

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет інформаційних технологій  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Бакалавр

Освітній рівень

Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE

Назва теми

**СПЕЦІАЛЬНІСТЬ**

172 Телекомунікації та радіотехніка

Шифр і назва

**ГАЛУЗЬ ЗНАНЬ**

17 Електроніка та телекомунікації

Шифр і назва

**ОСВІТНЯ ПРОГРАМА**

Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

КвРТР. 2019030.01.09 ПЗ

Виконав:


студент 3 курсу, група ТР1с-19-1

  
підпис

Віталій ШІТКО

ім'я, прізвище

Керівник: канд. військ. наук, доцент

  
підпис, дата

Віктор ЛУЖАНСЬКИЙ

ім'я, прізвище

Нормоконтроль:

канд. техн. наук, доцент

  
підпис, дата

Людмила КОРЕЦЬКА

ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій:  
д-р техн. наук, проф.

  
підпис

Валерій МАРТИНЮК

Ім'я, прізвище

«\_\_\_» червня 2022р.


Хмельницький, 2022

Хмельницький національний університет

Факультет	інформаційних технологій
Кафедра	автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Освітній рівень:	бакалавр
Галузь знань:	17 Електроніка та телекомунікації
Спеціальність:	172 Телекомунікації та радіотехніка
Освітня програма:	Телекомунікації та інформаційно-комунікаційні технології

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедру АКТ

 Валерій МАРТИНЮК

« 03 » березня 2022 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

СНІТКУ Віталію Вячеславовичу

Прізвище, ім'я по батькові здобувача

1 Тема роботи: Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE

Керівник роботи: канд. військ. наук, доц. Лужанський Віктор Ігорович

Затверджено наказом по університету від «01» березня 2022р. № 18

2 Строк подання здобувачем роботи на кафедру 25 травня 2022 року

3 Вихідні дані до роботи:

- аналіз актуальності використання радіодоступу на базі технології LTE;
- розглянути принципи побудови, архітектуру та функції мережі;
- інформаційний огляд основних технологій та стандартів радіодоступу;
- провести аналіз основних параметрів МІМО;
- експериментальна оцінка роботи радіодоступу за різних технологіях та стандартах;
- здійснити розрахунок основних параметрів якості мережі радіодоступу





4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

- основна частина;
- експериментальна частина;
- розрахункова частина.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень):

- функціональна схема пристрою;
- презентаційні слайди.

## 6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвища, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Нормоконтроль	КОРЕЦЬКА Людмила к.т.н., доцент		
Антиплагіат	ФЕДУЛА Микола к.т.н., доцент		

7 Дата видачі завдання 03 березня 2022 року

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Найменування виду роботи	Форма звітності, термін виконання	Відмітка наукового керівника
1.	Розробка завдання на кваліфікаційну роботу	03.03.2022р.	виконано
2.	Складання індивідуального плану на кваліфікаційну роботу	15.03.2022р.	виконано
3.	Написання першого (теоретичного) розділу	20.03.2022р.	виконано
4.	Написання другого розділу	03.04.2022р.	виконано
5.	Написання третього розділу	15.04.2022р.	виконано
6.	Написання вступу і загальних висновків та пропозицій до кваліфікаційної роботи	30.04.2022р.	виконано
7.	Оформлення кваліфікаційної роботи	10.05.2022р.	виконано
8.	Рецензування кваліфікаційної роботи	15.05.2022р.	виконано
9.	Презентаційні матеріали за результатами виконання кваліфікаційної роботи	20.05.2022р.	виконано

Здобувач

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Віталій ШІТКО

Науковий керівник

  
\_\_\_\_\_  
(підпис, дата)

Віктор ЛУЖАНСЬКИЙ

## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE»

Автор роботи: Снітко Віталій Вячеславович

Керівник роботи: канд. військ. наук, доц. Лужанський Віктор Ігорович.

Пояснювальна записка: 63 сторінок, 20 рисунків, 5 таблиць, 18 джерела, 2 додатки.

Графічна частина: 16 презентаційних слайдів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ТЕХНОЛОГІЯ LTE, ІНТЕРНЕТ, МОДЕМ, UMTS 3GPP, ЗВ'ЯЗОК, РЕГІСТР, ПРОТОКОЛИ, БАЗОВА СТАНЦІЯ, БАЗОВА МЕРЕЖА, МІМО, СИГНАЛ, МЕРЕЖА, КАНАЛ, ШВИДКІСТЬ, ЧАСТОТА.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження якості мережі радіо доступу на базі LTE шляхом поліпшення параметрів при різних технологіях та стандарти

У даній кваліфікаційній роботі розглянуто методи розвитку широкосмугових мереж радіодоступу. Бездротовий радіозв'язок представлений технологією LTE. У роботі проведені експериментальні дослідження та представлена розрахункова частина за системою радіодоступу. Відображено результати експериментальних досліджень роботи мережі радіодоступу LTE при різних технологіях та стандартах. (до 450 Мбіт/с на базову станцію) та низький рівень затримок (до 20 мс).

У роботі проведені експериментальні дослідження, та представлена розрахункова частина.

25.05.2022 р.







---

## ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....	3
ВСТУП.....	4
1 ОСНОВНА ЧАСТИНА .....	7
1.1 Введення в LTE .....	7
1.2 Стандартизація LTE .....	9
1.3 Архітектура.....	12
1.4 Радіотехнологія OFDM.....	15
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА .....	18
2.1 Удосконалені антени.....	18
2.2 Частотні діапазони для FDD і TDD.....	18
2.3 Цінова ефективність.....	21
2.4 Радіодоступ .....	23
2.5 Дослідження завадостійкості MIMO-OFDM систем.....	30
3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА.....	35
3.1 Розрахунок можливої зони покриття для системи .....	35
3.2 Сумарна ймовірність погіршення якості зв'язку.....	41
3.3 Розрахунок якісних показників .....	44
3.4 Розрахунок пропускної спроможності системи.....	52
3.5 Оцінка необхідного числа каналів та ймовірності втрати виклику .....	53
3.6 Оцінка похибки за збіжністю розподілів.....	58
3.7 Розрахунок затримок під час передачі промови .....	59
ВИСНОВКИ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
ДОДАТОК А Програма та алгоритм затримок повідомлень під час передачі мови.....	65
ДОДАТОК Б Лістинг програми MathCad.....	66

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Снітко В.В.			Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE  Пояснювальна записка	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.		Лужанський В.І.					2	63
Реценз.						ХНУ, гр. ТР1с-19-1		
Н. Контр.		Корецька Л.О.						
Затверд.		Мартинюк В.В.						

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

3GPP	–	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	–	3rd Generation Partnership Project 2
ARIB	–	Association of Radio Industries and Businesses
ATIS	–	Alliance for Telecommunication Industry Solutions
AWS	–	Advanced Wireless Services
CAPEX	–	Capital Expenditure
CCSA	–	China Communications Standards Association
CDMA	–	Code Division Multiple Access
DAB	–	Digital Audio Broadcast
DSL	–	Digital Subscriber Line
DVB	–	Digital Video Broadcast
eHSPA	–	evolved High Speed Packet Access
ETSI	–	European Telecommunications Standards Institute
FDD	–	Frequency Division Duplex
FWT	–	Fixed Wireless Terminal
GSM	–	Global System for Mobile communication
HSPA	–	High Speed Packet Access
HSS	–	Home Subscriber Server
IEEE	–	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPTV	–	Internet Protocol Television
LTE	–	Long Term Evolution

					КВПТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						3
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВСТУП

В наші дні, тобто під час інноваційного та технологічного розвитку прогнозується дуже стрімкий підйом, зростання та швидкий розвиток галузі телекомунікацій. Слід додати, що галузь є зростаючою, високотехнологічною та найбільш привабливою сферою економіки держави. Це характеризується швидким розвитком та удосконаленням нових розширених та різноманітних послуг, додатків, стандартів та технологій. Можливості провідної мережі не є великими, тому модернізація та розширення можливостей провідної мережі доступу (абонентських ліній) вимагає колосальних витрат та займає досить тривалий час із боку оператора зв'язку. Разом з тим доходи оператора зв'язку не можуть бути отримані без побудови мережі абонентського доступу, що формуються з установчої плати та оплати за трафік.

При існуючих темпах будівництва номерної ємності та мережевий інфраструктури відстрочка на протяжний термін належних фінансових коштів є небажаним. Однак, без мережі абонентського доступу не можна підключити нових абонентів до існуючої номерної ємності, отже, оператор, який чекає від своєї мережі доходів, не може їх отримати.

Зарекомендований підхід до вирішення проблеми «останньої милі», такий як ущільнення абонентських ліній, більшою популярністю користується рішення, що базується на технології бездротового зв'язку. Переваги бездротового зв'язку виявляються у відсутності або недостатньо розвиненої кабельної інфраструктури у важкодоступних та віддалених районах. Бездротові системи відповідно до попиту абонентів дозволяють добре розвивати та будувати мережу швидше. В результаті скорочуються капітальні витрати на будівництво цієї мережі. І що дуже важливо, скорочується термін її окупності, а також зменшуються значні витрати на технічне обслуговування мереж та експлуатацію. У комплексі з іншими методами побудови мережі абонентського та бездротового доступу дозволяють економічно і стрімко вирішувати питання

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						4
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

підключення щодо справи будь-якого «незручного», з погляду провідного рішення, абонента. Звичайно, думка про те, що бездротові технології в процесі свого розвитку повністю витіснять традиційні рішення, що передбачають наявність кабельних систем є помилковою. Як і будь-яка система бездротові технології мають низку проблем з точним розрахунком місця розміщення точки доступу та приймача. Тому на сьогоднішній день, технології бездротового зв'язку не можуть у повному обсязі забезпечити стійку, тобто не схильну до коливань роботу мережі.

На сьогоднішній день на ринку телекомунікації існує чимало кількості систем абонентського радіодоступу. У свою чергу вони відрізняються один від одного за своєю архітектурою, технічними параметрами, характеристикою та на кшталт завдань, розв'язуваних з допомогою.

Порівняно з іншими нинішніми підходами до вирішення проблеми «останньої милі», до яких відноситься прокладання волоконно-оптичних ліній зв'язку або ущільнення абонентських ліній, бездротові системи мають великі, можна сказати сучасні переваги в місцях з повною відсутністю або недостатністю кабельної інфраструктури, такі як важкодоступні райони, сільська місцевість, приміські та віддалені зони. До того ж радіодоступ дає багато можливостей швидкого розгортання «альтернативної» мережі в районах з розвиненою інфраструктурою та високою густиною населення (абонентів). І вона є незалежною від кабельної розподільної мережі. Крім того, застосування радіодоступу дає можливість створення мереж із обмеженою рухливістю абонентів. А собівартість розгортання набагато нижча порівняно з мережами мобільного зв'язку.

Ця кваліфікаційна робота в основному зосереджена на рішенні задач підвищення та покращення якості мережі, які актуальні в першу чергу з практичного погляду.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Метою даної кваліфікаційної роботи є дослідження якості мережі радіо доступу на базі LTE шляхом поліпшення параметрів при різних технологіях та стандарти. Для досягнення цієї мети у роботі необхідно зробити наступне:

- аналіз актуальності використання радіодоступу на базі технології LTE;
- розглянути принципи побудови, архітектуру та функції мережі;
- інформаційний огляд основних технологій та стандартів радіодоступу;
- провести аналіз основних параметрів MIMO;
- експериментальна оцінка роботи радіодоступу за різних технологіях та стандартах;
- здійснити розрахунок основних параметрів якості мережі радіодоступу.

Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків та список використаної літератури. У роботі розглянуті теоретичні та методологічні аспекти даної теми, а також є розрахункова частина, де відображені всі розрахунки та дослідження.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОСНОВНА ЧАСТИНА

## 1.1 Вступ до LTE

Мобільний широкосмуговий доступ стає дедалі більше поширеним, у міру того, як підростає інтернет-покоління, а разом з ним і потреба мати можливість широкосмугового доступу скрізь, де буває сучасна людина, а не лише вдома чи в офісі. З прогнозованого числа в 1.8 млрд людей, які до 2012 року обзаведуться широкосмуговим доступом, приблизно дві третини будуть користуватися ним у мобільному варіанті, причому більшість таких користувачів отримають послуги мобільного ШПД завдяки мережам з підтримкою HSPA (High Speed Packet Access) та LTE (Long Term Evolution). Усі, кому це потрібно, вже сьогодні можуть легко використати інтернет або надсилати повідомлення електронної пошти з ноутбуків, що підтримують технологію HSPA, поступово замінюючи фіксовані DSL модеми бездротовими HSPA-модемами або USB-донглами, а також відправляючи або отримуючи відео чи музику за допомогою телефонів 3G. Але коли з'явиться LTE, користуватись подібними послугами стане значно комфортніше. Більш того, в мережах LTE напевно з'являться й інші послуги серед тих, які дуже вимогливі до пропускної спроможності каналу зв'язку, як, наприклад, інтерактивне ТБ, мобільний відео-блогінг, сучасні онлайн ігри чи професійні послуги.

Перехід до LTE обіцяє кілька важливих переваг для абонентів та операторів:

- продуктивність та ємність. Одна з вимог, що висувуються стандартом до систем LTE – підтримувати пікові швидкості завантаження даних з мережі до 100 Мбіт/с. Сама по собі технологія дозволяє реалізувати в її рамках ще більш високі швидкості, наприклад, понад 200 Мбіт/с, та компанія Ericsson, наприклад,

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вже демонструвала роботу системи LTE з пікової швидкістю приблизно 150 Мбіт/с. Більше того, час відгуку на посилку короткого пакета даних у радіопідсистемі RAN (Radio Access Network) мережі LTE має бути не більше 10 мс. Це означає, що LTE, більше, ніж будь-яка інша технологія відповідає ключовим вимогам, що пред'являються до систем 4G;

- простота. Насамперед, LTE здатна працювати у смузі частот різної ширини, починаючи від значень помітно нижче 5 МГц (1.5 МГц) та до смуги 20 МГц. LTE також може бути реалізована на основі різних принципів поділу сигналів, частотного та тимчасового – FDD (Frequency Divission Duplex) та TDD (Time Division Duplex). Дотепер часу, 3GPP передбачила для роботи систем LTE десять парних та чотири непарні частотні діапазони. Планується виділення та інших діапазонів.

Це означає, що оператор може спочатку запускати LTE у «нових» діапазонах, де зазвичай простіше отримати смуги в 10 МГц або навіть 20 МГц, а потім поступово впроваджувати LTE у всіх доступних діапазонах. Крім того, продукти радіопідсистеми LTE володітимуть набором властивостей, які спростять будівництво та управління мереж наступного покоління. Наприклад, такі функції, як «включив і працюй», автоконфігурація та автооптимізація спростять та знизять витрати на запуск та управління мережами. В треті, мережі LTE будуть будуватися в паралель зі спрощеними, заснованими на IP-протоколі опорними та транспортними мережами, що дозволить спростити будівництво, експлуатацію систем LTE та введення нових послуг; широкий вибір терміналів. Окрім мобільних телефонів, у мережах LTE буде працювати багато комп'ютерів та пристроїв споживчої електроніки, таких, як ноутбуки, нетбуки, ігрові пристрої та камери, оснащені вбудованим модулем роботи з LTE-мережею. Оскільки LTE забезпечує підтримку хендоверів та роумінгу з існуючими мобільними

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мережами, ці пристрої з першого дня запуску зможуть користуватися перевагами вже існуючого покриття мереж 2G/3G.

Таким чином, впроваджуючи LTE, оператори зможуть найефективнішим чином використовувати виділені ним частоти, а також досягти поставлених бізнес-цілей у галузі радіодоступу та мультимедійних послуг.

## 1.2 Стандартизація LTE

LTE – це наступний суттєвий крок у розвитку мобільного радіозв'язку, який оформлений, як Release 8 3GPP (3rd Generation Partnership Project). LTE використовує ортогональне мультиплексування з частотним поділом (OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing) як технології радіодоступу, разом із удосконаленими антенами технологіями.

3GPP – це колективна угода, заснована у грудні 1998 року, яка об'єднала кілька організацій у галузі стандартизації телекомунікацій, відомих як «партнери-організатори». В даний час «партнерами організаторами» є ARIB, CCSA, ETSI, ATIS, TTA та TTC. Дослідники та інженери розробники з усього світу, що представляють більше 60 операторів, вендорів та дослідницьких інститутів, беруть участь у спільні спроби сформулювати стандарт радіодоступу LTE.

Крім LTE, 3GPP розробив також «плоску» мережеву архітектуру, засновану на використанні IP. Ця архітектура визначена як частина розробок у рамках проекту System Architecture Evolution (SAE, еволюція системної архітектури). Були розроблені архітектура та концепції LTE-SAE для ефективної підтримки масового використання будь-яких послуг на базі Інтернет протоколу. Архітектура заснована на еволюції існуючої базової мережі GSM/WCDMA у бік спрощення операцій та органічного, ефективного за витратами розгортання.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Більш того, було ініційовано взаємодію між 3GPP та 3GPP2 (Організація, що займається стандартизацією CDMA) з метою оптимізації міжмережевої взаємодії між CDMA та LTE-SAE. Це означає, що оператори CDMA зможуть розвинути свої мережі до LTE-SAE та скористатися економією на масштабі та глобальному характері виробництва чіпсетів, що зробило такий потужний позитивний вплив на успіх GSM та WCDMA.

Вихідною точкою для стандартизації LTE стала робоча зустріч 3GPP RAN Evolution Workshop, проведений у листопаді 2008 року в Торонто, Канада. В грудні 2004 року розпочалися дослідження, метою яких було виробити тимчасові рамки еволюції технології радіодоступу 3GPP:

- скорочена ціна на біт;
- збільшення обсягу послуг – більше послуг за меншу ціну з більш високою задоволеністю користувачів;
- гнучке використання існуючих та нових частотних діапазонів;
- спрощена архітектура та відкриті інтерфейси;
- прийнятне енергоспоживання терміналів.

Вивчення знадобилося для того, щоб підтвердити, що концепція LTE зможе забезпечити набір вимог, сформульованих в 3GPP TR 25.913 Feasibility Study of Evolved UTRA та UTRAN.

Розробку LTE розбили на так звані контрольні точки, а графік робіт погодили на пленарних засіданнях 3GPP у Південній Кореї у травні та у червні 2007 року. Результати наочно показували, що LTE відповідає, а іноді й перевищує цілі, встановлені щодо пікових швидкостей, пропускної здатності стільників і спектральної ефективності, а також по продуктивності VoIP та Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS).

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Була поставлена мета завершити стандартизацію LTE. Після першого релізу було заплановано доопрацювання, які будуть пов'язані зі змінами вимог та функціональності [2].

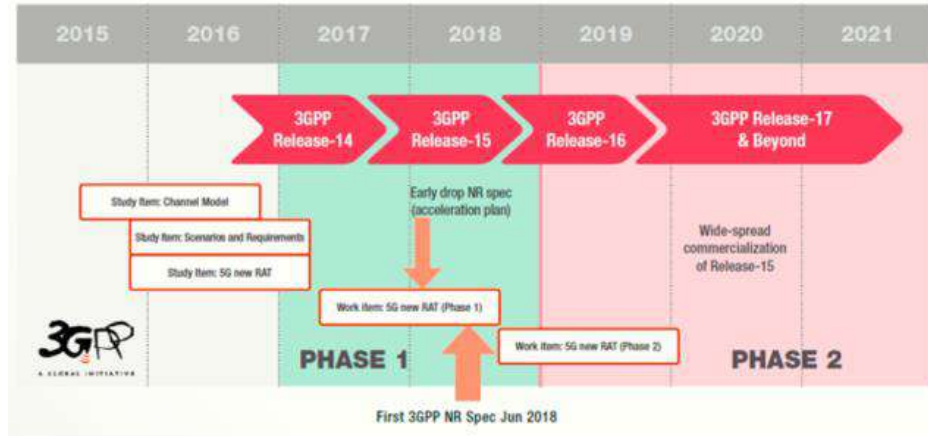


Рисунок 1.1 – Стандартизації 3GPP LTE

**Факти:**

- набір вихідних вимог 3GPP до LTE;
- підвищена пікова швидкість: 100 Мбіт/с у напрямку вниз та 50 Мбіт/с у напрямку догори;
- скорочення відгуку мережі радіодоступу до 10 мс;
- підвищена спектральна ефективність (у 2-4 рази, порівняно з HSPA Release 6);
- ефективна за витратами міграція від радіоінтерфейсу та архітектури Release 6 Universal Terrestrial Radio Access (UTRA);

**Поліпшена можливість широкомовлення:**

- IP-оптимізація (фокус на послугах у сфері пакетної комутації);
- масштабований діапазон від менш ніж 5 МГц до 5 МГц, 10 МГц, 15 МГц і 20 МГц;
- підтримка роботи як з парними, так і з непарними частотними діапазонами;



Основним досягненням такої архітектури порівняно з попередніми поколіннями є менші затримки при передачі як користувацьких даних, так і керуючої інформації у зв'язку з проходження через менше проміжних елементів.

