні принципи:

- 1) Логічно розділені транспортні підмережі передачі даних користувачів і службової інформації;
- 2) Мережа радіодоступу і базова пакетна мережа повністю звільнені від транспортних функцій. Схеми адресації, що використовуються в таких мережах, не повинні бути пов'язані зі схемами адресації, що використовуються при реалізації транспортних функцій;

										Адк
										29
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата	ЕлІТ 6.172.432 ПЗ					

- 3) Управління мобільністю абонентів і/або терміналів користувачів повністю покладено на мережу радіодоступу
- 4) Функціональний розподіл інтерфейсів мережі радіодоступу повинен мати декілька можливих опцій;
- 5) Інтерфейси повинні базуватися на логічній моделі блоку, що керується даним інтерфейсом;
- 6) Один фізичний елемент мережі може містити в собі декілька логічних блоків.

Із схеми мережі LTE (рис. 14) видно, що структура мережі сильно відмінна від мереж стандартів 2G та 3G. Суттєві зміни відбулися і з підсистемою базових станцій, і з підсистемами комутацій. Було змінено технологію передачі даних між обладнанням користувача і БС. Також зміни торкнулися і протоколів передачі даних між мережевими елементами. Уся інформація (голос, дані) передається у вигляді пакетів. Таким чином, уже немає розподілення на частини, що обробляли або голосову інформацію, або тільки пакетні дані.



*Рисунок 14 – Структура мережі стандарту LTE*

Можна виділити наступні основні елементи мережі стандарту LTE:

- Шлюз обслуговування мережі LTE Serving Gateway (SGW). Він призначений для обробки і маршрутизації пакетних даних, що поступають із/в підсистему базових станцій. Цей шлюз служить заміною MSC, MGW і SGSN мережі UMTS. SGW має пряме з'єднання з

									Адк
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата	ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ				30



мережами другого та третього покоління того ж оператора, що спрощує передачу з'єднання в/із них по причині погіршення зони покриття, перенавантажень і т.п.;

- Шлюз до/від мереж інших операторів Public Data Network (PDN) Gateway (PGW). Якщо інформація (голос, дані) передаються із/в мережу даного оператора, то вони маршрутизуються саме через PGW;
- Вузол управління мобільністю MME (Mobility Management Entity). Він призначений для управління мобільністю абонентів мережі LTE;
- Сервер абонентських даних HSS (Home Subscriber Server). HSS являє собою об'єднання VLR, HLR, AUC, виконаних в одному пристрої;
- Вузол виставлення рахунків абонентам за вказані послуги зв'язку PCRF (Policy and Charging Rules Function).

Усі перелічені вище елементи відносяться до системи комутації мережі LTE. У системі БС залишився лише один елемент з попередніх поколінь – БС, котра отримала назву eNodeB (eNB). Цей елемент виконує функції і БС, і контролера БС мережі LTE. За рахунок цього спрощується розширення мережі, оскільки не потребують розширення ємності контролерів чи додавання нових.

Мережа LTE складається з двох важливих компонентів: мережі радіодоступу E-UTRAN і базової мережі SAE (англ. System Architecture Evolution). Їх взаємодія показана на рис. 15.

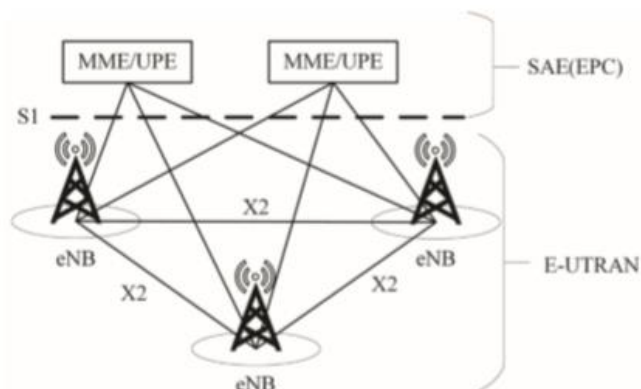


Рисунок 15 – Взаємодія мережі радіодоступу E-UTRAN і базової мережі SAE

Мережа радіодоступу E-UTRAN розглянута в певних технічних специфікаціях, згідно з якими вона складається тільки з БС. Базові станції eNB являється елементами повнозв'язної мережі E-UTRAN і з'єднані між собою за принципом «кожен з кожним» за допомогою інтерфейсу X2. Інтерфейс X2 підтримує хендовер мобільного терміналу в активному стані. Кожна eNB має інтерфейс S1-C з базовою мережею SAE, побудованій по принципу комутації пакетів.

Базова мережа SAE, що іноді називається мережею EPC (Evolved Packet Core), містить у собі SGW, PDNG, PCRF, HSS, вузли MME/UPE, що складаються із логічних елементів MME і UPE. EPC служить еквівалентом мережі GPRS. Логічний елемент MME взаємодіє з БС мережі E-UTRAN за допомогою протоколів площини управління C-plane (інтерфейс S1-C). Логічний елемент UPE (User Plane Entity) відповідає за передачу даних користувачів згідно протоколів площини користувача U-plane і взаємодіє з eNB засобом інтерфейсу S1-U.

Завдяки інтерфейсу S1 базові станції з'єднані з декількома вузлами MME/UPE, що дозволяє більш гнучко використовувати мережевий ресурс.

### 2.3.2. Канальна структура мереж LTE

Щодо каналної структури мереж LTE, існує три категорії, в які можна згрупувати різні канали передачі даних:

- Логічні канали – надають послуги середнього рівня управління доступом MAC в межах структури протоколу LTE. За типом інформації що передається логічні канали поділяються на канали управління та логічні канали трафіку.
- Транспортні канали – канали фізичного рівня, що виконують передачу інформації в MAC і вище. На транспортному рівні інформаційні повідомлення розбиваються на транспортні блоки. У кожному часовому інтервалі передачі через радіоінтерфейс передають хоча б один

					<i>ЕлІТ 6.172.432 ПЗ</i>	<i>Адк</i>
<i>Змн.</i>	<i>Адк</i>	<i>№ док.м.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<i>32</i>

транспортний блок. Технологія MIMO дає можливість передавати до чотирьох блоків в одному транспортному каналі;

- Фізичні канали – це канали передачі, що передають повідомлення користувачів і керуючі повідомлення. Вони змінюються між потоками «вверх» та «вниз».

Також в мережах LTE з'являється поняття наскрізного каналу (end-to-end bearer) між двома кінцевими точками: або між двома користувачами, або між терміналом користувача і якимось інтернет-сервером.

На рис.16 показане відображення фізичних, транспортних і логічних каналів у напрямку «вниз».

