

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

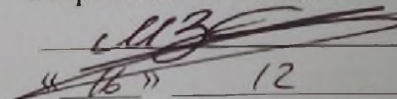
«Інформаційно-орієнтовані безпроводні мережі зв'язку»

Виконав: студент 2-го курсу,
групи TSM-23м
спеціальності 172 – Електронні комунікації
та радіотехніка



Козяр С.О.

Керівник: к.т.н., доцент каф. ІКСТ



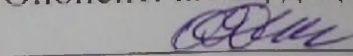
Васильківський М.В.

« 16 »

12

2024 р.

Опонент: к.т.н., доцент каф. ІРТС



Осадчук Я.О.

« 16 »

12

2024 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 16 »

12

2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань - 17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації
(шифр і назва)
Спеціальність - 172 – Електронні комунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма - Телекомунікаційні системи та мережі

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІКСТ

д.т.н., професор В.М. Кичак

"24" 09 2024 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

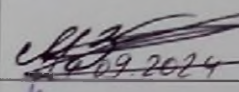
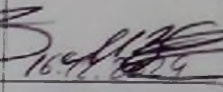
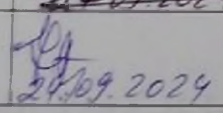
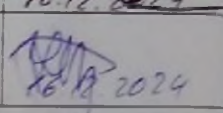
Козяру Сергію Олеговичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи Інформаційно-орієнтовані безпроводні мережі зв'язку
керівник роботи Васильківський Микола Володимирович, канд. техн. наук, доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від "17" 09 2024 року № 310
- Строк подання студентом роботи 09 грудня 2024 року
- Вихідні дані до роботи швидкість передачі даних для стаціонарних умов в мережі 4G: до 1 Гбіт/с; швидкість передачі даних для мобільних умов в мережі 4G: до 100 Мбіт/с; затримка сигналів в мережі 4G: ~10-50 мс; спектральна ефективність каналів в мережі 4G: 15 біт/с/Гц; частотний діапазон каналів в мережі 4G: 700 МГц – 2.6 ГГц; пропускна здатність в мережі 4G: до 20 МГц на канал; кількість антен в мережі 4G: MIMO 4x4 або 8x8; швидкість передачі даних в мережі 5G: до 10 Гбіт/с; затримка сигналів (URLLC) в мережі 5G: <1 мс; щільність підключень (mMTC) в мережі 5G: до 1 млн пристроїв/км²; частотні діапазони: низькі частоти до 1 ГГц; середні частоти: 1-6 ГГц; високі частоти (мм-хвилі): 24-52 ГГц; пропускна здатність мережі 5G: до 400 МГц (агрегація до 800 МГц); спектральна ефективність каналів в мережі 5G: 30 біт/с/Гц; швидкість передачі даних в мережі 6G: >1 Тбіт/с; затримка сигналів в мережі 6G: <0.1 мс; частотний терагерцовий діапазон в мережі 6G: 0.1-10 ТГц; щільність підключень в мережі 6G: до 10 млн пристроїв/км²; пропускна здатність в мережі 6G: >1 ГГц; інтелектуальні антени в мережі 6G: надмасивний MIMO (>64 антен).
- Зміст текстової частини: ключові технології в мережах 4G; аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж 5G; ключові технології для мереж шостого покоління; економічна частина.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових кресле
структурна схема бездротової системи MU-MIMO; структура бездро
системи на основі OFDMA; транзитні канали та канали доступу в архітект
основі ретрансляції; схема роботи низхідної лінії зв'язку NOMA; архіте
системи 5G; структурна схема оптичної бездротової системи з
безстільникова масивна система MIMO; системи бездротового зв'язк
використанням IRS.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Васильківський М.В., доцент кафедри ІКСТ	 16.09.2024	 16.09.2024
Економічна частина	Буромейко О.В., доцент кафедри ІКСТ	 26.09.2024	 26.09.2024

7. Дата видачі завдання 02 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим
1.	Розробка технічного завдання	09.09.2024р.	
2.	Техніко-економічне обґрунтування розробки	16.09.2024р.	
3.	Ключові технології в мережах 4G	12.10.2024р.	
4.	Аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж 5G	30.10.2024р.	
5.	Ключові технології для мереж шостого покоління	11.11.2024р.	
6.	Аналіз економічної ефективності розробки	22.11.2024р.	
7.	Оформлення пояснювальної записки та ілюстративної частини	02.12.2024р.	
8.	Нормоконтроль МКР	06.12.2024р.	
9.	Попередній захист МКР, опонування МКР	14.12.2024р.	
10.	Захист МКР ЕК	18.12.2024р.	

Студент

(підпис)

Козяр С. О.

Керівник роботи

(підпис)

Васильківський М.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Козяр С.О. Інформаційно-орієнтовані безпроводні мережі зв'язку. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – електронні комунікації та радіотехніка, освітня програма – телекомунікаційні системи та мережі. Вінниця: ВНТУ, 2024. 119 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 20 назв; рис.: 27; табл. 6.

У роботі виокремлено ключові аспекти технологій 4G, що дає змогу краще зрозуміти їхні принципи функціонування, оцінити ефективність у сучасних мережах та визначити напрями подальшого вдосконалення. Проаналізовано наявні підходи до забезпечення гнучкості, масштабованості та ефективності мереж 5G, що сприяє їх адаптації до швидкозмінних умов використання та підвищення здатності до обробки майбутніх навантажень. Особливу увагу приділено аналізу перспективних технологічних рішень для мереж 6G, зокрема їх потенціалу у вирішенні глобальних проблем телекомунікацій, таких як екологічна стійкість, надвисока пропускна здатність та ультранизька затримка. Отримані результати створюють основу для інновацій, що визначатимуть телекомунікаційне середовище майбутнього.

Метою роботи є вдосконалення роботи мереж та розвиток інноваційних рішень у сфері бездротових технологій для створення ефективних, масштабованих та надійних систем зв'язку, які відповідають потребам сучасного інформаційного суспільства.

Основними завданнями наукової роботи є дослідження ключових технологій у мережах 4G для розуміння принципів їхньої роботи, оцінки їхньої ефективності та визначення напрямків удосконалення; аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж 5G для забезпечення необхідної гнучкості, масштабованості і ефективності, що необхідні для наступних

поколінь мобільних мереж; дослідження ключових технологій для мереж шостого покоління (6G), що спрямоване на розробку та вивчення їх потенціалу для вирішення глобальних викликів у телекомунікаціях.

Робота містить чотири розділи. У першому розділі проведено дослідження ключових технологій в мережах 4G.

У другому розділі виконано аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж 5G.

У третьому розділі дослідженні ключові технології для мереж шостого покоління.

У четвертому розділі виконано економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи.

ABSTRACT

UDC 621.396

Kozyar S.O. Information-oriented wireless communication networks. Master's thesis in the specialty 172 - electronic communications and radio engineering, educational program - telecommunication systems and networks. Vinnytsia: VNTU, 2024. 118 c.

In Ukrainian. Bibliography: 20 titles; Figures: 27; Table 6.

The paper highlights the key aspects of 4G technologies, which makes it possible to better understand their principles of operation, evaluate their effectiveness in modern networks and identify areas for further improvement. The existing approaches to ensuring the flexibility, scalability and efficiency of 5G networks are analyzed, which facilitates their adaptation to rapidly changing conditions of use and increasing the ability to handle future loads. Particular attention is paid to the analysis of promising technological solutions for 6G networks, in particular their potential to address global telecommunications challenges such as environmental sustainability, ultra-high bandwidth, and ultra-low latency. These results create the basis for innovations that will shape the telecommunications environment of the future.

The aim of the work is to improve the operation of networks and develop innovative solutions in the field of wireless technologies to create efficient, scalable and reliable communication systems that meet the needs of the modern information society.

The main objectives of the research work are to study key technologies in 4G networks to understand the principles of their operation, assess their effectiveness and identify areas for improvement; to analyze existing solutions for software-configurable 5G networks to ensure the necessary flexibility, scalability and efficiency required for the next generations of mobile networks; to study key

technologies for sixth generation (6G) networks aimed at developing and studying their potential for solving global telecommunications challenges.

The paper consists of four sections. The first section studies the key technologies in 4G networks.

The second section analyzes the existing off-the-shelf solutions for 5G software-configurable networks.

The third section studies key technologies for sixth generation networks.

The fourth section provides an economic justification for the feasibility of this research work.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	9
1 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕРЕЖАХ 4G	18
1.1 Багатоканальний ввід-вивід/MIMO	18
1.2 Багатокористувацька багатоканальна передача даних/MU-MIMO	22
1.3 Ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів/OFDM.....	25
1.4 Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів/OFDMA.....	28
1.5 Множинний доступ з частотним розділенням каналів з однією несучою/SC-FDMA	33
1.6 Технологія ретрансляції сигналів	36
1.7 Агрегація несучих	38
1.8 Коди низької щільності з перевіркою на парність/LDPC	40
1.9 Гетерогенна мережа/HetNet	43
1.10 Зв'язок між пристроями/D2D	46
1.11 Висновки до розділу 1	50
2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ 5G	52
2.1 Неортогональний множинний доступ / NOMA	53
2.2 Програмно-визначена мережа / SDN	57
2.3 Віртуалізація мережевих функцій / NFV	60
2.4 Сервіс-орієнтована архітектура / SBA	63
2.5 Висновки до розділу 2	68
3 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ	70
3.1 Особливості розвитку надшвидкісних бездротових телекомунікаційних технологій	70
3.2 Оптичний бездротовий зв'язок / OWC	78

3.3 Масштабний безстільниковий MIMO	81
3.4 Інтелектуальна відбиваюча поверхня / IRS	87
3.5 Висновки до розділу 3	92
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	95
4.1 Комерційний та технологічний аудит науково-технічної розробки.....	95
4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної (дослідно-конструкторської) роботи.....	99
4.2.1 Основна заробітна плата розробників.....	99
4.2.2 Додаткова заробітна плата розробників, які брати участь в розробці обладнання/програмного продукту	100
4.2.3 Нарахування на заробітну плату розробників.....	100
4.2.4 Витрати на матеріали і комплектуючі	100
4.2.5 Амортизація обладнання, яке використовувалось для проведення розробки	100
4.2.6 Витрати на силову електроенергію	102
4.2.7 Інші витрати та загальновиробничі витрати	102
4.2.8 Витрати на проведення науково-дослідної роботи.....	103
4.2.9 Загальні витрати на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи	104
4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором	104
4.3.1 Розробка чи суттєве вдосконалення програмного засобу (програмного забезпечення, програмного продукту) для використання масовим споживачем	106
4.3.2 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності	107
4.4 Висновки до розділу 4	110
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
Додаток А Ілюстративна частина	116

Додаток Б Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи	122
---	-----

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

MIMO-OFDM - ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів

IoT - Інтернет речей

AI - штучний інтелект

STBC - Просторово-часове блокове кодування

D2D – Взаємодія пристрій-пристрій

MES – Концепція граничних обчислень

QoE – якість обслуговування

LoS – Лінія зв'язку прямої видимості

SDN – Програмно-конфігурована мережа

QoE – Якість сприйняття

M2M – Міжмашинна взаємодія

TI – Тактильний інтернет

AR – Доповнена реальність

MSE-T – Сектор Стандартизації Телекомунікацій Міжнародного союзу електрозв'язку

IP – Інтернет-протокол

RFID – Методи радіочастотної ідентифікації

NFC – Зв'язок ближньої дії

БС – Базова станція

SNR - співвідношення сигнал/шум

TDMA - Множинний доступ з часовим розділенням каналів

FDMA - множинний доступ з частотним розділенням каналів

CDMA - множинний доступ з кодовим поділом каналів

SDMA - множинний доступ з просторовим розділенням каналів

OFDM - ортогональне частотне мультиплексування

OFDMA - ортогональне частотне розділення каналів

eICIC - покращена координація міжстільникових завад

3GPP - Проект партнерства третього покоління

SIC - послідовне придушення завад

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність розвитку 4G технологій є надзвичайно високою, оскільки сучасні вимоги до швидкості передачі даних, ефективності використання спектра та стабільності мережі постійно зростають. Основні вимоги до 4G, такі як висока спектральна ефективність і гнучкість використання спектра, реалізуються через технології MIMO-OFDM, які стали фундаментом для передачі даних у мережах LTE і WiMAX. Щоб відповідати зростаючим вимогам та зберегти зворотну сумісність з попередніми технологіями, організації, такі як 3GPP та IEEE, постійно інтегрують нові технічні можливості у свої стандарти.

На прикладі LTE-Advanced у 10-й версії стандарту було впроваджено технологію агрегації несучих (CA), що дозволила збільшити гнучкість використання спектра. Крім того, було вдосконалено багатоантенну передачу, що підвищило якість з'єднання і передачі даних, а також було введено підтримку ретрансляторів і гетерогенних мереж для більш ефективного покриття та підвищення продуктивності мережі. Випуск 11 стандарту LTE-Advanced, завершений у 2012 році, ще більше розширив можливості цієї технології, що підтверджує її актуальність та здатність задовольняти нові вимоги телекомунікаційного ринку [1].

LTE продовжував активно розвиватися з кожним новим випуском стандарту. Однією з найбільш помітних особливостей 11-го випуску стало впровадження технології CoMP (Coordinated Multipoint), яка значно покращила радіоінтерфейс для передачі та прийому сигналів. Ця технологія дозволила підвищити якість з'єднання в умовах слабкого сигналу шляхом координації передачі даних між кількома базовими станціями.

У випуску 12, завершеному у 2014 році, відбувся новий стрибок у розвитку мереж LTE. Основними нововведеннями стали впровадження технології зв'язку "пристрій-пристрій" (D2D), що дозволило безпосередньо з'єднувати пристрої без участі базової станції, а також підтримка пристроїв низької складності для

комунікацій машинного типу (МТС). Це стало важливим кроком у напрямку розвитку Інтернету речей (IoT), де необхідно забезпечувати ефективний зв'язок між великою кількістю пристроїв [2].

З виходом 13-го випуску LTE зазнав значної еволюції, отримавши назву LTE-Advanced Pro. Основною інновацією стало включення технології LAA (Licensed Assisted Access), яка дозволила використовувати як ліцензійні, так і неліцензійні частоти для передачі даних. Це значно розширило доступні спектральні ресурси, дозволивши операторам використовувати частоти, раніше доступні тільки для Wi-Fi, для покращення пропускної здатності мереж [3].

Дослідження еволюції до мобільного зв'язку п'ятого покоління (5G) є надзвичайно актуальним, оскільки 5G вже зараз змінює фундаментальні аспекти технологічної інфраструктури, економіки і способу життя. Основні аспекти, що підкреслюють важливість таких досліджень [4]:

1. 5G сприяє стрімкому впровадженню інноваційних технологій, таких як Інтернет речей (IoT), штучний інтелект (AI), автоматизація, доповнена та віртуальна реальність (AR/VR). Розуміння еволюції 5G і його впливу дозволяє глибше зрозуміти майбутній напрям розвитку інфраструктури цифрового зв'язку, визначити перспективи для створення нових видів сервісів і застосунків, а також удосконалити існуючі технології.

2. З огляду на зростання обсягу особистих і конфіденційних даних, які передаються у мережах 5G, актуальним стає питання безпеки і захисту приватності користувачів. Дослідження ризиків і розробка відповідних стандартів кібербезпеки є критично важливими для забезпечення надійного функціонування мереж 5G. Таким чином, дослідження еволюції до мобільного зв'язку 5G є не лише актуальним, а й критично важливим для підготовки до нової ери цифрового розвитку, де нові стандарти комунікації впливатимуть на всі аспекти людської діяльності, економіки та екології.

Терагерцові (ТГц) технології стають все більш актуальними в контексті майбутнього розвитку бездротових мереж шостого покоління (6G) і виходу за межі традиційних радіочастотних спектрів, використаних у 5G. Використання

частотного діапазону терагерц (0,1–10 ТГц) відкриває нові можливості для досягнення швидкостей передачі даних, що значно перевищують потужності 5G, з потенційно низькими затримками і значно підвищеною пропускнуою здатністю.

Зростання кількості пристроїв Інтернету речей (IoT), розвиток автономного транспорту, розширення застосування віртуальної і доповненої реальності (VR/AR) ставлять нові вимоги до пропускнуї здатності мереж. Терагерцові частоти дозволяють досягти швидкостей передачі даних у діапазоні кількох терабіт на секунду, що необхідно для обробки таких обсягів даних і підтримки складних додатків. У перспективі розвитку технологій 6G передбачається використання частот у діапазоні ТГц для досягнення нових рівнів швидкості та ефективності. Терагерцова частотна смуга має значно більшу ємність, що може забезпечити стабільне з'єднання в умовах високої щільності пристроїв. Діапазон ТГц забезпечує надзвичайно високу роздільну здатність при передачі даних, що важливо для технологій, які потребують точної передачі інформації, наприклад, для зображень, картографії, спектроскопії, дистанційного зондування та медичних зображень.