Обмін даними в мережі EPC відбувається лише за IP протоколом з комутацією пакетів, що суттєво відрізняє мережу LTE від мереж попередніх поколінь, у яких використовувалася комутація каналів між окремими елементами. До цієї мережі входять елементи, відповідальні за управління, маршрутизацію, комутацію та зберігання різних даних, яких далі буде розказано докладніше.

Мережа E-UTRAN, що складається з базових станцій (eNodeB), бере на себе функції радіоінтерфейсу і є сполучною ланкою між користувальницькими терміналами (UE) та мережею EPC. Основною особливістю, відрізняється мережею LTE від мереж інших поколінь, і те, що базові станції eNodeB можуть обмінюватися між собою інформацією з протоколу X2 та здійснювати функції управління. На відміну від стандарту GSM, де підсистема базових станцій BSS складалася з базового приймача BTS та контролера базових станцій BSC у мережі LTE в одному елементі eNodeB об'єднані функції передавача та контролера.

У мережі LTE існує два види трафіку: передача користувача даних (UP – User Plane) та передача сигнальної інформації (CP – Control Plane). Призначення основних елементів мережі:

- БС (EnodeB) у мережі LTE керує радіоресурсами, вибирає блок управління мобільністю (MME) при включенні в мережу користувача терміналу за відсутності в інформації про минуле підключення, маршрутизує в площині користувача пакети даних за напрямком до обслуговуючого шлюзу (S-GW), стискає заголовок IP-пакетів, шифрує потік даних користувача.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

- MME(Вузол керування мобільністю – Mobility Management Entity). Це основний керуючий елемент мережі LTE. Він здійснює тільки функції управління і не працює з даними користувача. Має безпосередній зв'язок з UE через протокол сигналізації поза рівнем доступу.

S-GW (Serving Gateway – обслуговуючий шлюз). Призначений для обробки та маршрутизації пакетних даних, що надходять з/в підсистему базових станцій. SGW маршрутизує та спрямовує пакети з користувальницькими даними, в той же час виконуючи роль вузла управління мобільністю (mobility anchor) для даних користувача при хендовері між базовими станціями (eNodeB), а так само як вузол управління мобільністю між мережею LTE та мережами з іншими технологіями 3GPP.

Коли UE вільний і не зайнятий викликом, S-GW підключає низхідний канал даних (DownLink – DL) і виробляє пейджинг, якщо потрібно передати дані щодо DL у напрямку UE. Він керує та зберігає стани UE (наприклад вимоги щодо пропускної спроможності для IP-сервісів, внутрішню інформацію з мережевої маршрутизації). Він також надає копію даних користувача при узаконеному перехопленні.

PGW – Пакетний шлюз – Packet Data Network Gateway. Пакетний шлюз забезпечує з'єднання від UE до зовнішніх пакетних мереж даних, будучи точкою входу та виходу трафіку для UE. UE може мати одночасно з'єднання з більш ніж одним P-GW для підключення до кількох мереж.

PGW виконує функції захисту, фільтрації пакетів для кожного користувача, підтримку білінгу, узаконеного перехоплення та сортування пакетів.

PCRF (Вузол виставлення рахунків абонентам – Policy and Charging Rules Function). Policy Function (управління політикою) також можна розділити на дві функції: контроль шлюзу (gating control) та контроль якістю. Під контролем

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

шлюзу (gating control) розуміється своєчасність та безпомилковість визначення таких подій як початок надання, зміна параметрів, завершення надання послуги тощо. Управління якістю включає безперервний моніторинг і підтримання заданих абонентськими параметрами характеристик якості надання послуг (QoS) причому як для голосових з'єднань, але й пакетних сесій.

Charging Function (управління нарахуванням плати) обов'язково передбачає on-line тарифікацію, тобто. абонент та оператор можуть у реальний час відстежувати стан рахунку. PCRF має підтримувати кілька моделей нарахування плати: за наданим обсягом послуг, витраченого на послугу часу, за фактом надання послуги, а також комбіновані моделі.

HSS (Home Subscriber Server - сервер абонентських даних мережі):

- HSS є великою базою даних і призначений для зберігання даних про абонентів. HSS фактично замінює набір реєстрів (VLR, HLR, AUC, EIR), які використовувалися в мережах 2G та 3G.

#### 1.4 Радіотехнологія OFDM

LTE використовує OFDM на формування низхідного каналу, тобто каналу від базової станції до мобільного пристрою OFDM відповідає вимогам LTE до спектральної гнучкості та дозволяє створювати ефективні за витратами рішення для широкосмугових несучих з високими піковими швидкостями передачі. Це добре опрацьована технологія, про що свідчить про цілий спектр стандартів, таких, як IEEE 802.11a/b/g, 802.16, HIPERLAN-2, DVB та DAB.

OFDM для забезпечення передачі використовує велику кількість вузькосмугових піднесучих. Базовий низхідний канал LTE на фізичному рівні можна розглядати, як частотно-часову решітку. У частотній області у проміжки між піднесучими  $\Delta f$  становить 15 кГц.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тривалість символу OFDM становить  $1/\Delta f$  + префікс циклічності. Префікс циклічності використовується для забезпечення ортогональності між піднесучими навіть за умов радіоканалу з дисперсією за часом.

Один ресурсний елемент формується модуляцією QPSK, 16QAM або 64QAM. Якщо використовується модуляція 64QAM, кожен ресурсний елемент забезпечує передачу 6 біт інформації.

Символи OFDM згруповані у ресурсні блоки. Ресурсні блоки мають розмір у 180 кГц у частотному вимірі та 0.5 мс у тимчасовому вимірі. Кожен часовий інтервал передачі (TTI, Transmission Time Interval) складається із двох слотів (Tslot). Кожному користувачеві надається деяка кількість так званих ресурсних блоків у частотно-часових ґратах. Чим більше ресурсних блоків призначається користувачеві, і чим вищий рівень модуляції використовується у формуванні ресурсних елементів, тим більше високий забезпечується біт-рейт.

Які ресурсні блоки будуть призначені та скільки їх отримає користувач в даний момент часу, залежить від вдосконаленого механізму складання частотно-часового розкладу. Механізм складання розкладу, що використовується в LTE, схожий на той, що застосовується в HSPA і забезпечує оптимальне функціонування різних послуг у різних умовах.

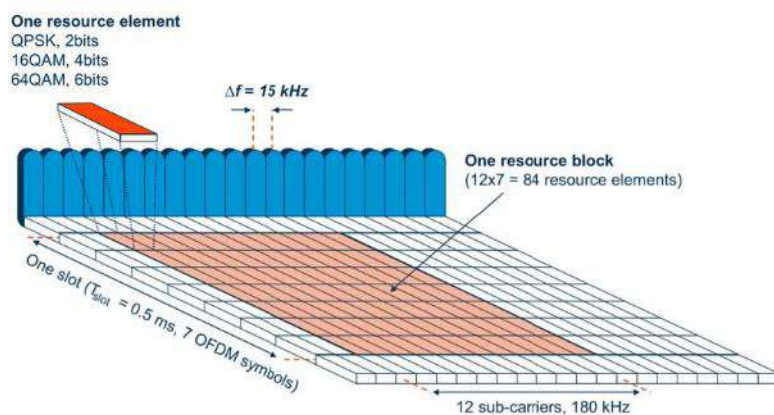


Рисунок 1.3 – Фізичні ресурси низхідного каналу LTE засновані на OFDM

У висхідному каналі, LTE використовує прекодовану версію OFDM під назвою SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access – множинний доступ із частотним поділом на базі однієї несучої). Це зроблено для того, щоб компенсувати витрати на OFDM, який відрізняється дуже високим ставленням пікової потужності до середньої потужності радіосигналу (PARP – Peak to Average Power Ratio). Реалізація високих значень PARP вимагають використання дорогих та неефективних підсилювачів потужності, що висувають високі вимоги до лінійності, що позначається на зростанні вартості терміналів та швидкості розряду батарей.

SC-FDMA дозволяє вирішити проблему за рахунок об'єднання ресурсних блоків таким чином, що скорочуються вимоги до лінійності, а також до споживаної потужності підсилювача. Низькі значення PARP також покращують покриття та продуктивність стільники.

#### Висновки до 1 розділу

В даному розділі були розглянуті основні технології та стандарти сучасних поколень зв'язку. Однак більше уваги приділялося ключовим технологіям мережевого моделювання, зокрема технології LTE. Цей розділ був присвячений характеристикам технологій цього стандарту, а також детальному опису основних інструментів, які використовуються при розробці мережі 4-го покоління, а саме технології MIMO та OFDMA.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

### 2.1 Удосконалені антени

Удосконалені антенні рішення були розроблені для впровадження HSPA (eHSPA) і використовуватиметься в системах LTE. Рішення, в яких використовується кілька антен, відповідають вимогам до мобільних мереж наступного покоління щодо пікових швидкостей передачі даних, розширеного покриття та високої ємності. По суті, для досягнення цих цілей удосконалені антенні рішення з використанням кількох антен – це ключові компоненти. Немає такого рішення антенного пристрою, яке б відповідало кожному можливому сценарію. Відповідно, є ціла родина антенних рішень для різних сценаріїв розгортання мережі. Високі пікові швидкості передачі даних, наприклад, можуть досягатися за рахунок використання багат шарових антенних рішень, таких як 2x2 або 4x4 MIMO, тоді як розширене покриття зручніше забезпечувати за рахунок використання бімформінгу.

### 2.2 Частотні діапазони для FDD та TDD

LTE може використовуватися, як у парних (FDD), так і в непарних (TDD) ділянках діапазону. Перші релізи товару від лідируючих постачальників гарантуватимуть допомогу обох дуплексних схем.

В цілому, FDD – гарантує величезну віддачу та дає найбільше високий потенціал застосування пристроїв та інфраструктури, тоді як TDD може виконувати роль гарного доповнення, наприклад, для заповнення прогалів. Найбільш ретельно читайте у короткій довідці (нижче), присвяченій FDD та TDD. Оскільки оснащення LTE фактично ідентично для випадків FDD і TDD (крім фільтрів), оператори які почнуть з будівництва мереж TDD, зможуть потім

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

скористатися результатом економії на масштабі, що дасть широке розподіл товарів FDD.

Всі стільникові системи зв'язку на сьогоднішній день використовують FDD, та більше 90% частот, що використовуються системами мобільного зв'язку в усьому світі – це парні набори смуг частот. У випадку FDD, трафік вниз та вгору забезпечується поряд з цим, у різних частотних діапазонах. У системах TDD, передача в каналі вгору та вниз не ведеться постійно, що дозволяє використовувати для організації каналу той самий частотний діапазон. Наприклад, якщо розділити час між передачею вгору та вниз у співвідношенні 1:1, то напрям вгору буде використовуватися лише на половину часу. Також, для кожного сеансу зв'язку середня потужність виявляється рівною половині пікової потужності. Так як пікова потужність є обмеженою регулятором, то в результаті чого виходить, що для тієї ж пікової потужності, TDD забезпечує менше покриття, ніж FDD.

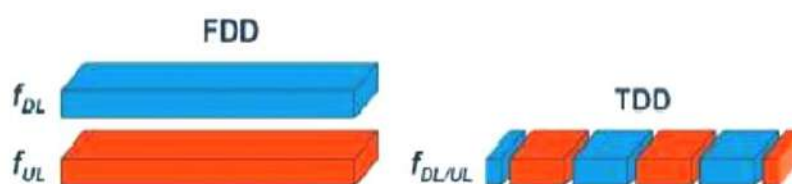


Рисунок 2.1 – Покриття TDD та FDD

Більше того, оператори часто хотіли б виділити більш ніж половину своїх ресурсів для організації каналу вниз (щоб підвищити пікову швидкість у цьому напрямі). Якщо співвідношення DL/UL дорівнює 3:1, то для реалізації мережі TDD потрібно на 120% більше сайтів, ніж для реалізації мережі FDD

До теперішнього часу, 3GPP було виділено 10 різних частотних діапазону для створення систем LTE-FDD і чотири частотні діапазони для LTE-TDD, як показано в таблиці 2.1. Ймовірно, цей список буде розширено за рахунок

додавання інших частотних діапазонів, таких, наприклад, як діапазон 700 МГц у США.

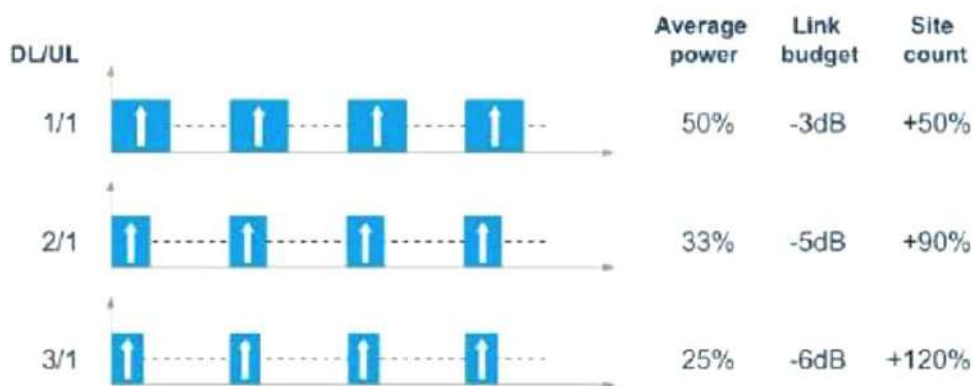


Рисунок 2.2 – Співвідношення DL/UL для FDD та TDD

Таблиця 2.1 – FDD (ліворуч) і TDD (праворуч) – частотні діапазони, певні рішеннями 3GPP

FDD Bands		TDD Bands	
Band	Frequencies UL/DL (MHz)	Band	Frequencies UL and DL (MHz)
I	1920-1980/2110-2170	a	1900-1920 2010-2025
II	1850-1910/1930-1990	b	1850-1910 1930-1990
III	1710-1785/1805-1880	c	1910-1930
IV	710-1755/2110-2155	d	2570-2620
V	824-849/869-894		
VI	830-840/875-885		
VII	2500-2570/2620-2690		
VIII	880-915/925-960		
IX	749.9-1784.9/1844.9-1879.9		
X	710-1770/2110-2170		

Перша інфраструктура мережі LTE та термінали будуть з першого ж дня підтримувати роботу з безліччю частотних діапазонів. LTE, таким чином, досить швидко зможе забезпечити можливість економії на масштабах та глобального покриття.

LTE розроблена так, щоб підтримувати гнучкий підхід до ширини несучих, які можуть варіювати від менше, ніж 5 МГц до 20 МГц багатьох частотних діапазонах, причому, як із побудові мережі FDD. так і за побудові мережі TDD. Це означає, що оператор може розгортати LTE, як у нових, і у виділених оператору раніше частотних діапазонах.

Першими можуть бути діапазони, де, в цілому, легше буде знайти несучі в 10 МГц або 20 МГц (наприклад, 2.6 ГГц (діапазон VII), AWS (діапазон IV) або діапазон 700 МГц), але, крім того, LTE можна будувати у всіх стільникових діапазонах. На відміну від колишніх систем стільникового зв'язку, LTE буде швидко розгорнута у різних частотних діапазонах. Термінали фіксованого бездротового зв'язку (FWT – Fixed Wireless Terminals) – це ще одна можливість ефективного використання мобільного ШПД. FWT можна порівняти з DSL-модемами для підключення до Ethernet, WLAN або POTS різних пристроїв в офісі чи вдома. Основне відмінність у цьому, що широкосмугові послуги забезпечуються за допомогою мідного кабелю, а за допомогою радіомережі. FWT дають оператору можливість забезпечувати послугу ШПД ефективним за витратами способом для всіх абонентів, які вже мають настільні комп'ютери з підключенням до Ethernet або власникам ноутбуків, здатних підключатися до мереж WLAN.

### 2.3 Цінова ефективність

Існує значна та велика підтримка LTE з боку мобільної промисловості. Багато постачальників, операторів та дослідних інститутів беруть участь у стандартизації цієї технології. Це хороша база для створення здорової екосистеми.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Один з ключових факторів успіху будь-якої технології – це економія на масштабі. Переваги, пов'язані з обсягами, істотні як для абонентських терміналів та для обладнання інфраструктури. Вони позначаються зниження витрат на виробництво і дозволяють операторам надавати абонентам найефективніші за ціною послуги. Це одна з основних причин, які приваблюють до LTE тих операторів, які тільки збираються вийти на ринок із власною мережею мобільного ШПД.

Розгортання LTE буде здійснюватися за різними сценаріями, залежно від конкретних ринкових умов тієї чи іншої країни; регуляторних особливостей Перші пристрої будуть мультимодовими, що дозволить говорити про широкую зону покриття, мобільності та послуг з першого ж дня запуску мережі LTE. Існуючі стандартні мережі мобільного зв'язку можна використовувати для забезпечення зв'язку там, де LTE ще не впроваджено.

Важливим є те, що використання інфраструктури LTE настільки просто та ефективно з погляду на витрати, наскільки це тільки можливо. Наприклад, мабуть, можливо, здійснити удосконалення існуючих базових станцій радіопідмережі до LTE використовуючи модулі, що легко замінюються, причому вони зможуть працювати, як з одним частотним діапазоном, і з парними наборами частот.

Окремі базові станції для LTE також буде простіше встановити, ніж сучасне обладнання GSM/WCDMA. Запуск мережі, її експлуатація та менеджмент може бути спрощено з допомогою використання таких функцій, як «включив і працює» та «авто-оптимізація», що позитивно позначається на скорочення капітальних та операційних витрат оператора.

LTE позиціонується як мережа, яка відповідає вимогам до мереж мобільного зв'язку наступного покоління – як для існуючих операторів 3GPP/3GPP2, так і для новачків ринку. Ця технологія дозволить операторам

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надавати високопродуктивні послуги мобільного ШПД для широкої аудиторії, використовуючи комбінацію високих пікових швидкостей та пропускної потужності системи, як у напрямку «вниз», так і у напрямку «вгору», причому з низьким часом відгуку.

Інфраструктура LTE розроблена для того, щоб бути якомога більше простий у розгортанні та експлуатації, для чого розроблена гнучка технологія, здатна залишатися працездатною у широкому наборі частотних діапазонів LTE має на увазі можливість масштабування частотних діапазонів може працювати в смузі частот менше 5 МГц і аж до 20 МГц, а також підтримує, як парні частотні діапазони для FDD, так і поодинокі – для TDD. Архітектура LTE-SAE скорочує кількість вузлів, підтримує гнучкі конфігурації мережі та забезпечує високий рівень доступності послуг. Крім того, LTE-SAE забезпечуватиме між мережне взаємодія з мережами GSM, WCDMA/HSPA, TD-SCDMA та CDMA.

Можливостями LTE-мережі можна буде скористатися не тільки за допомогою мобільного телефону, але також за допомогою ноутбука, камери, камкордера, фіксованих бездротових терміналів та інших пристроїв, орієнтованих використання мобільного ШПД.

## 2.4 Радіодоступ

Великий інтерес викликає розвиток мереж бездротового доступу, які мають безперечну перевагу за відсутності кабельної інфраструктури, у важкодоступних та малонаселених районах. Іншим гідністю систем радіодоступу є швидкість їх розгортання та можливість поетапного нарощування за необхідності. Головними недоліками є обмежена пропускна здатність і щодо висока вартість розрахунку абонента. Усі системи WLL орієнтовані, насамперед, на надання послуг аналогової телефонії, що не можна назвати недоліком умов

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Казахстану. Серед найбільш поширених технологій, що використовуються в системах радіодоступу, можна назвати стандарти мобільної телефонії DAMPS, GSM, стандарти бездротової телефонії CT-2 та DECT, а також технології CDMA та деякі приватні протоколи, як, наприклад, FH TDMA та інші.