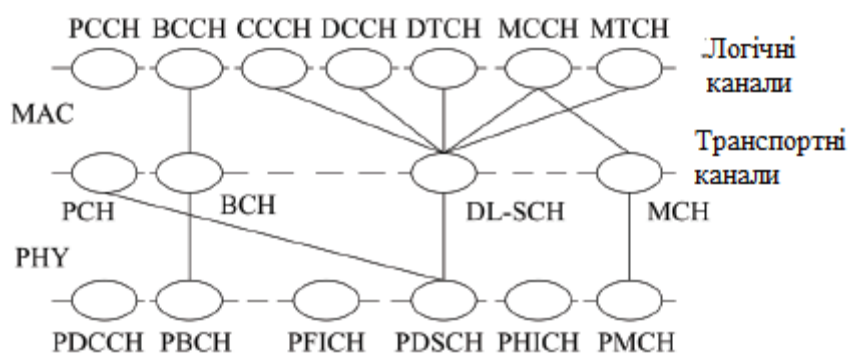


Рисунок 16 – Відображення каналів в напрямку «вниз»

Взаємне відображення логічних, транспортних і фізичних каналів в напрямку «вверх» показане на рис. 17.

Важливим поняттям є канал, що переносить деякі параметри якості обслуговування, що встановлюється між MS і шлюзом пакетної мережі. В специфікаціях LTE такий канал має назву EPS-канал (EPS bearer, виділена пакетна система).

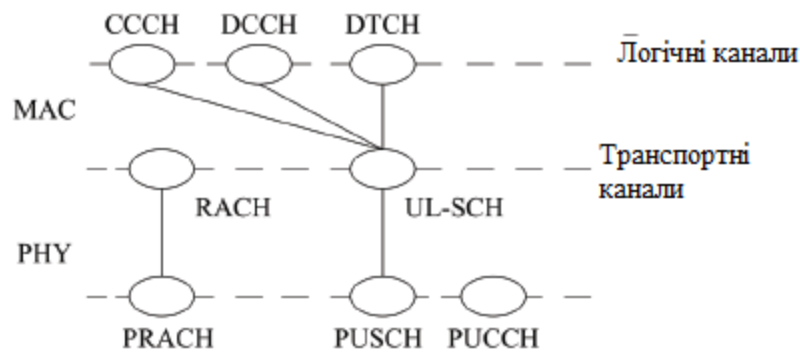


Рисунок 17 – Відображення каналів в напрямку «вверх»

EPS-канал дає можливість мережі встановлювати різним абонентам різні пріоритети. І це відбувається таким чином: кожен IP-потік, пов'язаний з окремим індивідуальним EPS-каналом. Коли IP-пакет приходить ззовні (зовнішня мережа IP, Інтернет) він класифікується вузлом обслуговування по якості, на основі параметрів, що були попередньо налаштовані, і відображається у відповідному EPS-каналі. Далі передається по радіоканалу між eNB і MS. Таким чином, існує взаємно-безумовна відповідність між EPS-каналом і радіоканалом.

### 2.3.3. Радіоінтерфейс LTE.

Дуплексний розподіл каналів в LTE буває як частотним (FDD) так і часовим (TDD). Це дозволяє більш універсально використовувати частотний ресурс. Підтримка FDD зручна для більш традиційних операторів стільникового зв'язку, так як спарені частоти існують з самого початку – так організовані майже всі існуючі системи стільникового зв'язку. FDD більш ефективний в площині використання частотного ресурсу ніж TDD, за рахунок менших витрат (службових полів, інтервалів і т.п.).

Функціонування мереж LTE може реалізуватись в частотних діапазонах різної ширини. Сигнали висхідного і низхідного напрямів можуть займати полоси від 1,4 до 20 МГц, а залежності від кількості активних ресурсних блоків. Передача інформації організована в кадрах, що йдуть по напрямкам «вверх» і «вниз», і тривалість цих кадрів рівна приблизно 10 мс. В свою чергу кадри розділяються на більш менші часові структури – а саме слоти. У режимі FDD

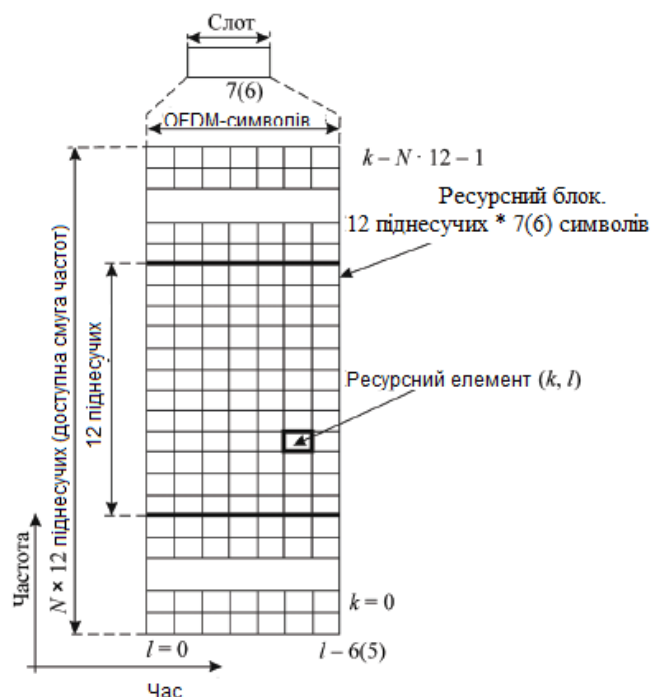
									Адк
									34
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата	ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ				

кадр поділяється на 20 слотів, що нумеруються від 0 до 19, і кожний з яких має тривалість 0,5 мс.

Між абонентами розподіл частотного ресурсу відбувається ресурсними блоками. Кожному такому блоку відповідає смуга частот 180 кГц, що при розності між сусідніми піднесучими частотами в 15 кГц відповідають 12 піднесучим. В залежності від виділення у системі діапазону частот залежить максимальна кількість доступних ресурсних блоків.

Якщо відстань між піднесучими  $\Delta F=15$  кГц (або можливий ще один варіант з  $\Delta F=7,5$  кГц) тривалістю OFDM символу дорівнює  $1/\Delta F = 66,7$  мкс. У кожному слоті (0,5мс) передаються 6 або 7 OFDM символів в залежності від тривалості циклічного префіксу (CP). Тривалість циклічного префіксу рівна  $T_{CP}=5,2$  мкс перед першим символом і  $T_{CP} = 4,7$  мкс перед іншими символами. Також існує можливість використання розширеного циклічного префіксу тривалістю  $T_{CP} = 16,7$ . У такому випадку в одному слоті будуть передаватись 6 OFDM символів.

Для кожного користувача у кожному слотізначається індивідуальний діапазон каналних ресурсів у частотно-часовій області – ресурсна сітка (рис. 18).



*Рисунок 18 – Ресурсна сітка частот*

Ресурсний елемент – це назва частини ресурсної сітки, що відповідає одній піднесучій в частотній області і одному OFDM-символу – в часовій. З цих елементів формується ресурсний блок – мінімальна інформаційна одиниця в каналі. Місткість ресурсного блока являє собою 12 піднесучих (180 кГц) і 7 або 6 OFDM символів, в залежності від типу циклічного префіксу – так, щоб загальна тривалість слоту була 5 мс. В залежності від ширини смуги каналу змінюється і число ресурсних блоків NRB, і дорівнює від 6 до 110. Ресурсний блок являє собою мінімальний ресурсний елемент, що виділяється пристрою абонента планувальником базової станції. А про розподіл ресурсів у кожному слоті базова станція повідомляє спеціальному керуючому каналі.