ТГц-хвилі здатні проходити через багато матеріалів і виявляти їхні унікальні спектральні характеристики, що відкриває нові можливості у медицині, безпеці та промисловості. Наприклад, терагерцова спектроскопія дозволяє ідентифікувати склад матеріалів, виявляти приховані дефекти та проводити безконтактний аналіз. ТГц-технології пропонують нові методи захисту передачі даних завдяки широкому частотному спектру, що ускладнює перехоплення сигналу. Крім того, терагерцові хвилі можуть бути використані для створення систем безпеки, таких як сканери, здатні виявляти зброю чи інші загрози на великих відстанях без прямого контакту. Хоча терагерцовий діапазон пропонує значні переваги, його використання пов'язане з низкою технічних викликів, зокрема, складністю генерації стабільних і потужних сигналів у цьому діапазоні, високою поглинальною здатністю хвиль, що обмежує їхнє поширення, та необхідністю створення нових матеріалів для

антен. Ці виклики стимулюють розвиток наукових досліджень та інженерних рішень, спрямованих на подолання обмежень ТГц технологій. Терагерцові технології є перспективним напрямом, який сприятиме переходу до 6G і розвитку таких галузей, як зв'язок, охорона здоров'я, промисловість і безпека. Їх актуальність зумовлена потребою у більш високих швидкостях передачі даних, розширеною пропускну здатністю та можливістю реалізовувати нові сценарії використання, які недоступні в межах нинішніх частотних діапазонів [5].

Аналіз останніх досліджень. Дослідження підтверджують, що Network Slicing — розділення мережі на ізольовані сегменти для різних потреб — стало важливим елементом 5G-інфраструктури. Віртуалізація ресурсів мережі дозволяє адаптувати її до різноманітних сценаріїв застосування: від високошвидкісного мобільного інтернету до мереж IoT із низьким енергоспоживанням. За допомогою цього підходу можна створювати спеціалізовані мережі, які гарантують якість і безпеку для кожного з типів трафіку, що актуально для таких сфер, як медицина, транспорт і промисловість.

Масивний MIMO і міліметрові хвилі (mmWave) — дві ключові технології, які дозволяють значно збільшити пропускну здатність мереж. Останні дослідження показують, що завдяки використанню багатьох антен та високочастотних діапазонів 5G здатний забезпечити більшу ємність мережі навіть в умовах високої щільності користувачів. Водночас дослідники наголошують на необхідності розвитку ефективних методів розміщення антен, оскільки міліметрові хвилі мають коротший радіус дії та більш чутливі до фізичних перешкод. Останні дослідження приділяють значну увагу викликам кібербезпеки в 5G. Зокрема, новітні методи виявлення та захисту від кібератак, такі як системи глибокого навчання та машинного навчання, забезпечують моніторинг мережевої активності та швидке виявлення аномалій. Це дозволяє ефективно протидіяти потенційним загрозам, проте дослідники зазначають, що зростання складності мережі вимагає постійного вдосконалення протоколів

захисту, особливо у випадках D2D-зв'язку (пристрої безпосередньо між собою) [6].

Багато досліджень спрямовані на підвищення енергоефективності 5G-мереж. Вони підкреслюють важливість розвитку методів енергозбереження, як-от динамічного управління ресурсами, яке дозволяє зменшити енергоспоживання базових станцій у періоди низького навантаження. Особливо актуальним це стає для розгортання мереж 5G у міських умовах та для мереж IoT, де тривалий час роботи автономних пристроїв є ключовим фактором [7].

Останні дослідження акцентують увагу на синергії 5G з іншими новітніми технологіями, такими як штучний інтелект (AI), Інтернет речей (IoT) і хмарні обчислення. Зокрема, використання AI для оптимізації роботи мережі дозволяє в режимі реального часу адаптуватися до навантаження, прогнозувати потреби користувачів та запобігати збоям. 5G в IoT забезпечує можливість підтримки мільйонів підключень на одному квадратному кілометрі, що є основою для розумних міст, медичних систем моніторингу здоров'я і сільськогосподарських рішень [8].

Деякі дослідники підкреслюють, що впровадження 5G вимагає значних ресурсів і нових підходів до переробки відходів від старих базових станцій. Питання екологічної стійкості стає все актуальнішим, і дослідження орієнтовані на мінімізацію впливу 5G на довкілля шляхом оптимізації енергетичних витрат та впровадження екологічних стандартів для виробництва й утилізації обладнання. Отже, дослідження еволюції 5G показують, що ця технологія є потужним інструментом для інновацій, здатним задовольнити потреби сучасного суспільства та економіки. Однак питання безпеки, енергоефективності, інтеграції з іншими технологіями і екологічної стійкості потребують подальших розробок для максимального використання потенціалу 5G і мінімізації ризиків [9].

Аналіз останніх досліджень у сфері терагерцових (ТГц) технологій демонструє, що інтерес до цього частотного діапазону значно зростає через його потенціал для застосування в комунікаційних системах шостого покоління

(6G), сенсорних технологіях, охороні здоров'я, безпеці та інших галузях. Генерація стабільних і потужних ТГц-сигналів є складним завданням, оскільки традиційні матеріали обмежені в цьому діапазоні. Сучасні дослідження зосереджені на нових матеріалах, таких як графен, нанотрубки та метаматеріали, які здатні працювати в ТГц-діапазоні. Такі матеріали дозволяють створювати антени та генератори ТГц-хвиль, що є перспективним кроком для подальшого розвитку систем зв'язку та сенсорних пристроїв. Терагерцова спектроскопія і зображення вже знаходять застосування у сферах охорони здоров'я, безпеки та промисловості. Дослідження демонструють ефективність ТГц-спектра для виявлення прихованих об'єктів (метали, рідини, вибухівка) і для медичної діагностики (виявлення ракових пухлин на ранніх стадіях, моніторинг шкірних покривів). Зокрема, досліджуються методи підвищення точності зображень і обробки сигналів, щоб забезпечити високу якість і точність результатів [10].

Використання ТГц-частот для бездротового зв'язку надає нові можливості для безпеки, оскільки терагерцові хвилі дозволяють створювати вузькоспрямовані сигнали, які важче перехопити. Дослідження включають розробку технологій кодування і шифрування сигналів, щоб знизити ризики несанкціонованого доступу до даних. Крім того, технології на базі штучного інтелекту застосовуються для моніторингу мережі і захисту від потенційних загроз у режимі реального часу. Одним із викликів ТГц-технологій є енергоспоживання пристроїв, здатних генерувати і приймати терагерцові сигнали. Це призводить до підвищення температури, що може пошкодити обладнання. Останні дослідження сфокусовані на розробці матеріалів з високою теплопровідністю та систем охолодження для ТГц-пристроїв. Технології, такі як пасивне охолодження та використання наноматеріалів, допомагають зменшити нагрівання пристроїв.

Використання терагерцових частот у системах 6G є одним з основних напрямків сучасних досліджень. Це включає розробку архітектури мережі, що враховує високу швидкість і затримку, сумісність з іншими частотними

діапазонами (міліметрові хвилі, суб-ТГц) та можливість інтеграції з новими технологіями, такими як квантові обчислення і штучний інтелект. Це дозволяє формувати гнучку мережу, що забезпечить підтримку масового підключення пристроїв IoT, автономних автомобілів, розширеної та віртуальної реальності. Сучасні дослідження в області ТГц-технологій активно розвиваються, зосереджуючи увагу на розширенні можливостей бездротового зв'язку, розробці нових матеріалів і підвищенні безпеки. Незважаючи на наявні виклики, такі як поглинання сигналу, обмежений радіус дії та енергоспоживання, прогрес у цих дослідженнях закладає фундамент для використання ТГц-спектра в 6G, що обіцяє революційні можливості в багатьох галузях [11].

Мета і завдання роботи. Метою даної кваліфікаційної роботи є вдосконалення роботи мереж та розвиток інноваційних рішень у сфері бездротових технологій для створення ефективних, масштабованих та надійних систем зв'язку, які відповідають потребам сучасного інформаційного суспільства.

Задачами магістерської кваліфікаційної роботи є:

1. Дослідження ключових технологій у мережах 4G для розуміння принципів їхньої роботи, оцінки їхньої ефективності та визначення напрямків удосконалення.
2. Аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж 5G для забезпечення необхідної гнучкості, масштабованості і ефективності, що необхідні для наступних поколінь мобільних мереж.
3. Дослідження ключових технологій для мереж шостого покоління (6G), що спрямоване на розробку та вивчення їх потенціалу для вирішення глобальних викликів у телекомунікаціях.

Об'єктом дослідження є комплекс технологічних, інформаційних та організаційних компонентів, які забезпечують функціонування сучасних і перспективних бездротових мереж, орієнтованих на передачу та обробку інформації.

Предметом дослідження є методи побудови та функціонування інформаційно-орієнтованих безпроводних мереж, що спрямовані на підвищення їх ефективності, надійності та безпеки.

Методи досліджень базуються на використанні: теоретичних методів для розробки математичних моделей, формулювання основних принципів функціонування та аналізу поведінки систем; методів моделювання та симуляції для перевірки роботи мережі у віртуальних умовах та прогнозування її ефективності; експериментальних методів для проведення практичних випробувань та оцінки реальних характеристик системи; алгоритмічних методів для розробки ефективних протоколів та алгоритмів управління ресурсами мережі; експертних оцінювань для отримання фахових рекомендацій щодо архітектури, функціональних можливостей та розвитку мережі; статистичного аналізу для обробки великих обсягів даних, отриманих з мережі, та оцінки її продуктивності; енергетичного аналізу для оптимізації споживання енергії в мережі та зменшення впливу на навколишнє середовище; методів верифікації та тестування для перевірки відповідності розроблених рішень встановленим вимогам та стандартам; економічного аналізу для оцінки витрат, рентабельності та ефективності впровадження мережі; інтеграційних методів для забезпечення сумісності різних компонентів системи та її взаємодії з іншими мережами.

Новизна одержаних результатів:

1. Виокремлено ключові аспекти технологій 4G, які дозволяють краще зрозуміти їх принципи функціонування, оцінити ефективність застосування в сучасних мережах та виявити напрямки для їх подальшого вдосконалення. Це відкриває можливості для адаптації існуючих рішень до нових умов і вимог користувачів.

2. Виявлено та систематизовано наявні підходи для забезпечення високої гнучкості, масштабованості та ефективності мереж 5G. Цей аналіз сприяє покращенню адаптаційності мереж до швидко змінюваних умов використання, що є критично важливим для підтримки майбутніх навантажень.

3. Проведено аналіз нових технологічних рішень для мереж 6G з акцентом на їх потенціал у вирішенні глобальних проблем телекомунікацій, таких як екологічна стійкість, надвисока пропускна здатність та ультранизька затримка. Це дозволяє створювати основу для інноваційних розробок, які визначають телекомунікаційне середовище майбутнього.

Отримані результати підкреслюють актуальність і внесок у розвиток сучасних і перспективних мобільних мереж, забезпечуючи нові можливості для дослідників та інженерів у галузі телекомунікацій.

Апробація роботи та її основні результати роботи проводилися на Всеукраїнській науково-практичній інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2025)» у 2024 році.

Публікації результатів магістерської кваліфікаційної роботи. Основні положення кваліфікаційної роботи висвітлені у 2 тезах науково-технічної конференції.

1 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ В МЕРЕЖАХ 4G

1.1 Багатоканальний ввід-вивід/MIMO

Вражаючий потенціал технології V-BLAST (Vertical Bell Labs Layered Space-Time Architecture), розробленої наприкінці 1990-х років, став важливим поштовхом для досліджень і впровадження багатопотокових систем MIMO (Multiple Input Multiple Output). Технологія MIMO використовує кілька передавальних і приймальних антен, що дозволяє використовувати просторові виміри як додаткові ступені свободи для передачі даних, підвищуючи спектральну ефективність мережі.

У середовищах з інтенсивним розсіюванням сигналів (де відбиваються хвилі від численних об'єктів) MIMO може досягати вражаючої продуктивності. Теоретична спектральна ефективність при цьому лінійно залежить від меншої кількості передавальних або приймальних антен. Це означає, що чим більше таких антен використовується, тим вища пропускна здатність мережі, оскільки кожна антена може одночасно передавати та приймати різні потоки даних без взаємних перешкод.

Таким чином, технологія MIMO стала ключовим компонентом сучасних бездротових мереж (зокрема LTE та WiMAX), що дозволило суттєво підвищити швидкість передачі даних і ефективність використання спектра, особливо в умовах міських середовищ, де відбувається сильне відбиття сигналів [5].

Технологія MIMO пропонує три ключові технічні переваги, що забезпечують як підвищення ефективності, так і надійності бездротового зв'язку:

1. Просторове мультиплексування дозволяє одночасно передавати кілька потоків даних на одній частоті за допомогою кількох просторових шарів, створених множинними антенами. Кожен потік проходить окремим шляхом, що дозволяє значно підвищити спектральну ефективність мережі. Просторове мультиплексування є особливо корисним для збільшення пропускної здатності

без додаткового розширення спектра, що критично для високошвидкісного мобільного зв'язку.

2. Просторове рознесення підвищує надійність передачі сигналу, використовуючи незалежні шляхи розповсюдження, створені кількома антенами. У складних умовах, таких як багатопроменеве поширення і завмирання сигналу, просторове рознесення мінімізує ризик втрати даних, оскільки хоча б один з сигналів досягає приймача з достатньою потужністю. Це допомагає підтримувати стабільний зв'язок у середовищах з великою кількістю перешкод та відбиттів.

3. Завдяки підсиленню антенної решітки система може спрямовувати енергію в певному напрямку, покращуючи прийом корисних сигналів і зменшуючи вплив перешкод з інших напрямків. Це підвищує потужність сигналу у необхідних зонах і зменшує ймовірність взаємних перешкод між користувачами, особливо в щільних мережах. Beamforming також сприяє більш ефективному використанню енергії та забезпеченню кращої якості обслуговування в умовах високої завантаженості мережі. Ці переваги роблять MIMO ключовою технологією у сучасних мережах LTE, 5G та Wi-Fi, що дозволяє одночасно покращити продуктивність, надійність і ефективність використання радіочастотного спектра [6].

Технології MIMO відіграли вирішальну роль у розвитку 4G, зокрема у таких стандартах, як LTE та WiMAX. Вони дозволили значно покращити продуктивність бездротового зв'язку, попри виклики, пов'язані з апаратними обмеженнями, вартістю та енергоспоживанням. Одним із таких важливих підходів стала схема Transmit Diversity, яка забезпечує підвищену надійність передачі сигналу.

Transmit Diversity – це схема багатоантенного передавання, при якій одношаровий потік даних передається через кілька сигнальних шляхів з низькою кореляцією між ними. Цей підхід використовує просторове рознесення, що досягається шляхом встановлення антен на достатньо великій відстані одна від одної або застосуванням різних поляризацій антен. Завдяки

цьому метод забезпечує більш стабільний прийом сигналу, що є критично важливим у складних умовах, де можливе зникнення сигналу через багатопротеневі перешкоди. Ця схема особливо корисна в тих випадках, коли потрібна висока надійність передачі, наприклад, у каналах управління або при трансляції мовлення, де будь-які перешкоди або втрати даних можуть суттєво вплинути на якість з'єднання. У системі LTE рознесення передавання було визначено спеціально для сценаріїв з двома або чотирма передавальними антенами, що дозволяє суттєво знизити ризик втрати сигналу в умовах сильних перешкод або багатопротеневого поширення. Загалом, використання MIMO в поєднанні з технологіями, як-от Transmit Diversity, дозволило не тільки покращити спектральну ефективність мереж, але й забезпечити високу надійність зв'язку навіть у складних радіочастотних умовах. Це сприяло тому, що технології 4G стали здатними підтримувати стабільний і високоякісний зв'язок для широкого кола застосувань, від інтернет-сервісів до критично важливих комунікацій [7].

Технології MIMO використовують різні методи для підвищення ефективності, надійності та пропускну здатності бездротового зв'язку. Деякі з цих методів включають:

1. Кодування переданих символів: Символи можуть бути закодовані гнучкими методами для підвищення стійкості до завмирань сигналу або покращення продуктивності в умовах розсіювання:

- Просторово-часове блокове кодування (STBC) [8]: Один із найбільш популярних методів, що підвищує надійність зв'язку, передаючи копії символів у різних часових інтервалах і на різних антенах.

- Просторово-частотне блокове кодування (SFBC): Подібний до STBC, але кодування відбувається за частотою, що є корисним у середовищах з частотно-селективним завмиранням.

- Передача з частотною модуляцією (FSTD) і передача з циклічною затримкою (CDD): Ці методи дозволяють мінімізувати кореляцію між

переданими сигналами, що допомагає зберігати ефективність передачі в складних умовах.

2. Формування променя (Beamforming): Якщо доступна інформація про низхідний канал, передавач може використовувати формування променя для концентрації енергії у певному напрямку, що підвищує потужність прийому сигналу. Це забезпечує підвищення якості зв'язку, оскільки сигнал спрямовується на конкретного користувача, а перешкоди з інших напрямків мінімізуються. Промені можуть формуватися за допомогою:

- Класичного формування променя з висококореляційними антенними решітками.

- Формування з використанням попереднього кодування, яке дозволяє використовувати низькокореляційні антени.

3. Просторове мультиплексування з розімкненим контуром: У цій схемі MIMO (використовується в системах LTE), передається кілька потоків даних через кілька антен, і система не отримує детальної інформації про стан каналу від приймача, окрім індикатора рангу передачі (TRI). Цей індикатор використовується для визначення кількості просторових рівнів, що дозволяє ефективно передавати дані в різних умовах каналу.