Вартість рішення на основі радіодоступу складається, по-перше, вартості проектування, підготовчих інжинірингових робіт, частотного присвоєння, а також інфраструктури обладнання радіодоступу. Всі ці витрати (назвемо їх стартовими) мало залежать від кількості абонентів та практично не залежать від довжини бездротової абонентської лінії (у межах зони дії системи). Другий складник витрат у системі Радіодоступ є абонентський термінал. Ця складова зростає лінійно зі зростанням кількості абонентів, але також залежить від довжини лінії.

Поставимо завдання щодо побудови мережі абонентського доступу, характерну на наш погляд для оператора зв'язку в Україні.

Умови застосування обладнання. Комутаційні станції:

- цифрові, різних виробників;
- аналогові, різних систем (координатні, іноді декадно-крокові).

Розподільна мережа:

- розгалужена мережа мідно-кабельних ліній невисокої якості міських районах (для базових операторів);
- відсутня чи недостатньо-розвинена власна мережа;
- нерозвинена мережа кабельних ліній у сільській місцевості та передмістях.

Потреба у послугах:

більше 95%:

- аналоговий телефон;

Передача даних за допомогою модему/факсу.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

до 5%:

- високошвидкісне підключення до мереж передачі даних або мережі ISDN.

Пріоритети для оператора під час вибору коштів абонентського доступу можуть бути різні. Наприклад, у базових операторів, основне завдання яких полягає в 100% телефонізації та основна частина клієнтів, які потребує традиційних телефонних послуг, пріоритети при виборі обладнання частіше розставляються так:

- ціна;
- швидкість розгортання;
- витрати на обслуговування;
- гнучкість з погляду надання інтегрованих послуг;
- мобільність.

У альтернативних операторів завдання, як правило, полягає у більш швидкому, ніж у конкуруючих базових операторів, забезпеченні традиційним зв'язком заможної частини населення та наданням високоякісних послуг (у тому числі і нетрадиційних) абонентам ділового сектора. Пріоритети вибору обладнання для них дещо інші:

- швидкість розгортання;
- гнучкість з погляду надання інтегрованих послуг;
- мобільність;
- ціна;
- витрати на обслуговування.

Спробуємо зробити якісний аналіз різних технологій та подивитися, якою мірою вони відповідають поставленому завданню – телефонізація з використанням різних технологій абонентського доступу. З аналізу таблиці 2.2 можна дійти невтішного висновку, що альтернативні оператори будуть тяжіти до

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

трох більш сучасних способів вирішення проблеми доступу (ущільнення та радіодоступ), тому що саме вони дозволяють вирішити питання підключення абонентів істотно швидше, ніж у разі прокладання мідного кабелю, або надати більший набір послуг.

Таблиця 2.2 – Якісний аналіз технологій

Параметр	Ущільнення АЛ	Застосування ВОЛЗ	Радіодоступ	Мідний кабель
Ціна	Низька (\$150)	Середня (\$200...\$600)	Висока (\$500..\$1000)	Середня (\$100...\$300)
Швидкість розгорт.	Висока (1 день)	Низька (3..12 міс.)	Середня (2..4 міс.)	Низька (3...12 міс.)
Витрати на обслуговування.	Низькі	Низькі	Низькі	Високі
Гнучкість (Смугапр.)	Середня (до 2 Мбіт/с)	Висока (до 155 Мбіт/сі вище)	Низька (зазвичай до 32 кбіт/с)	Низька (аналогова передача)
Мобільний	Висока	Низька	Висока	Низька

Такий висновок підтверджується практикою. Більшість альтернативних операторів значно раніше за базові почали використовувати обладнання ЦСПАЛ та широко впроваджувати ВОЛЗ. Радіодоступ, як технологічне рішення, набув поширення порівняно недавно, але вже очевидно, що і в світової та вітчизняної практики це рішення для міського зв'язку застосовується переважно альтернативними операторами, тоді як для сільської зв'язку воно є ефективним і у базових операторів зв'язку (рисунок 2.3)

Тепер спробуємо проаналізувати вартісні показники різних методів організації доступу. Вартісний аналіз, безумовно, є надзвичайно важливим для сучасного оператора, який прагне найбільшій економічній ефективності своєї діяльності.

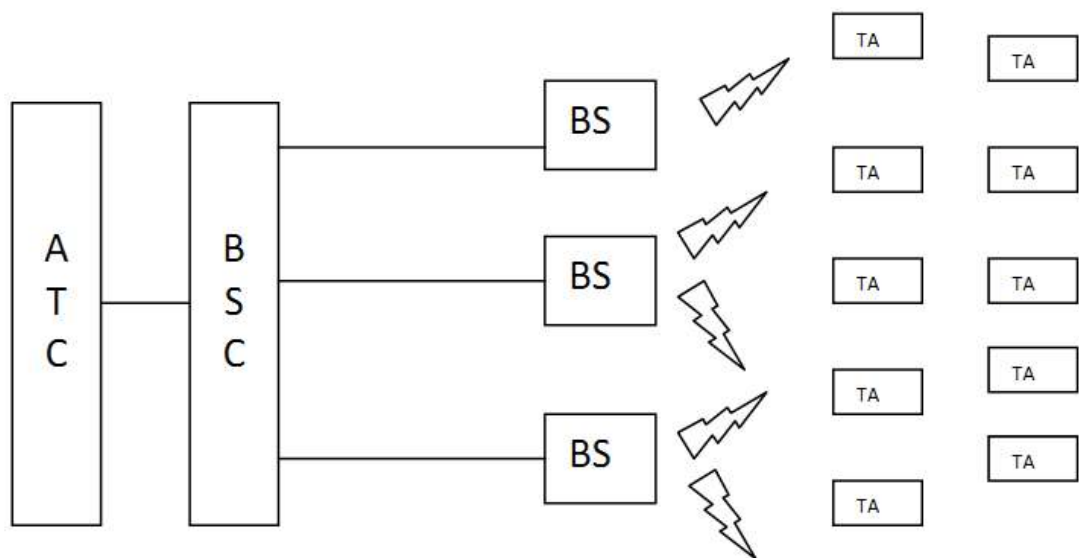


Рисунок 2.3 – Бездротовий доступ

Розглянемо випадок модернізації міської АТС. Завдання полягає в роздачі нових телефонних номерів (кількість яких збільшилася в порівнянні з існуючим раніше в 2-4 рази) абонентам, рівномірно розподіленим у радіусі до 5 км від АТС. Кількість абонентів, що підключаються в кожній точці, як правило, для цього випадку становитиме не більше 10. Цей параметр суттєвий для дротових технологій (мідний кабель та ВОЛЗ). Для ЦСПАЛ кількість абонентів, що підключаються в кожній точці, не істотний (за наявності кабельних введів у кожную будівлю), а для радіодоступу кількість абонентів, що підключаються, розраховується на всю зону радіо покриття, тобто вся кількість додатково введених номерів, як правило, більше 600. Розглянемо застосування різних способів доступу даної задачі.

Як бачимо, при коротких АЛ (або ділянок АЛ, що підлягають посиленню) традиційне кабельне рішення все ще виявляється найдешевшим. Проте, зі збільшенням довжини АЛ понад 1...1,5 км, ефективним стає застосування ЦСПАЛ, ВОЛЗ та радіодоступ виявляються дорожчими рішеннями для цього завдання. При виборі між посиленням кабельного введення та застосуванням ЦСПАЛ оператору доцільно враховувати також тимчасовий фактор, адже під час будівельно-монтажних робіт оператор не отримує оплати від клієнта. Зважаючи

на все вищесказане, а також, ґрунтуючись на практичному досвіді взаємодії з операторами, розв'язання цього завдання можна рекомендувати застосування ЦСПАЛ при довжині ділянки АЛ, що підлягає посиленню, понад 100 метрів.

Тепер розглянемо наступне типове завдання – телефонізацію об'єктів нового будівництва (житлових будинків, бізнес-центрів тощо). Для цієї задачі характерне відносно невелика довжина АЛ (до 5 км), а також велика кількість абонентів, що підключаються в одній точці (будівлі або кварталі) – понад 500 терміналів.

Застосування ЦСПАЛ для вирішення поставленого завдання неможливе, оскільки кабельне введення в будівлю відсутнє, а, отже, нічого ущільнювати. Тому до порівняння підлягають інші технології. Радіодоступ, як і в першому випадку, виявляється найдорожчим рішенням. Гнучкість радіо рішення (можливість швидко переставляти абонентські термінали з місця на місце в межах зони дії) також не важлива для розглянутого випадку, тому що всі абоненти свідомо будуть перебувати в межах об'єкта на постійних місцях. Конкуруючими рішеннями залишаються прокладання мідного або волоконно-оптичного кабелю. Час, потрібне на прокладку, практично однаково. Більше того, для випадку нового будівництва, коли каблювання може здійснюватися одночасно з остаточною обробкою будівель, навіть радіодоступ не дає виграшу в часі.

Тепер розглянемо типове завдання для сільської місцевості, передмістя, районів малоповерхової забудови. Для цього завдання характерна відсутність інфраструктури мідних кабельних ліній (тому неможливо або обмежено застосування ЦСПАЛ), мала кількість абонентів, що підключаються у кожній точці, а також велика відстань від АТС до місць розташування абонентів (до 10 та більше кілометрів).

Як видно з аналізу, найбільш ефективним було б використання ЦСПАЛ. Там, де це можливо (тобто існує якась кабельна мережа), рекомендується застосовувати ЦСПАЛ із великим коефіцієнтом ущільнення (до 60 ліній за

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

однією парою) або з динамічною концентрацією. Як правило, така можливість у сільській місцевості є там, де існують кабельні лінії, на яких змонтовано системи типу К-12 або ІКМ-15, ІКМ-30. При переобладнанні цих ліній на основі використання технологій HDSL з'являється можливість виносів номерної ємності АТС, встановлених у великих населених пунктах, до передмість чи сіл.

Однак, у багатьох випадках застосування ЦСПАЛ неможливе зовсім через повну відсутність кабельної інфраструктури. Для цього випадку ймовірно і відсутність кабельної каналізації, що суттєво подорожчає кабельні рішення щодо розглянутих раніше завдань щодо телефонізації у міських районах. У сільській місцевості менше (а частіше зовсім відсутній) попит на нетрадиційні високошвидкісні послуги (передача даних тощо), тому якісна перевага ВОЛЗ (велика пропускна спроможність) несуттєво. Як бачимо, для цього завдання радіодоступ може бути найбільш прийнятною альтернативою. Практика інших країн підтверджує це виведення.

Розглянувши теоретично кілька типових задач телефонізації, автор природно не вичерпав усіх можливих та рентабельних застосувань для тих чи інших засобів доступу. Наприклад, радіодоступ та ЦСПАЛ часто використовуються як тимчасові рішення, щоб забезпечити зв'язок до завершення прокладання кабелю або для організації будь-яких разових заходів (фестивалі, спортивні змагання тощо). У багатьох випадках, особливо в ділових районах, оператори прокладають ВОЛЗ не для надання аналогових телефонних послуг, а надання цифрового зв'язку. Для цих ж цілей можуть бути використані і спеціалізовані радіозасоби. Ми дали лише узагальнений і, природно, спрощений порівняльний аналіз технологій абонентського доступу У кожному конкретному випадку необхідно враховувати безліч об'єктивних факторів, таких як розкид вартості ЦСПАЛ в залежності від типу, потреба (у тому числі і потенційна) у тих чи інших послугах, доступність радіочастот у даному регіоні і таке інше. Тому рекомендуємо операторам звертатися до постачальникам засобів доступу з

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постановкою завдання, а потім разом аналізувати різноманітні можливості її вирішення з метою оптимізації техніко-економічних параметрів.

## 2.5 Дослідження завадостійкості MIMO-OFDM систем

LTE – технологія, яка досі не має жодних комерційно діючих реалізацій, що дозволяє отримати відповіді на дедалі більшу кількість питань щодо того, що пропонуються в сучасному світі [11].

Порівняльний аналіз різних методів детектування сигналів у системах з багатоелементними антенними решітками присвячено досить велику кількість наукових праць. Основними з цих методів є метод максимуму правдоподібності (Maximum Likelihood – ML) та метод найменших квадратів (Zero Forcing – ZF). Однак у відомих роботах порівняння обмежувалося дослідженням систем із низькими порядками модуляції. Наприклад, у роботах [12] розглядалися лише модуляції з невеликою кількістю  $M$  біт однією символом (BPSK:  $M = 1$ , QPSK:  $M = 2$ ). У цих роботах було показано, що різниця в характеристиках MIMO-систем, що використовують різні методи детектування сигналів, є значною і становить близько 6–10 дБ. У цьому авторами відзначалася висока складність реалізації ML-метода.

У цій роботі досліджується завадостійкість MIMO. Ця проблема особливо актуальна у системах радіодоступу, які у складних умовах поширення сигналів. Традиційним вирішенням цієї проблеми є розширення смуги частот та/або підвищення випромінюваної потужності. Тим не менш, застосування цих методів має недоліки. Зокрема, через вимоги біологічного захисту та електромагнітної сумісності підвищення потужності та розширення смуги частот обмежено [13].

Одним із найефективніших способів вирішення цієї проблеми на сьогоднішній день може бути застосування антенних решіток із

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

слабокорельованими антенними елементами, на основі яких реалізується технологія MIMO [14].

На рисунку 2.4 представлена загальна структура системи MIMO, яка дозволяє збільшити пропускну здатність лінії зв'язку за рахунок формування різних фізично каналів.

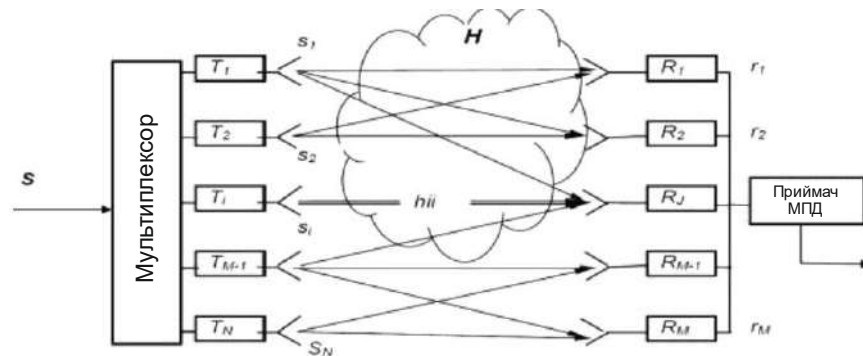


Рисунок 2.4 – Загальна структура системи MIMO

У роботі досліджено структурну схему імітатора радіопередачі. Для цього було створено програмну реалізацію MIMO каналу в середовищі Simulink пакету прикладних програм MatLAB. З різних варіантів побудови MIMO каналу була обрана архітектура на основі просторово-часового кодування. Така схема запропонована Alamouti [15] і є найефективнішим видом неадаптивної радіопередачі, оскільки поєднує просторове та тимчасове рознесення. Структурна схема імітатора зображено на рисунку 2.5.

Структурна схема складається із блоків: Bernoulli Binary Generator (генератор випадкового двійкового коду); BPSK Modulator (Demodulator) Baseband (модулятор (демодулятор) сигналу ФМ-2); OSTBC Encoder (Combiner) (ортогональний просторово-часовий блоковий кодер (декодер), виконує функцію кодування (декодування)); Error Rate Calculation (лічильник помилок у каналі); BER Display (відображає показання лічильника помилок у каналі); Selector (виконує функцію демультимплексування); Multipath Rayleigh Fading Channel (середовище поширення сигналу, що імітує релєївські завмирання).

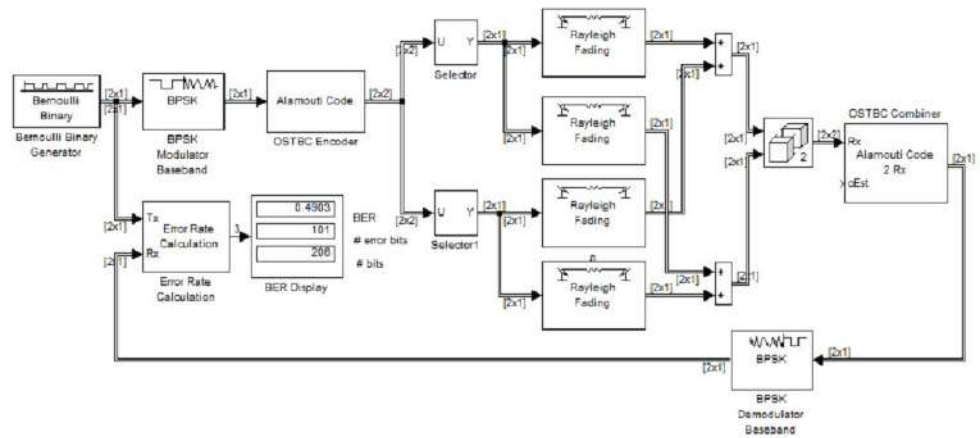


Рисунок 2.5 – Структурна схема MIMO каналу (2×2) в середовищі Simulink

Алгоритм роботи полягає в наступному: джерело сигналу формує випадкову послідовність, яка надходить на вхід модулятора ФМ-2. Модулятор формує сигнали передачі по сигнальному сузір'ю, закладаючи інформацію у зміну фази. Далі промодульований сигнал надходить на вхід просторово-часового кодера блоками по 2 символи, він формує матрицю за певним законом, кожен рядок якої надходить окремо на випромінювальну антену. У каналі сигнал зазнає можливих впливів і надходить на приймальну антену, після чого на просторово-часовий декодер, де за певним законом відновлюють передану послідовність. Потім слід демодулятор M-2, а після пристрій, що порівнює сигнал на передачі і прийомі, результату виводиться на лічильник помилок.

У роботі досліджувалась завадостійкість MIMO-OFDM-систем зв'язку з двома конфігураціями  $N_t \times N_r$  передавальних та приймальних антен (2×2 та 2×4). Результати моделювання для 2×2-MIMO-OFDM-системи (з двома передавальними та двома приймальними антенами) представлені в таблиці 1 і 2 для BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM модуляцій відповідно. Оскільки сучасні стандарти локальних радіомереж є системами пакетної передачі даних, то мірою перешкодостійкості використовувалася ймовірність пакетної помилки. Довжина пакета вибиралася рівною 1000 байтів. У моделюванні використовувалася модель частотно-селективного каналу з експонентним профілем тимчасового згасання. Середньоквадратична затримка каналу дорівнювала 50 нс. Частотно-

часові параметри OFDM-символів вибиралися згідно з рекомендаціями стандарту IEEE 802.11a, а число піднесних бралось рівним 96, що еквівалентно подвоєнню смуги передачі цього стандарту.

У таблиці 2.3 наведено відносні втрати щодо сигналу-шуму ZF-методу по відношенню до ML-методу при фіксованому значенні ймовірності пакетної помилки (PER = 0.01).

Таблиця 2.3 – Відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу для 2×2-MIMO

Швидкість коду, R	Модуляція	SNR <sub>ML</sub> - SNR <sub>ZF</sub>
1/2	BPSK	~5 дБ
3/4	BPSK	~7 дБ
1/2	QPSK	~4,5 дБ
3/4	QPSK	~7 дБ
1/2 16	QAM	~3 дБ
3/4 16	QAM	~4 дБ
2/3 64	QAM	~2 дБ
3/4 64	QAM	~3 дБ

З таблиці 2.3 видно, що відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу менше при QAM-модуляції та більшої швидкості коду.

У таблиці 2.4 наведено відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу при фіксованому значенні ймовірності пакетної помилки (PER = 0.01) для 2×4-MIMO-OFDM-системи з двома передаючими та чотирма приймальними антенами. З порівняння даних у таблицях 2.3 і 2.4 видно, що різниця в характеристиках ML-і ZF-схем детектування істотно зменшується зі зростанням кількості приймальних антен. З таблиці 2.4 видно, що відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу для 2×4-MIMO менше, ніж для 2×2-MIMO.