У радіоінтерфейсі LTE реалізована функція, що виконує диспетчеризацію в залежності від стану каналу зв'язку. Використовуючи часові і частотні ресурси з відносно гарними умовами зв'язку, ця функція забезпечує передачу даних на підвищених швидкостях (за рахунок використання модуляціях більш високого порядку, зменшення ступеня кодування каналів, передачі додаткових потоків даних і меншої кількості повторних передач). В результаті для передачі будь-якого об'єму інформації необхідно менше часу. Частотно-часова сітка OFDM допомагає обирати ресурси в частотній або часовій областях.

Для трафіку сервісів, що пересилають пакети з невеликим корисним навантаженням і через однакові проміжки часу, об'єм трафіку сигналізації, необхідної для динамічної диспетчеризації, може перевищувати об'єм переданої користувачем інформації. Саме тому в LTE передбачена і функція статичної диспетчеризації (в додаток до динамічної). Статична диспетчеризація – це виділення користувачу радіочастотного ресурсу для передачі конкретної кількості підкадрів.

За специфікацією LTE визначають декілька фіксованих значень для ширини висхідного і нисхідного каналів між eNB і MS (табл.2).

											Адк
											36
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата	ЕлІТ 6.172.432 ПЗ						

Таблиця 2.

Параметри каналу передачі						
Ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100
Число піднесучих	72	180	300	600	900	1200
Число номінальних несучих для ШПФ	128	256	512	1024	1536	2048
Тактова частота для ШПФ, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72

Зважаючи на те, що в OFDM використовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ), число формальних піднесучих для спрощення процедур цифрової обробки сигналу повинно дорівнювати  $N=2n$  ( тобто 128, 256, ..., 2048). При цьому частота вибірок повинна становити  $F_s=\Delta f \cdot N$ . При значеннях, заданих в стандарті, ця частота дорівнює 3,84 МГц – що є стандартною частотою вибірок у технології WCDMA. Це додає зручності для створення пристроїв, що підтримують як WCDMA, так і LTE. Зрозуміло, при формуванні сигналу амплітуди «зайвих» піднесучих ( в тому числі і центральну піднесучу каналу) вважаються рівними нулю.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата		37

### 3. РОЗРАХУНКИ ПАРАМЕТРІВ МЕРЕЖІ LTE, ЩО ПРОЕКТУЄТЬСЯ

#### 3.1. Попередня оцінка трафіку і кількості каналів в мережі

Зважаючи на те, що місто Конотоп не дуже велике місто щільність абонентів не дуже висока. Тому і базові станції можна розмістити на більшій відстані одна від одної, що дасть змогу кожному eNB покривати більшу площу. Відповідно під задані умови необхідно підібрати радіочастотний спектр, що підходить для наших потреб. Користуючись новими положеннями, для нашого проектування можна обрати спектр радіочастот у діапазоні 880-960 МГц (band 8) з видом дуплексу – частотний FDD. Оскільки в загальному випадку розраховується що чим нижче частота, тим більше поширення сигналу, то такий варіант підходить для нашого випадку. Тим паче це допоможе зекономити матеріальні витрати.

Знаючи кількість населення і площу міста можна розрахувати потенційну кількість трафіку. Населення міста дорівнює 86000 чоловік, площа 43,78 км<sup>2</sup>.

Для більш точного розрахунку оберемо кількість абонентів, що користуються послугою зв'язку на рівні 35% від загальної кількості потенційних абонентів. Це і є максимальна ємність ринку.

Тепер, маючи всі необхідні дані, ми одразу можемо підрахувати потенційну кількість абонентів, що потребують користування послугами проектованої мережі. Розрахуємо за формулою:

$$N_{аб} = N_{жит} * 0,35 = 86000 * 0,35 = 30100 \text{ чол. (3.1)}$$

Наступним кроком необхідно знайти пропускну здатність або ємність мережі. В конкретних випадках ці значення залежать від середніх значень спектральної ефективності. В свою чергу значення спектральної ефективності визначає швидкість передачі даних у відповідних смугах частот. Вона розраховується як відношення швидкості передачі даних на 1 Гц смуги частот

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата		38



(біт/с/Гц). Для різних варіантів MIMO ширина смуги частот для частотного виду дуплексу (FDD) дорівнює 20 МГц.

В таблиці 3 вказана середня спектральна ефективність для мережі LTE

Таблиця 3.

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

Для того щоб знайти необхідну нам середню пропускну здатність одного сектора БС для системи FDD треба провести операцію множення між спектральною ефективністю і шириною каналу. У результаті:

$$R = S * W \quad (3.1.1)$$

де S – середня спектральна ефективність, біт/с/Гц; W – ширина каналу, МГц, W=20.

Так отримуємо:

1) Для лінії UL:  $R_{UL} = 1,829 * 20 = 36,58$  Мбіт/с;

2) Для лінії DL:  $R_{DL} = 3,43 * 20 = 68,6$  Мбіт/с

Тепер отримаємо середню пропускну здатність БС eNB. Беремо за основу кількість секторів в eNB = 3. Щоб знайти пропускну здатність БС треба перемножити пропускну здатність одного сектора на кількість самих секторів базових станцій. Формула розрахунку:

$$R_{eNB} = R_{DL/UL} * 3 \quad (3.1.2)$$

Отже:

1) Для лінії UL:  $R_{eNB,UL} = 36,58 * 3 = 109,74$  Мбіт/с ;

2) Для лінії DL:  $R_{eNB,DL} = 68,6 * 3 = 205,8$  Мбіт/с

Ще одним важливим значенням яке необхідно обчислити це кількість стільників, яку потребує проєктована мережа. Для цього треба визначити загальне число каналів, що необхідно виділити для розгортання мережі. Розраховується це число за формулою:

$$N_k = \left\lceil \frac{\Delta F}{F_k} \right\rceil = \left\lceil \frac{80000}{180} \right\rceil \approx 445 \quad (3.1.3)$$

Де  $F$  – смуга частот, що виділяється для роботи ,  $F = 80$  МГц ;  $F_k$ - смуга частот одного радіоканалу, в мережах LTE це поняття описується як ресурсний блок (БК) і ширина його -  $f_k = 180$  кГц.

Щоб дізнатися яка кількість каналів необхідна для обслуговування абонентів в одному секторі одного стільника виконуємо наступні операції:

$$N_{\text{к.сек}} = \left\lceil \frac{N_k}{(N_{\text{кл}} \times M_{\text{сек}})} \right\rceil = \left\lceil \frac{445}{(3 \times 3)} \right\rceil \approx 50 \text{ каналів,} \quad (3.1.4)$$

де  $N_k$  – загальна кількість каналів;  $N_{\text{кл}}$  – розмірність кластера, вибрана з урахуванням кількості секторів eNB, які рівні трьом;  $M_{\text{сек}}$  – кількість секторів eNB, прийняте рівним трьом.

Наступним кроком визначимо скільки в одному секторі одного стільника каналів трафіку:

$$N_{\text{кт.сек}} = N_{\text{кт1}} \times N_{\text{к.сек}} = 1 * 50, \quad (3.1.5)$$

де  $N_{\text{кт1}}$  – кількість каналів трафіку одному радіоканалі. Воно регламентується стандартом радіодоступу ( для OFDMA  $N_{\text{кт1}} = 1 \dots 3$ ). Для цього проєктування мережі LTE оберемо  $N_{\text{кт1}} = 1$ .