4. Замкнуте просторове мультиплексування: У цій схемі MIMO приймач (UE) передає інформацію про стан каналу (CSI) у вигляді індикатора матриці попереднього кодування (PMI), що допомагає передавачу вибрати найкращу матрицю для попереднього кодування. Обидві сторони (передавач і приймач) мають спільну кодову книгу, що містить набір можливих матриць попереднього кодування. Ця схема максимізує пропускну здатність і забезпечує ефективне розділення різних потоків даних.

5. Вибір передавальної антени: У багатоканальних системах, де кількість радіочастотних ланцюгів відповідає кількості антен, зростають витрати на обладнання та енергоспоживання. Для оптимізації цього процесу можна використовувати зворотний зв'язок від приймача, щоб вибирати одну або кілька антен із найвищим співвідношенням сигнал/шум (SNR) для передачі. Це

зменшує кількість необхідних радіочастотних ланцюгів, знижуючи вартість обладнання, складність реалізації та енергоспоживання. Цікаво, що такий підхід дозволяє досягати повного порядку різноманітності, тобто ефективність системи визначається кількістю всіх передавальних антен, навіть якщо одночасно використовуються не всі з них. Ці методи дозволяють досягати вищої ефективності та надійності бездротових систем, зберігаючи баланс між продуктивністю, складністю реалізації та енергоспоживанням [9].

1.2 Багатокористувацька багатоканальна передача даних/MU-MIMO

SU-MIMO (Single-User MIMO) та MU-MIMO (Multi-User MIMO) є ключовими методами, які розширюють можливості сучасних систем бездротового зв'язку. SU-MIMO використовується для розділення просторово мультиплексованих потоків даних від одного користувача, забезпечуючи високу пропускну здатність та подавлення інтерференції шляхом попереднього кодування та обробки сигналів. У цьому методі кілька антен на передавачі та приймачі дозволяють передавати незалежні потоки даних для одного користувача, що підвищує швидкість передачі інформації без потреби в додатковому спектрі.

MU-MIMO, з іншого боку, орієнтований на одночасне обслуговування кількох користувачів, використовуючи той самий частотно-часовий ресурс. Базова станція або точка доступу з декількома антенами можуть одночасно передавати інформацію на декілька користувачів, кожен з яких має одну або кілька антен. Це дозволяє ефективно використовувати спектр, забезпечуючи значне підвищення ємності мережі. MU-MIMO особливо корисний у сценаріях з великою кількістю користувачів, як у мобільних мережах або бездротових локальних мережах, де необхідна оптимізація використання частотно-часових ресурсів для обслуговування множини пристроїв. Група терміналів з однією або декількома антенами може спільно формувати віртуальний масив, що дозволяє

використовувати переваги просторового мультиплексування поряд з багатоантенною базовою станцією, як показано на рис. 1.1.

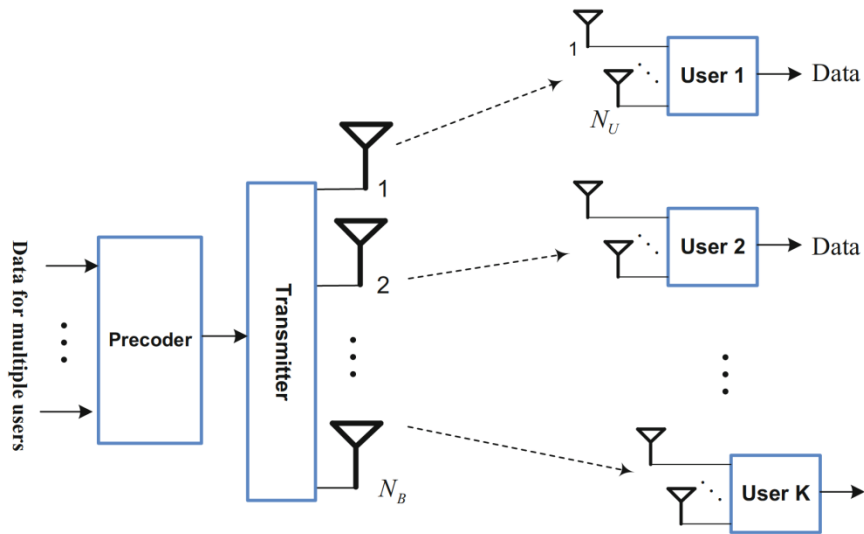


Рисунок 1.1 – Структурна схема бездротової системи MU-MIMO

MU-MIMO має значні переваги перед SU-MIMO, особливо в умовах сучасних мобільних мереж. Основну роль у цьому відіграє базова станція, яка з потужними можливостями обробки сигналів забезпечує просторове розділення потоків через кодування та формування променів для кожного користувача в низхідній лінії зв'язку. У висхідній лінії зв'язку вона застосовує багатокористувацьке виявлення, що дозволяє обслуговувати одночасно декілька користувачів з різними потребами.

MU-MIMO має ключові переваги над SU-MIMO. По-перше, вона дозволяє використовувати менш потужні термінали, зберігаючи ефект просторового мультиплексування. Це є критичним фактором для масштабування мережі, оскільки навіть пристрої з обмеженою кількістю антен можуть ефективно взаємодіяти з базовою станцією. По-друге, MU-MIMO менш вразливий до особливостей поширення сигналу. Просторове розділення терміналів означає, що навіть за умов прямої видимості або в середовищі з обмеженим розсіюванням можна досягти декореляції каналів.

На відміну від SU-MIMO, який потребує високої декореляції антен для досягнення просторового мультиплексування, в MU-MIMO ця вимога природно виконується через віддаленість користувачів один від одного. Географічно розділені термінали створюють різні просторові сигнатури, які менш піддаються взаємним перешкодам. Нарешті, MU-MIMO надає додаткову перевагу у вигляді багатокористувацької диверсифікації. Це збільшує загальну пропускну здатність каналу, що підтверджується інформаційно-теоретичними дослідженнями: сумарна пропускну здатність багатокористувацької передачі вища, ніж при однокористувацькому зв'язку [12].

Ефективність MU-MIMO значною мірою залежить від точності інформації про стан каналу (CSI) на передавачі, що дозволяє оптимально направляти потужність сигналу до кожного користувача. Точність CSI є критичною, оскільки навіть невеликий обсяг зворотного зв'язку здатний значно підвищити якість передачі. У системах SU-MIMO неточний CSI впливає здебільшого на співвідношення сигнал/шум (SNR), але не зменшує коефіцієнт мультиплексування. Натомість у MU-MIMO точність CSI безпосередньо визначає коефіцієнт мультиплексування, впливаючи на кількість одночасно обслуговуваних користувачів.

Забезпечення точного й своєчасного зворотного зв'язку CSI є складним завданням, адже це вимагає ресурсів та може перевантажити канали зв'язку. У ранніх версіях LTE основний акцент робився на SU-MIMO та на різноманітності передачі. Підтримка MU-MIMO з'явилася у версії 8, однак використовувалася та ж схема кодування, що й для SU-MIMO, з неявним CSI. У пізніших випусках LTE введено UE-специфічні опорні сигнали для розширеної підтримки MU-MIMO, що дозволило перейти до явного зворотного зв'язку CSI. Цей підхід зняв обмеження кодової книги та дав змогу застосовувати передові методи, як-от попереднє кодування з нульовим прискоренням і спряжене формування променя, підвищуючи ефективність MU-MIMO в умовах реальних мереж.

1.3 Ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів/OFDM

У бездротових системах, де підвищення швидкості передачі часто досягається через розширення смуги пропускання, виникають нові виклики, пов'язані з багатопроменевим каналом і інтерференцією між символами (ISI). У традиційній системі з однією несучою розширення смуги пропускання скорочує період символу, що призводить до підсилення ISI внаслідок затримок. Для компенсації цього на приймачі застосовують еквалайзер, який завдяки цифровому фільтру відновлює сигнали, спотворені каналом. Однак, із збільшенням смуги пропускання потрібен складний еквалайзер із численними відгалуженнями, що стає непрактичним для реалізації.

Одним з перспективних рішень цієї проблеми є багатопозиційна модуляція (MCM), що забезпечує альтернативу передачі з однією несучою. У системі MCM широкосмуговий сигнал розбивається на декілька ортогональних вузькосмугових каналів. Це подовжує період символу кожного вузькосмугового сигналу, зменшуючи відносний вплив затримок. В результаті, оскільки період символу в MCM є значно довшим, ніж у широкосмугового сигналу, ефекти ISI істотно зменшуються. Такий підхід дозволяє ефективніше передавати широкосмугові сигнали, що особливо актуально в умовах розширення смуги пропускання для підтримки високих швидкостей передачі [10].

OFDM (ортогональне частотне мультиплексування) є одним із найбільш значущих досягнень у галузі зв'язку, що стало провідним методом модуляції для дротових і бездротових систем за кілька десятиліть. Запропонований Чангом, цей метод забезпечує високу ефективність у боротьбі з частотно-селективними завмираннями, характерними для багатопроменевих каналів. Унікальною особливістю OFDM є здатність справлятися з інтерференцією між символами (ISI) за допомогою розділення широкосмугового сигналу на безліч

ортогональних вузькосмугових підканалів, що знижує необхідність складного вирівнювання. Окрім цього, використання дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) значно спрощує його реалізацію.

Завдяки своїм численным перевагам, OFDM знайшов застосування у багатьох стандартах, таких як DSL, DVB-T, Wi-Fi, WiMAX, LTE і LTE-Advanced. Цей метод став важливим компонентом для систем зв'язку п'ятого покоління (5G NR), де він був ретельно обраний після порівняння з іншими методами модуляції. OFDM забезпечує відмінний баланс між продуктивністю, складністю, масштабованістю та надійністю, що робить його ідеальним рішенням для вимог сучасних і майбутніх мереж, здатним підтримувати високошвидкісну передачу даних у широкому спектрі умов [11].

OFDM відрізняється від традиційного частотного мультиплексування, такого як FDMA (мультиплексування з частотним поділом каналів), кількома ключовими характеристиками:

1. Велика кількість ортогональних піднесучих: на відміну від FDMA, де використовується лише обмежена кількість піднесучих, що не перекриваються, OFDM застосовує велику кількість піднесучих, які розміщуються дуже близько одна до одної. Завдяки ортогональності вони можуть перекриватися в частотному спектрі без створення інтерференції, що значно підвищує ефективність використання частотного ресурсу.

2. Прямокутне формування імпульсів і синусоїдальний спектр: для формування піднесучих в OFDM використовується прямокутний імпульс, який має синусоїдальний спектр, що спрощує реалізацію та обробку сигналу. Завдяки цій властивості реалізація системи можлива з використанням швидкого перетворення Фур'є (FFT), яке значно полегшує модуляцію та демодуляцію сигналу.

3. Щільне уцілювання піднесучих в частотній області: піднесучі в OFDM розташовані щільно, з інтервалом $\Delta f = 1/T$, де T — тривалість символу. Це забезпечує мінімальний розподіл частотного ресурсу, оскільки кожна піднесуча використовується на межі можливого перекриття з іншими піднесучими, але

без інтерференції завдяки їх ортогональності. Це дозволяє досягти високої спектральної ефективності, на відміну від FDMA, де піднесучі розділені проміжками для запобігання взаємним завадам. Ці характеристики роблять OFDM надзвичайно ефективним методом для широкосмугових систем зв'язку, які потребують високої пропускної здатності та стійкості до інтерференцій у складних каналах з багатопроменевим поширенням.

Історія розвитку OFDM позначена двома важливими нововведеннями, що сприяли його широкому застосуванню: використанням дискретного перетворення Фур'є (ДПФ) як модулятора і введенням циклічного префікса. Хоча банк пар "модулятор-корелятор" часто використовується для пояснення базових принципів OFDM, його структура є складною для практичної реалізації. Натомість OFDM забезпечує простішу та ефективнішу реалізацію завдяки своїй ортогональній структурі та точному вибору відстаней між піднесучими.

Для генерації та приймання сигналів OFDM використовується ДПФ, що значно знижує обчислювальну складність. Коли кількість піднесучих є степенем двійки, цей процес може бути ще більше прискорений за допомогою алгоритму швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), який забезпечує високу обчислювальну ефективність. Крім того, для протидії часовій дисперсії в каналі було введено циклічний префікс або циклічне розширення, запропоноване Пеледом. Циклічний префікс додається на початок кожного символу OFDM, щоб усунути інтерференцію між символами (ISI) у багатопроменевих каналах і спростити процес вирівнювання. Це дозволяє системі OFDM зберігати ортогональність піднесучих навіть за наявності багатопроменевих затримок, що робить її надзвичайно ефективною в складних середовищах, наприклад у мобільних та широкосмугових мережах [15].

Вставка циклічного префікса (ЦП) у OFDM-системах є важливим засобом для зменшення міжсимвольної інтерференції (ISI) та міжнесучої інтерференції (ICI), що можуть виникати через часову дисперсію каналу. Коли остання частина OFDM-символу копіюється на його початок, це створює періодичність

сигналу, яка дозволяє зберігати ортогональність піднесучих протягом інтервалу інтегрування, тобто на періоді символу. Така ортогональність дозволяє уникнути ICI і, таким чином, підвищити надійність передачі.

Додаткова перевага циклічного префікса полягає у тому, що він перетворює лінійну згортку з канальним фільтром на кругову згортку, що значно спрощує обробку сигналу в частотній області. Проте використання циклічного префікса також має недоліки, зокрема, втрати потужності та пропускну здатності через зниження корисної тривалості OFDM-символу.

Для мінімізації цих втрат іноді зменшують міжпіднесучі відстані, що дозволяє збільшити тривалість символу, однак це може підвищити чутливість до доплерівського спектру і знижувати надійність сигналу в умовах швидкої зміни каналу. Крім того, циклічний префікс не обов'язково має повністю покривати часову дисперсію каналу, і тут виникає компроміс: вибір довжини ЦП є балансом між втратами потужності і можливим спотворенням сигналу через залишкову часову дисперсію, яка не покрита ЦП.

1.4 Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів/OFDMA

Ефективний розподіл радіоресурсів у стільникових мережах є важливою складовою для забезпечення якісного зв'язку, особливо з огляду на обмеженість частотно-часових ресурсів. Мета полягає в оптимальному виділенні каналів для різних користувачів, щоб максимально використовувати доступні ресурси і забезпечити надійний зв'язок як для висхідних (uplink), так і для низхідних (downlink) каналів.

Розподіл каналів між користувачами, що знаходяться в різних географічних зонах, здійснюється за допомогою множинного доступу. Цей процес включає поділ доступного спектра і часу на окремі канали, які призначаються користувачам, використовуючи ортогональні або неортогональні методи. Ортогональні методи забезпечують ізоляцію сигналів

користувачів, що допомагає уникати взаємних перешкод, тоді як неортогональні допускають деяку інтерференцію, але можуть бути більш ефективними у високонавантажених мережах. До основних методів множинного доступу, що широко використовувалися до появи 4G, належать:

1. TDMA (Time Division Multiple Access) – розподіл каналу в часовому домені, де кожному користувачеві призначаються певні часові слоти для передачі даних.

2. FDMA (Frequency Division Multiple Access) – поділ частотного спектра на окремі канали для різних користувачів.

3. CDMA (Code Division Multiple Access) – використання унікальних кодів для кожного користувача, що дозволяє одночасно передавати сигнали на одній частоті.

4. SDMA (Spatial Division Multiple Access) – розподіл ресурсів на основі просторового положення користувачів, що дозволяє одночасне використання частот і часу. Ці методи забезпечують баланс між пропускною здатністю та якістю зв'язку, враховуючи обмеження радіоресурсів, і залишаються основою для розробки нових, більш гнучких схем множинного доступу в сучасних бездротових системах.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) традиційно розглядається у сценарії «точка-точка», де всі піднесучі використовуються для передачі даних одному користувачу. У низхідній лінії зв'язку (downlink) всі піднесучі обслуговують одного користувача, передаючи призначені йому дані. Водночас у висхідній лінії зв'язку (uplink) один користувач захоплює всі доступні піднесучі для передачі своїх даних. Проте OFDM має також здатність ефективно працювати як схема множинного доступу. Ключова властивість OFDM — незалежність піднесучих — дозволяє розподіляти різні піднесучі серед декількох користувачів, забезпечуючи ортогональність для уникнення інтерференції між користувачами. Така схема відома як OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). OFDMA є розширенням OFDM, яке використовує технологію з декількома піднесучими для створення гнучких та

ефективних часово-частотних ресурсів. Завдяки цьому, кожен користувач отримує свій набір піднесучих або «ресурсних блоків», які можуть динамічно призначатися в залежності від потреб мережі. Ця архітектура надає значні переваги, зокрема в системах з високою мобільністю та змінними навантаженнями, оскільки вона дозволяє гнучко та ефективно керувати ресурсами для покращення пропускної здатності та мінімізації затримок. У низхідній лінії зв'язку певні піднесучі OFDM призначені для передачі даних окремим користувачам, як показано на рис. 1.2, тоді як у висхідній лінії зв'язку різні користувачі можуть одночасно передавати свої дані, використовуючи окремі піднесучі OFDM.