Таблиця 2.4 – Відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу для 2×4-MIMO

Швидкість коду, R	Модуляція	SNR <sub>ML</sub> - SNR <sub>ZF</sub>
1/2	BPSK	~1 дБ
3/4	BPSK	~2 дБ
1/2	QPSK	~0,5 дБ
3/4	QPSK	~1 дБ
1/2 16	QAM	~ 0,2дБ
3/4 16	QAM	~0,6 дБ
2/3 64	QAM	~0,1 дБ
3/4 64	QAM	~0,4 дБ

Реалізовано імітатор MIMO-каналу в середовищі Simulink пакету прикладних програм MatLAB, а також MIMO-OFDM-система зв'язку з двома конфігураціями  $N_t \times N_r$  передаючих та приймальних антен (2×2 та 2×4).

Відносні втрати щодо сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM модуляцій для 2×4 у 4-5 разів менші, ніж 2×2-MIMO-OFDM-системи.

#### Висновки до 2 розділу

У цьому розділі розглядається завадостійкість MIMO. Ця проблема особливо актуальна в системах радіодоступу, які використовуються в складних умовах поширення сигналу.

Досліджено структурну схему симулятора радіопередача. Для цього була створена програмна реалізація каналу MIMO в середовищі Simulink пакета прикладних програм MatLAB. З різних варіантів побудови каналу MIMO була обрана архітектура на основі просторово-часового кодування. Така схема була запропонована Alamouti і є найефективнішим типом неадаптивної радіопередачі, оскільки поєднує просторове та часове рознесення. Відносні втрати щодо сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM модуляцій для 2×4 у 4-5 разів менші, ніж 2×2-MIMO-OFDM-системи.

## 3 РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### 3.1 Розрахунок можливої зони покриття системи

Зробимо розрахунок дальності зв'язку між антеною базової станції (BS-AU) та абонентського блоку (SU) на стороні абонента. Оцінити очікувану дальність зв'язку між блоками AU та SU системи.

Вихідні дані для розрахунку:

- пристрій доступу (AU);
- потужність передавача – 28 дБм;
- мінімальний поріг рівня на вході приймача – 68 дБм;
- частота прийому – 3,5 ГГц;
- частота передачі – 3,5 ГГц;
- загасання у фільтрах та антенних роздільниках – 15дБ;
- діаграма спрямованості антени – 60°;
- коефіцієнт підсилення антени БС – 11 дБ;
- висота розташування антени – 40 м;
- блок фіксованого абонентського доступу (FAU);
- діаграма спрямованості – 6,1°;
- коефіцієнт підсилення антени – 13,5 дБм;
- висота приймальної антени (FAU) – від 3 до 10 м;
- напруженість поля, при якій забезпечується достатня якість прийому, дорівнює 53 дБ.

Визначимо зону покриття однієї БС за методикою розрахунку, яка ґрунтується на даних про поширення радіохвиль над середньопересіченою місцевістю. У розрахунку наведено криві розповсюдження радіохвиль, які покладено основою методу розрахунку (рисунок 3.1).

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

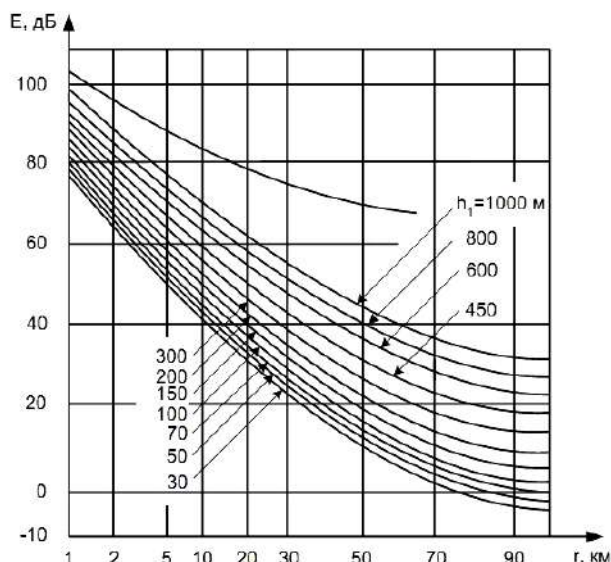


Рисунок 3.1 – Криві розповсюдження радіохвиль над поверхнею землі у міській зоні

Дані криві побудовані при використанні передавача потужністю 1 кВт, який створює в пунктах прийому на відстані  $r$ , напруженість поля  $E$ , що відповідають перетину вертикалі з кривою висоти, що передає антени. Але реальні характеристики передавачів відрізняються від прийнятих у кривих, тому вводяться поправочні коефіцієнти, а загальна розрахункова формула має вигляд [7]:

$$E = E_C + B_{P.H.} + B_{\phi} + B_{h_2} + B_{PEЛ} + (\alpha \cdot l) - D_{RPU} - D_{FAU} + B_{\theta}, \quad (3.1)$$

де  $E_C$  – напруженість поля сигналу, необхідна отримання заданих показників.  $E_C$  дана в технічній документації до обладнання,  $E_C = 53$  дБ;

$B_{P.H.}$  – поправка, яка враховує відмінність номінальної потужності передавача від потужності 1 кВт, прийнятої для кривих, дБ;

$B_{\phi}$  – загасання в резонаторних, мостових фільтрах та антенних роздільниках,  $B_{\phi} = 7$  дБ;

$B_{h_2}$  – поправка, що враховує висоту приймальної антени, дБ;

$B_{\text{рел}}$  – поправка, що враховує рельєф місцевості, дБ;

$\alpha \cdot 1$  – згасання у фідері передавальної та приймальної антени, дБ. У цьому вся типі устаткування немає, т.к. з'єднання з блоком RPU відбувається за допомогою цифрової лінії з'єднання HDSL;

$D_{\text{AU}}$  – коефіцієнт посилення антени БС RPU,  $D_{\text{RPU}} = 11$  дБ;

$D_{\text{SU}}$  – коефіцієнт посилення антени абонентського обладнання AU,  $D_{\text{SU}} = 13,5$  дБ;

$B_{\theta}$  – поправка, що враховує зменшення сприйнятливості перешкод у порівнянні з чотирьохвильовим штирем, дБ.

Визначимо поправку  $B_{\text{р.н.}}$  наступною формулою:

$$B_{\text{р.н.}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1000}{P_H}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1000}{0.316}\right) = 35 \text{ дБ}, \quad (3.2)$$

де  $P_H$  - номінальна потужність передавача,  $P_H = 316$  мВт.

Визначимо поправку  $B_{h_2}$ , що враховує висоту приймальної антени відмінну від 1,5 м, за формулою:

$$B_{h_2} = 10 \cdot \lg\left(\frac{1.5}{h_2}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{1.5}{10}\right) = -8.2 \text{ дБ}, \quad (3.3)$$

де  $h_2$  – висота приймальної антени,  $h_2 = 10$  м.

Поправка, що враховує реальний рельєф місцевості у зоні дії системи радіодоступу визначається таким чином. Графіки залежності дальності зв'язку

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від напруженості поля при різних висотах передавальних антен БС складені на підставі статистичної обробки інформації про зміни за умов середньопересіченої місцевості. Середньопересіченою вважається така місцевість, де середнє коливання позначок висот з відривом 10-15 км від БС вбирається у 50 м. Графік визначення рельєфу місцевості, наведено на рисунку 3.2. Для визначення коливання рівня місцевості  $h$ , малюють рельєф місцевості і визначають коливання  $h$ . Коли  $\Delta h$  відрізняється від 50 м у ту чи іншу сторону, слід вносити поправки, що визначаються за графіками на рисунку 3.2а та рисунку 3.2б для  $r < 100$  км. Антена БС системи Breeze ACCESS має секторну конструкцію, один сектор має зону охоплення  $60^\circ$ , то для охоплення зони  $360^\circ$ , використовується шість секторів. Дальність зв'язку кожному секторі визначається з рельєфу місцевості, наявності будов, чи інших перешкод для проходження сигналу у прямій видимості.

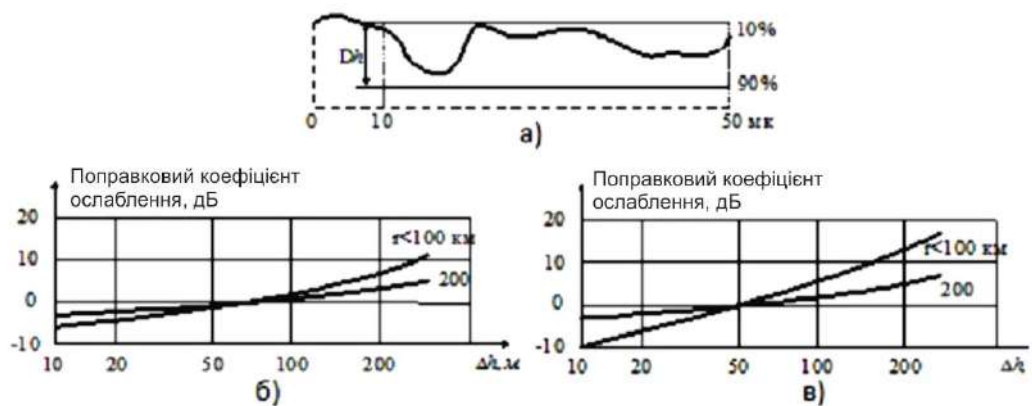


Рисунок 3.2 – Графіки визначення поправки, враховує рельєф місцевості:

а) рельєф місцевості; б) та в) графіки для визначення поправок

За графіками на рисунку 3.2 визначимо поправку  $V_{\text{рел}}$  з урахуванням рельєфу і будівель для кожного сектора:

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- перший сектор. Характеризується наявністю будов заввишки до 10 м-коду. Поправка  $\Delta h_5 = 10$  м. Поправка на рельєф  $V_{\text{рел}} = - 10$  дБ;

- другий сектор. Характеризується наявністю одно-двох поверхових будинків та наявністю дерев висотою до 10 м. Поправка  $\Delta h_2=10$  м. Поправка на рельєф,  $V_{\text{рел}} = - 10$  дБ;

- третій сектор. Характеризується наявністю одно-двох поверхових будинків та наявністю дерев висотою до 10 м. Поправка  $\Delta h_3=10$  м. Поправка на рельєф,  $V_{\text{рел}} = - 10$  дБ;

- четвертий сектор. Характеризується наявністю висотних будов (Висота до 28 м). Поправка  $\Delta h_5 = 28$  м. Поправка на рельєф  $V_{\text{рел}} = - 3$  дБ;

- п'ятий сектор. Характеризується висотою будівель до 10 м. відстані п'яти кілометрів починається передгір'я, висота місцевості досягає 100 м, щодо рівня розташування БС. Виправлення  $\Delta h_4=100$  м. Поправка на рельєф  $V_{\text{рел}} = 7$  дБ;

- шостий сектор. Характеризується переважанням у зоні радіоохоплення п'яти поверхових будівель з відривом до 5 км. Всі будівлі та дерева на більш дальню відстань не перевищують 14 м. Поправка  $\Delta h_1=15$  м. Поправка на рельєф  $V_{\text{рел}} = - 6$  дБ.

Розрахуємо поправку  $\Delta V_\theta$ , що враховує зменшення сприйнятливості до перешкод у порівнянні з чотирьохвильовим штирем:

$$\Delta V_\theta = 10 \cdot \lg\left(\frac{\theta_E}{360}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{6.1}{360}\right) = -17.7 \text{ дБ}, \quad (3.4)$$

де  $\theta_E$  – кут діаграми спрямованості приймаючої антени,  $\theta_E = 6,1^\circ$ . Підставляючи значення у формулу (3.1), визначимо напруженість поля, створюване передавальною базовою станцією (БС) у пункті прийому абонентської станцією:

для першого сектора:

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 - 10 - 11 - 13.5 - 17.7 = 34,6 \text{ дБ}$$

для другого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 - 10 - 11 - 13.5 - 17.7 = 34,6 \text{ дБ}$$

для третього сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 - 10 - 11 - 13.5 - 17.7 = 34,6 \text{ дБ}$$

для четвертого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 - 3 - 11 - 13.5 - 17.7 = 41,6 \text{ дБ}$$

для п'ятого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 + 7 - 11 - 13.5 - 17.7 = 51,6 \text{ дБ}$$

для шостого сектора:

$$E = 53 + 35 + 7 - 8.2 - 6 - 11 - 13.5 - 17.7 = 38,6 \text{ дБ}$$

За отриманим значенням напруженості поля створюваного БС в пункті прийому, визначимо дальність зв'язку для кожного сектора за графіком на рисунку 3.1.

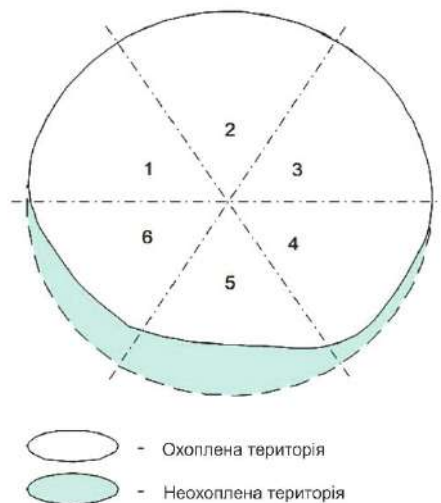


Рисунок 3.3 – Зони покриття кожної базової станції

Дальність зв'язку кожного сектора складає:

- на першому, другому і третьому – 20 км при  $E = 34,6$  дБ;
- на четвертому – 13 км при  $E = 41,6$  дБ;

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- на п'ятому – 8 км при  $E = 51,6$  дБ;
- на шостому – 17 км при  $E = 38,6$  дБ.

На рисунку 3.3 зображена дальність зв'язку на кожному секторі. Отримані результати можуть відрізнитись від реальних значень. Порівнюючи отримані дані дальності зв'язку можна визначити, що середня дальність зв'язку складає 16 км, що відповідає середній дальності зв'язку по технічній документації.

### 3.2 Сумарна ймовірність погіршення якості зв'язку

Сумарна ймовірність погіршення якості зв'язку через глибокі замирань сигналу, що обумовлюється в загальному випадку трьома причинами:

а) екранування перешкодами мінімальної зони Френеля при субрефракції радіохвиль  $T_0(V_{\min})$ ;

б) інтерференцією в точці прийому прямого променя та променів відбитих від шаруватих неоднорідностей тропосфери  $T_{\text{інт}}(V_{\min})$ ;

в) ослабленням сигналу через дощі  $T_{\text{д}}(V_{\min})$ .

Таким чином [7]:

$$T_{\text{np}}(V_{\min}) = T_0(V_{\min}) + T_{\text{інт}}(V_{\min}) + T_{\text{д}}(V_{\min}), \quad (3.5)$$

Визначаємо середнє значення просвіту:

$$H(g) = H(0) + \Delta H(g), \quad (3.6)$$

$$\Delta H(g) = -\left(R_0^2 / 4\right)g \cdot k(1 - k),$$

$$\Delta H(g) = -\left(39 \cdot 10^3\right)^2 / 4 \cdot \left(-10 \cdot 10^{-8}\right) \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 9,51 \text{ м},$$

$$\Delta H(g) = 23,14 + 9,51 = 32,65 \text{ м},$$

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо середнє значення просвіту:

$$P(g) = \frac{H(g)}{H_0} = \frac{32.65}{22.66} = 1.44, \quad (3.7)$$

Імовірність погіршення якості зв'язку через екранування перешкодою мінімальної зони Френеля при субрефракції радіохвиль залежить від форми верхньої частини перешкоди. Для уніфікації розрахунків прийнято апроксимувати перешкоду будь-якої форми сферою. Параметр  $\mu$ , що характеризує апроксимуючу сферу, визначають наступним чином: проводять пряму АВ паралельно радіопроменю на відстані  $\Delta y = H_0$  від вершини перешкоди та з профілю знаходять ширину перешкоди  $r = R_0 = 39$  км.

$$\mu = \sqrt[3]{k(1-k) \cdot l \cdot \sqrt[6]{64 \cdot \pi \alpha / 3}}, \quad (3.8)$$

де  $l = r/R_0 = 39/39 = 1$ ;

$\alpha = \Delta y/H_0 = 1$

$$\mu = \sqrt[3]{0.5 \cdot 0.5 \cdot \sqrt[6]{64 \cdot 3.14 / 3}} = 0.79$$

Визначаємо множник ослаблення  $V_0$  за  $H(0)=0$  [1],  $V_0 = -18$  дБ.

Розрахуємо значення відносного просвіту  $p(g_0)$ , у якому настає глибоке завмирання сигналу, викликане екрануванням перешкодою мінімальної зони Френеля.

$$p(g_0) = \frac{V_0 - V_{\min}}{V_0}, \quad (3.9)$$

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$p(g_0) = \frac{-18 - (-33.67)}{-18} = -0.87.$$

Розрахуємо параметр  $\Psi$ :

$$\Psi = 2.31 \cdot A [p(g) - p(g_0)], \quad (3.10)$$

$$A = 1/\sigma \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{R \cdot k(1-k)}},$$

$$A = 1/10,5 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{15,8 \cdot 10}{(39 \cdot 10) \cdot 0,5 \cdot 0,5}} = 0,983,$$

$$\Psi = 2.31 \cdot 0,983 \cdot [1,44 - (-0,87)] = 5,3.$$

Визначаємо значення  $T_0(V_{\min})$  [2],  $T_0(V_{\min}) \approx 0\%$ .

Розрахунок величини  $T_{\text{інт}}(V_{\min})$  на пересіченому прольоті визначається лише завмираннями через відображення радіохвиль від шаруватих неоднорідностей тропосфери.

$$T_{\text{інт}}(V_{\min}) = V_{\min}^2 \cdot T(\Delta\varepsilon), \quad (3.11)$$

де  $V_{\min}$  – у відносних одиницях;  $V_{\min} = -33,67$  дБ;

$$V_{\min}^2 = 4.3 \cdot 10^{-4}$$

$$T(\Delta\varepsilon) = 4.1 \cdot 10^{-4} \cdot \xi \cdot R_0 \cdot \sqrt{f}, \quad (3.12)$$

де  $\xi = 1$  для сухопутних трас;

$R_0$  – у кілометрах;

$f_0$  – у гігагерцях.

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

$$T(\Delta\varepsilon) = 4.1 \cdot 10^{-4} \cdot 39^2 \cdot \sqrt{1.9} = 1.63 \%$$

$$T_{инт}(V_{\min}) = (4.3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 1.63 = 3 \cdot 10^{-7} \%$$

Гранично допустима інтенсивність дощу  $J$  для цього прольоту визначається за відомим значенням  $V_{\min} = -33,67$  дБ, таким чином,  $J > 190$  мм/год.

За знайденою інтенсивністю дощу визначаємо  $T_d(V_{\min}) \approx 0,00014 \%$ .

Сумарна ймовірність погіршення якості за формулою 3.6:

$$T_{пр}(V_{\min}) = 0 + 3 \cdot 10^{-7} + 14 \cdot 10^5 = 1,4 \cdot 10^{-4} \%$$

### 3.3 Розрахунок якісних показників

Розрахуємо якісні показники (категорію обслуговування для будь-якого часу дії та ймовірність обслуговування), що забезпечуються системою на вулицях мікрорайону, забудованого одно-двоповерховими і більше будинками, в зоні радіусом 10 км. Вихідні дані:

- частота прийому абонентської станції дорівнює 2 ГГц;
- номінальна чутливість приймача при співвідношенні сигнал\шум на виході 20 дБ,  $G_h = 15$  мкВ;
- смуга частот телефонного каналу дорівнює 0,3-3,4 кГц;
- загальне згасання елементів антенно-фідерних пристроїв,  $V_{ф.пер} = 9.7$  дБ;
- вихідна номінальна потужність передавача,  $P_n = 30$  Вт ( $P_n = 14,8$  дБ);
- висота антени базової станції над нульовою позначкою місцевості,  $h_{01} = 210$  м;
- висота приймальної антени абонентського терміналу над рівнем землі,  $h_2 = 2$  м;

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ширина лінії пропускання приймача,  $\Pi_{пр}=25$  кГц;
- довжина фідера приймальної антени (РК-75-7-11),  $l_{ф.пр} = 4$  м;
- довжина фідера передавальної антени (РК-75-7-11),  $l_{ф.пер} = 50$  м;
- середня висота будівель,  $h_{зд} = 20$  м;
- середня ширина вулиць,  $2b = 30$  м.