Для того щоб дізнатись допустиме навантаження в секторі одного стільника звертаємось до таблиці Ерланга. Звідти, якщо ймовірність блокування 1%, то отримаємо значення  $A_{\text{сек}} = 37,9$  Ерл.

									Адк
									40
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата					

Тепер ми можемо розрахувати скільки одна БС може обслуговувати абонентів:

$$N_{аб.еNB} = 3 \times \left\lceil \frac{37,9}{0,1} \right\rceil = 1137 \text{ абонентів (3.1.6)}$$

Наступним кроком буде прорахунок необхідної кількості БС:

$$N_{еNB} = \left\lceil \frac{N_{аб}}{N_{аб.еNB}} \right\rceil + 1 = \left\lceil \frac{30100}{1137} \right\rceil + 1 = 27 \text{ (3.1.7)}$$

Середня пропускна планова пропускна здатність  $R_N$  мережі розраховується за формулою:

$$R_N = (R_{еNB.UL} + R_{еNB.DL}) \times N_{еNB} = (109,74 + 205,8) \times 27 = 11043,9 \text{ (Мбіт/с)} = 11,0439 \text{ (Гбіт/с)} \text{ (3.1.8)}$$

Результати порівняємо з перевіркою оцінкою ємності мережі. В час найбільшого навантаження (ЧНН) можемо визначити усереднений трафік одного абоненту:

$$R_{т.ЧНН} = \frac{T_m \times q}{N_{ЧНН} \times N_d} \text{ (3.1.9)}$$

де  $T_m$  – середній трафік одного абонента в місяць,  $T_m = 20$  Гбайт/міс;  $q$  – коефіцієнт для місцевості,  $q=2$ ;  $N_{ЧНН}$  – число ЧНН в день,  $N_{ЧНН} = 7$ ;  $N_d$  – число днів у місяці,  $N_d = 30$ .

$$R_{т.ЧНН} = \frac{20 \times 2}{7 \times 30} = 0,190 \left( \frac{\text{Мбіт}}{\text{с}} \right)$$

Далі прораховуємо загальний трафік мережі в ЧНН  $R_{заг/ЧНН}$ :

$$R_{заг/ЧНН} = R_{т.ЧНН} \times N_{акт.аб}, \text{ (3.1.10)}$$

де  $N_{акт.аб}$  – кількість активних користувачів мережі – 60% від загального числа потенційного абонентів  $N_{аб}$ , тобто  $N_{акт.аб} = 51600$  абонентів.

$$R_{заг/ЧНН} = 0,190 \times 51600 = 9804 \text{ (Мбіт/с)} = 9,804 \text{ (Гбіт/с)}$$

Тепер, порівнявши результати, можемо побачити що  $R_N > R_{общ/ЧНН}$ , а звідси зрозуміло що в мережі, що проектується не буде перевантаження.

										Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата						41

### 3.2. Розрахунок покриття мережі

Першим кроком для розрахунку покриття треба знайти максимально допустимі втрати (МДП). У даному випадку, для діапазону 880-960 МГц можна обрати два значення запасу на проникнення: -8 дБ для сільської місцевості, -12дБ в умовах рідкісної забудови.

Параметри для спроектованої мережі:

- 1) БС працюють в режимі MIMO 2x2
- 2) Системна полоса: 20 МГц, для FDD=10/10(UL/DL).

Формула для розрахунку максимальних допустимих втрат:

$$L_{\text{мпд}} = P_{\text{евп.прд}} + S_{\text{ч.пр}} - G_{\text{А.прд}} - L_{\text{ф.прд}} - M_{\text{прон}} - M_{\text{зав}} - M_{\text{зат}} + G_{\text{хо}} \quad (3.2.1)$$

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 = 0 дБ, для DL = 18 дБ;  $L_{\text{ф.прд}}$  – втрати в фідерному тракті передавача, для DL = 0,3 дБ;  $M_{\text{прон}}$  – запас на проникнення сигналу в приміщенні для приміської місцевості, дорівнює 12 дБ;  $M_{\text{зав}}$  – запас на завади, для UL = 2,6 дБ, для DL = 6,6 дБ;  $M_{\text{зат}} = 8,2$  дБ - запас на затінення;  $G_{\text{хо}} = 1,7$  дБ – вигреш від хендовера.

Для того щоб знайти  $P_{\text{евп.прд}}$  використовуємо формулу:

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

де  $P_{\text{вих.прд}}$  - це вихідна потужність передавача. Вона залежить від ширини смуги частот стільників, і має значення від 1,4 до 20 МГц. Якщо межі менше 5 МГц, то кращим вибором буде TRX передавач, потужність якого – 20 Вт (34 дБм), а у випадках більше 5 МГц – 40 Вт (46 дБм).

$P_{\text{вих.прд}}$  для DL = 46 дБм, а для UL = 28 дБм.

Маючи ці значення можемо розрахувати еквівалентну випромінювану потужність передавача. Отримуємо:

- 1) Для UL:  $P_{\text{евп.прд}} = 28$  (дБм)

									Адк
									42
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата	ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ				

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

Наступний пункт – величина чутливості приймача. Використовується формула:

$$S_{\text{ч.пр}} = P_{\text{тш.пр}} + M_{\text{всш.пр}} + L_{\text{пр}} \quad (3.2.3)$$

де  $P_{\text{тш.пр}}$  – це потужність теплового шуму приймача, що для DL = -173,5 дБм, а для UL = -103,6 дБм;  $M_{\text{всш.пр}}$  – відношення сигнал/шум приймача, для DL = -0,25, для UL = 0,62;  $L_{\text{пр}}$  – коефіцієнт шуму приймача: DL = 6,8 дБ UL = 2,7 дБ.

А отже:

1) Для лінії UL:  $S_{\text{ч.пр}} = -103,6 + 0,62 + 2,7 = -100,28$  (дБм);

2) Для DL:  $S_{\text{ч.пр}} = -175,3 + (-0,25) + 6,8 = -168,75$  (дБм);

Тепер, з урахуванням попередніх розрахунків ми можемо розрахувати максимально допустимі втрати  $L_{\text{мпд}}$ :

1) Для лінії UL:  $L_{\text{мпд}} = 28 - (-100,28) - 8 - 2,7 - 8,2 + 1,7 = 111,08$ (дБ);

2) Для лінії DL:  $L_{\text{мпд}} = 63,7 - (168,75) - 0,3 - 8 - 6,8 - 8,2 + 1,7 = 217,65$ (дБ)

Отримавши результати, необхідно обрати менше з них, і опираючись на обране значення продовжувати розрахунки дальності зв'язку і радіусу стільників. Для подальших розрахунків оберемо модель поширення радіохвиль Окумура – Хата. За цією моделлю формула для розрахунку середнього загасання радіосигналу в міських умовах:

$$L_{\text{м}} = 69,5 + 26,16 \log f_c - 13,82 \log h_t - A(h_r) + (44,9 - 6,55 \log h_t) \times \log d \quad (3.2.4)$$

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
						43
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата		

Також існує і трохи коригований варіант для сільської місцевості:

$$L_c = L_m - 4,78 (\log f_c)^2 + 17,33 \times \log f_c - 40,94 \quad (3.2.5)$$

де  $f_c$  – частота в діапазоні від 150 до 1500 МГц;  $h_t$  – висота антени передавача;  $h_r$  – висота антени приймача;  $d$  – радіус стільника;  $A(h_r)$  – коефіцієнт для похибки висоти антени рухомого об'єкту.