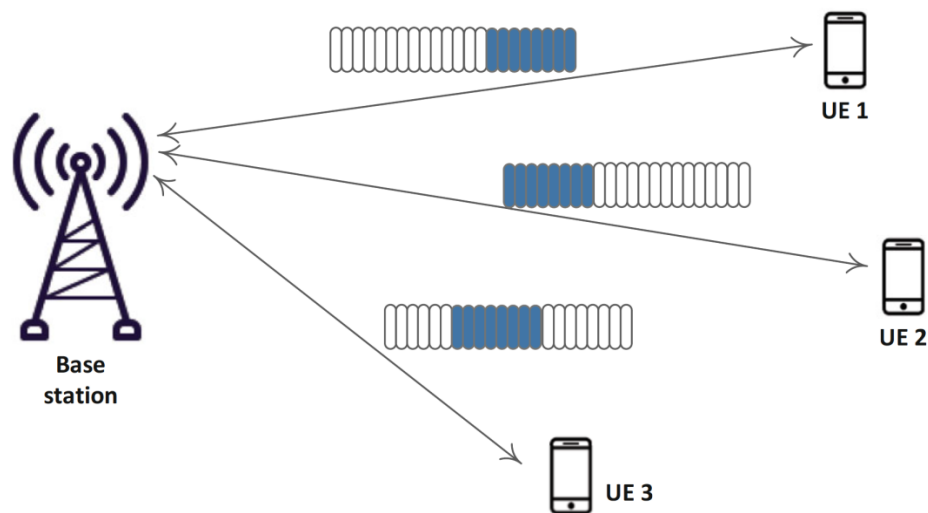


Рисунок 1.2 – Структура бездротової системи на основі OFDMA

OFDMA використовує частотний домен для забезпечення додаткової гнучкості та ефективного розподілу ресурсів у системі, зокрема завдяки таким можливостям:

1. Масштабована пропускна здатність. OFDMA дозволяє масштабувати пропускну здатність системи без змін базових параметрів системи або обладнання, що дає змогу легко адаптувати систему для роботи у вузьких або фрагментованих частотних діапазонах. Це забезпечує гнучкість при розгортанні мереж у різних частотних спектрах і підтримує можливість розширення

пропускної здатності при потребі, зберігаючи при цьому стабільну роботу обладнання.

2. Гнучкий розподіл частотно-часових ресурсів. Завдяки можливості розподіляти піднесучі серед різних користувачів, OFDMA дозволяє ефективно керувати часово-частотними ресурсами для користувачів з різними вимогами до трафіку та пропускної здатності. Це також сприяє реалізації частотного планування, завдяки чому можна оптимально використовувати частотну різноманітність для зменшення перешкод і покращення надійності сигналу.

3. Повторне використання частот і управління міжстільниковими завадами. OFDMA підтримує дробове або м'яке повторне використання частот, що є особливо важливим для зменшення інтерференції між сусідніми стільниками. Це полегшує координацію міжстільникових завад, підвищуючи ефективність спектра та забезпечуючи кращу якість обслуговування, особливо на межах стільників. Ці переваги роблять OFDMA одним із найбільш гнучких і ефективних методів множинного доступу, особливо в умовах обмеженого частотного спектра і високих вимог до якості та надійності зв'язку.

OFDMA, хоча й забезпечує гнучкий і ефективний доступ до ресурсів, має певні технічні обмеження при використанні у висхідній лінії зв'язку (uplink). Основна проблема полягає в тому, що для підтримання ортогональності піднесучих сигнали від різних користувачів повинні прибувати на базову станцію з мінімальною різницею в часі. Якщо час прибуття різниться більше, ніж довжина циклічного префікса, це може призвести до міжпіднесучої інтерференції (ICI) і порушити ортогональність, що погіршує якість зв'язку. Через відмінності в затримках сигналу залежно від відстані користувачів до базової станції потрібно коригувати час передачі кожного користувача, щоб сигнали прибували синхронно. Це досягається за допомогою управління синхронізацією передачі, яке коригує час початку передачі кожного користувача, зокрема з урахуванням його розташування. Наприклад, користувачі, що знаходяться далі, мають починати передачу раніше, щоб їх сигнали досягли базової станції одночасно із сигналами ближчих користувачів.

Ще одним викликом є те, що ця затримка змінюється, коли користувачі переміщуються в межах стільника, тому управління синхронізацією передачі має бути динамічним і постійно адаптивним. Система повинна безперервно оцінювати і коригувати час передачі кожного користувача, щоб компенсувати зміни затримки розповсюдження сигналу. Це адаптивне налаштування є важливою умовою для підтримки стабільної роботи OFDMA у висхідній лінії зв'язку, особливо у великих мережах з багатьма мобільними користувачами.

Окрім управління синхронізацією передачі, OFDMA на висхідній лінії зв'язку вимагає вирішення проблем, пов'язаних із частотними помилками та дисбалансом потужності прийнятих сигналів. Навіть при точній синхронізації можуть виникати міжнесучі інтерференції (ICI) через частотні помилки та доплерівський розкид, які спричиняють зміщення частот піднесучих. Ці проблеми здебільшого залишаються мінімальними, якщо частотні зсуви і доплерівський ефект не перевищують допустимих меж. Проте для забезпечення ефективної роботи передбачено, що всі піднесучі приймаються на однакових рівнях потужності.

Через різні відстані між користувачами і базовою станцією у висхідній лінії зв'язку виникають значні відмінності у втраті потужності на шляху, через що рівні сигналів, що надходять, можуть суттєво відрізнятися. Цей дисбаланс призводить до так званої інтерференції від сильних піднесучих до слабших (near-far effect), де сильніші сигнали можуть створювати завади для слабших сусідніх піднесучих, особливо якщо ортогональність між ними порушується. Щоб зменшити цю інтерференцію, OFDMA передбачає управління потужністю у висхідній лінії зв'язку. Користувацьким терміналам, які розташовані ближче до базової станції, можна знизити потужність передачі, щоб усі прийняті сигнали мали приблизно однаковий рівень. Це дозволяє мінімізувати ризик завад між піднесучими і забезпечує збереження їх ортогональності. Такий підхід до управління потужністю допомагає стабілізувати якість зв'язку і підтримувати продуктивність системи на високому рівні, особливо в умовах, коли різниця в рівнях потужності сигналів значна [1].

Під час розробки стандарту LTE (3GPP) було проведено детальну оцінку кількох схем множинного доступу для визначення найефективніших технологій для низхідної і висхідної ліній зв'язку. Для низхідної лінії розглядалися OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) і MC-CDMA (Multi-Carrier Code Division Multiple Access), оскільки вони могли забезпечити високу пропускну здатність і ефективне управління ресурсами. У висхідній лінії, де значну роль грає енергоефективність, кандидатами стали SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), OFDMA і MC-CDMA.

На засіданні 3GPP RAN у грудні 2005 року було прийнято остаточне рішення щодо вибору схем. OFDMA було затверджено для низхідної лінії зв'язку завдяки його здатності ефективно працювати в умовах багатопроблемного розповсюдження та забезпечувати високу швидкість передачі даних. Для висхідної лінії обрали SC-FDMA, оскільки він забезпечує меншу пікову потужність сигналу, що є критичним для продовження заряду акумулятора мобільних пристроїв. Цей вибір став ключовою віхою у розвитку LTE, заклавши основу для високопродуктивних мереж із покращеними можливостями передачі даних і оптимізованим використанням частотних ресурсів.

1.5 Множинний доступ з частотним розділенням каналів з однією несучою/SC-FDMA

Проблема високого відношення пікової до середньої потужності (PAPR) є однією з ключових технічних складностей в передачі сигналів OFDM. Високий PAPR вимагає підсилювачів потужності з високою лінійністю, що призводить до зниження їхньої ефективності та підвищення вартості. Це є особливо критичним для мобільних пристроїв, де обмеження енергоспоживання мають вирішальне значення. Існують різні методи зниження PAPR, такі як:

1. Резервування тональності (Tone Reservation) – коли частина піднесучих не використовується для передачі даних, а замість цього модулюється для

придушення пікових значень сигналу. Цей метод дозволяє певним чином розподілити енергію сигналу, щоб знизити пікові значення.

2. Селективне скремблювання (Selective Scrambling) – коли передається сигнал обирається з кількох можливих варіантів, які були скрембльовані за допомогою різних кодів. Це дозволяє вибрати той сигнал, який має найнижче значення PAPR.

Однак, більшість із цих методів мають свої обмеження, наприклад, складність реалізації, втрати спектральної ефективності чи необхідність додаткових обчислювальних ресурсів. Через це ширша увага зосереджується на альтернативних схемах передачі, які зменшують пікові коливання сигналу.

Системи з однією несучою (Single Carrier) часто розглядаються як приваблива альтернатива OFDM у висхідній лінії зв'язку, оскільки вони мають низьке значення PAPR і забезпечують менші вимоги до підсилювача потужності. Це особливо корисно для мобільних терміналів, де збереження енергії є критично важливим. Однією з таких технологій є, наприклад, SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access), яка використовується в LTE для висхідного зв'язку. Таким чином, для мобільних систем існує баланс між спектральною ефективністю, енергоспоживанням та апаратною складністю, який потрібно враховувати при виборі методів модуляції та передачі [2].

Рисунок 1.3 ілюструє фундаментальну концепцію, що лежить в основі передачі OFDM з дискретним перетворенням Фур'є (DFT-s-OFDM). Отже, DFT-s-OFDM (Discrete Fourier Transform spread-OFDM) можна сприймати як техніку, що поєднує характеристики OFDM з властивостями системи з однією несучою. Основною ідеєю DFT-s-OFDM є використання попереднього кодування шляхом перетворення ДПФ, що дозволяє знизити PAPR у порівнянні зі звичайним OFDM.

Процес генерації сигналу DFT-s-OFDM відбувається наступним чином:

1. Модуляція символів: На початку формується блок з M символів (наприклад, QPSK або 16QAM).

2. Перетворення ДПФ: До цього блоку застосовується Дискретне Перетворення Фур'є (ДПФ) розміром M . Це перетворення "розподіляє" енергію символів по всьому блоку, що надає DFT-s-OFDM властивість систем з однією несучою.

3. Мапування на піднесучі: Вихідні значення ДПФ розподіляються на певні піднесучі у вигляді масиву комплексних коефіцієнтів. Це подібно до того, як піднесучі модуляції OFDM заповнюються комплексними коефіцієнтами.

4. Інверсне Швидке Перетворення Фур'є (IFFT): Як і в звичайному OFDM, застосовується IFFT, що перетворює масив коефіцієнтів піднесучих у часовий сигнал.

5. Додавання захисного інтервалу (циклічний префікс): Як і в OFDM, додається циклічний префікс для уникнення міжсимвольних інтерференцій (ISI).

Основною відмінністю між DFT-s-OFDM та OFDM є застосування попереднього кодування на основі ДПФ, яке зменшує коливання миттєвої потужності та забезпечує менше значення PAPR. Це робить DFT-s-OFDM ефективним рішенням для висхідної лінії зв'язку, де енергоспоживання є критичним фактором, наприклад, у мобільних мережах LTE.

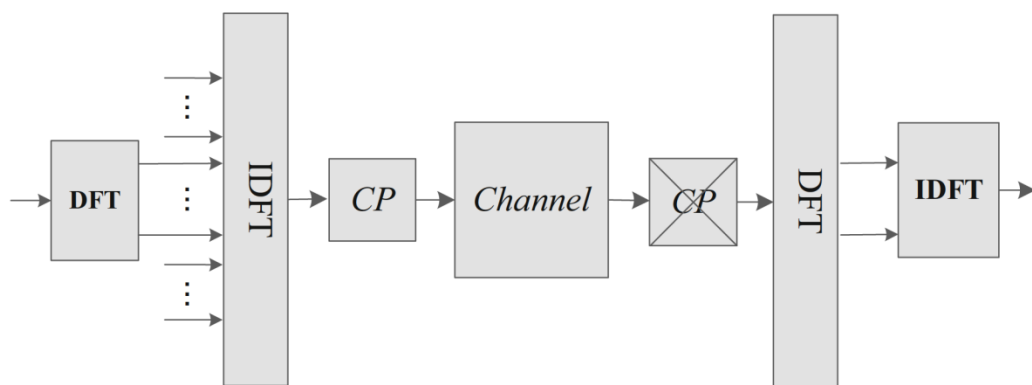


Рисунок 1.3 – Блок-схема передачі DFT-s-OFDM

На практиці OFDM-модулятор зазвичай реалізується як обернене ДПФ (IDFT) розміру N , при цьому всі невикористані входи IDFT встановлюються в

нуль. Якщо розмір DFT M дорівнює розміру IDFT N , то послідовні каскадні операції DFT/IDFT повністю компенсують одна одну. Однак, коли M менше N і решта входів IDFT встановлені в нуль, вихід IDFT набуває характеристик сигналу з однією несучою. Отже, сигнал демонструє мінімальні коливання потужності, а його смуга пропускання визначається M .

Основна перевага DFT-s-OFDM над звичайним OFDM полягає в його здатності пом'якшувати раптові коливання потужності передачі, тим самим потенційно підвищуючи ефективність підсилювача потужності. DFT-s-OFDM - це метод передачі, який поєднує в собі всі сприятливі характеристики:

- Мінімальні флуктуації миттєвої потужності сигналу, що передається, подібно до властивості з однією несучою.
- Потенціал для ефективного та якісного вирівнювання в частотній області.
- Можливість гнучкого розподілу смуги пропускання в системі FDMA.

Динамічно регулюючи розмір блоку M , можна змінювати миттєву смугу пропускання сигналу, що передається, що дозволяє гнучко призначати смугу пропускання. Крім того, призначаючи вихід ДПФ на іншу підмножину піднесучих OFDM, сигнал, що передається, можна зміщувати в частотній області. Кілька користувачів можуть одночасно передавати свої дані, використовуючи передачу DFT-s-OFDM, що дозволяє не тільки малопотужні варіанти, такі як передача з однією несучою, але й ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів. Тому ця технологія називається SC-FDMA (Berardinelli et al., 2008), яка була прийнята як схема передачі висхідної лінії зв'язку в 3GPP LTE.

1.6 Технологія ретрансляції сигналів

Технологія розгортання ретрансляційних вузлів для покращення покриття та збільшення швидкості передачі даних є ключовою в сучасних бездротових мережах, особливо для систем 5G та майбутніх стандартів. Ретрансляція дійсно може суттєво знизити втрати на шляху поширення сигналу, скорочуючи

фізичну відстань між терміналом і базовою станцією, що дозволяє досягати високої швидкості передачі даних навіть за відсутності високої потужності передачі.

Основні моменти розгортання ретрансляційних вузлів:

1. Ретрансляційні вузли мають бути "невидимими" для терміналів, тобто з точки зору мобільного пристрою вони виглядають як звичайні базові станції. Це забезпечує зворотну сумісність із застарілими стандартами та мінімізує вимоги до оновлення програмного та апаратного забезпечення терміналів. Прозорість також спрощує механізми управління мережею.

2. Зменшуючи відстань між терміналом і базовою станцією, ретрансляційні вузли дозволяють компенсувати втрати на шляху розповсюдження сигналу. Це особливо ефективно у великих і складних міських середовищах, де сигнали можуть сильно затухати через перепони (будівлі, перешкоди тощо).

3. Ретрансляційний вузол може виконувати двостороннє перетворення сигналів між терміналом і основною мережею, використовуючи бездротовий інтерфейс для підключення до основної інфраструктури. Це дозволяє ретрансляційним вузлам розширювати покриття навіть у місцях, де прокладання фізичних кабельних з'єднань недоцільне чи технічно складне.

4. Ретрансляція дозволяє збільшити щільність розгортання мережі без суттєвого збільшення частотного навантаження, оскільки вона може повторно використовувати ті ж частотні ресурси для покриття більш віддалених зон.

В умовах розвитку мереж 5G та майбутніх технологій розгортання ретрансляційних вузлів є важливим елементом для досягнення високої пропускної здатності, зниження затримок і підвищення ефективності покриття. Зокрема, такі вузли можуть забезпечити підключення у віддалених районах, у щільній міській забудові та навіть у складних внутрішніх середовищах (наприклад, у великих будівлях, підземних спорудах тощо). Як показано на рис. 1.4, з'єднання між базовою станцією і ретранслятором, а також ретранслятором і терміналом називаються магістральним каналом і каналом доступу відповідно.

В LTE-Advanced (Release 10) було введено вдосконалену схему ретрансляції з декодуванням і ретрансляцією (Decode-and-Forward), яка передбачає повне декодування сигналу ретранслятором перед його повторним передаванням. Це дозволяє ефективніше усувати помилки й покращує якість зв'язку, особливо на великих відстанях або в умовах сильного загасання сигналу.

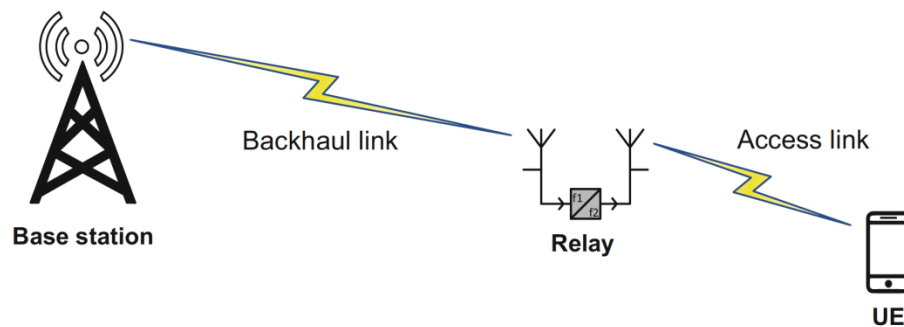


Рисунок 1.4 – Транзитні канали та канали доступу в архітектурі на основі ретрансляції

Простіша схема – ретрансляція з підсиленням і ретрансляцією (Amplify-and-Forward) – працює без проміжного декодування, просто підсилюючи сигнал і передаючи його далі. Такий метод не потребує додаткової стандартизації, оскільки він не змінює структуру даних, але є менш ефективним у боротьбі з шумами та інтерференцією.