Переважними на зазначеній частоті є індустриальні перешкоди. Середнє ефективне значення напруженості поля індустриальних перешкод визначаємо за формулою[7]:

$$E_{i.эф} = (E_i + 0,115\sigma_E^2)_{i3} + 10\lg \Pi_{np} - 20\lg \Pi_{i3} + 10\lg F_i - 2,7, \quad (3.13)$$

$$E_{i.эф} = 9 \text{ дБ} = 3 \text{ мкВ/м}.$$

Визначаємо напруженість поля сумарних перешкод за формулою [7]:

$$E_{i.эф} = 10\lg \left[ E_{i.эф}^2 + E_{n.эф}^2 + E_{к.эф}^2 + \frac{G_H^2 (\alpha l)_{np}^2}{(S/N)_{np.сх}^2 \cdot h_{д.пр}^2} \right], \quad (3.14)$$

Іншими видами перешкод у порівнянні з індустриальними нехтуємо.

$$P_{\partial} = P_n - B_{ф.пер}, \quad (3.15)$$

$$B_{ф.пер} = B_{ф} + B_n + (\alpha l_{ф})_{пер} - \sigma_{пер}, \quad (3.16)$$

де  $B_{ф.пер} = 1$  дБ;

$(\alpha l_{ф})_{пер} = 9$  дБ;

$\alpha = 0,18$  дБ/м;

$\sigma_{пер} = 3$  дБ.

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначаємо потужність базової станції, що ефективно випромінюється:

$$P_{\text{дД}_y} = 14,8 - 9,4 = 5,4 \quad (3.17)$$

Визначаємо напруженість поля, створювану базовою станцією в найбільш характерні пункти прийому на межі зони обслуговування. Для прийому на відкритих площах використовують формулу:

$$E_{c.o.} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60. \quad (3.18)$$

Коефіцієнти якого визначають за номограмою на рисунку 3.4.

$K_2$  знаходимо за сімейством кривих четвертого квадранта для  $P_{\text{дД}_y} = 0,0035$  кВт та наведеної висоти передавальної антени:

$$h_1 = h_{01} - h_{02} - h_{3\text{д}} = 201 - 140 - 20 = 50, \quad (3.19)$$

інтерполюючи між кривими 0,003 та 0,004, визначаємо  $K_2 = 11$  дБ.

$K_3$  знаходимо за графіком другого квадранту для зони радіусом дії  $r = 10$  км:  $K_3 = -40$  дБ.

$K_4$  знаходимо за сімейством кривих третього квадранту для  $\lambda = 1,72$  м і  $h_2 = 2$  м:  $K_4 = 7$  дБ.

$\Delta E_n$  визначимо за графіком (рисунок 3.5),  $\Delta E_n = -3$  дБ. Підставляючи знайдені коефіцієнти формулу (3.18), отримуємо:

$$E_{c.o.} = 11 - 40 + 7 - 3 + 60 = 35 \text{ дБ.}$$

Для прийому на радіальних вулицях використовуємо формулу:

$$E_{cp} = M_1 + M_2 + M_3 + \Delta E_n + 60. \quad (3.20)$$

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнти визначаємо за номограмою на рисунку 3.6.

$M_1$  знаходимо по сімейству кривих першого квадранта: для  $Z = h_{зд} - h_2 = 18\text{м}$  і  $b = 22,5\text{ м}$ , інтерперуючи між кривими 20 і 25, визначаємо  $M_1 = 20\text{ дБ}$ .

$M_2 = 40\text{дБ}$  визначаємо за сімейством кривих четвертого квадранта для  $P_{дД} = 0,0035\text{ кВт}$  і  $h = 50\text{м}$ .

$M_3 = -44\text{дБ}$  визначаємо по кривій третього квадранта для зони дії радіусом  $r = 10\text{ км}$  та висоти приймальної антени  $h_2 = 2\text{ м}$ .  $\Delta E_{п} = -2\text{дБ}$ .

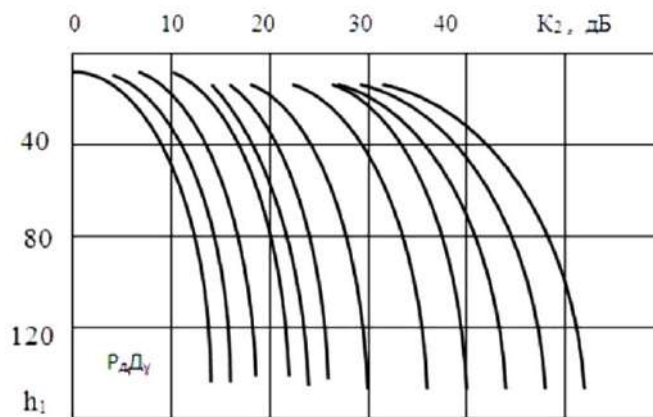


Рисунок 3.4 – Номограма визначення  $K_2$

Підставимо знайдені коефіцієнти у формулу (3.20), отримуємо:

$$E_{с.р.} = -20 + 40 - 44 - 2 + 60 = 34\text{ дБ.}$$

Для прийому на поперечних вулицях використовуємо формулу:

$$E_{с.н.} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60. \quad (3.21)$$

Коефіцієнти якого визначаємо за номограмою на рисунку 3.4:

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$K_1 = -18$  дБ;  $K_2 = -16$  дБ;  $K_3 = 11$  дБ;  $K_4 = -40$  дБ;  $\Delta E_{\text{п}} = -3$  дБ.

Підставимо знайдені значення у формулу (3.19):

$$E_{c.n.} = -16 + 11 - 40 - 3 + 60 = 12 \text{ дБ.}$$

Визначаємо значення захисного відношення  $R_{\text{д}}$ . Для відкритих площ:

$$R_{\text{д0}} = E_{c0} - E_{i.eф} = 35 - 9,6 = 25,4 \text{ дБ.} \quad (3.22)$$

Для радіальних вулиць:

$$R_{\text{д.p}} = E_{c.p.} - E_{i.eф} = 34 - 9,6 = 24,4 \text{ дБ.} \quad (3.23)$$



Рисунок 3.5 – Номограми розрахунку напруженості поля

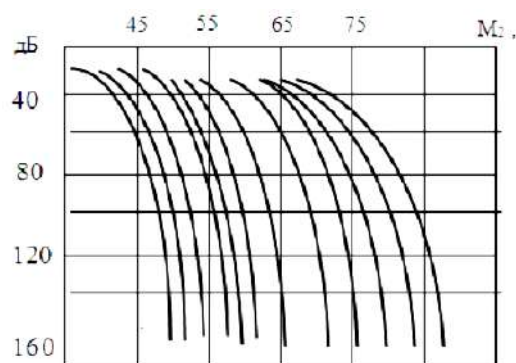


Рисунок 3.6 – Номограма визначення  $M_2$

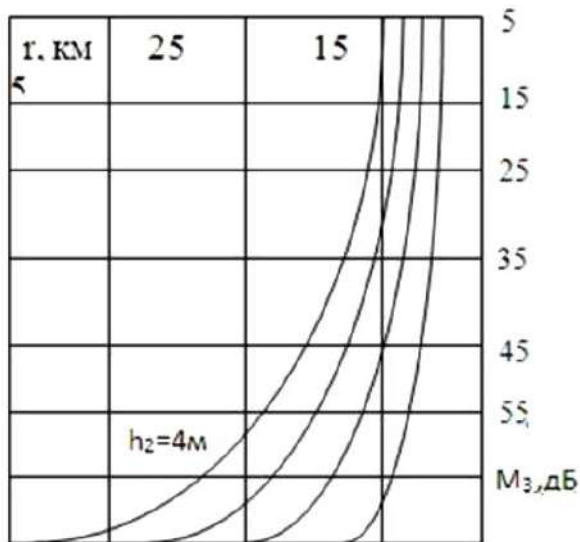


Рисунок 3.7 – Номограма визначення  $M_3$

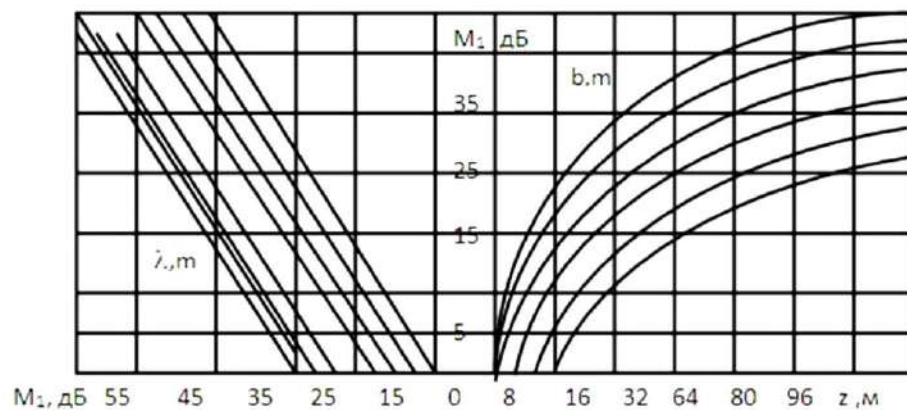


Рисунок 3.8 – Номограма визначення  $M_1$

Для поперечних вулиць:

$$R_{д.н.} = E_{с.н} - E_{i.еф} = 12 - 9,6 = 2,4 \text{ дБ.} \quad (3.24)$$

Визначаємо категорію обслуговування, що забезпечується базовою станцією на межі зони обслуговування для 70% пунктів та довільно обраного часу дії 90%. В результаті розрахунку отримані наступні значення  $R_d$ , дБ:

- для передачі даних – 14,7;
- для передачі промови – 31,7;
- для відкритих площ  $R_d > R_{\min}$  (25,4 >> 14,7);
- для радіальних вулиць  $R_{д,р} > R_{\min}$  (24,4 >> 14,7);
- для поперечних вулиць категорія обслуговування незадовільна.

Тому визначимо максимальну відстань, на якій забезпечується задана категорія обслуговування. Для цього знаходимо рівень сигналу, який забезпечить у пункті прийому категорію обслуговування 90% розбірливості при  $R_{д,хв} = 14,7$  дБ:

$$E_{c.n.}^1 = E_{i.eф} + R_{д.мін} = 9.6 + 14.7 = 24.3 \text{ дБ}, \quad (3.25)$$

$$K_{зн} = E_{c.n.} - K_1 - K_2 - \Delta E_n - 60 \text{ дБ}, \quad (3.26)$$

За умови  $E_{c.п} = 24,3$  дБ визначаємо:

$$K_{зн} = 24,3 + 16 - 11 + 3 - 60 = -27.7 \text{ дБ},$$

А за рисунком 3.4 (другий квадрант) знаходимо відстань, що шукається  $r = 5.5$  км Побудуємо графік залежності  $R_{д0} > R_{д\min}$  від  $\alpha_2$ , де  $\alpha_2$  – час дії %. Для побудови графіка складемо таблицю 3.1, де  $R_{д} = E_c - E_{п.}$

Таблиця 3.1 – Отримані дані

$\alpha_2$ %	Захисне відношення сигнал/перешкода, дБ		
	Для площ	Для радіальних вулиць	Для поперечних вулиць
50	30,9	29,9	20,2
70	28,4	27,4	17,7
90	25,4	24,4	14,7
95	23,9	22,9	13,2

Рішення, представлене на рисунку 3.4, отримано за умов деякої невизначеності, що з допущенням сталості сигналу у часі, наближеною оцінкою рівня перешкод і параметрів технічної системи. У зв'язку з цим результати розрахунку слід розглядати з урахуванням певної ймовірності реалізації на практиці – ймовірності обслуговування.

Ймовірність обслуговування визначається стандартними відхиленнями величин, що брали участь у розрахунку:  $\sigma_{c,t}$ , яка враховує завмирання в протягом тривалого часу, що визначаються за кривими, відповідно до рисунка 3.9 ( $\sigma_{c.50} = 0$ ;  $\sigma_{c.90} = 1,5$  дБ;  $\sigma_{c.99} = 5,5$  дБ);  $\Delta\sigma_t$ , яка враховує відхилення рівнів перешкод від середніх значень протягом тривалого часу ( $\Delta\sigma_{50} = 0$ ;  $\Delta\sigma_{90} = 5$  дБ;  $\Delta\sigma_{99} = 8$  дБ);  $\sigma_R$ , яка враховує невизначеність обраного значення  $R_d$  (вибираємо приблизно 2 дБ). Загальна невизначеність:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{cm}^2 + \Delta\sigma_t^2 + \sigma_R^2}. \quad (3.27)$$

Оскільки за взаємної незалежності ці значення мають нормальне розподіл ймовірності, то графік  $\sigma_T(\alpha_2)$  будують за трьома точками малюнок 16. Першою точкою кривої є величина  $\sigma_{50} = \sqrt{\sigma_R^2} = 2$  дБ. Другою точкою кривою можна вибрати, наприклад, величину  $\sigma_{90} = \sqrt{\sigma_{c90}^2 + \Delta\sigma_{90}^2 + \sigma_R^2} = 5.6$  дБ. Третя точка кривої, наприклад, має значення  $\sigma_{99} = \sqrt{\sigma_{c99}^2 + \Delta\sigma_{99}^2 + \sigma_R^2} = 9.9$  дБ.

Можливість обслуговування визначається залежно від нормованого аргументу – відсотка часу дії  $t_a = (R_{d70} - R_{d50})/\sigma$ , де  $R_t$  визначається за таблицею 3.1, а  $\sigma_T$  – на рисунку 3.10.

Так, якщо  $R_{d70} = 28,4$  дБ;  $R_{d50} = 30,9$  дБ, а  $t_{70} = 3$  дБ, то  $t_a = (R_{d70} - R_{d50})/\sigma_T = -0,83$ , а можливість обслуговування дорівнює 0,2, тобто

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

чим більший час дії, тим менша ймовірність обслуговування при постійному сигналі.

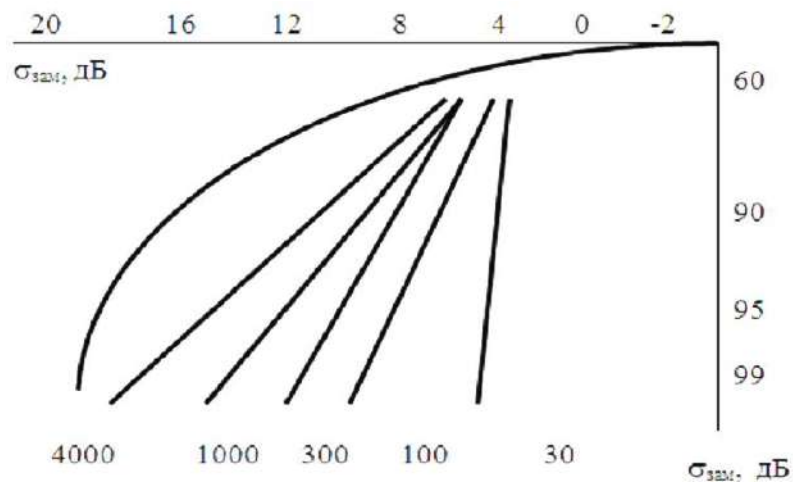


Рисунок 3.9 – Графіки завмирань за Буллінгтоном

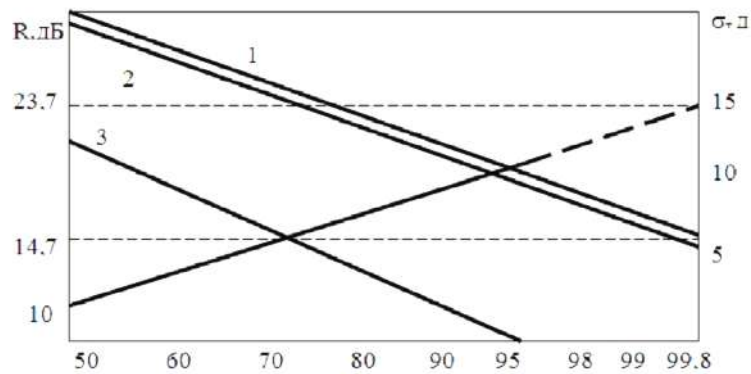


Рисунок 3.10 – Розрахункові значення захисних відносин на поперечних вулицях (1 – на відкритих майданчиках; 2 – на радіальних вулицях; 3 – сигнал/завада)

### 3.4 Розрахунок пропускної спроможності системи

Відмінною та позитивною особливістю системи є наявність параметрів QoS (Quality of Service) – параметрів якості послуги, які можна регулювати.

QoS складається з: CIR (Committed Information Rate) гарантованої смуги пропускання та MIR (Maximum Information Rate) – максимальної швидкості передачі. Саме QoS як властивість системи дозволило реалізувати VoIP (Voice over Internet Protocol) – передачу голосу без втрати якості, що зазвичай вважається проблемою.

Для стиснення мови в системі використовуються кодеки G.711 (64 кбіт/с), G.729 (8 Кбіт/с) та G.723.1 (6,3 кбіт/с).

Крім того, наявність CIR дозволяє планувати ємність системи в у разі перевищення фізичних можливостей мережі. Так, якщо кількість користувачів в осередку – соті перевищує фізичні можливості БС у 10 разів, то можливість досягнення значення CIR, тобто. отримання абонентом гарантованої смуги пропускання, що дорівнює 97%. Таким чином, для БС на 6 секторів кількість користувачів з CIR=64 кбіт/с та MIR=128 кбіт/с діапазоні 2,4 дорівнює 960, а в діапазоні 3,5 дорівнює 1740, відповідно значенням 0,1 Ерланг на абонента.

У випадку, коли, наприклад, CIR = 512 К, а можливість досягнення CIR становить 99,5%, загальна кількість користувачів дорівнює 18 та 32 відповідно. При розподілі абонентів, коли, наприклад, у 20% користувачів CIR=256 кбіт/с, що мають 80% трафіку, а у 80% користувачів CIR=64 кбіт/с відповідно мають 20% трафіку, ємність системи 2,4 осередку з базовою станцією на 6 секторів становить близько 300 абонентських пристроїв. Ємність системи у діапазоні 3,5 ГГц за рахунок використання технології частотного дуплексу (FDD) вище, а максимальна кількість абонентів шляхом планування ємності системи та використання можливості спільної роботи трьох AU (Access Unit) – пристроїв доступу в одному секторі можна довести до 5220 абонентських пристроїв.

### 3.5 Оцінка необхідної кількості каналів та ймовірності втрати виклику

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Дана методика розрахунку заснована на методі динаміки моментів, що базується на тих же вихідних лінійних диференціальних рівняннях теорії безперервних марківських кіл, що описують зміну ймовірностей дискретних станів у безперервному часі, як і формула Ерланга. Метод передбачає агрегування станів однорідних та незалежних елементів системи на підставі того, що середня кількість  $E_i$  елементів, що знаходяться в  $i$ -му стані, є добуток загальної кількості елементів  $N(\sum E_i = N)$  на можливість  $p_i$  перебування у стані  $i$ .

В даному випадку елементами системи є абоненти, кожен з яких може бути в одному з двох станів: в пасивному 1 і в стан заняття другого каналу на час сеансу зв'язку (рис. 3.11).

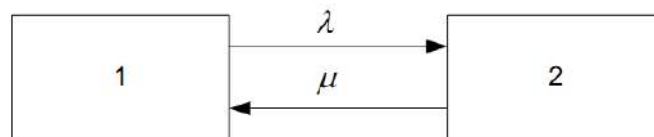


Рисунок 3.11 – Стан системи

Якщо  $\lambda$  та  $\mu$  – інтенсивності переходу одного абонента між станами 1, 2, то рівняння динаміки середніх мають вигляд:

$$\frac{dE_1}{dt} = -\lambda \cdot E_1 + \mu \cdot E_2. \quad (3.28)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \lambda \cdot E_1 - \mu \cdot E_2. \quad (3.29)$$

Звідси для режиму, що встановився:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{dE_2}{dt} = 0. \quad (3.30)$$

Таким чином, середня кількість зайнятих каналів дорівнює:

$$E_2 = N \cdot \rho \cdot (1 + \rho). \quad (3.31)$$

де  $\rho$  – наведена інтенсивність заявок

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3.32)$$

Нехай випадкова дискретна величина  $x_{ij}$  може приймати лише два значення:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } j\text{-й елемент знаходиться у стані } i \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}. \quad (3.33)$$

Ряд розподілу має для кожного  $j$  один і той самий вид:

- при  $x_i=0$ ,  $p_i = 1 - \rho_i$ ;
- при  $x_i = 1$ ,  $p_i = \rho_i$ .