Візьмемо для нашого випадку такі величини:

- 1) Частоту передачі - 900 МГц
- 2) Висоту антени передавача – 30 м
- 3) Висоту антени приймача – 5 м

Спочатку розрахуємо коефіцієнт  $A(h_r)$  для не щільно заселеної території за формулою:

$$A(h_r) = (1,1 \times \log f_c - 0,7) \times h_r - (1,56 \times \log f_c - 0,8) = (1,1 \times \log 900 - 0,7) \times 5 - (1,56 \times \log 900 - 0,8) = 8,9 \quad (3.2.6.)$$

В решті решт, виводимо із формул () і () радіус стільника, отримуємо значення  $d \approx 1$  км. І використовуючи це значення можемо обчислити площу покриття стільника:

$$S_{eNB} = 9 \frac{\sqrt{3}}{8} \times d^2 = 9 \frac{\sqrt{3}}{8} \times 21^2 = 1,95 \text{ (км}^2\text{)} \quad (3.2.7)$$

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата		44

## 4. ПРОЕКТУВАННЯ У ПРОГРАМІ ATOLL

### 4.1. Програма Atoll

Для виконання проектування безпроводних мереж використовують великий перелік програмного забезпечення. Багато ІТ-компаній спеціалізуються як раз на розробці та підтримці програм, що дають змогу розраховувати покриття, втрати, швидкість передачі даних та інші величини. До таких програмних засобів відносяться наприклад:

- RVA – («Розрахунок впливу антен») – програма, що використовується більш ніж в сотні підприємств країн СНД, має можливості проводити розрахунки електромагнітного поля, санітарно-захисних зон і зон обмеження забудови;
- RF3D WiFi Planner – програма для планування бездротових мереж типу WiFi у рамках офісу чи будівлі;
- ICS Telecom – аналіз практично всіх видів бездротових мереж, у тому числі мобільні GSM/CDMA/LTE, WiFi/WiMAX, ширококомвні, телеметричні, радіорелейні, а також радари, супутникові наземні станції і подібне. Дає змогу планувати і випробування мереж, рішення задач системного адміністрування, бізнес-моделювання, визначення розмірів інфраструктури і т.д.
- EkaHau Site Survey – інструмент планування Wi-Fi. Можливості включають: підтримку стандартів 802.11a/b/g/n, автоматичне планування мереж, пасивне і активне дослідження, підтримка GPS, спектральний аналіз для виявлення інтерференцій і т.п.
- Atoll від компанії Forsk – це ПЗ буде більш детально описуватися нижче, оскільки використовується в даній роботі для проектування.

						ЕлІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ док.м.	Підпис	Дата			45

Atoll – мультитехнологічна платформа, доволі відкрита, масштабована і гнучка. На базі цієї платформи виконується проектування та оптимізація мережі, програма підтримує технології безпроводних мереж від початкового проекту мережі до її ущільнення і оптимізації. Універсальність Atoll забезпечує те, що робочий простір кожен користувач може підлаштувати під себе, легко інтегрується з іншими застосуваннями. Так можна легко і швидко додавати модулі, що допоможуть отримати саме той результат який необхідний оператору чи розробнику мережі.

Основні технології які підтримує Atoll:

- GSM/GPRS/EDGE;
- UMTS/HSPA;
- CDMA2000 1xRTT/EV-DO;
- LTE;
- TD-SCDMA;
- WiMAX/BWA;
- Microwave links.

Користуючись Atoll можна провести дослідження у широкому діапазоні сценаріїв виконання. До них відносяться як багатопотокові обчислення, так і автономне та корпоративне розподілення конфігурацій усього підприємства.

Обране програмне забезпечення багате на особливості, що відокремлюють продукт від конкурентів. А саме:

- 1) Доволі широкі можливості проектування мереж. Включає в себе більшість існуючих стандартів бездротового зв'язку.
- 2) Вбудовані інструменти оптимізації. Дозволяють виконувати завдання планування і оптимізації на основі існуючої IT інфраструктури.
- 3) Відкрита архітектура.

											Адк
											46
Змн.	Адк	№ док.	Підпис	Дата							



4) Сучасні засоби геоінформаційних систем(ГІС). Підтримка багатьох форматів геоданих. Відображення місцевостей в багат шаровому режимі. Підтримка цифрових багат шарових моделей, дані шумів та завод(тип і висоту),3D дані будівель, дані трафіку, відскановані карти, населення, векторні дані, клімат.

5) Засоби автоматичного планування стільників та засоби автоматичного частотного планування.

6) Використання широкого спектру бездротових телекомунікаційних систем – від служб що працюють на частотах нижче 400 МГц, до мікрохвильових ліній зв'язку, що використовують частоти до 10000-18000 МГц.

7) Автоматичне частотне планування

8) Автоматичне планування стільників. Дає змогу налаштувати параметри проєктованих стільників такі як:

- тип антен
- висота
- азимут і нахил
- потужність передавача

#### **4.2. Моделювання LTE мережі**

Першим кроком уже практичного моделювання буде додавання рельєфної карти міста Конотоп для більш точних результатів. Адже опираючись на різницю висоти між різними стільниками ми отримаємо більш чітке уявлення про покриття спроектованої мережі.

Для цього можна використати веб-сайт <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Його функціонал дає змогу отримати карту висот необхідної місцевості, що знаходиться у вільному доступі (Рис. 19)

					<i>ЕлІТ 6.172.432 ПЗ</i>	Адк
<i>Змн.</i>	<i>Адк</i>	<i>№ докum.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		47