1.7 Агрегація несучих

LTE-Advanced і IEEE 802.16m були розроблені для відповідності вимогам IMT-Advanced, що включають високу пікову швидкість передачі даних та розширену смугу пропускання. Проте, через обмеження з доступністю великих ділянок безперервного спектру, було розроблено механізм агрегації несучих. Він дозволяє об'єднувати кілька компонентних несучих для досягнення бажаної загальної пропускної здатності, що стало ефективним рішенням для подолання фрагментованого спектру. У LTE-Advanced можливо агрегувати до п'яти

компонентних несучих, що дозволяє досягти ширини смуги до 100 МГц для одного терміналу. Кожна з агрегованих несучих базується на структурі LTE версії 8, що забезпечує зворотну сумісність. Це означає, що LTE-Advanced термінал може використовувати як одну несучу для звичайного LTE-зв'язку, так і кілька агрегованих несучих для підвищення швидкості передачі даних. Такий підхід забезпечує максимальну гнучкість та ефективність використання спектру, відповідаючи потребам сучасних мереж передачі даних.

Розглянемо три основні підходи до агрегації несучих в LTE-Advanced:

1. Внутрішньосмугове суміщення (Intra-band contiguous aggregation) дозволяє об'єднувати суміжні компонентні несучі в одній смузі частот, що є найпростішим із трьох. За його використання не потрібно додаткових захисних смуг між компонентами, що економить спектральні ресурси. Також є можливість використовувати один ланцюг обробки, якщо радіочастотний приймач підтримує достатню ширину смуги. Однак на практиці, через розподіл спектру, внутрішньосмугове суміжне суміщення часто обмежене.

2. Внутрішньосмугове несуміжне суміщення (Intra-band non-contiguous aggregation) дозволяє ефективно використовувати спектр навіть за наявності частотних розривів між компонентними несучими. Це ідеальний метод для розподілених ресурсів у межах однієї частотної смуги.

3. Міжсмугова агрегація (Inter-band aggregation) об'єднує несучі з різних смуг частот, забезпечуючи додаткову частотну різноманітність. Завдяки агрегації несучих у різних смугах, сигнал може краще адаптуватися до різних умов замирання, притаманних кожній смузі. Проте, для міжсмугової агрегації потрібні окремі радіочастотні й базові ланцюги для кожної смуги, що ускладнює й здорожчує її реалізацію. Кожен із цих підходів має свої переваги та обмеження, що дозволяє операторам вибрати оптимальне рішення, залежно від наявного спектра і цільових характеристик мережі. Отже, різні типи агрегації несучих надають операторам гнучкість у використанні доступного спектру, що дозволяє адаптувати мережу під різні умови та оптимізувати її

продуктивність. Кожен підхід до агрегації має свої переваги й обмеження, що впливають на:

1. Наявність спектра: Якщо оператор має в розпорядженні суміжний спектр, він може обирати внутрішньосмугове суміжне суміщення, яке є менш ресурсозатратним. В умовах роздробленого спектра підходять внутрішньосмугове несуміжне чи міжсмугове рішення.

2. Частотне різноманіття: Міжсмугова агрегація може покращити якість зв'язку в умовах завмирань сигналу, оскільки використання несучих із різних частотних діапазонів допомагає мінімізувати інтерференцію та втрати. Це особливо корисно в зоні дії однієї базової станції з різними характеристиками розповсюдження сигналу.

3. Складність і вартість реалізації: Вибір агрегації впливає на технічну складність апаратного забезпечення, особливо у випадку міжсмугової агрегації, яка потребує кількох радіочастотних трактів і підвищує вартість обладнання.

Завдяки цій гнучкості IMT-Advanced стандарти, включаючи LTE-Advanced, забезпечують ефективніше використання доступного спектру, дозволяючи розгортати канали з ширшою смугою пропускання й підвищувати загальну пропускну здатність мереж [16].

1.8 Коди низької щільності з перевіркою на парність/LDPC

У 1948 році Клод Шеннон зробив революційний внесок у розвиток теорії інформації, опублікувавши свою роботу "A Mathematical Theory of Communication". У цій праці він встановив основні принципи передачі даних через ненадійні канали зв'язку і ввів поняття пропускну здатності (канальної ємності) — максимальну швидкість передачі інформації, при якій ще можлива її надійна передача з мінімальними помилками. Шеннон показав, що існує межа для будь-якого каналу, за якою стає неможливим передавати дані без помилок, якщо швидкість перевищує цю пропускну здатність. Крім того, він довів, що існують коди, які дозволяють передавати дані на швидкості, близькі до цієї

межі, і що ймовірність помилки при декодуванні цих кодів може зменшуватися до нуля, коли довжина кодового блоку збільшується. Це відкриття мало значний вплив на подальший розвиток технологій зв'язку, зокрема на бездротовий зв'язок, де ефективне кодування та декодування даних є критично важливими для забезпечення надійної передачі інформації.

Теорія Шеннона заклала основи для сучасної цифрової комунікації, включаючи мобільний зв'язок, Інтернет і супутникові системи, дозволивши інженерам розробляти більш ефективні та стійкі до шумів системи передачі даних.

Конкатенаційні коди Ріда-Соломона та згорткові коди стали дуже популярними у другій половині XX століття завдяки їхній високій ефективності в контролі помилок. Це затьмарило увагу до інших технік, таких як коди з низькою щільністю перевірки на парність (LDPC-коди), які вперше були запропоновані Робертом Галлагером ще у 1960-х роках. Проте, через три десятиліття після свого першого винаходу, коди LDPC пережили відродження завдяки незалежним дослідженням двох спільнот: Дейвіда МакКея та Раджива Неала у 1997 році, а також Томаса Річардсона та інших у 2001 році. Хоча обидві групи керувалися різними мотивами, вони дійшли до схожих висновків про ефективність LDPC-кодів. Ключовою особливістю LDPC-кодів є їхня розріджена матриця перевірки на парність, яка містить відносно мало одиниць у порівнянні з нулями. Це дозволяє використовувати ефективні алгоритми для кодування та декодування.

Процес кодування починається з вектора інформаційних бітів, відомого як вектор повідомлення. Розріджена матриця перевірки на парність визначає взаємозв'язки між змінними вузлами (що представляють біти повідомлення) і контрольними вузлами (що представляють рівняння перевірки на парність). Для отримання кодового слова інформаційні біти множаться на цю матрицю з використанням операції додавання по модулю 2 (XOR), в результаті чого генеруються біти перевірки на парність. Сформоване кодове слово складається як з початкових інформаційних бітів, так і з бітів перевірки на парність.

Декодування LDPC-кодів, як правило, виконується за допомогою ітеративних алгоритмів, таких як алгоритм розповсюдження переконання (belief propagation) або алгоритм сумарного добутку (sum-product algorithm). Ці алгоритми дозволяють ефективно виправляти помилки, надаючи LDPC-кодам перевагу в різних системах зв'язку, особливо в сучасних високошвидкісних і бездротових мережах. Завдяки своїм характеристикам, LDPC-коди сьогодні використовуються в багатьох сучасних комунікаційних стандартах, таких як Wi-Fi, 5G, супутниковий зв'язок та інші системи з високими вимогами до надійності передачі даних [3].

Ітеративне декодування кодів LDPC спрямоване на поступове покращення оцінок ймовірностей кожного біта в кодовому слові та виправлення помилок, що виникають у каналі зв'язку. Основна ідея цього процесу полягає в тому, щоб за допомогою обміну повідомленнями між вузлами змінних та вузлами перевірки (що є елементами розрідженої матриці перевірки на парність) уточнювати оцінки бітових значень. На фазі ініціалізації кожен біт отримує початкову ймовірність бути 0 або 1, зазвичай на основі виходу каналу або попередньо отриманих даних.

Під час кожної ітерації вузли змінних надсилають свої поточні оцінки вузлам перевірки, а вузли перевірки, у свою чергу, надсилають інформацію назад, уточнюючи ці оцінки. Цей процес є ітеративним і дозволяє динамічно оновлювати ймовірності кожного біта. Розрідженість матриці перевірки на парність робить цей процес ефективним з точки зору обчислювальних витрат, оскільки кожен вузол перевірки взаємодіє лише з невеликою кількістю змінних вузлів.

Процес декодування триває до тих пір, поки не буде досягнуто певного критерію зупинки. Це може бути:

- досягнення максимальної кількості ітерацій,
- досягнення стабільного рівня збіжності (коли ймовірності більше не змінюються значно),
- або досягнення мінімальної кількості помилок у результаті.

LDPC-коди показали чудові результати у виправленні помилок, перевершуючи продуктивність багатьох інших кодів. Наприклад, нерегулярний LDPC-код, розроблений Річардсоном та його колегами у 2001 році, продемонстрував коефіцієнт бітових помилок (BER) на рівні 10^{-6} , що було лише на 0,13 дБ гірше від теоретичної межі Шеннона, яка визначає найкращу можливу ефективність передачі даних через канал зв'язку. Цей результат навіть перевершив продуктивність відомих турбо-кодів, що були стандартом у багатьох комунікаційних системах. Ще один вражаючий результат був досягнутий Чангом та його командою у 2001 році, коли вони розробили LDPC-код із довжиною блоку 10^7 , який зміг досягти коефіцієнта бітових помилок на рівні 10^{-6} і мав продуктивність лише на 0,04 дБ нижче межі Шеннона. Це стало важливим проривом у теорії кодування і мало великий вплив на розробку сучасних систем зв'язку. LDPC-коди завдяки своїй високій ефективності та близькості до межі Шеннона стали важливим елементом у сучасних комунікаційних стандартах, таких як 5G та Wi-Fi, де надійність передачі даних є критично важливою [7].

1.9 Гетерогенна мережа/HetNet

Мережева архітектура зазнала суттєвих змін у відповідь на зростаючий попит на високу швидкість передачі даних для великої кількості мобільних користувачів. У стільникових мережах застосовуються різноманітні технології для досягнення високої пропускної здатності системи, зокрема:

1. Передові методи радіопередачі спрямовані на підвищення спектральної ефективності, що дозволяє використовувати доступні радіочастотні ресурси більш оптимально.

2. Розширення частотного діапазону, який може бути використаний для передачі даних, допомагає забезпечити більшу пропускну здатність.

3. Збільшення кількості базових станцій або малопотужних вузлів у мережі для зменшення відстані між користувачами та базовими станціями також сприяє підвищенню пропускної здатності.

У традиційних однорідних мережах для покращення показників пропускної здатності та зменшення розміру осередків використовується розбиття мережі. Однак цей процес вимагає значних зусиль з перепланування та реконфігурації системи. Крім того, трафік у мережах розподіляється нерівномірно, що може призводити до перевантаження деяких осередків, тоді як інші залишаються недовантаженими. Для вирішення зазначених проблем у LTE-Advanced були представлені гетерогенні мережі (HetNets). Ця архітектура складається з осередків різного розміру, потужності передачі та зони покриття. Основні компоненти HetNets включають:

- Макрокомірки мають велику зону покриття і забезпечують основне покриття мережі.
- Мікрокомірки зазвичай використовуються для посилення покриття в зонах з високим попитом, таких як міські райони.
- Піко- та фемтокомірки використовуються для заповнення прогалів у покритті, як усередині приміщень, так і на вулиці. Малопотужні базові станції економічно додаються до мереж макростільників, щоб забезпечити високу пропускну здатність у зонах з високим попитом. Вони допомагають покращити загальну продуктивність мережі, зменшуючи затримки та покращуючи якість зв'язку.

Гетерогенні мережі є важливим кроком у розвитку стільникових технологій, адже вони дозволяють більш ефективно задовольняти зростаючі потреби в передачі даних та покращувати користувацький досвід. У гетерогенних мережах (HetNets) одним з основних викликів є управління міжстільниковими перешкодами (Inter-Cell Interference Coordination, ICIC), оскільки стільники різного типу часто працюють на одних і тих самих частотах, що може призводити до взаємної інтерференції. Це особливо актуально в умовах, коли не вистачає спектральних ресурсів для виділення окремих

частотних діапазонів для кожного типу стільників, таких як макро-, піко-, фемто- та мікроклітинки.

Коли різні типи стільників мають однакові частотні ресурси, виникає проблема географічного перекриття та взаємної інтерференції. Зокрема, базові станції з малими зонами покриття, такі як піко- або фемтокомірки, можуть створювати перешкоди для макроклітин, що суттєво знижує продуктивність системи. Для боротьби з цією проблемою міжнародна організація 3GPP (Third Generation Partnership Project) створила механізми ICIC, які пізніше були вдосконалені до eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination).

В рамках LTE-Advanced була розроблена концепція агрегації несучих (Carrier Aggregation), що дозволяє підвищити ефективність використання частотного спектру в гетерогенних мережах. Цей метод передбачає об'єднання кількох частотних смуг (несучих) в одну логічну смугу, що підвищує загальну пропускну здатність системи. Однак для уникнення перешкод важливо належним чином координувати використання частот між макро- та малими стільниками.

eICIC використовує кілька важливих технік для зменшення впливу перешкод:

1. Часове планування передачі (Time Domain eICIC) використовується для чергування активної передачі даних між макро- та малими стільниками. Вільні періоди (або "абсолютні тиші") в роботі макроосередку дозволяють малим стільникам передавати дані без перешкод.

2. Агрегація несучих дозволяє одночасно використовувати кілька частотних смуг для передачі даних. За допомогою агрегації несучих можна розділяти трафік між макро- та малими стільниками, розподіляючи ресурси залежно від потреби та уникати інтерференції між управлінськими сигналами.

3. Для запобігання інтерференції між керуючими сигналами макро- та дрібностільникових базових станцій використовується планування між несучими. Це дозволяє управляти передачами в таких спосіб, щоб сигнали управління не заважали один одному.

Завдяки eICIC та агрегації несучих, гетерогенні мережі можуть забезпечувати ефективну співпрацю між різними типами стільників, навіть за умов обмеженого спектрального ресурсу та високих вимог до пропускної здатності. Це сприяє покращенню покриття, продуктивності та якості обслуговування, зокрема в умовах нерівномірного розподілу трафіку або високої концентрації користувачів [8].

1.10 Зв'язок між пристроями/D2D

Традиційна мобільна мережа вимагає передачі даних через базову станцію, що обмежує її ефективність у ситуаціях, коли пристрої знаходяться на близькій відстані один від одного. З іншого боку, D2D-зв'язок (Device-to-Device) дозволяє пристроям встановлювати прямий зв'язок для обміну даними без необхідності звертатися до базової станції, що значно скорочує затримку та знижує потребу в потужності. D2D-зв'язок, визначений у стандарті 3GPP версії 12, підтримує нові сценарії, як-от ProSe (Proximity-based Services). Це забезпечує ефективне використання спектра і є економічно вигідним, оскільки дозволяє ресурсам обмінюватися локально та з меншою потужністю передачі. Також це підвищує енергоефективність, знижує затримку, що є критично важливим для деяких додатків і сприяє створенню більш гнучкої та надійної мережі, яка може функціонувати навіть за умов обмеженого доступу до основної інфраструктури.

D2D-зв'язок дійсно пропонує значні технічні переваги для сучасних мобільних мереж. Наведемо детальніший огляд ключових аспектів [9]:

- Завдяки прямому зв'язку між пристроями, що перебувають поблизу, D2D-зв'язок не лише знижує затримку, а й зменшує використання мережевих ресурсів, зокрема потужність базових станцій. Це підвищує загальну пропускну здатність мережі та оптимізує витрату енергії, що особливо важливо для сценаріїв з інтенсивним трафіком.

- Можливість прямого обміну даними між пристроями, що знаходяться поруч, має великий потенціал для таких ситуацій, як масові заходи, конференції або концерти, де необхідна швидка передача контенту. Це дозволяє миттєво обмінюватися фотографіями, відео або іншим мультимедійним контентом між користувачами без значного навантаження на основну мережу.

- Оскільки частина трафіку передається напряму між пристроями, основна інфраструктура мобільної мережі звільняється від перевантаження, що дозволяє базовим станціям обслуговувати більше користувачів і підвищує загальну надійність мережі.

- D2D-зв'язок відкриває можливості для впровадження нових послуг, орієнтованих на найближчих користувачів. Наприклад, мобільні додатки можуть надавати рекомендації щодо об'єктів поруч, допомагати в орієнтуванні або організовувати обмін інформацією між пристроями з врахуванням їхньої відстані один до одного.

D2D-зв'язок стає основою для розвитку мереж 5G та 6G, де йому відводиться ключова роль у створенні більш автономних і гнучких комунікаційних систем. Приклади використання D2D-зв'язку, такі як реклама на основі місцезнаходження, багатокористувацькі ігри та програми для спільної роботи, демонструють його можливості забезпечувати високу взаємодію між користувачами, що знаходяться поблизу. D2D-зв'язок дозволяє обмінюватися інформацією та контентом безпосередньо між пристроями, що значно покращує користувацький досвід, скорочуючи час відповіді системи та знижуючи навантаження на мережеву інфраструктуру.