Тут  $p_i$  – ймовірність перебування у стані  $i$ . Тому дисперсія чисельності стану  $i = 2$  є сумою  $N$  однакових значень дисперсії величини  $x_{ij} = x_i$ :

$$D[x_2] = (0 - p_2)^2 \cdot (1 - p_2) + (1 - p_2)^2. \quad (3.34)$$

$$D_2 = E_2 \cdot \left(1 - \frac{E_2}{N}\right) = N \cdot \rho \cdot (1 - \rho)^2. \quad (3.35)$$

Відповідно до «правила трьох сигм» практично можливе максимальне значення числа зайнятих каналів складає  $E_2 + 3 \cdot \sqrt{D_2}$  (звісно, у припущенні про нормальний розподіл числа зайнятих каналів). На цій підставі необхідне число  $n$  каналів для обслуговування  $N$  абонентів, кожен із яких створює в ЧПН навантаження  $\rho$ , виражається як:

$$n = \frac{N \cdot \rho + K \cdot \sqrt{N \cdot \rho}}{1 + \rho} \quad (3.36)$$

де  $K$  – коефіцієнт допустимості відмови, що визначається як значення аргументу (нормованого середнім квадратичним відхиленням) при відповідному значенні функції нормального розподілу.

Коефіцієнт  $K$  вибирається за умови допустимості відмови. При допустимості у середньому одного відмовитися від 70 викликів  $K=2,2$ . При допустимості у середньому одного відмови на 100 викликів  $K=2,31$ .

Коефіцієнт  $K$  вибирається за умови допустимості відмови. При допустимості в середньому однієї відмови на 70 викликів  $K=2,2$ . За допустимості в середньому однієї відмови на 100 викликів  $K=2,31$ .

Визначимо кількість необхідних каналів  $n$  на сполучній лінії між проектованою станцією EWSD та мережею СТОП для 1000 абонентів:

$$n = \frac{1000 \cdot 0,05 + 2,31 \cdot \sqrt{1000 \cdot 0,05}}{1 + 0,05} \approx 63 \text{ каналів.}$$

Для оцінки точності формули порівняємо результати обчислень з результатами обчислень, обчислених за першою формулою Ерланга. Таке зіставлення зробимо для  $\rho = 0,05$  (тобто для навантаження одного абонента 0,05

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ерл), результати показали, що різницю між двома методами розрахунку становить 14%.

Розрахуємо можливість втрати виклику. Для певних вище (за методом динаміки середніх) математичного очікування  $E_2$  та дисперсії  $D_2$  та відповідно до припущення про нормальний розподіл випадкової чисельності стану ймовірність відмови  $P_{OTK}$  можна виразити через інтеграл Лапласа:

$$\Phi(y) = \left( \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot \int_0^y \exp \cdot \left( \frac{-t^2}{2} \right) \cdot dt. \quad (3.37)$$

Тобто, ймовірність перевищення такою випадковою величиною значення  $n$ , або перевищення відхилення від середнього  $E_2 = \frac{N \cdot \rho}{1 + \rho}$  величини  $n - E_2$ :

$$P_{OTK} \approx 1 - 2 \cdot \Phi n \cdot \left[ \frac{1 + \rho}{\sqrt{N \cdot \rho} - \sqrt{N \cdot \rho}} \right]. \quad (3.38)$$

Підстановка дає можливість відмови  $P_{OTK}$ :

$$P_{OTK} \approx 1 - 2 \cdot \Phi[K]. \quad (3.39)$$

Помилка складає:

$$\Delta P_{OTK} = P_{OTK} - P_n. \quad (3.40)$$

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $P_n$  відповідає ймовірності втрат за першою формулою Ерланга та визначається лише помилкою  $\Delta n$  за формулою (3.38), а також помилкою, пов'язаною з припущенням про нормальний розподіл чисельності стану.

Вплив помилки  $\Delta n$  на похибку визначення  $P_{отк}$  можна оцінити з порівняння з обчисленнями за першою формулою Ерланга при  $K = 2,2 \dots 2,31$  (тобто для  $P_{отк}=0,01\dots0,014$ ),  $N \geq 20$  та значеннях  $0,04 \leq \rho \leq 0,1$ , характерних для навантаження, яке створюється в ЧПН середнім абонентом квартирному телефону. В зокрема,  $\Delta P_{отк} < 0,03 P_n$  для  $\Delta n=(0,01\dots0,015)n$  та похибка визначення  $P_{отк}$  через помилку оцінки  $n$  порядку  $1\dots1,5\%$  становить менше  $7\%$  або за абсолютного значення  $\Delta P_{отк} < 0,0004$ . Отже, суттєвою може бути лише похибка, що вноситься припущенням про нормальний закон розподілу.

### 3.6 Оцінка похибки щодо збіжності розподілів

Відповідно до наведеного вище ряду розподілу величини  $x_{ij}$  розподіл суми  $N$  незалежних випадкових величин вважається біномним і тому вірна наступна оцінка:

$$P(|n - E_2| \geq K \cdot \sqrt{D_2}) \leq \frac{4}{(9 \cdot K)^2}. \quad (3.41)$$

У правій частині нерівності відсутня параметр  $N$ , тому навіть за  $N < 10$  можливість перевищення числом  $|n - E_2|$  величини  $K \cdot \sqrt{D_2}$  для  $K = 2,2 \dots 2,31$  та  $\rho = 0,05\dots0,1$  становить не більше  $0,042\dots0,046$ . Зі зростанням  $N$  біномне розподіл швидко прагне нормального. Ступінь наближення нормальному розподілу визначається близькістю величини ексцесу нульового значення.

						КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
							58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

На рисунку 3.12 показано (у логарифмічних шкалах) зміну максимального значення ексцесу. Графік відповідає ймовірності не менше 0,015 дзвінка від одного абонента протягом середньої тривалості розмови. При збільшенні  $N$  від 10 до 1000 величина ексцесу наближається до нульового значення ексцесу нормального розподілу (зменшується з шести до 0,06), тобто «гостроверхість» симетричної кривої щільності біномного розподілу практично зникає.

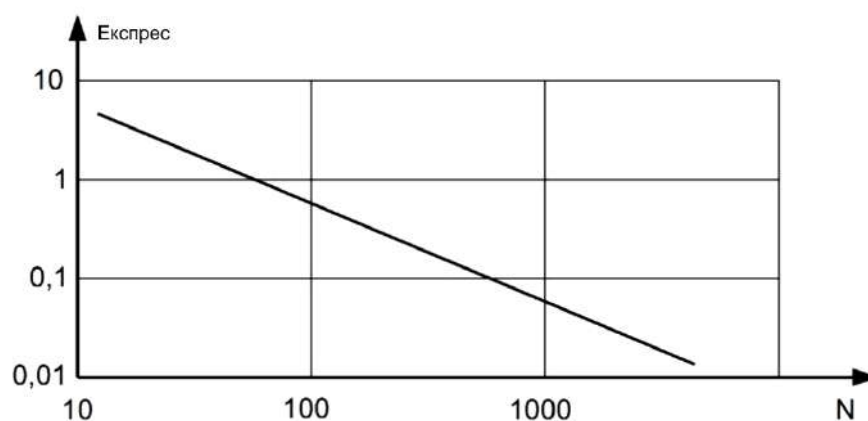


Рисунок 3.12 – Графік зміни максимального значення ексцесу

Таким чином, як формулу (3.36) для числа каналів, так і наближену формулу (3.37) для ймовірності втрати виклику можна вважати прийнятними з точністю близько 1% (причому останню для практичних випадків, коли розглядаються тисячі та десятки тисяч абонентів).

### 3.7 Розрахунок затримок під час передачі промови

Повідомлення впорядковано за часом їх надходження у черзі. Після того як у каналі закінчується передача чергового повідомлення, то керування переходить до програми «Приворотник». Програма вибирає повідомлення з найвищим пріоритетом для чергової передачі, якщо черги старші пріоритетів

виявляються порожніми. Вибране повідомлення для передачі захоплює канал весь час його передачі. Якщо систему надходить  $N$  найпростіших потоків повідомлень з інтенсивністю  $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ , середні тривалості передачі повідомлень кожного типу дорівнюють  $\tau_1, \dots, \tau_N$ , та другі початкові моменти відповідно рівні  $\tau^{(2)}_1, \dots, \tau^{(2)}_N$ , то середній час очікування у черзі повідомлень  $t_k$ , які мають пріоритет  $K$ , визначається співвідношенням:

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \tau_i^{(2)}}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)}. \quad (3.42)$$

$$R_{k-1} = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_{k-1}$$

$$R_k = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_k$$

$$t_k = \frac{2 \cdot 0,01}{2(1 - 0,18)(1 - 0,2)} = \frac{0,02}{1,64 \cdot 0,8} = \frac{0,02}{1,312} = 0,015 \text{ с.}$$

Отримаємо співвідношення середньоквадратичного відхилення часу передачі повідомлення:

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \tau_i (1 + \tau_i^2)}{2(1 - R_{k-1})(1 - R_k)}. \quad (3.43)$$

де  $k = 1, 2, \dots, N$

$$t_k = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} (1 + 1^2)}{2(1 - 0,18)(1 - 0,2)} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1,312} = 3,048 \cdot 10^{-3} = 0,003 \text{ с.}$$

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Даний алгоритм затримок повідомлень при передачі мови представлений на рисунку А1 у додатку.

### Висновки до 3 розділу

Проведено розрахунок можливої зони покриття системи. Зроблено розрахунок дальності зв'язку між антеною базової станції (BS-AU) та абонентського блоку (SU) на стороні абонента. Оцінено очікувану дальність зв'язку між блоками AU та SU системи.

Розраховано якісні показники (категорію обслуговування для будь-якого часу дії та ймовірність обслуговування), що забезпечуються системою на вулицях мікрорайону, забудованого одно-двоповерховими і більше будинками, в зоні радіусом 10 км. Оцінено необхідну кількість каналів та ймовірності втрати виклику

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

## ВИСНОВКИ

У цій кваліфікаційній роботі розглянуто характеристики радіодоступу на базі технології LTE, а також деякі варіанти розширення мережі абонентського доступу міської телефонної мережі за допомогою використання системи радіодоступу. В даний час тема проекту є актуальною, і відповідає фактичним складностям у сфері телефонізації та технології мереж. Також у роботі розглянуті актуальність та переваги мереж LTE, порівняння з мережами попередніх поколінь.

Технічне рішення складається з радіочастини, тобто базових станцій, та опорної мережі, яка розгорнута на базі сервісних та пакетних шлюзів, сервера з базою абонентів, сервера управління мобільністю та сервера політик. Ядро мережі сформовано з урахуванням подальшого зростання, за необхідності кількість радіосайтів може бути сміливо збільшено в 10 разів без ризику перевантажити трафіком опорну мережу. Що стосується покриття, то радіус стільники БС при роботі мережі в діапазоні 700 МГц в умовах міської забудови може становити близько 2 км (залежно від трафік-моделі), а в умовах менш щільної забудови або сільській місцевості збільшитися до 5-10 км за аналогічних із міськими параметрами використання трафік-моделі абонентів.

У ході експериментальних даних досліджено структурну схему імітатора радіопередачі. Для цього було реалізовано програмну реалізацію MIMO каналу в середовищі програми Simulink. Також досліджено завадостійкість зв'язку з двома конфігураціями  $N_t \times N_r$  ( $2 \times 2$  і  $2 \times 4$ ) передавальних та приймальних антен MIMO-OFDM-систем.

Відносні втрати щодо сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM модуляцій для  $2 \times 4$  у 4-5 разів менші, ніж  $2 \times 2$ -MIMO-OFDM-системи.

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гнатушенко, В.В. Системи супутникового та стільникового зв'язку : навч. посіб. / В.В. Гнатушенко, О.О. Дробахін, В.М. Корчинський. – Д.: РВВ ДНУ, 2012. – 80 с.
2. Проектування безпроводових стільникових мереж зв'язку [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів усіх форм навчання за напрямом підготовки 6.050903 «Телекомунікації» / НТУУ «КПІ» ; уклад.: В. В. Пілінський, П. В. Попович, С. М. Веретюк – Київ : НТУУ «КПІ», 2014. – 69 с.
3. Бойко Б. Р. Аналіз проблем впровадження мереж LTE // Тези науково-технічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка», СумДУ, 2021 р.
4. LTE Radio Planning Using Atoll Radio Planning and Optimization Software. Marwa Elbagir Mohammed, Khalid Hamid Bilal.
5. Description of Models and Tool, Coverage and Capacity Estimation of 3GPP Long Term Evolution radio interface. Abdul Basit, Syed.
6. How 4G Works [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://electronics.howstuffworks.com/4g.htm/printable>
7. Мобильная связь: стандарты, структура, алгоритмы, планирование. Лохвицкий М. С., Сорокин А. С., Шорин О. А., 2018. – 264с.
8. Системи рухомого зв'язку. Навчальний посібник / О. О. Семенова, А. О. Семенов, В. С. Белов. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 185 с.
9. Сайко В.Г., Амірханов Е.Д. Основи мережі цифрового радіозв'язку і радіодоступу нового покоління. – К.: ДУТ, 2015. – 77 с.
10. 4G vs LTE: What's the difference? [Електронний ресурс].– Режим доступу: <https://www.techadvisor.co.uk/feature/mobile-phone/4g-vs-lte-whats-the-differenceтри605656>

					КвРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

11. 4G LTE-Advanced Pro and The Road to 5G (Third Edition) / Erik Dahlman, Stefan Parkvall and Johan Skold – Academic Press – 2016. – 616 p.

12. LTE RF Planning [Електронний ресурс].— Режим доступу: <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/lte-radio-link-budgeting-and-rf-planning/lte-rf-planning>

13. LTE radio network deployment design in urban environments under different traffic scenarios // António Bernardo Barreiros de Alcobia, May 2017, 110 p.

14. Стеклов В.К., Беркман Л.Н. Телекомунікаційні мережі. Київ, Техніка, 2001р – 526 с.

15. Бортник Г.Г., Васильківський М.В., Кичак В.М. Транспортні телекомунікаційні технології : навч. посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 162 с.

16. Варукіна, Л.А. Технологія МІМО в системах LTE [Текст] / Л.А. Варукіна // Електрозв'язок. – 2009. – № 11. – С. 52-55.

17. Г.Г.Швачич, В.В.Толстой, Л.М.Петречук, Ю.С.Іващенко, О.А.Гуляєва, Соболенко О.В. Сучасні інформаційно-комунікаційні технології: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2017. –230 с.

18. Mathy Vanhoef and Frank Piessens. Predicting, decrypting, and abusing wpa2/802.11 group keys. In 25th USENIX Security Symposium, USENIX Security 16, 2016 – 673с.

					КВРТР.2019030.01.09 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## ДОДАТОК А

### Програма та алгоритм затримок повідомлень під час передачі мови

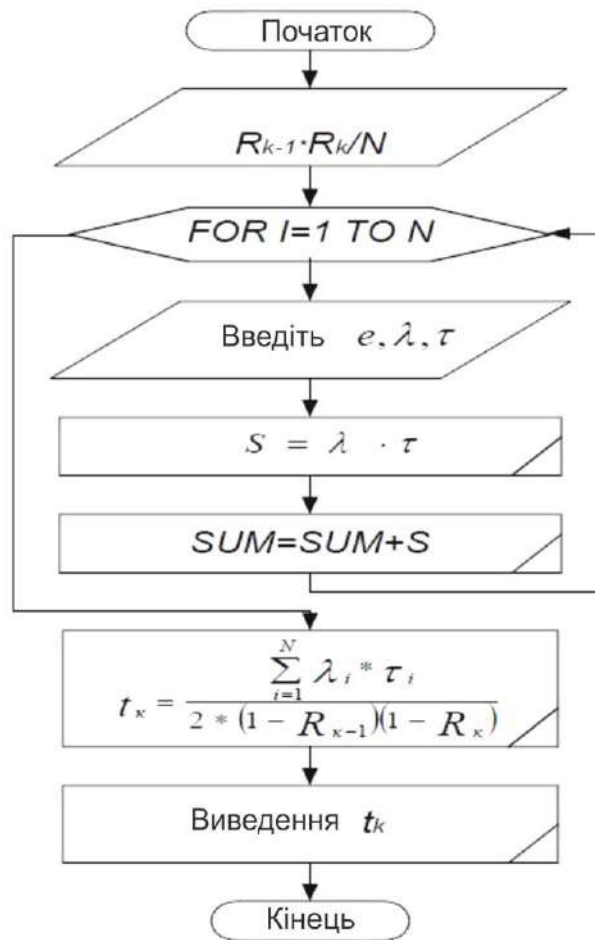
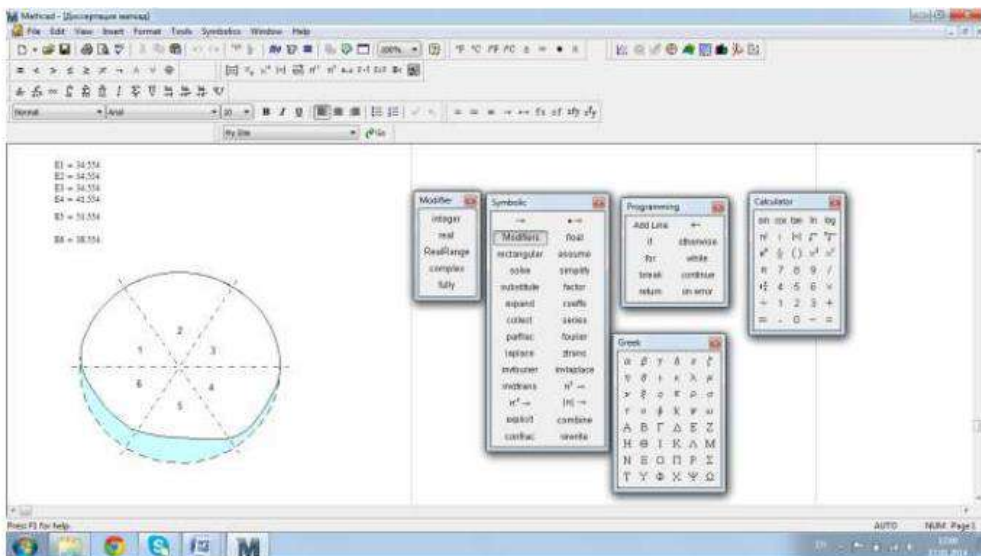
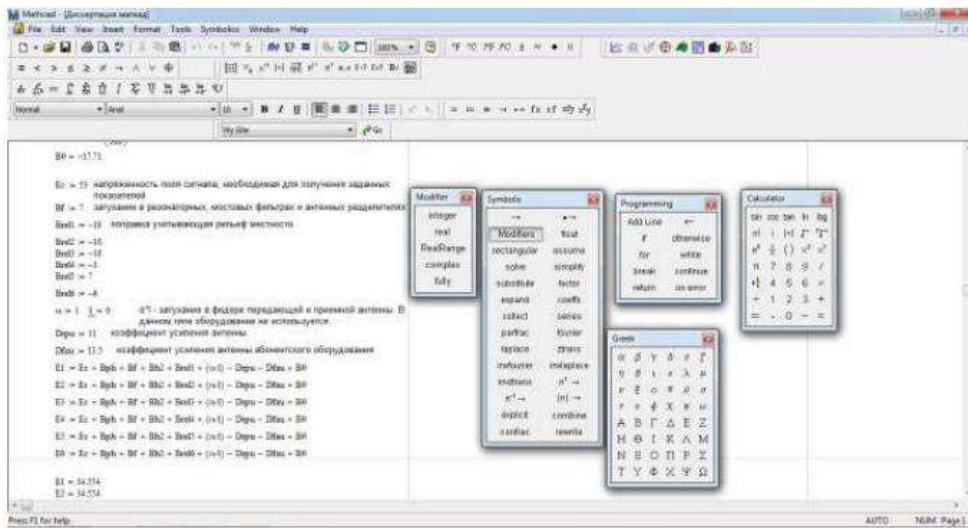
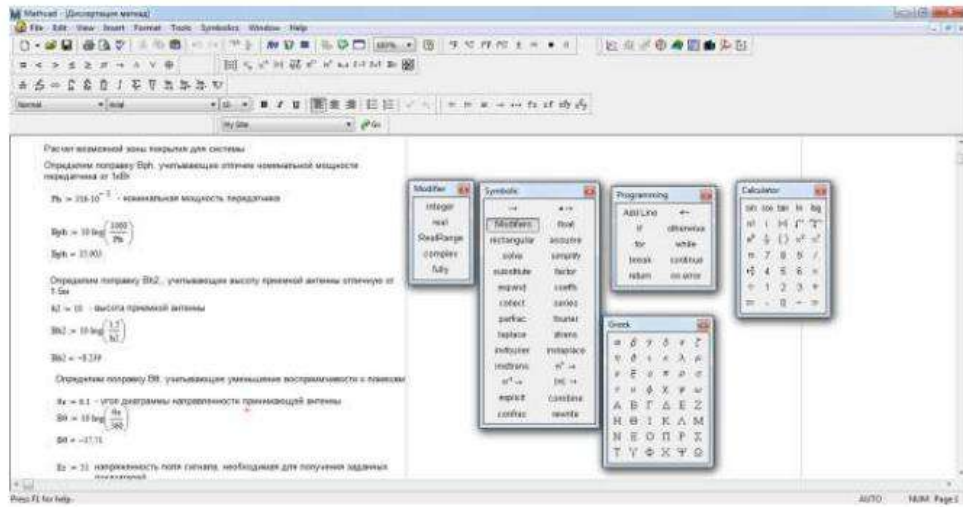


Рисунок А1 – Алгоритм затримок повідомлення

Відповідно до даного алгоритму розроблено програму, представлена нижче. 10 CLS 20 SUM = 0 30 INPUT "Введіть N"; N 40 INPUT "Введіть Rk:"; RK1 50 INPUT "Введіть Rk-1:"; RK2 60 FOR I = 1 TO N Закінчення програми А 70 INPUT "ВВЕДІТЬ ІНТЕНСИВНІСТЬ ПОТОКУ:"; L 80 INPUT "Введіть тривалість передачі:"; T 90 S = L \* T 100 SUM = SUM + S 110 NEXT I 120 TK = SUM / 2 \* (1 - RK2) \* (1 - RK1) 130 PRINT "Tk="; TK 140 END

# ДОДАТОК Б

## Лістинг програми MathCad



ФАКУЛЬТЕТ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

## ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОБІЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО ТЕХНОЛОГІЇ LTE

Виконав:  
студент групи ТР1с-19-1  
Снітко В.В.