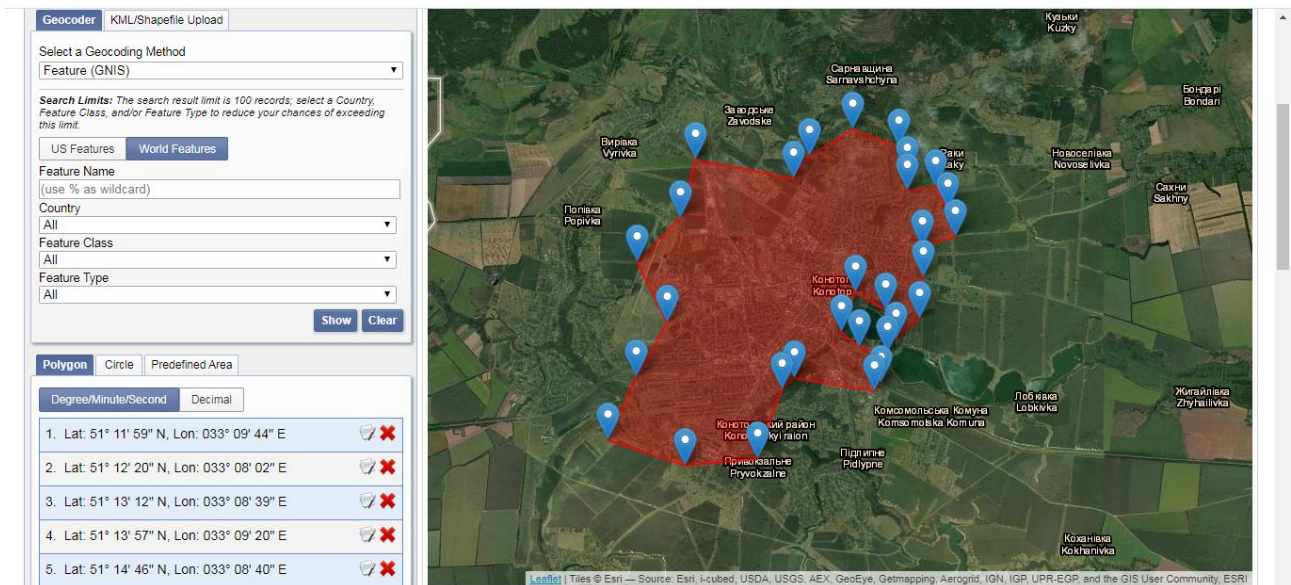


Рисунок 19 – Обираємо необхідну нам місцевість

Обравши певну ділянку ми можемо викачати карту рельєфу місцевості, що має значення висот. Це додає більшої реалістичності для моделювання мережі. Отримавши необхідний файл, треба використати спеціальне ПЗ для того щоб конвертувати отриманий файл в такий, що підтримується Atoll. Для цього доволі доцільно використати GlobalMapper. Цей додаток працює з багатьма розширеннями файлів в області геоінформаційних систем і використовуються в багатьох сферах пов'язаних з картографією і обробкою карт.

Отже, відкриваємо в цій програмі отриманий файл карти рельєфу. Виглядатиме це таким чином (рис. 20)

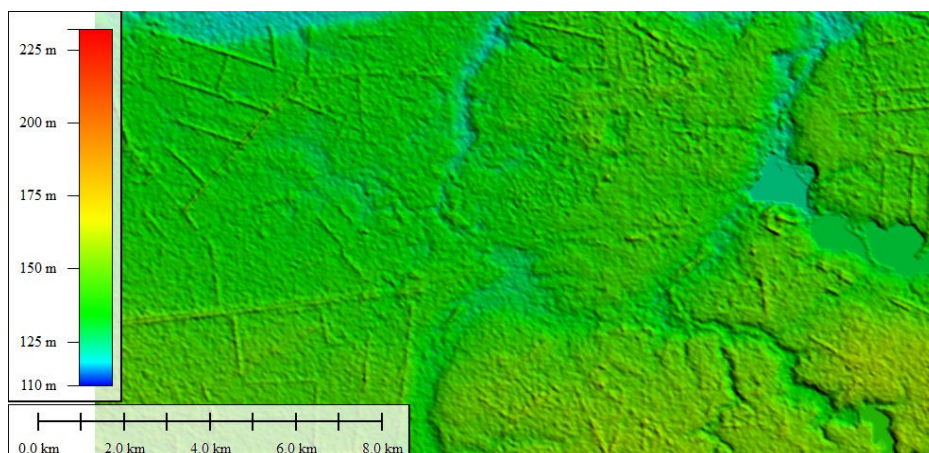


Рисунок 20 – Рельєфна карта міста Коното

Завдяки можливостям цього ПЗ ми можемо додати ще й окремо завантажену схомотехнічну карту міста Конотоп. Завдяки прив'язці за географічними координатами схема покриває рельєфну карта саме так як потрібно. (Рис. 21)

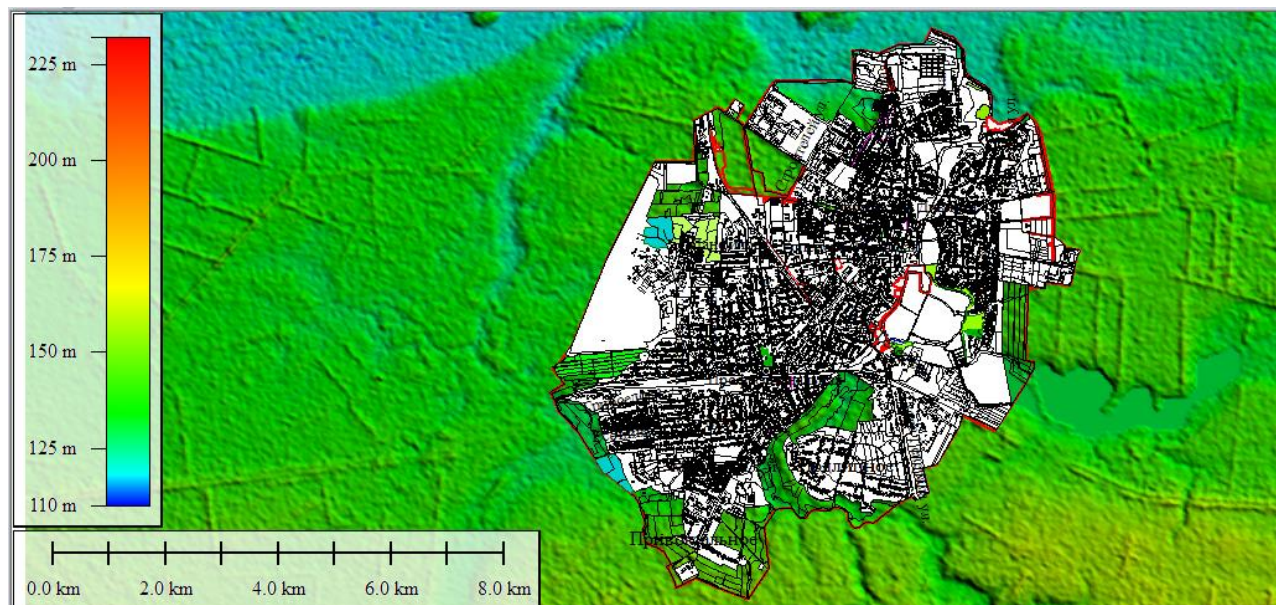


Рисунок 21 – Схемотехнічна карта поверх рельєфу

Об'єднавши ці шари карт ми можемо їх конвертувати як один суцільний файл і завантажити його в Atoll. Додавши його, ми отримуємо наступний робочий простір (Рис. 22):