D2D-зв'язок може функціонувати як у ліцензованому, так і в неліцензованому спектрі. Це робить технологію гнучкою та адаптивною, залежно від вимог мережі та доступності спектра.

- Внутрішньосмуговий D2D-зв'язок. У цьому випадку D2D-зв'язок і стільниковий зв'язок поділяють один і той самий частотний спектр. Внутрішньосмуговий зв'язок може бути реалізований двома способами:

- Підкладка (underlay). Цей підхід дозволяє повторно використовувати той самий спектр одночасно для D2D та стільникового зв'язку. Це покращує спектральну ефективність, оскільки обидва типи з'єднань використовують одні й ті ж частоти. Однак такий спосіб потребує ефективного управління інтерференцією, щоб уникнути конфліктів у спектрі.

- Накладка (overlay). У цьому випадку для D2D-зв'язку виділяються окремі частотні ресурси, що знижує можливість перешкод між D2D та стільниковим зв'язком. Це забезпечує стабільнішу якість обслуговування для D2D-зв'язку, оскільки прямі з'єднання між передавачами і приймачами не залежать від стільникового трафіку. Завдяки цим варіантам внутрішньосмуговий D2D-зв'язок забезпечує гнучкість у використанні спектра та оптимізації продуктивності мережі, одночасно підтримуючи якість зв'язку для обох типів комунікацій. Так, внутрішньосмуговий D2D-зв'язок дійсно має значний недолік через ризик інтерференції між D2D-користувачами та стільниковим зв'язком, що може негативно впливати на якість обслуговування для обох систем. Щоб мінімізувати ці перешкоди, існує альтернативний підхід — поза смуговий (outband) D2D-зв'язок.

Outband D2D-зв'язок передбачає використання неліцензованого спектра та окремого інтерфейсу для зв'язку між D2D-пристроями. Це рішення часто реалізується за допомогою таких технологій, як Wi-Fi Direct або Bluetooth, що дозволяє зберегти ліцензований спектр для стільникових потреб і зменшує інтерференцію між системами. Хоча outband-зв'язок зменшує перешкоди в ліцензованому спектрі, він має власний потенційний недолік — неконтрольовані завади у неліцензованому спектрі, де можуть функціонувати інші пристрої та мережі (наприклад, сусідні Wi-Fi мережі, побутові прилади з бездротовими модулями тощо). У неконтрольованому середовищі завади можуть бути непередбачуваними та коливатися залежно від поточного навантаження спектра, що може призводити до зниження продуктивності та стабільності зв'язку.

Таким чином, обидва підходи — внутрішньосмуговий та позасмуговий D2D-зв'язок — мають свої переваги та обмеження, і вибір між ними залежить від специфічних вимог мережі та очікуваного сценарію застосування.

Впровадження D2D-комунікацій у стільникові мережі справді вимагає подолання ряду складних технічних викликів для досягнення ефективної роботи та високої якості обслуговування (QoS). Нижче детальніше описані ключові проблеми та підходи до їхнього вирішення:

- Управління завадами. Оскільки D2D-комунікації часто використовують той самий спектр, що й стільниковий зв'язок, важливо запобігати взаємним завадам. Це може бути досягнуто за допомогою алгоритмів координації частот і методів контролю інтерференції, таких як розподілення смуг частот на основі потреб і стану каналу, а також регулювання потужності передачі.

- Забезпечення справедливості у розподілі ресурсів та підтримка QoS між D2D-пристроями та стільниковими користувачами потребує ефективного управління ресурсами. Для цього використовуються алгоритми, що можуть динамічно призначати ресурси, враховуючи фактори, як-от відстань між пристроями, потреби в спектрі, рівень інтерференції та пріоритети трафіку.

- Оптимізація потужності передачі для D2D-зв'язків є критичною для зменшення перешкод і одночасного забезпечення стабільності сигналу. Регулювання потужності допомагає контролювати радіус дії сигналу, що особливо важливо в густонаселених районах, щоб уникнути «шуму» в сусідніх каналах.

- Прямий зв'язок між пристроями створює потенційні загрози безпеці, такі як несанкціонований доступ та зловмисне втручання. Для захисту D2D-зв'язку необхідні надійні протоколи шифрування, автентифікації та захисту доступу, що можуть запобігти несанкціонованому втручанню та забезпечити конфіденційність даних.

- Із зростанням кількості D2D-пристроїв необхідні алгоритми та протоколи, здатні масштабуватися відповідно до зростання трафіку і пристроїв. Це потребує гнучких підходів до керування ресурсами та ефективних методів

організації каналів для підтримки якості обслуговування в умовах високого навантаження.

- D2D-зв'язок потребує ефективного планування та управління ресурсами, щоб забезпечити необхідну якість зв'язку навіть у динамічному та нестабільному середовищі. Використовуються підходи, як-от адаптивні алгоритми планування, прогнозування та управління інтерференцією для підтримки QoS у реальному часі.

- D2D-зв'язок створює додаткові витрати на передачу сигнальних і керуючих повідомлень, що може знизити пропускну здатність основної мережі. Щоб уникнути цього, необхідно розробити оптимізовані механізми передачі сигналів та керування, що зменшують накладні витрати без шкоди для продуктивності. Подолання цих викликів потребує інтеграції D2D-зв'язку з розумними алгоритмами та інноваційними протоколами, які не лише знижують інтерференцію та оптимізують використання спектра, але й забезпечують стабільний, захищений та продуктивний зв'язок між пристроями [10].

1.11 Висновки до розділу 1

З широким впровадженням LTE як основної технології 4G, індустрія мобільного зв'язку вперше об'єдналася навколо єдиного глобального стандарту, що стало значущим кроком вперед після ери численних конкуруючих стандартів 3G. Хоча Міжнародний союз електрозв'язку (ITU-R) схвалив ще один стандарт IMT-Advanced — WirelessMAN-Advanced, побудований на основі технології WiMAX, саме LTE здобула провідне місце на ринку завдяки своїм технічним перевагам та економічній привабливості для операторів і виробників.

Фундаментальні технології, які підтримують 4G, такі як MIMO (багатоканальне мультиплексування), OFDM та OFDMA (ортогональне мультиплексування з частотним розділенням каналів), SC-FDMA, D2D та інші, стали вирішальними у створенні швидших та більш ефективних бездротових

мереж, що відповідають зростаючим вимогам до обсягу даних і швидкості передачі. Ці інновації дали змогу забезпечити значно більшу пропускну здатність і стабільність зв'язку, перетворюючи 4G у справжню мобільну широкопasmову технологію.

Розгляд та аналіз цих технологій допоможуть краще зрозуміти перехід від 3G до 4G, а також причини, чому LTE стало фактичним стандартом для глобальних мереж 4G, тоді як інші рішення, такі як WiMAX, мали обмежене поширення.

2 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНИХ МЕРЕЖ 5G

Для забезпечення високої продуктивності, низької затримки та надійності з'єднань у мережах 5G, які відповідають вимогам IMT-2020, встановленим у стандарті ITU-R M.2410, використовуються декілька передових технологій. Кожна з них має важливе значення для реалізації всіх ключових показників 5G. Серед них:

1. Масивні MIMO (Massive MIMO) – технологія, що дозволяє підвищити пропускну здатність завдяки використанню великої кількості антен, що працюють одночасно.

2. Міліметрові хвилі (mmWave) – використовуються для розширення спектру частот і підвищення швидкості передачі даних.

3. Мережі з низькою затримкою – досягаються завдяки використанню периферійних обчислень (Edge Computing) та розподілених ресурсів для мінімізації часу передачі даних.

4. Новий тип інтерфейсу NR (New Radio) – спеціально розроблений для забезпечення гнучкості у використанні частот і зменшення затримки.

Попри ці переваги, при впровадженні цих інновацій виникають виклики:

- Безпека – нові технології можуть збільшувати ризики кібератак, що потребує розвитку захисних механізмів і стандартів.

- Сумісність – потрібно забезпечити взаємодію з уже існуючими системами та пристроями.

- Обчислювальні потужності – підтримка високих швидкостей передачі даних потребує значних ресурсів для обробки даних.

- Інтерференція – висока щільність з'єднань може спричиняти інтерференцію, особливо в міських умовах, що вимагає ефективних методів управління радіоспектром.

Всі ці аспекти є критичними для того, щоб 5G міг підтримувати складні сценарії використання, такі як автономні транспортні засоби, розумні міста та

індустріальний інтернет речей. Успішна інтеграція цих технологій є основою для забезпечення надійного та гнучкого зв'язку, здатного задовольняти поточні та майбутні потреби користувачів та індустрії [5].

2.1 Неортогональний множинний доступ / NOMA

Множинний доступ (Multiple Access) відіграє ключову роль в оптимізації використання радіочастотних ресурсів у системах стільникового зв'язку, що дозволяє одночасно обслуговувати кількох користувачів. Схеми множинного доступу від покоління до покоління змінювалися й удосконалювалися для збільшення ефективності та пропускної здатності мережі.

FDMA (Frequency Division Multiple Access) використовувався в 1G і полягав у розподілі спектру на вузькі смуги частот для кожного користувача. TDMA (Time Division Multiple Access), що застосовувався в 2G, розділяв час на часові інтервали, які призначалися різним користувачам. З приходом 3G технологія CDMA (Code Division Multiple Access) дозволила всім користувачам передавати інформацію в одному й тому ж частотному діапазоні завдяки використанню унікальних кодів. Для 4G стала поширеною OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access), яка забезпечує ефективне використання спектра, знижуючи міжкористувацькі інтерференції за рахунок ортогональних піднесучих частот. Кожна з цих технологій є частиною підходу ОМА (Orthogonal Multiple Access), який надає кожному користувачеві унікальну ортогональну одиницю ресурсу — по частоті, часу чи коду. ОМА була ефективною в попередніх поколіннях мереж, знижуючи міжкористувацькі перешкоди і спрощуючи реалізацію на рівні обладнання. Однак ОМА має обмеження з точки зору пропускної здатності, особливо у випадках, коли є високий попит на мережеві ресурси. Для вирішення цих обмежень у 5G та нових поколіннях зв'язку почали впроваджувати технології неортогонального множинного доступу (NOMA), які дозволяють одночасну передачу даних

кільком користувачам в одному ресурсі шляхом кодування сигналів з різними рівнями потужності або іншим способом мультиплексування [6].

Отже, неортогональний множинний доступ (NOMA) є ключовою технологією в мережах 5G, що забезпечує високу спектральну ефективність, підтримку масового підключення та зменшення затримок. На відміну від ортогональних схем, NOMA дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати ті самі ресурсні одиниці, завдяки чому досягається більше завантаження і вища ефективність використання спектра. Основний механізм реалізації NOMA включає два ключові підходи: суперпозиційне кодування на стороні передавача та метод SIC (Successive Interference Cancellation) на стороні приймача.

- Суперпозиційне кодування: на передавачі сигнали від різних користувачів комбінуються, кожен із них кодується з різними рівнями потужності. Користувачам, які мають кращі умови каналу, призначаються сигнали з нижчим рівнем потужності, тоді як користувачам із гіршими умовами каналу призначаються сигнали з вищим рівнем потужності. Це дозволяє передавати сигнали одночасно, але з різними "потужнісними шарами".

- SIC на приймачі: приймач використовує метод послідовного усунення інтерференції, щоб декодувати сигнали з різними рівнями потужності. Спочатку він декодує та видаляє сигнал користувача з найвищою потужністю, а потім переходить до декодування наступного за потужністю сигналу. Це ітераційний процес, який триває, доки не буде отримано сигнал із найменшою потужністю.

Підхід NOMA з розподілом по потужності має значні переваги, оскільки він дозволяє збільшити кількість користувачів у системі, покращити спектральну ефективність і забезпечити гнучкіше управління мережею. Завдяки цим характеристикам NOMA є перспективною технологією для 5G і майбутніх мереж 6G, де вимоги до масового підключення та ефективного використання ресурсів зростатимуть ще більше [7].

У випадку двох користувачів, як показано на рис. 2.1, дальньому користувачеві на краю комірки виділяється більше потужності, а ближньому користувачеві в центрі комірки - менше. Незалежно від різниці коефіцієнтів підсилення каналів, це співвідношення потужності буде зберігатися в прийнятому сигналі будь-якого користувача. Ближній користувач спочатку виявляє символ дальнього користувача, а потім віднімає його регеновану складову з отриманого сигналу, щоб виявити свій власний символ. Дальній користувач виявляє свій сигнал безпосередньо, розглядаючи сигнал ближнього користувача як кольоровий шум.

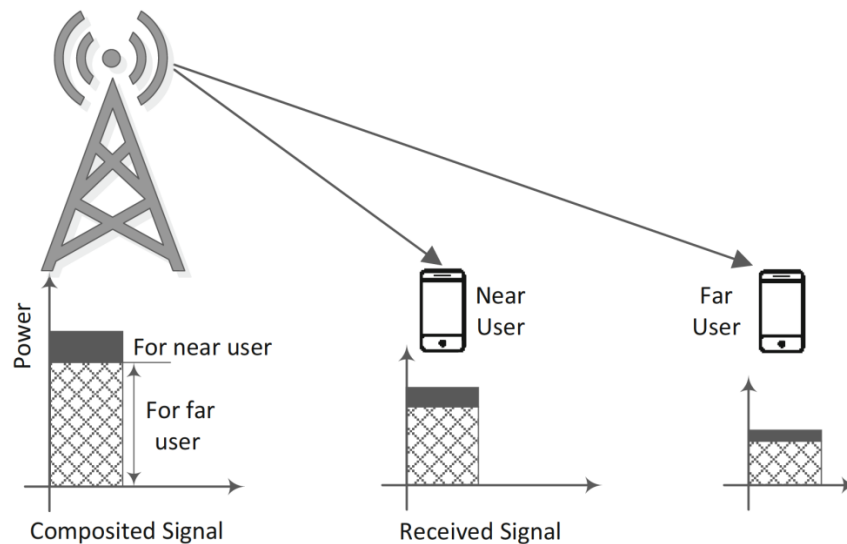


Рисунок 2.1 – Схема роботи низхідної лінії зв'язку NOMA

Дослідження Дінга та ін. [8] наочно показує, як NOMA може забезпечити справедливість та підвищену спектральну ефективність у порівнянні з традиційними схемами ОМА. Сценарій з користувачем, який має слабкий канал, ілюструє ключову перевагу NOMA — можливість одночасного обслуговування користувачів з різними умовами каналів, не погіршуючи загальну ефективність мережі.

В ОМА, користувач з поганим каналом потребує виділення ексклюзивного ресурсу (часового, частотного чи кодового), що призводить до

неефективного використання спектра, оскільки користувач не може використовувати ресурс на повну. Це особливо недоцільно в умовах, коли доступність ресурсів обмежена, а пропускна здатність є критично важливим параметром.

NOMA вирішує цю проблему, дозволяючи користувачам з кращими умовами каналу одночасно ділити ресурс із користувачем зі слабким каналом. У цьому випадку обслуговується і користувач з поганим каналом, і користувачі з кращими умовами, які використовують той самий ресурс без шкоди для спектральної ефективності. Метод суперпозиційного кодування та SIC забезпечує, щоб користувачі могли одночасно отримувати сигнали, адаптовані до їхніх умов. Цей підхід має важливе значення для сценаріїв масового підключення IoT, де мережі мають підтримувати велику кількість пристроїв, кожен із яких може мати різні вимоги до якості обслуговування та пропускної здатності. NOMA не лише покращує справедливість, забезпечуючи обслуговування для всіх типів користувачів, але й підвищує загальну пропускну здатність системи, що особливо важливо в умовах великого навантаження.

У розвитку технологій LTE, починаючи з 13-ї версії, спостерігається активне впровадження елементів NOMA, які забезпечують ефективніше управління ресурсами та підвищують спектральну ефективність. Зокрема, багатокористувацька накладена передача (MUST) стала одним з перших кроків у використанні принципів NOMA, спрямованих на покращення роботи низхідного каналу. У MUST застосовується адаптивне керування потужністю разом із диференційованим кодуванням, що допомагає ефективно обслуговувати кількох користувачів на одній і тій же одиниці ресурсу. Три категорії схем MUST відрізняються типами зіставлення кодованих бітів із символами сузір'я, що дозволяє досягти гнучкості в управлінні якістю та потужністю сигналу [9].

У 14-й версії LTE було запропоновано кілька інших методів NOMA, таких як SCMA, MUSA, PDMA та RSMA, кожен з яких використовує різні

підходи до розподілу кодів та ресурсів для поліпшення спектральної ефективності. Для підтримки еволюційного мобільного широкосмугового доступу (eMBB) у низхідному каналі ці схеми здатні одночасно обслуговувати кілька користувачів на тих самих частотних ресурсах. Крім того, у версії 14 було специфіковано NOMA на основі грантів, що підходить для додатків, де потрібна висока якість обслуговування.

З переходом до 15-ї версії, в межах робочої групи 3GPP фокус досліджень змістився на подальше вдосконалення NOMA через оптимізацію обробки сигналів на стороні передавача, розробку багатокористувацьких приймачів та впровадження складніших схем управління потужністю та адаптації лінії зв'язку. Проте, як показали дослідження, масивний MIMO (Massive MIMO) в нових радіомережах (NR) забезпечив значні покращення продуктивності, що звело до мінімуму вигоди від NOMA в низхідному каналі NR.