Науковий керівник:  
кандидат військових наук, доцент  
Лужанський В.І.



## ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

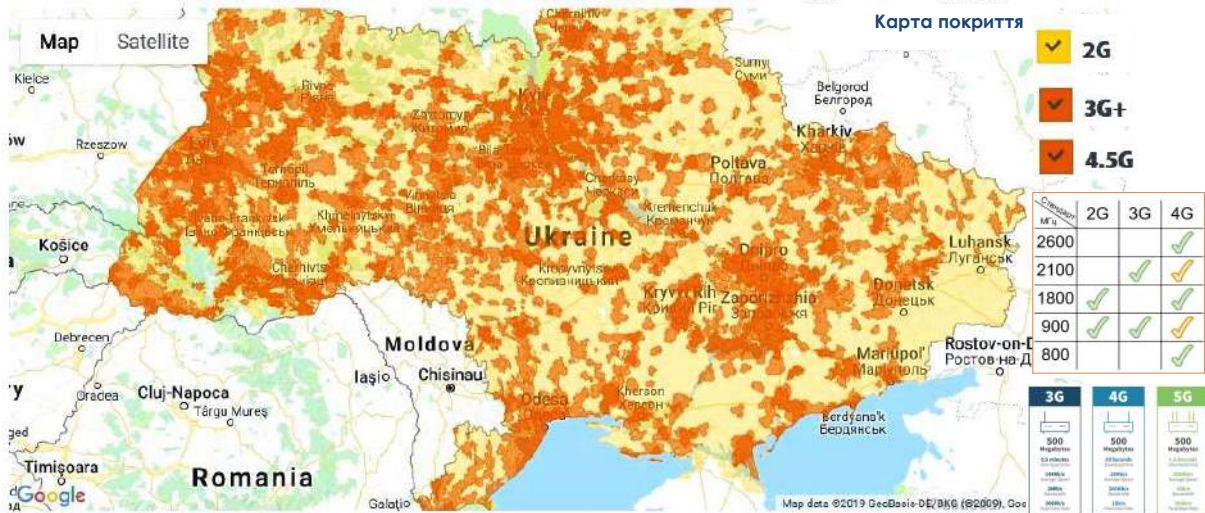
**Мета роботи:** дослідження якості мережі радіо доступу на базі LTE шляхом поліпшення параметрів при різних технологіях та стандартах

**Для досягнення цієї мети у роботі необхідно зробити наступне:**

- аналіз актуальності використання радіодоступу на базі технології LTE;
- розглянути принципи побудови, архітектуру та функції мережі;
- інформаційний огляд основних технологій та стандартів радіодоступу;
- провести аналіз основних параметрів MIMO;
- експериментальна оцінка роботи радіодоступу за різних технологіях та стандартах;
- здійснити розрахунок основних параметрів якості мережі радіодоступу.



# Стандарт 4G LTE в Україні



# Що таке LTE?

## Long Term Evolution

**LTE – система стільникового мобільного зв'язку.**  
Формально вона входить до числа мереж 3G.

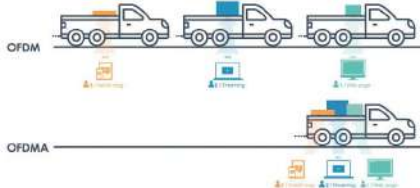
### Переваги LTE

- Знижена вартість за біт
- Збільшене надання послуг – більше послуг за меншу вартість з кращим користувацьким досвідом
- Гнучкість використання існуючих і нових діапазонів частот
- Спрощена архітектура, відкриті інтерфейси, забезпечте розумне споживання енергії терміналом

### Недоліки LTE

- LTE може підтримуватися не на всіх телефонах/пристроях

LTE використовує іншу форму радіоінтерфейсу (OFDMA / SC-FDMA замість CDMA)



### LTE проти 4G

**LTE не є синонімом 4G**

- **4G** швидкість до 1000 Мбіт/с.
- **LTE** швидкість ≈ 100 Мбіт/с при зовантаженні і 50 Мбіт/с при вивантаженні

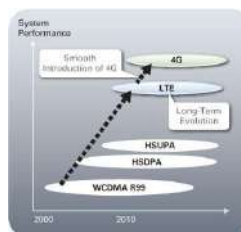


Рис. 1 - Дорожня карта до 4G

### Специфікація LTE та 3G/3.5G

	3G WCDMA (R99)	3.5G HSPA	LTE
Частота	Загальна частота, призначена для 3G		
Пропускна здатність	5 МГц		1,4/3/5/10/20 МГц
Радіодоступ	DS-SSMA		DL: OFDMA UL: SC-FDMA
Пікова швидкість висхідного зв'язку	384 кбіт/с	5,7 Мбіт/с	>50 Мбіт/с
Пікова швидкість низхідного зв'язку	384 кбіт/с	14 Мбіт/с	>100 Мбіт/с

## Еволюція системної архітектури (SAE) і розвинене ядро пакетів (EPC)

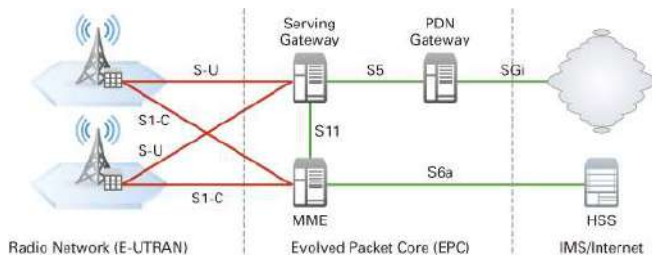


Рис. 1 - SAE (Еволюція системної архітектури)

### Основні підкомпоненти LTE EPC

#### MME - організація управління мобільністю

- MME є важливим вузлом контролера в мережі LTE. Він відповідає за:
- Відстеження UE (користувачського обладнання) в режимі очікування
  - Процедура пейджинга, наприклад повторна передача
  - Процес активації та дезактивації носія
  - Вибір S-GW для UE під час початкового приєднання
  - Передача всередину LTE з переміщенням вузла основної мережі
  - Аутентифікація користувача за допомогою HSS

#### SGW - шлюз обслуговування

- Основною функцією Serving Gateway є маршрутизація та пересилання пакетів даних користувача.
- Відповідає за хендовери між eNB у площині U та забезпечує мобільність між LTE та іншими типами мереж, наприклад між 2G/3G
- SGW зберігає інформацію про контекст, таку як параметри носія IP і інформацію про маршрутизацію, і зберігає контексти UE, коли відбувається пейджинг.
- Відповідає за відтворення користувачського трафіку для законного перехоплення.

#### PGW - шлюз PDN

Шлюз PDN є вузлом з'єднання між UE та зовнішніми мережами. Це точка входу трафіку даних для UE. Функції PGW :

- Забезпечення виконання політики
- Пакетна фільтрація
- Підтримка зарядки
- Законне перехоплення
- Скринінг пакетів

## Архітектура LTE



Мережа LTE складається з двох найважливіших компонентів:

- **мережа радіодоступу E-UTRAN**
- **базова мережа SAE (System Architecture Evolution) або EPC (Evolved Packet Core Network)**

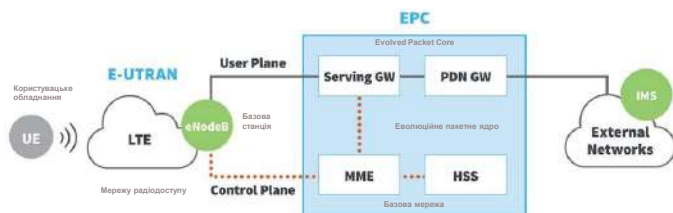


Рис. 1 – Архітектура мережі LTE

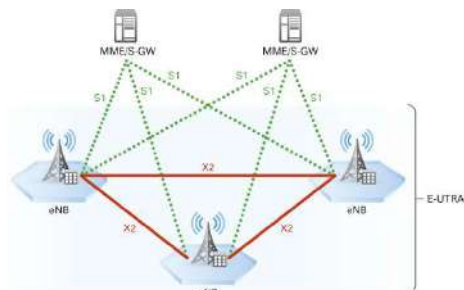


Рис. 2 – Архітектура E-UTRAN

## Технологія LTE OFDM

### Переваги OFDM

- Основною перевагою OFDM над схемами з однією несучою є його **здатність справлятися з жорсткими умовами каналу** (наприклад, загасання високих частот у довгому мідному дроті, вузькосмугові перешкоди та частотно-вибірче завмирання через багатопроменеве поширення) без складних фільтрів вирівнювання.
- **Вирівнювання каналу спрощується**, оскільки OFDM можна розглядати як використання множини повільно модульованих вузькосмугових сигналів, а не одного швидко модульованого широкосмугового сигналу.
- Низька швидкість передачі символів уможливає використання захисного інтервалу між символами, що **дозволяє усунути міжсимвольні перешкоди (ISI)**.
- Цей механізм також **полегшує проектування одночастотних мереж (SFN)**, де кілька сусідніх передавачів посилають один і той же сигнал одночасно на одній і тій же частоті, оскільки сигнали від декількох віддалених передавачів можуть бути конструктивно об'єднані, а не створювати перешкоди, як це зазвичай відбувається в традиційній системі з однією несучою.

### Недоліки OFDM

- Високе відношення піка до середнього
- Чутливий до зсуву частоти, а отже і до доплерівського зміщення

Один ресурсний елемент формується модуляцією:

- QPSK
- 16QAM
- 64QAM

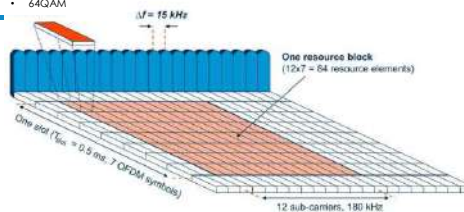


Рис. 1 – Фізичні ресурси низхідного каналу LTE засновані на OFDM

## Технологія SC-FDMA

LTE використовує у висхідній лінії зв'язку попередньо кодовану версію OFDM, звану множинним доступом з частотним поділом з однією несучою (SC-FDMA - Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Це має компенсувати недолік зі звичайним OFDM, який має дуже високе відношення до пікової потужності до середньої (PAPR - Peak to Average Power Ratio).

Низьке PAPR покращує покриття та продуктивність на межі мобільного пристрою.

## Частотні діапазони для FDD та TDD

LTE може використовуватися як у **парних (FDD)**, так і в **непарних (TDD)** ділянках спектра.

**FDD** - забезпечує більшу ефективність і становить більш високий потенціал використання пристроїв та інфраструктури

**TDD** - виконує роль хорошого доповнення, наприклад, для заповнення пробілів у мережі.

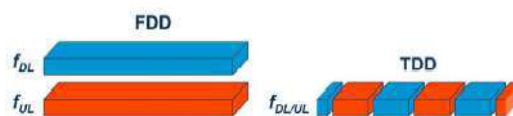


Рис. 1 - Покриття TDD та FDD

Таблиця 1 – частотні діапазони, за рішенням 3GPP

FDD Bands		TDD Bands	
Band	Frequencies UL/DL (MHz)	Band	Frequencies UL and DL (MHz)
I	1920 - 1980/2110 - 2170	a	1900 - 1920 2010 - 2025
II	1850 - 1910/1930 - 1990	b	1850 - 1910 1930 - 1990
III	1710 - 1785/1805 - 1880	c	1910 - 1930
IV	1710 - 1755/2110 - 2155	d	2570 - 2620
V	824 - 849/869 - 894		
VI	830 - 840/875 - 885		
VII	2500 - 2570/2620 - 2690		
VIII	880 - 915/925 - 960		
IX	1749.9 - 1784.9/1844.9 - 1879.9		
X	1710 - 1770/2110 - 2170		

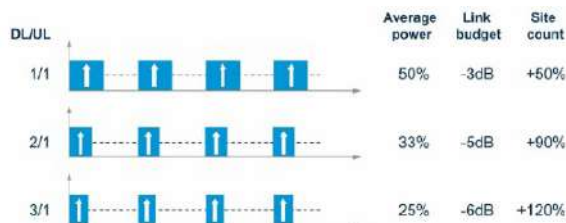


Рис. 2 – Співвідношення DL/UL для FDD та TDD

## Дослідження завадостійкості MIMO-OFDM систем

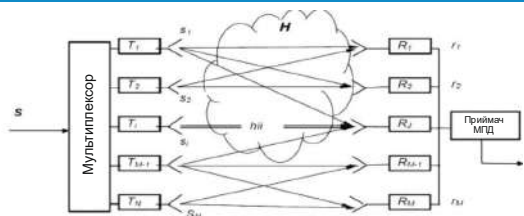


Рис. 1 – Загальна структура системи MIMO

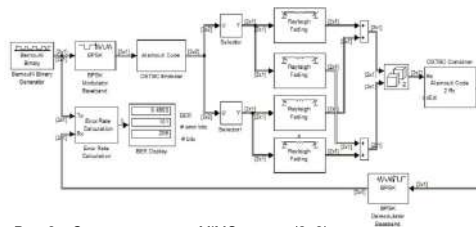


Рис. 2 – Структурна схема MIMO каналу (2x2) в середовищі Simulink

Таблиця 1 – Відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу для 2x2-MIMO

Швидкість коду, R	Модуляція	SNRML - SNRZF
1/2	BPSK	~5 дБ
3/4	BPSK	~7 дБ
1/2	QPSK	~4,5 дБ
3/4	QPSK	~7 дБ
1/2 16	QAM	~3 дБ
3/4 16	QAM	~4 дБ
2/3 64	QAM	~2 дБ
3/4 64	QAM	~3 дБ

Таблиця 2 – Відносні втрати щодо сигнал-шум ZF-методу по відношенню до ML-методу для 2x4-MIMO

Швидкість коду, R	Модуляція	SNRML - SNRZF
1/2	BPSK	~1 дБ
3/4	BPSK	~2 дБ
1/2	QPSK	~0,5 дБ
3/4	QPSK	~1 дБ
1/2 16	QAM	~0,2 дБ
3/4 16	QAM	~0,6 дБ
2/3 64	QAM	~0,1 дБ
3/4 64	QAM	~0,4 дБ

## Розрахункова частина

### 1. Розрахунок можливої зони покриття системи

Загальна розрахункова формула **напруженості поля, що створюване передавальною базовою станцією (БС) у пункті прийому абонентської станцією:**

$$E = E_c + B_{P.H.} + B_\phi + B_{k2} + B_{PEL} + (\alpha \cdot l) - D_{RPU} - D_{FAU} + B_0 \quad (1)$$

- для першого сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6$  дБ
- для другого сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6$  дБ
- для третього сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 10 - 11 - 13,5 - 17,7 = 34,6$  дБ
- для четвертого сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 3 - 11 - 13,5 - 17,7 = 41,6$  дБ
- для п'ятого сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 + 7 - 11 - 13,5 - 17,7 = 51,6$  дБ
- для шостого сектора:  
 $E = 53 + 35 + 7 - 8,2 - 6 - 11 - 13,5 - 17,7 = 38,6$  дБ

**Дальність зв'язку кожного сектора складає:**

- на першому, другому і третьому – **20 км** при  $E = 34,6$  дБ;
- на четвертому – **13 км** при  $E = 41,6$  дБ;
- на п'ятому – **8 км** при  $E = 51,6$  дБ;
- на шостому – **17 км** при  $E = 38,6$  дБ.

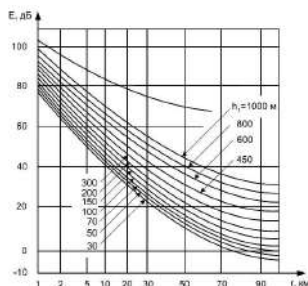


Рис.1 – Криві розповсюдження радіохвиль над поверхнею землі у міській зоні

### Вихідні дані для розрахунку:

- пристрій доступу (AU);
- потужність передавача – 28 дБм;
- мін. поріг рівня на вході приймача – 68 дБм;
- частота прийому – 3,5 ГГц;
- частота передачі – 3,5 ГГц;
- загасання у фільтрах та антенних роздільниках – 15дБ;
- діаграма спрямованості антени – 60°;
- коефіцієнт підсилення антени БС – 11 дБ;
- висота розташування антени – 40 м;
- блок фіксованого абонентського доступу (FAU);
- діаграма спрямованості – 6,1°;
- коефіцієнт підсилення антени – 13,5 дБм;
- висота приймальної антени (FAU) – від 3 до 10 м;
- напруженість поля, при якій забезпечується достатня якість прийому, дорівнює 53 дБ.