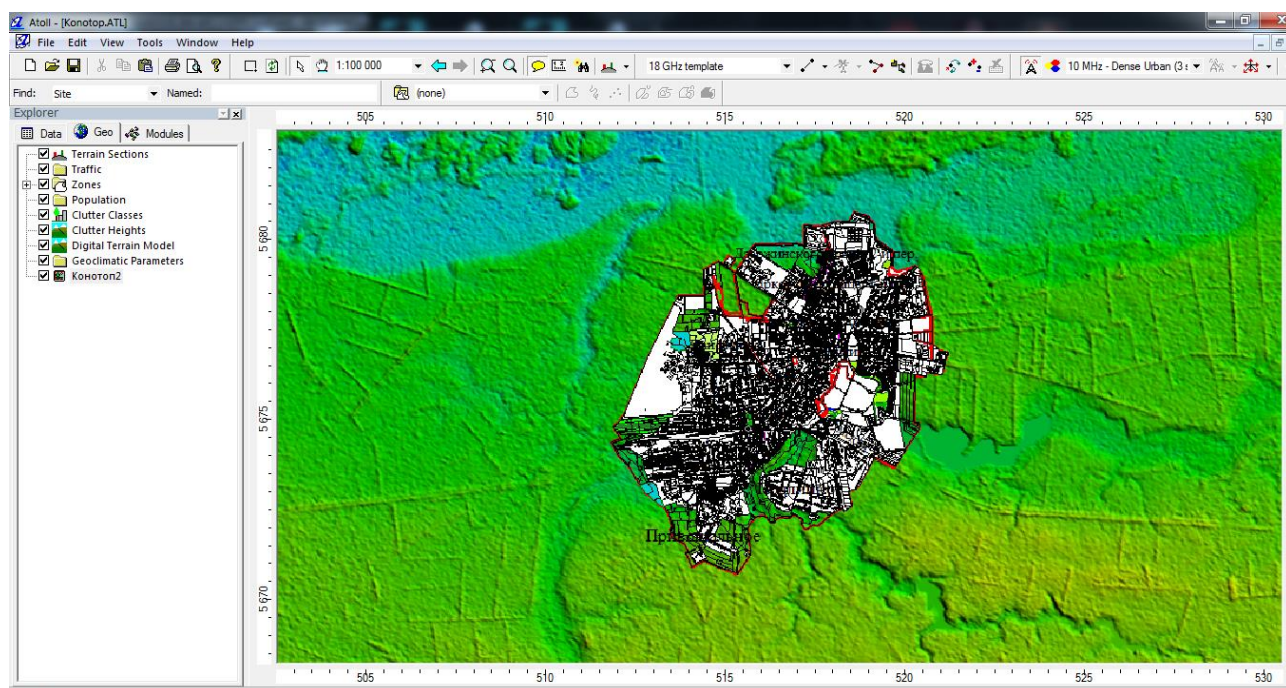
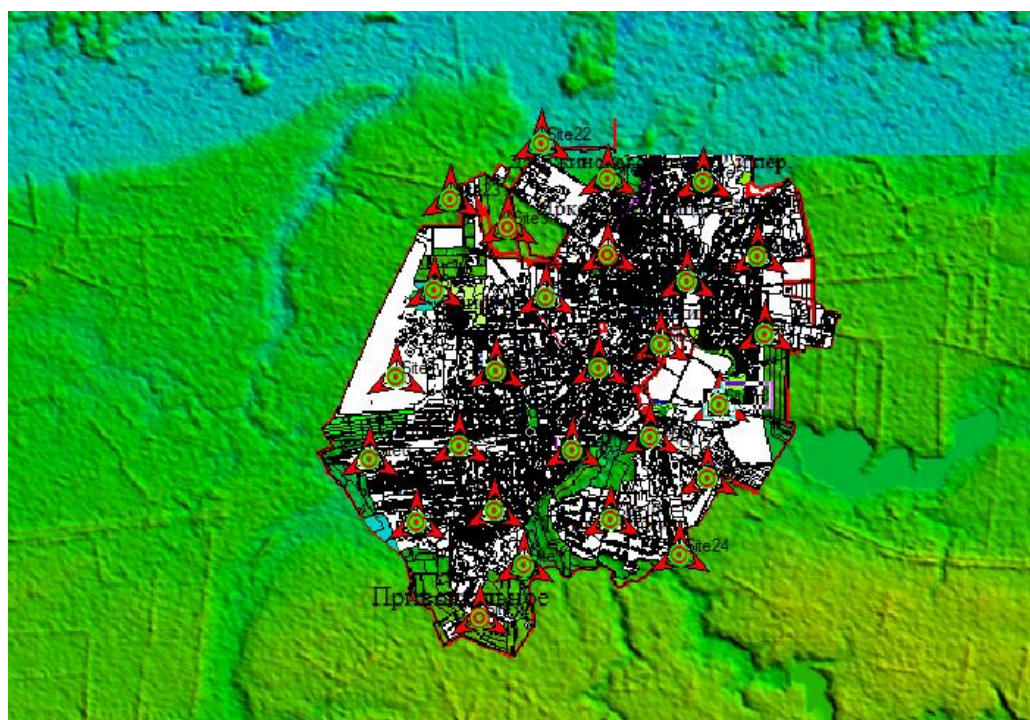


Рисунок 22 – Робочий простір Atoll

Тепер можна приступати до саме модулювання мережі. На даному етапі можна налаштувати велику кількість параметрів, починаючи від висоти антени до потужності передавача. Для того щоб обрати необхідні нам параметри, звертаємось до минулих розділів. Після усіх налаштувань тепер можемо додавати стільники, таким чином щоб захопити якнайбільшу територію міста. В реальних умовах рідко досягається така кількість БС, оскільки операторам мобільного зв'язку необхідно враховувати кількість коштів які виділяються щоб витратити їх на проектування мережі. Але у нашому випадку це майже ідеальна мережа, що орієнтується на максимальний результат пропускної здатності і покриття.

Отже, розмістивши обчислену раніше кількість базових станцій ми отримуємо приблизно такий результат (Рис. 23):



*Рисунок 23 – Розташування БС у місті*

Далі ми можемо перейти до саме моделювання покриття і перевірки рівня сигналу у місті. Тому користуємося можливістю Atoll розрахувати покриття з параметрами, що були задані раніше. У процесі прорахування ми отримуємо такий рівень покриття міста (Рис. 24):