Внаслідок цього, у версії 16 фокус досліджень NOMA був зміщений на передачу без грантів у висхідному каналі. Це дозволяє уникнути накладних витрат на сигнали керування, знизити затримку і енергоспоживання. Передача без грантів є особливо важливою для додатків IoT та інших сценаріїв масового підключення, де велика кількість пристроїв повинна швидко та енергоефективно передавати дані, особливо коли вони перебувають у стані неактивного з'єднання або мають обмежені ресурси [10].

2.2 Програмно-визначена мережа / SDN

Мережа з програмно-конфігурованою архітектурою (Software-Defined Networking, SDN) є інноваційною моделлю мережевого управління, яка передбачає чітке розділення між площиною управління (Control Plane) і площиною пересилання даних (Data Plane). У традиційних мережах обидві ці функції тісно пов'язані між собою на рівні мережевих пристроїв, що обмежує гнучкість і швидкість адаптації до змін у мережевих налаштуваннях або вимогах. SDN усуває ці обмеження, дозволяючи централізовано контролювати

всі мережеві пристрої за допомогою спеціального контролера, який приймає рішення про маршрутизацію, залишаючи саму передачу даних на окремі пристрої. Парадигма SDN активно розвивалася завдяки некомерційному консорціуму Open Networking Foundation (ONF), який об'єднує операторів, розробників та інших учасників ринку для стандартизації й популяризації відкритих мережевих рішень. Однією з ключових технологій, що підтримується ONF, є протокол OpenFlow, який дозволяє контролеру управляти маршрутами даних на комутаторах і маршрутизаторах. Це створює більш адаптивну, масштабовану та програмовану інфраструктуру, що може швидко реагувати на змінні потреби користувачів і бізнесу [11].

SDN відкриває широкі можливості для автоматизації, динамічного розподілу ресурсів, оптимізації продуктивності мережі та ефективного управління трафіком. В архітектурі SDN, як показано на рис. 2.2, управління мережею централізовано в контролері SDN, в той час як базова інфраструктура абстрагована в набір елементів переадресації. Централізуючи управління мережею, контролер SDN отримує комплексне уявлення про всю мережу. Це дозволяє безпосередньо програмувати функції управління мережею, такі як маршрутизація, контроль перевантажень, інженерія трафіку та перевірка безпеки. Контролер SDN діє як централізована точка для управління та конфігурації мережі, що сприяє більшій гнучкості та маневреності мережевих операцій. SDN зазвичай складається з трьох основних компонентів, які разом формують її структуру:

- Прикладний рівень: Цей рівень слугує найвищим рівнем абстракції в SDN. Він охоплює додатки і сервіси, які взаємодіють з мережею. Приклади включають додатки для управління мережею, інструменти інжинірингу трафіку, додатки для забезпечення безпеки і моніторингу мережі. Ці програми взаємодіють з контролером SDN для визначення та управління поведінкою мережі.

- Рівень управління: Рівень управління бере на себе відповідальність за централізований контроль і управління мережею. Він включає в себе контролер

SDN, який є програмною сутністю, що функціонує як основний інтелект архітектури SDN.

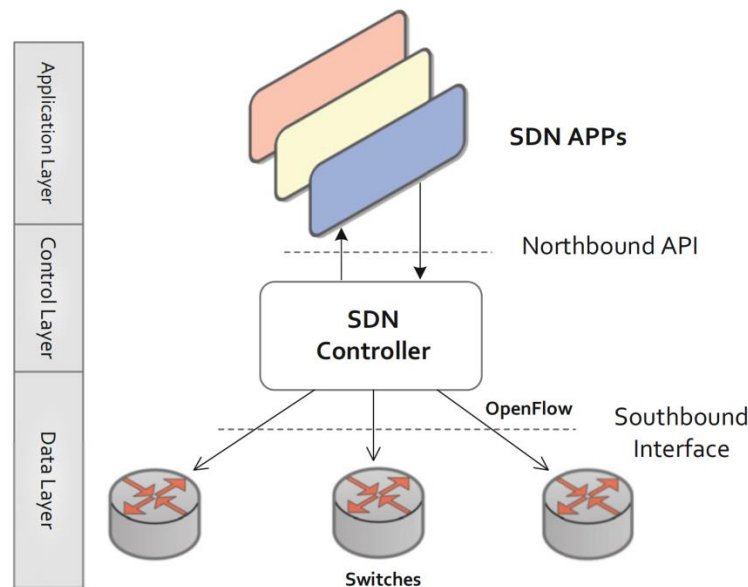


Рисунок 2.2 – Загальний огляд архітектури SDN

Контролер взаємодіє з додатками і безпосередньо керує базовими мережевими пристроями (наприклад, комутаторами, маршрутизаторами) через південний інтерфейс (наприклад, OpenFlow). Він отримує інформацію про стан мережі, приймає рішення щодо поведінки мережі на основі інструкцій або політик, встановлених додатками, і відповідно програмує площину даних.

- Рівень даних: Рівень даних, також відомий як площина пересилання, охоплює фізичні або віртуальні мережеві пристрої, що відповідають за пересилання мережевого трафіку. Ці пристрої включають комутатори, маршрутизатори та інше мережеве обладнання. В архітектурі SDN площина керування відокремлена від площини даних. Це відокремлення означає, що керуючі рішення, прийняті контролером SDN, реалізуються пристроями площини даних. Контролер SDN програмує таблиці переадресації або правила на комутаторах або маршрутизаторах, щоб визначити, як пакети пересилаються через мережу.

Хоча SDN не вирішує безпосередньо технічні проблеми, пов'язані з управлінням мережею, вона відкриває нові шляхи для розробки та впровадження винахідливих рішень для вирішення цих проблем. Вона досягає цього, надаючи мережу як послугу для додатків SDN через північний інтерфейс. SDN-додатки надають інструкції SDN-контролеру, який потім перетворює їх на конкретні команди конфігурації для базової інфраструктури, використовуючи протокол OpenFlow через південний інтерфейс. SDN має численні технічні переваги, серед яких можна виділити наступні:

- Централізоване управління мережевими елементами різних постачальників
- Автоматизація і програмованість мережі за рахунок абстрагування від базової інфраструктури і представлення її через стандартний інтерфейс
- Швидкі інновації завдяки розгортанню нових мережесхемних додатків і послуг без необхідності конфігурування специфічних елементів або очікування релізів від постачальників
- Підвищення надійності та безпеки мережі завдяки централізованому та автоматизованому управлінню мережевими елементами, єдиному застосуванню політик та меншій кількості помилок конфігурації.

2.3 Віртуалізація мережесхемних функцій / NFV

Віртуалізація мережесхемних функцій (NFV) дійсно є потужною інновацією в сфері мережесхемних технологій, яка принципово змінює підхід до створення і управління мережами. Її головна концепція полягає у відокремленні програмних мережесхемних функцій від спеціалізованого апаратного забезпечення. Це дозволяє запускати мережесхемні сервіси як віртуальні інстанси на стандартних серверах, що значно підвищує гнучкість і ефективність роботи мережі. Основні переваги NFV включають:

1. Використання стандартного обладнання замість спеціалізованих пристроїв дозволяє операторам скористатися економічними перевагами ІТ-індустрії та зменшити витрати на обладнання та його енергоспоживання.

2. Віртуалізовані функції можна швидко створювати, масштабувати або переносити, що суттєво скорочує час на запуск нових мережевих послуг.

3. NFV дозволяє гнучко збільшувати або зменшувати пропускну здатність, підлаштовуючись під змінні вимоги бізнесу та користувачів.

4. Завдяки можливості запускати кілька віртуальних функцій на одній фізичній платформі, NFV дозволяє використовувати ту саму інфраструктуру для різних додатків, користувачів і клієнтів.

5. NFV сприяє розвитку відкритих екосистем і підтримує програмні рішення, що працюють незалежно від фізичного обладнання, що сприяє інноваціям і взаємодії між різними постачальниками рішень. Ця технологія значно полегшує процес модернізації та масштабування мереж, дозволяючи операторам швидше реагувати на нові виклики і вимоги ринку. Як показано на рис. 2.3, структура NFV включає кілька основних компонентів, які разом створюють функціональну екосистему для віртуалізації мережевих функцій. Розглянемо основні компоненти:

1. Функції мережі охоплюють різноманітні завдання, які зазвичай виконуються мережевими пристроями, такими як маршрутизатори, брандмауери, балансувальники навантаження та системи виявлення вторгнень. У випадку NFV ці функції реалізуються як програмні модулі, незалежні від спеціалізованого обладнання, і можуть запускатися на стандартних серверах. Завдяки цьому досягається значна гнучкість у їхньому розгортанні та масштабуванні.

2. Інфраструктура NFV (NFVI) включає всі фізичні та віртуальні ресурси, які необхідні для розміщення та запуску віртуалізованих мережевих функцій. Вона складається з серверів, систем зберігання даних, мережевого обладнання та віртуалізаційних платформ (гіпервізорів), а також інструментів для управління ними. NFVI надає мережеві, обчислювальні та сховищні ресурси

для підтримки роботи віртуалізованих функцій, забезпечуючи основну інфраструктуру для їхньої діяльності.

3. Віртуалізовані мережеві функції (VNF) — це саме ті програмні екземпляри мережевих функцій, які розгортаються на інфраструктурі NFVI. VNF є основним будівельним блоком у NFV, дозволяючи використовувати мережеві функції як програмні компоненти, що працюють на універсальних серверах. Це забезпечує гнучкість і дозволяє масштабувати мережеві функції залежно від потреб.

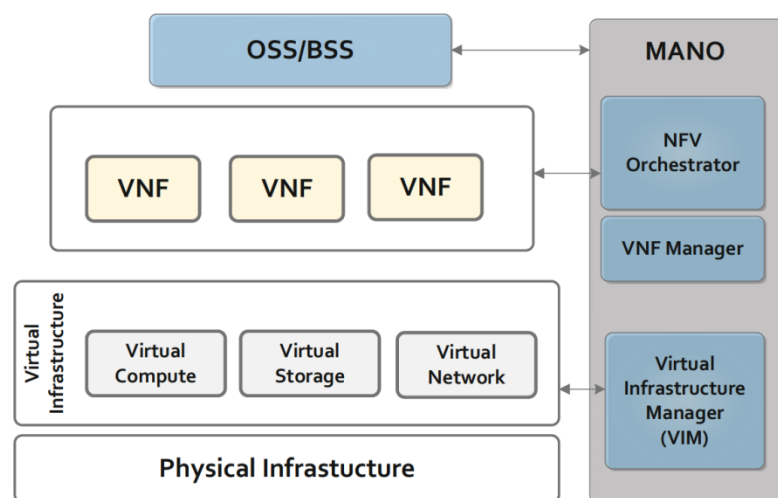


Рисунок 2.3 - Архітектура систем на основі технології NFV

Вони являють собою віртуалізовану версію традиційних мережевих функцій і розгортаються і управляються як програмні додатки. VNF можна створювати, масштабувати і динамічно керувати відповідно до вимог мережі, що робить їх гнучкими і пристосованими до мінливих умов мережі. NFV (віртуалізація мережевих функцій) включає в себе декілька критично важливих компонентів для ефективного управління та розгортання мережевих функцій, серед яких:

1. Оркестратор NFV відповідає за управління життєвим циклом віртуалізованих мережевих функцій (VNF). Він виконує ключові завдання, такі як створення, масштабування, завершення та координація VNF. NFV

Orchestrator також керує ресурсами NFVI, забезпечуючи оптимальну продуктивність і ефективність використання ресурсів для VNF.

2. Менеджер віртуалізованої інфраструктури (VIM) управляє ресурсами NFVI, такими як обчислювальні потужності, мережеві та сховищні ресурси. Він створює рівень абстракції для фізичної інфраструктури, що дозволяє більш гнучко керувати розгортанням VNF. VIM взаємодіє з NFV Orchestrator, щоб підтримувати дотримання політик управління ресурсами і забезпечувати ефективне використання інфраструктури.

6. Управління та оркестрація (MANO) — це загальна структура для управління та оркестровки всієї системи NFV. MANO поєднує NFV Orchestrator, VIM та інші компоненти, забезпечуючи управління ресурсами, життєвим циклом послуг та віртуалізованих функцій, що створює єдине середовище для гнучкого розгортання та експлуатації VNF. Хоча SDN (програмно-визначена мережа) та NFV розробляються незалежно, вони можуть працювати разом, створюючи синергетичний підхід для розгортання мережевих функцій. Основні аспекти такої взаємодії включають: Контролери та додатки SDN можуть працювати як VNF, розгортаючись на стандартних ІТ-платформах. Це дозволяє NFV MANO динамічно керувати екземплярами SDN: створювати, масштабувати, мігрувати та оновлювати їх у віртуалізованій інфраструктурі.

Використовуючи програмованість мережі, яку забезпечує SDN, NFV може оптимізувати надання мережевих послуг і покращувати функціональність мережевих операцій. Об'єднання SDN і NFV трансформує мережеву архітектуру, дозволяючи операторам більш гнучко та ефективно надавати мережеві послуги, підвищуючи їх адаптивність до змін ринку.

2.4 Сервіс-орієнтована архітектура / SBA

5G Core (5GC) представляє нову архітектуру мережі, побудовану на основі архітектури, орієнтованої на сервіси (Service Based Architecture, SBA). SBA є сучасним підходом, який значно відрізняється від попередніх мережевих

архітектур, таких як EPC (Evolved Packet Core), що використовувалися в 4G. Головна відмінність полягає у способі взаємодії між функціями мережі (NF). У традиційних архітектурах зв'язок між компонентами здійснюється через виділені інтерфейси точка-точка (P2P), які створюють жорстку, фіксовану схему зв'язку між мережевими функціями. Ці інтерфейси обмежують гнучкість мережі та ускладнюють її масштабування, оскільки кожна функція має певний, фіксований набір «опорних точок», через які вона підключається до інших елементів.

SBA, у свою чергу, забезпечує більш гнучкий і модульний підхід. У цій архітектурі мережеві функції можуть взаємодіяти через загальну службу, а не через виділені інтерфейси. Функції мережі можуть пропонувати свої сервіси через програмний інтерфейс, до якого інші функції можуть підключатися за необхідності. Цей підхід надає ряд переваг:

1. Кожна функція може розгортатися окремо та масштабуватися незалежно від інших функцій, що забезпечує більшу гнучкість у реагуванні на змінні вимоги до ресурсів.

2. SBA дозволяє спростити керування мережею, оскільки взаємодія між функціями відбувається через загальнодоступні сервіси. Це полегшує процеси оновлення та обслуговування мережевих функцій.

3. Завдяки можливості динамічного підключення до необхідних сервісів мережеві функції можуть адаптуватися до нових потреб і умов, що сприяє швидкому запуску нових послуг і збільшенню ефективності роботи мережі.

Таким чином, SBA у 5GC сприяє створенню більш динамічної та легко масштабованої мережевої інфраструктури, яка краще відповідає потребам сучасних мобільних мереж, де важливими є гнучкість, швидкість і ефективне використання ресурсів. У цій архітектурі, як показано на рис. 2.4, NF пропонують свої можливості як послуги, які можуть бути спожиті іншими NF, що сприяє більшій гнучкості, масштабованості та простоті розгортання. Отже, Service Based Architecture (SBA) у 5G Core переважно застосовується до площини управління (Control Plane), яка координує і контролює роботу мережі.

Площина управління в 5GC орієнтована на сервіси, що дозволяє мережевим функціям взаємодіяти гнучко та динамічно, використовуючи архітектуру сервісів замість виділених інтерфейсів точка-точка. Площина користувача (User Plane), що відповідає за передачу даних користувача в реальному часі, залишається в значній мірі схожою на архітектуру EPC у 4G. У площині користувача не застосовується повна модульність та гнучкість, характерні для SBA, оскільки швидкість і ефективність передачі даних залишаються головними пріоритетами. Архітектура тут має більш статичну природу, і маршрути передачі даних оптимізуються для мінімальної затримки і максимальної пропускної здатності, що є критичними показниками для обслуговування користувачів. Таким чином, SBA у 5GC значно трансформує площину управління, забезпечуючи гнучкість і масштабованість, тоді як площина користувача зберігає традиційний підхід з акцентом на стабільність і продуктивність передачі даних.