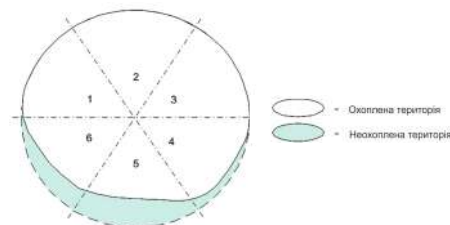


Рис. 3 – Зони покриття кожної базової станції

# Розрахункова частина

## 2. Сумарна ймовірність погіршення якості зв'язку

Сумарна ймовірність погіршення якості зв'язку через глибокі замирання сигналу, що обумовлюється в загальному випадку трьома причинами:

- а) екранування перешкодами мінімальної зони Френеля при субрефракції радіохвиль  $T_0(V_{min})$ ;
- б) інтерференцію в точці прийому прямого променя та променів відбитих від шаруватих неоднорідностей тропосфери  $T_{int}(V_{min})$ ;
- в) ослабленням сигналу через дощі  $T_A(V_{min})$

$$T_{np}(V_{min}) = T_0(V_{min}) + T_{int}(V_{min}) + T_A(V_{min}) \quad (1)$$

$$T_{np}(V_{min}) = 0 + 3 \cdot 10^{-7} + 14 \cdot 10^{-5} = 1,4 \cdot 10^{-4} \quad \%$$

## 3. Розрахунок якісних показників

Середнє ефективне значення напруженості поля індустриальних перешкод:

$$E_{i,ef} = (E_1 + 0,115\sigma_E^2)_{1/3} + 10 \lg P_{np} - 20 \lg P_{13} + 10 \lg F_1 - 2,7 \quad E_{i,ef} = 9 \text{ дБ} = 3 \text{ мкВ/м} \quad (2)$$

Напруженість поля сумарних перешкод: 
$$E_{i,ef} = 10 \lg \left[ E_{i,ef}^2 + E_{n,ef}^2 + E_{k,ef}^2 + \frac{G_{nt}^2 (\alpha I)_{np}^2}{(S/N)_{np,ax}^2 \cdot h_{0,np}^2} \right] \quad (3)$$

Потужність базової станції, що ефективно випромінюється  $P_0 = P_n - B_{ф,пер} \quad P_0 D_y = 14,8 - 9,4 = 5,4 \quad (4)$

Напруженість поля, створювану базовою станцією в найбільш характерні пункти прийому на межі зони обслуговування:

$$E_{c.o.} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60 \quad (5)$$

$$E_{c.o.} = 11 - 40 + 7 - 3 + 60 = 35 \text{ дБ}$$

$K_2 = 11 \text{ дБ}$   
 $K_3 = -40 \text{ дБ}$   
 $K_4 = 7 \text{ дБ}$   
 $\Delta E_n = -3 \text{ дБ}$

### Вихідні дані для розрахунку пункту 3:

- частота прийому абонентської станції дорівнює 2 ГГц;
- номінальна чутливість приймача при співвідношенні сигнал\шум на виході 20 дБ,  $C_{\gamma} = 15 \text{ мкВ}$ ;
- смуга частот телефонного каналу дорівнює 0,3-3,4 кГц;
- загальне згасання елементів антенно-фідерних пристроїв,  $B_{ф,пер} = 9,7 \text{ дБ}$ ;
- вихідна номінальна потужність передавача,  $P_n = 30 \text{ Вт}$  ( $P_n = 14,8 \text{ дБ}$ );
- висота антени базової станції над нульовою позначкою місцевості,  $h_{01} = 210 \text{ м}$ ;
- висота приймальної антени абонентського терміналу над рівнем землі,  $h_2 = 2 \text{ м}$ ;
- ширина лінії пропускання приймача,  $\Pi_{пр} = 25 \text{ кГц}$ ;
- довжина фідера приймальної антени (РК-75-7-11),  $l_{ф,пр} = 4 \text{ м}$ ;
- довжина фідера передавальної антени (РК-75-7-11),  $l_{ф,пер} = 50 \text{ м}$ ;
- середня висота будівель,  $h_{зд} = 20 \text{ м}$ ;
- середня ширина вулиць,  $2b = 30 \text{ м}$ .

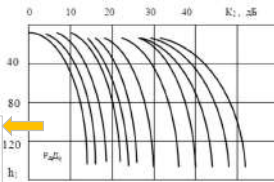


Рис. 1 – Номограма визначення  $K_2$

# Розрахункова частина

## 3. Розрахунок якісних показників

Для прийому на радіальних вулицях використовуємо формулу:  $E_{c.p.} = M_1 + M_2 + M_3 + \Delta E_n + 60 \quad (1)$

$$E_{c.p.} = -20 + 40 - 44 - 2 + 60 = 34 \text{ дБ}$$

Для прийому на поперечних вулицях використовуємо формулу:  $E_{c.л.} = K_2 + K_3 + K_4 + \Delta E_n + 60 \quad (2)$

$$E_{c.л.} = -16 + 11 - 40 - 3 + 60 = 12 \text{ дБ}$$

Визначаємо значення захисного відношення  $R_d$ .

• Для поперечних вулиць:  $R_{d,p} = E_{c.p.} - E_{i,ef} = 34 - 9,6 = 24,4 \text{ дБ} \quad (3)$

• Для відкритих площ:  $R_{d,л.} = E_{c.л.} - E_{i,ef} = 12 - 9,6 = 2,4 \text{ дБ} \quad (4)$

Визначено категорію обслуговування, що забезпечується базовою станцією на межі зони обслуговування для 70% пунктів та довільно обраного часу дії 90%. В результаті розрахунку отримані наступні значення  $R_d$ , дБ:

- для передачі даних – 14,7;
- для передачі промови – 31,7;
- для відкритих площ  $R_{d,л.} > R_{d,мін}$  ( $25,4 \gg 14,7$ );
- для радіальних вулиць  $R_{d,p} > R_{d,мін}$  ( $24,4 \gg 14,7$ );
- для поперечних вулиць категорія обслуговування незадовільна.

Тому визначимо максимальну відстань, на якій забезпечується задана категорія обслуговування. Для цього знаходимо рівень сигналу, який забезпечить у пункті прийому категорію обслуговування 90% розбірливості при  $R_{d,хв} = 14,7 \text{ дБ}$ :

$$E_{c.л.}^1 = E_{i,ef} + R_{d,мін} = 9,6 + 14,7 = 24,3 \text{ дБ} \quad (5)$$

$$K_{zn} = E_{c.л.} - K_1 - K_2 - \Delta E_n - 60 \text{ дБ} \quad (6)$$

$$K_{zn} = 24,3 + 16 - 11 + 3 - 60 = -27,7 \text{ дБ}$$

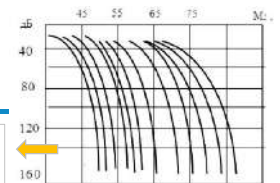


Рис. 1 – Номограма визначення  $M_2$

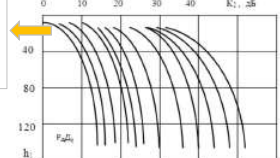


Рис. 2 – Номограма визначення  $K_2$

## Розрахункова частина

### 3. Розрахунок якісних показників

Побудуємо графік залежності  $R_{\Delta 0} > R_{\Delta \text{мін}}$  від  $\alpha_2$ , де  $\alpha_2$  – час дії %. Для побудови графіка складено таблицю 1, де  $R_A = E_c - E_{\text{п}}$ .

Таблиця 1 – Отримані дані

$\alpha_2$ %	Захисне відношення сигнал/перешкода, дБ		
	Для площ	Для радіальних вулиць	Для поперечних вулиць
50	30,9	29,9	20,2
70	28,4	27,4	17,7
90	25,4	24,4	14,7
95	23,9	22,9	13,2

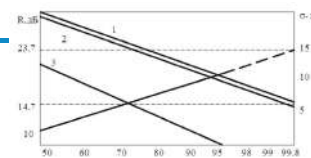


Рис. 1 – Розрахункові значення захисних відносин на поперечних вулицях (1 – на відкритих майданчиках; 2 – на радіальних вулицях; 3 – сигнал/завада)

Ймовірність обслуговування визначається стандартними відхиленнями величин, що брали участь у розрахунку:  $\sigma_{c,n}$ , яка враховує завмирання в протягом тривалого часу, що визначаються за кривими, відповідно до рис. 2

Загальна невизначеність:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{cm}^2 + \Delta\sigma_t^2 + \sigma_R^2} \quad \text{дБ} \quad (1)$$

$$\sigma_{30} = \sqrt{\sigma_R^2} = 2 \quad \text{дБ}$$

$$\sigma_{90} = \sqrt{\sigma_{c90}^2 + \Delta\sigma_{90}^2 + \sigma_R^2} = 5,6 \quad \text{дБ}$$

$$\sigma_{99} = \sqrt{\sigma_{c99}^2 + \Delta\sigma_{99}^2 + \sigma_R^2} = 9,9 \quad \text{дБ}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{c,50} &= 0; \\ \sigma_{c,90} &= 1,5 \text{ дБ}; \\ \sigma_{c,99} &= 5,5 \text{ дБ} \end{aligned}$$

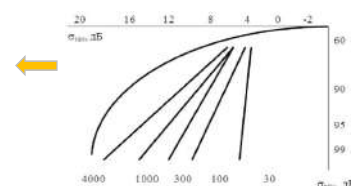


Рис. 2 – Графіки завмирання за Буллінгтоном

Можливість обслуговування визначається залежно від нормованого аргументу – відсотка часу дії

$$t_a = (R_{\Delta 70} - R_{\Delta 50}) / \sigma \quad (2)$$

Так, якщо  $R_{\Delta 70} = 28,4$  дБ;  $R_{\Delta 50} = 30,9$  дБ, а  $t_{70} = 3$  дБ, то  $t_a = (R_{\Delta 70} - R_{\Delta 50}) / \sigma = -0,83$ , а можливість обслуговування дорівнює 0,2, тобто чим більший час дії, тим менша ймовірність обслуговування при постійному сигналі

## Розрахункова частина

### 4. Оцінка необхідної кількості каналів та ймовірності втрати виклику

Якщо  $\lambda$  та  $\mu$  – інтенсивності переходу одного абонента між станами 1, 2, то рівняння динаміки середніх мають вигляд:

$$\frac{dE_1}{dt} = -\lambda \cdot E_1 + \mu \cdot E_2 \quad (1)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \lambda \cdot E_1 - \mu \cdot E_2 \quad (2)$$

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{dE_2}{dt} = 0$$

Таким чином, середня кількість зайнятих каналів дорівнює:

$$E_2 = N \cdot \rho \cdot (1 + \rho) \quad \rho = \frac{\lambda}{\mu} \quad (3)$$

де  $\rho$  – наведена інтенсивність заявок

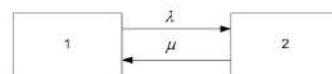


Рис. 1 – Стан системи

Необхідне число  $n$  каналів для обслуговування  $N$  абонентів, кожен із яких створює в ЧПН навантаження  $\rho$ :

$$n = \frac{N \cdot \rho + K \cdot \sqrt{N \cdot \rho}}{1 + \rho} \quad (4)$$

Кількість необхідних каналів  $n$  на сполучній лінії між проектованою станцією EWSA та мережею СТОП для 1000 абонентів:

$$n = \frac{1000 \cdot 0,05 + 2,31 \cdot \sqrt{1000 \cdot 0,05}}{1 + 0,05} \approx 63 \text{ канали}$$

### 5. Оцінка похибки щодо збіжності розподілів

$$P(|n - E_2| \geq K \cdot \sqrt{D_2}) \leq \frac{4}{(9 \cdot K)^2} \quad (5)$$

У правій частині нерівності відсутній параметр  $N$ , тому навіть за  $N < 10$  можливість перевищення числом  $|n - E_2|$  величини  $K \cdot \sqrt{D_2}$  для  $K = 2,2 \dots 2,31$  та  $\rho = 0,05 \dots 0,1$  становить не більше 0,042...0,046. Зі зростанням  $N$  біномне розподілі швидко прагне нормального.

## Розрахункова частина

### 6. Розрахунок затримок під час передачі промови

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot \tau_i^{(2)}}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)} \quad (1)$$

$$R_k = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_k$$

$$R_{k-1} = \rho_1 + \rho_2 + \dots + \rho_{k-1}$$

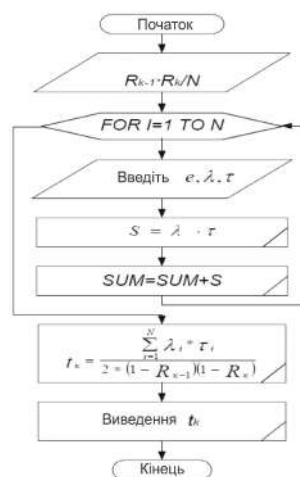
$$t_k = \frac{2 \cdot 0,01}{2(1-0,18)(1-0,2)} = \frac{0,02}{1,64 \cdot 0,8} = \frac{0,02}{1,312} = 0,015$$

Отримано співвідношення середньоквадратичного відхилення часу передачі повідомлення:

$$t_k = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \cdot \tau_i (1 + \tau_i^2)}{2(1-R_{k-1})(1-R_k)} \quad (2)$$

$$t_k = \frac{0,2 \cdot 10^{-3} (1 + 1^2)}{2(1-0,18)(1-0,2)} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1,312} = 3,048 \cdot 10^{-3} = 0,003$$

### АЛГОРИТМ ЗАТРИМОК ПОВІДОМЛЕНЬ ПРИ ПЕРЕДАЧІ МОВИ



## ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи відповідно до технічного завдання:

- аналіз актуальності використання радіодоступу на базі технології LTE;
- розглянути принципи побудови, архітектуру та функції мережі;
- інформаційний огляд основних технологій та стандартів радіодоступу;
- проведено аналіз основних параметрів MIMO;
- проведена експериментальна оцінка роботи радіодоступу за різних технологій та стандартах;
- здійснено розрахунок основних параметрів якості мережі радіодоступу.



Доповідь  
завершена 😊

ДЯКУЮ  
ЗА УВАГУ!



Завідувачу кафедри автоматизації та  
комп'ютерно-інтегрованих технологій  
д.т.н., професору Мартинюку В.В,  
здобувача вищої освіти  
Снітко В.В.  
ФІТ, гр. ТР1с-19-1

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про дотримання академічної доброчесності в Хмельницькому національному університеті» від 26.09.2020 (зі змінами від 26.11.2020), згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений. Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений (а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Unicheck та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

25 травня 2022 р.  
дата

  
підпис

Ім'я користувача:  
Кафедра АКІТіТК

ID перевірки:  
1011528513

Дата перевірки:  
09.06.2022 22:45:57 EEST

Тип перевірки:  
Doc vs Internet

Дата звіту:  
09.06.2022 22:47:22 EEST

ID користувача:  
100005862

Назва документа: КвРТР\_СНІТКО\_ТР1с-19-1

Кількість сторінок: 64 Кількість слів: 10329 Кількість символів: 73836 Розмір файлу: 3.91 MB ID файлу: 1011401738

## 10.4% Схожість

Найбільша схожість: 3.96% з Інтернет-джерелом (<http://repository.dnu.dp.ua:1100/upload/ea4fe66bc515cddb021fd388f7..>)

10.4% Джерела з Інтернету

53

Сторінка 66

Пошук збігів з Бібліотекою не проводився

## 0% Цитат

Вилучення цитат вимкнене

Вилучення списку бібліографічних посилань вимкнене

## 0% Вилучень

Немає вилучених джерел

## Модифікації

Виявлено модифікації тексту. Детальна інформація доступна в онлайн-звіті.

Замінені символи

160

### Anti-Plagiarism v-15.257

Максимальное совпадение с одним документом 3.0%

Словари проверки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Ошибок в документах: 10%

ID: 104998 Название: Бакалаврська кваліфікаційна робота Добавлено в БД: 2022-06-10 Авторы: Ситко В. Руководители: Лужанський В.І. Консультанты: Оцененты:	Документ		Суммарное совпадение по Базе Данных	
	Символы	Лексемы	Символы	Лексемы
	67255	557	3323 (5%)	48 (9%)

Источник плагиата

ID	Описание	Наличие плагиата в документе	
		Символы	Лексемы

## РІШЕННЯ

### кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

#### ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE

Автор: Снітко Віталій Вячеславович

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка

Науковий керівник: к.в.н., доцент Лужанський Віктор Ігорович

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту.	-
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи	відповідає
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	-
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	-
5	Інше:	-

Підтвердження: Виявлені запозичення не є плагіатом так як розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження (є власні терміни, визначення тощо), складають 10,4% та мають посилання на приведений список літературних джерел.

«09» червня 2022 р.

Науковий керівник



Лужанський В.І.

Завідувач кафедру АКТ



Мартинюк В.В.

## ВІДГУК

на кваліфікаційну роботу

студента групи ТР1с-19-1 Снітко В.В.

### «ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОБІЛЬНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ПО ТЕХНОЛОГІЇ LTE»

Дана кваліфікаційна робота в основному зосереджений на рішенні задач підвищення та покращення якості мережі, які актуальні в першу чергу з практичного погляду. Метою даного кваліфікаційного проєкту є дослідження якості мережі радіо доступу на базі LTE шляхом поліпшення параметрів при різних технологіях та стандарти.

У даній кваліфікаційній роботі розглянуто методи розвитку широкопasmових мереж радіодоступу. Бездротовий радіозв'язок представлений технологією LTE. У роботі проведені експериментальні дослідження та представлена розрахункова частина за системою радіодоступу. Відображено результати експериментальних досліджень роботи мережі радіодоступу LTE при різних технологіях та стандартах. (до 450 Мбіт/с на базову станцію) та низький рівень затримок (до 20 мс).

У роботі проведені експериментальні дослідження, та представлена розрахункова частина. Під час роботи над кваліфікаційною роботою Снітко В.В. виконав детальний аналіз вітчизняної, закордонної технічної літератури та патентних матеріалів, що дозволило прийняти оптимальні рішення під час виконання роботи.

Під час виконання роботи Снітко В.В. проявив креативність, ініціативність, старанність, наполегливість, здатність та вміння застосовувати набуті знання для вирішення складних завдань, обізнаність у сучасних системних та інформаційних технологіях.

Кваліфікаційну роботу виконано на високому технічному рівні, він має безперечну актуальність в області сучасних телекомунікацій, а студент Снітко В.В. заслуговує оцінки «добре».

Керівник:  
к.в.н., доцент



Лужанський В.І.

МІНІСТЕРСТВО ОВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Снітко Віталій Вячеславович

Тема роботи: Підвищення ефективності мобільної передачі даних по технології LTE

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи

Кількість листів креслень 0 Кількість сторінок записки 63

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень в результаті виконаного наукового дослідження Метою кваліфікаційної роботи є дослідження якості мережі радіо доступу на базі LTE шляхом поліпшення параметрів при різних технологіях та стандарти. У даній кваліфікаційній роботі розглянуто методи розвитку широкосмугових мереж радіодоступу. Бездротовий радіозв'язок представлений технологією LTE. У роботі проведені експериментальні дослідження та представлена розрахункова частина за системою радіодоступу. Відображено результати експериментальних досліджень роботи мережі радіодоступу LTE при різних технологіях та стандартах. (до 450 Мбіт/с на базову станцію) та низький рівень затримок (до 20 мс). У роботі проведені експериментальні дослідження, та представлена розрахункова частина..

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню Кваліфікаційна робота відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки та техніки і передових методів роботи: В першому розділі були розглянуті основні технології та стандарти сучасних поколінь зв'язку. Однак більше уваги приділялося ключовим технологіям мережевого моделювання, зокрема технології LTE. Цей розділ був присвячений характеристикам технологій цього стандарту, а також детальному опису основних інструментів, які використовуються при розробці мережі 4-го покоління, а саме технології MIMO та OFDMA. У другому розділі досліджено структурну схему симулятора радіопередача. Для цього була створена програмна реалізація каналу MIMO в середовищі Simulink пакета прикладних програм MatLAB. З різних варіантів побудови каналу MIMO була обрана архітектура на основі просторово-часового кодування. Така схема була запропонована Alamouti і є найефективнішим типом неадаптивної радіопередачі, оскільки поєднує

просторове та часове рознесення. Відносні втрати щодо сигнал-шум BPSK, QPSK, 16-QAM та 64-QAM модуляцій для 2×4 у 4-5 разів менші, ніж 2×2-MIMO-OFDM-системи. В третьому розділі розраховано якісні показники (категорію обслуговування для будь-якого часу дії та ймовірність обслуговування), що забезпечуються системою на вулицях мікрорайону, забудованого одно-двоповерховими і більше будинками, в зоні радіусом 10 км. Оцінено необхідну кількість каналів та ймовірності втрати виклику.

4. Позитивні сторони роботи: Ця кваліфікаційна робота в основному зосереджена на рішенні задач підвищення та покращення якості мережі, які актуальні в першу чергу з практичного погляду.

5. Негативні сторони роботи: У роботі бажано було б більш детально розглянути питання експериментального дослідження. Присутні невеликі граматичні помилки. Однак, ці недоліки не мають принципового значення, суттєво не впливають на кінцевий результат і не знижують загального враження від проведеної роботи

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: немає

7. Відгук про роботу в цілому: В цілому кваліфікаційно робота виконано на високому технічному рівні, вона має безперечну актуальність в області сучасних технологій телекомунікацій

8. Інші зауваження: немає

9. Оцінка кваліфікаційної роботи: Кваліфікаційна робота відповідає встановленим вимогам і заслуговує оцінки добре (4,0/5), а її автору Снітко В.В., присвоєння кваліфікації бакалавра зі спеціальності «Телекомунікації та радіотехніка»

10. Рецензент Бойко Юлій Миколайович – д.т.н., професор кафедри ТМІТ

«07» червня 2022р.

  
підпис