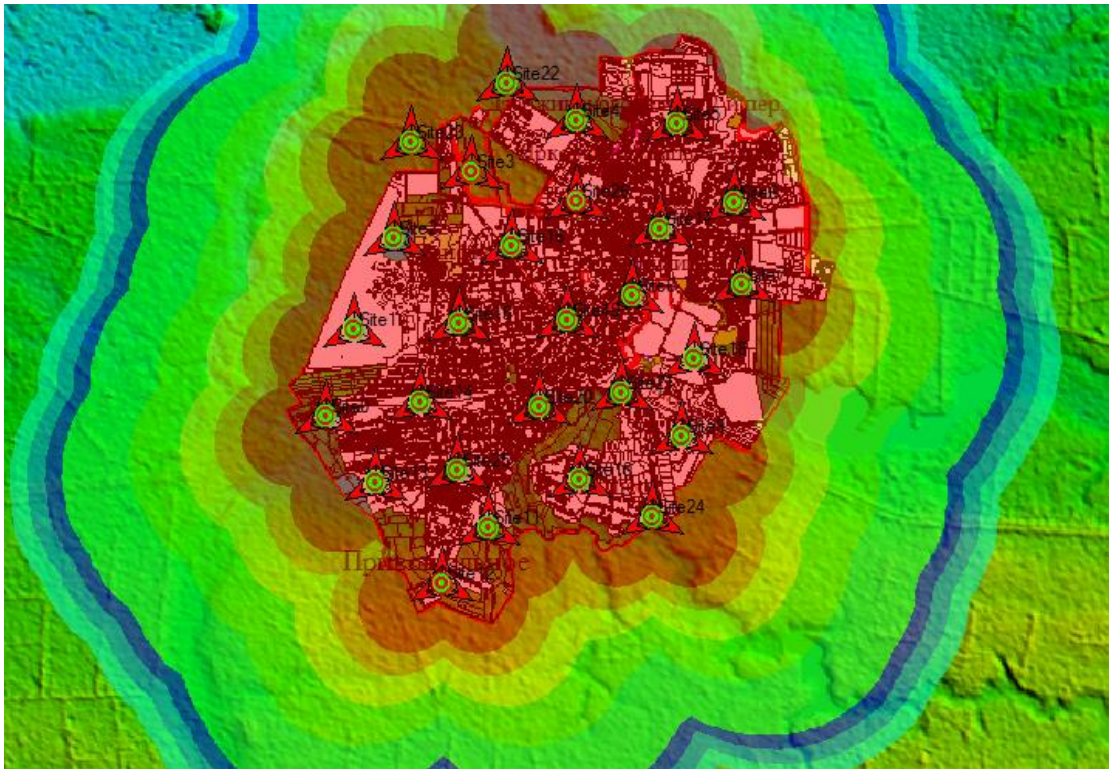


Рисунок 24 – Рівень покриття місцевості

Отримавши таке покриття тепер можемо продивитись який рівень сигналу переважає на місцевості. Попередньо бачимо що для міста буде цього рівня достатньо. Тим паче існуюче обладнання готове й до кількості населення, що буде у подальшому рости й рости. Це забезпечить достатність ресурсів мережі на багато років. Але все ж перевіримо рівень сигналу засобами Atoll (Рис. 25).

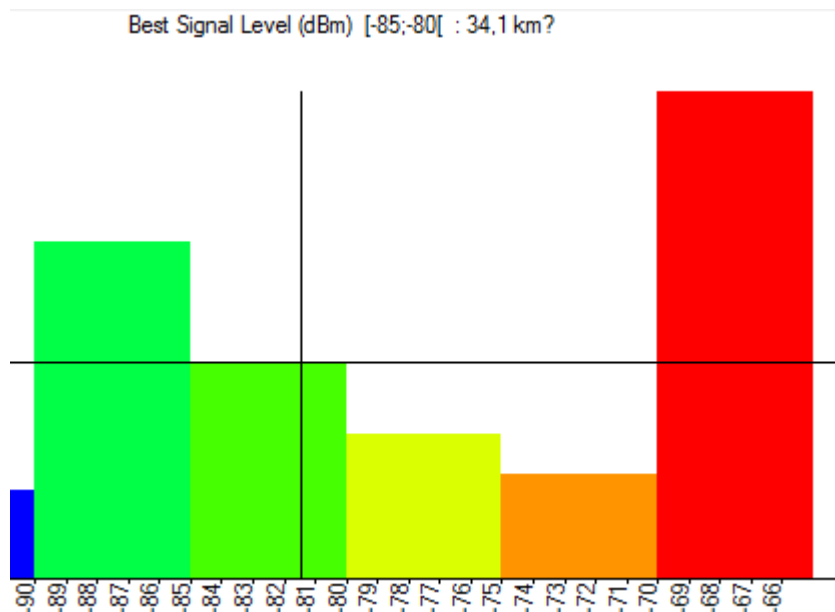


Рисунок 25 – гістограма рівня сигналу

Згідно гістограми ми можемо зрозуміти що в межах міста переважає рівень сигналу в межах (-66) – (-69) дБ , що є доволі гарним результатом. З таким рівнем сигналу усі потреби в засобах зв'язку будуть вичерпними для міста, і добитися перевантаження системи буде майже неможливо.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата		52

## ВИСНОВКИ

Результативність роботи проявляється в отриманих даних про те що проєктована мережа не тільки в цілому може забезпечити місто високим рівнем доступу до мобільного зв'язку 4-го покоління LTE, але й готова до того, що місто буде рости і розвиватись. Як пропускна здатність так і зона покриття та рівень сигналу має доволі чудові характеристики, який вистачить до того моменту як буде розроблено і почнеться запровадження наступного покоління мобільного зв'язку.

Крім того у роботі було представлено опис нині існуючих поколінь зв'язку, їх основні технології та стандарти. Більшою мірою все ж відбувалося розкриття цільової технології для проєктування мережі, а саме технології LTE. Якщо говорити більш конкретно то було ознайомлення з характеристиками технології цього стандарту, а також з основними засобами що використовуються при розробці мереж 4G, такими як MIMO та OFDMA.

Використовуючи спеціальне програмне забезпечення для проєктування мереж – Atoll – проведене моделювання певною мірою приближене до реального. Підсумком даних дій стало розуміння того як в тих чи інших випадках можливо створити мережу, щоб задовольняла вимоги міста Конотоп.

					ЕЛІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата		53

## ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Системы мобильной связи : учеб.-метод. пособие для студентов специальности 1-98 01 03 «Программное обеспечение информационной безопасности» / Н. Н. Буснюк, Г. И. Мельянец. – Минск : БГТУ, 2018. – 153 с.
2. Introduction to mobile network engineering : GSM, 3G-WCDMA, LTE and the road to 5G / by Alexander Kukushkin
3. Космические и наземные системы радиосвязи / Б.Н. Маглицкий. – Учебное пособие. Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2014. – 297 с.
4. LTE and LTE Advanced. 4G Network Radio Interface. André Perez
5. Системы и сети радиодоступа 4G: LTE, WiMAX / А.Е. Рыжков, М.А. Сиверс, В.О. Воробьев, А.С. Гусаров, А.С. Слышков, Р.В. Шуньков. – СПб: Линк, 2012. – 226 с. : ил.
6. Современные средства связи : материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф., 17–18 окт. 2019 года, Минск, Респ. Беларусь ; редкол. : А. О. Зеневич [и др.]. – Минск : Белорусская государственная академия связи , 2019. – 250 с.
7. Principles of Mobile Communication. Gordon L. Stüber. Fourth Edition
8. <http://1234g.ru/4g/lte>
9. <https://books.google.com.ua/books?id=pbpmDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=Fundamentals+of+Network+Planning+and+Optimisation+2G/3G/4G&hl=uk&sa=X&ved=0ahUKEwibhbXQna7pAhVkJSoKHT4jD7AQ6AEIKDAA#v=onepage&q&f=false>
10. [https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o\\_26849#1](https://www.rfbr.ru/rffi/ru/books/o_26849#1)
11. Навчальний практикум з кредитного модуля “Бездротові телекомунікаційні системи – 2. Системи та засоби зв’язку з рухомими об’єктами“ Укл. В.Г. Абакумов, П.В. Попович, К.О. Трапезон. – К.: Аверс, 2013. – 146 с.

					ЕлІТ 6.172.432 ПЗ	Адк
Змн.	Адк	№ докum.	Підпис	Дата		54