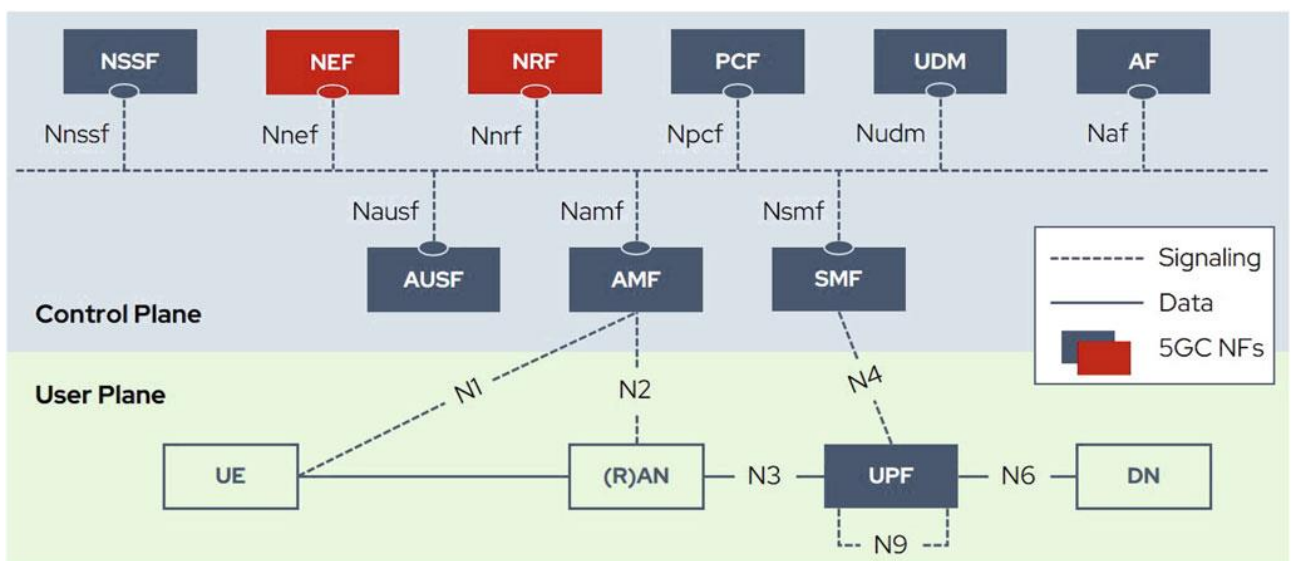


Рисунок 2.4 - Архітектура системи 5G

Service-Based Architecture (SBA) і традиційні підходи, засновані на інтерфейсах Peer-to-Peer (P2P), можуть доповнювати один одного в контексті 5G Core Network Functions (NF). Це взаємодоповнення є важливим для

забезпечення гнучкості та ефективності в мережах п'ятого покоління. SBA орієнтується на послуги, які NF пропонують один одному, сприяючи динамічному та масштабованому підходу, де NF виступають як постачальники та споживачі послуг. Це означає, що кожна функція може безпосередньо запитувати та отримувати доступ до необхідних послуг, що надає додаткову гнучкість і спрощує керування мережею.

Класичний підхід P2P, навпаки, використовує виділені інтерфейси, як показано на рис. 2.5., забезпечуючи чітко визначені канали взаємодії між NF. Така структура корисна для чіткого розподілу функцій та збереження стабільності й узгодженості між компонентами, особливо в тих сценаріях, де важливий детермінований зв'язок. Таким чином, обидва підходи можна розглядати як різні перспективи для опису NF у 5GC: SBA — для динамічних сервісів, а класичний підхід — для суворого контролю зв'язку між функціями. Ці два погляди співіснують і можуть використовуватися взаємозамінно, в залежності від конкретних вимог і сценаріїв розгортання. Один із способів зрозуміти структурну різницю між ними - розглянути топології. Традиційний погляд на представлення опорних точок нагадує сіткову топологію, де кожна пара NF взаємодіє безпосередньо. На противагу цьому, SBA можна порівняти з топологією шини. Тут NF надають свої послуги на спільній шині, що дозволяє будь-якій NF отримати доступ до послуг іншої без прямого, виділеного інтерфейсу. Такий дизайн не тільки спрощує інтеграцію нових послуг, але й сприяє гнучкості у розвитку мережі.

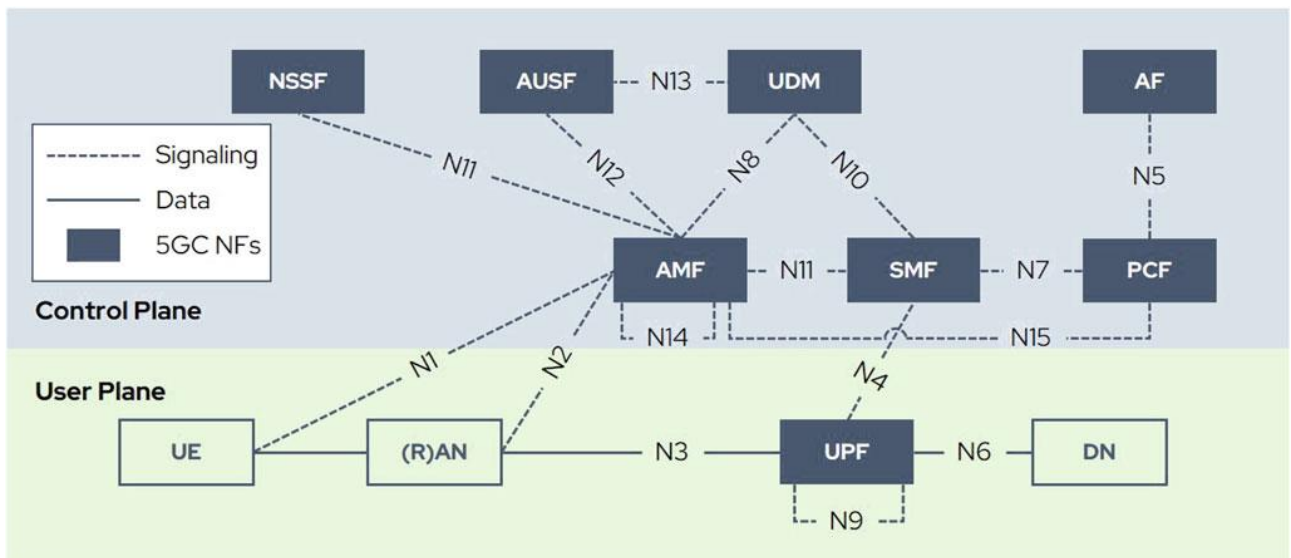


Рисунок 2.5 - Архітектура системи 5G

Впровадження Service-Based Architecture (SBA) у 5G Core (5GC) було зумовлене саме потребою забезпечити підтримку різних сценаріїв використання, таких як Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Massive Machine Type Communications (mMTC) і Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC). Модульний і гнучкий підхід SBA сприяє швидкому розгортанню та масштабуванню мережевих послуг, що дозволяє відповідати специфічним вимогам додатків 5G.

Ключовим елементом, що робить SBA таким вигідним для 5G, є його здатність до динамічного розподілу і перерозподілу мережевих ресурсів. Це особливо важливо для мережевої сегментації (network slicing), яка є основою для забезпечення різних сервісів з відмінними вимогами до якості та надійності.

Також серед основних переваг SBA — вбудована підтримка автоматизації та оркестрації, що значно полегшує управління ресурсами в умовах великої кількості мережевих елементів і забезпечує високу ефективність роботи мережі. Автоматизація знижує потребу в ручному управлінні й дозволяє швидко реагувати на зміни в попиті на мережеві ресурси. Крім того, модульність архітектури SBA значно полегшує інтеграцію нових технологій і стандартів. Це

робить SBA перспективною архітектурою, що готова до адаптації під нові вимоги, які можуть з'явитися в процесі еволюції мереж 5G і, згодом, 6G.

2.5 Висновки до розділу 2

Для попередніх поколінь, від 1G до 4G, місія стільникових мереж полягала в наданні телекомунікаційних послуг абонентам. Найважливіша особливість п'ятого покоління (5G), також відомого як IMT-2020, полягає в розширенні сфери застосування стільникового зв'язку, переходячи від зв'язку між людьми до зв'язку між людьми, машинами та речами. Здійснено всебічний погляд на 5G, включаючи його рушійні сили, три сценарії використання (розширений мобільний широкосмуговий зв'язок, наднадійний зв'язок з низькою затримкою і масовий зв'язок машинного типу), ключові показники ефективності та процес стандартизації. В результаті, отримано основи ключових технологій, які сприяли впровадженню систем стільникового зв'язку 5G. Для більш глибокого розуміння, в наступному розділі розглянемо основні функції і досягнення, представлені в 15-й версії 3GPP, що знаменує собою ключовий перехід від технологій 4G до 5G.

Також здійснено висвітлення основних понять і термінів, пов'язаних з 5G, що створює підґрунтя для глибшого вивчення його складної архітектури. Детально описується еволюція RAN (радіомереж доступу), з акцентом на інновації в NR (нове радіо) і вдосконаленнях, які вона приносить. Розділ також проливає світло на 5GC (ядро мережі 5G) і його архітектуру, засновану на послугах, підкреслюючи її гнучкість і адаптивність. Обговорюється роль мережевого розшарування в забезпеченні ефективного використання ресурсів і надання індивідуальних послуг, демонструючи його потенціал у революційній зміні мережевих операцій.

Отже, перехід до 5G був зумовлений потребою у вищій швидкості передачі даних, меншій затримці та можливості підключення великої кількості пристроїв. Однак значні інвестиції, необхідні для повного розгортання 5G,

створили проблеми для операторів. Варіант розгортання NSA (нерозвинене автономне розгортання) став практичним рішенням, що дозволило здійснити більш поступовий перехід, використовуючи існуючу інфраструктуру LTE. Такий підхід сприяв швидшому початковому розгортанню, що дозволило операторам пропонувати послуги 5G, продовжуючи розвивати повну інфраструктуру NG-RAN і 5GC.

3 КЛЮЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ ШОСТОГО ПОКОЛІННЯ

3.1 Особливості розвитку надшвидкісних бездротових телекомунікаційних технологій

Використання частот у діапазоні ТГц відкриває нові горизонти для розвитку надшвидкісних бездротових технологій та додатків. Завдяки цьому, з'являються можливості для реалізації терабітних стільникових хот-спотів, приватних мереж на території кампусів, терабітних D2D-з'єднань (Device-to-Device), голографічного зв'язку, мультимодальних окулярів доповненої реальності (XR) без прив'язки, з рендерингом на межі мережі, та інших інноваційних сценаріїв використання. ТГц-зв'язок дозволяє проектувати мобільні системи з новим рівнем гнучкості. Він може бути застосований для бездротового транзитного зв'язку між базовими станціями, малими осередками, ретрансляторами, віддаленими радіоголовками та придорожніми пристроями. Такий підхід сприяє створенню надщільної мережевої архітектури, прискорює розгортання мережі та знижує витрати на придбання, встановлення та обслуговування обладнання. Антени для передачі сигналів у ТГц-діапазоні мають крихітні розміри, порядку мікрометрів. Це відкриває можливості для бездротового зв'язку між наномашинами, які можуть виконувати специфічні завдання на нанорівні, наприклад, працювати як біосенсори в кровоносних судинах. Компоненти таких наномашин зазвичай мають розміри від кількох сотень кубічних нанометрів до кількох кубічних мікрометрів. Це створює потенціал для широкого спектру нових застосувань, таких як нанорозмірні комунікації між пристроями, внутрішньосхемні комунікації, Інтернет наноречей (IoNT) та внутрішньотілесні мережі [1].

Підвищення частот сигналів до рівня ТГц призводить до значного покращення просторової роздільної здатності, що дозволяє досягти високої точності у просторовій диференціації сигналів. Це має важливе значення для точного зондування та позиціонування, оскільки використання надзвичайно

малих довжин хвиль порядку мікрометрів і частотно-селективних резонансів матеріалів навколишнього середовища дозволяє отримувати унікальну інформацію зі спостережуваного сигналу. Зокрема, ТГц-зв'язок відкриває можливості для нових застосувань у високоточному зондуванні та позиціонуванні. Малі довжини хвиль надають можливість детально аналізувати структуру та склад матеріалів, виявляти приховані об'єкти та проводити точні вимірювання відстаней. Частотно-селективні резонанси матеріалів, які залежать від їх фізичних та хімічних властивостей, дозволяють отримувати додаткову інформацію про навколишнє середовище, підвищуючи ефективність та точність зондування. Ці технології, як зазначено у дослідженні [2], демонструють потенціал для різноманітних інноваційних застосувань, зокрема у сферах медицини, безпеки, промислової автоматизації та інших галузях, де потрібна висока точність та деталізація.

Останньою, але не менш важливою технічною перевагою є використання ТГц випромінювання для формування зображень. ТГц-зображення відрізняються високою просторовою роздільною здатністю завдяки меншій довжині хвиль і надширокій смузі пропускання, що можна досягти за допомогою обладнання помірної розміру. Порівняно з інфрачервоним світлом, ТГц хвилі мають кращу проникаючу здатність, роблячи звичайні матеріали відносно прозорими для ТГц обладнання. Це відкриває широкий спектр застосувань, зокрема в сфері безпеки. ТГц-зображення можуть бути використані для перевірки поштових відправлень на наявність прихованих об'єктів, що дозволяє здійснювати сканування конвертів, пакетів, посилок і невеликих сумок для виявлення потенційно небезпечних предметів. Крім того, ТГц випромінювання є неіонізуючим, тобто не має відомих ризиків для здоров'я біологічних клітин, окрім нагрівання. Це робить його безпечним для застосування в медицині, де використання іонізуючого випромінювання, такого як ультрафіолетове, рентгенівське або гамма-випромінювання, могло б становити високий ризик для здоров'я. Таким чином, ТГц випромінювання забезпечує безпечне, ефективне і високоінформативне рішення для візуалізації

в різних галузях, від безпеки до медицини, завдяки своїм унікальним властивостям та технічним перевагам [3].

ТГц діапазон відкриває широкі спектральні ресурси для бездротового зв'язку і має значні переваги в сенсориці, позиціонуванні, візуалізації та спектроскопії. Це спричинило значний інтерес до його використання як ключового компонента в реалізації інтегрованого зондування і зв'язку (ISAC). Двофункціональні бездротові мережі, які поєднують ТГц-зв'язок і ТГц-зондування, забезпечують потужну синергію завдяки двом підходам: зв'язок за допомогою зондування і зондування за допомогою зв'язку.

Використання сенсорної інформації в комунікаціях стає ключовою перевагою ISAC, оскільки це призводить до більш передбачуваного і детермінованого каналу розповсюдження. Це дозволяє розробляти і впроваджувати ефективні алгоритми і протоколи зв'язку, такі як оцінка каналу за допомогою зондування, прогнозоване формування променя за допомогою зондування, швидке вирівнювання і відстеження променя, а також пом'якшення наслідків блокування каналів зв'язку. З іншого боку, мережі мобільного зв'язку надають значні можливості для мережевого зондування або зондування як послуги. Обмінюючись результатами зондування через мобільну мережу, кілька мережевих вузлів, таких як базові станції і термінали, можуть спільно діяти як система зондування. Таке спільне зондування, що досягається завдяки об'єднанню даних зондування, зменшує невизначеність вимірювань і розширює зону покриття, підвищуючи точність і роздільну здатність зондування.

Отже, інтеграція ТГц-зондування і зв'язку в одній мережі відкриває нові можливості для підвищення ефективності і точності як комунікаційних, так і зондувальних систем. Це створює умови для розробки нових інноваційних рішень, які можуть значно покращити якість зв'язку і забезпечити високоточне зондування в різних сферах застосування.

Незважаючи на великий потенціал ТГц-зв'язку та зондування, їх практична реалізація стикається з численними викликами та проблемами. Найважливішою з них є високі втрати при поширенні в ТГц-діапазоні.

По-перше, приймальна антена для ТГц-діапазону має обмежену здатність уловлювати потужність випромінювання через надзвичайно малу довжину хвиль ТГц. Це призводить до значних втрат у вільному просторі, які зростають пропорційно до несучої частоти. Крім того, довжина хвиль ТГц має той самий порядок величини, що й розміри молекул в атмосфері та тканинах людини. Як наслідок, раніше незначні явища, такі як сильне молекулярне поглинання і розсіювання частинок, стають серйозною проблемою. Зокрема, водяна пара та молекули кисню в атмосфері спричиняють значні втрати, що досягають приблизно 20 000 дБ на кілометр за найгірших умов [3]. Для подолання цих викликів потрібно розробляти нові технології та методи, спрямовані на зниження втрат при поширенні та підвищенні ефективності передачі сигналів. Серед можливих рішень можуть бути:

1. Використання адаптивних антен та формування променів: Це дозволить сконцентрувати енергію сигналу в напрямку приймача, зменшуючи втрати у вільному просторі.

2. Використання ретрансляторів та малих осередків: Це допоможе зменшити відстані між передавачем і приймачем, що знизить втрати на поширення сигналу.

3. Розробка нових матеріалів для антен та компонентів: Високоефективні матеріали можуть значно зменшити втрати при передачі та прийомі сигналів у ТГц-діапазоні.

4. Оптимізація частотних каналів: Використання частотних діапазонів з меншими втратами при поширенні може покращити загальну продуктивність системи. Таким чином, подолання цих викликів вимагатиме значних досліджень і розробок, але результати можуть відкрити нові горизонти для технологій ТГц-зв'язку та зондування, як показано на рис. 3.1. Крім високих втрат при поширенні сигналу, є ще кілька факторів, які ускладнюють практичне використання ТГц діапазону для зв'язку та зондування:

1. Зважені краплі рідкої води в хмарах, дощ, гідрометеори, сніжинки і тумани можуть значно послаблювати сигнал, оскільки їхні розміри можна

порівняти з довжиною хвилі ТГц. Це призводить до розсіювання та поглинання сигналу.

2. Навколишні фізичні об'єкти, такі як будівлі, меблі, транспортні засоби, листя і навіть люди, можуть створювати значні перешкоди. Звичайні поверхні часто занадто шорсткі для створення дзеркальних відбиттів, що призводить до сильного розсіювання сигналу.

3. Через високі втрати при поширенні сигналу в ТГц діапазоні, відстань передачі сигналу зазвичай дуже коротка. Це ускладнює використання ТГц зв'язку на великих відстанях.

4. Потужність теплового шуму пропорційна смузі пропускання сигналу при постійній густині потужності. Тому широкосмуговість ТГц систем, яка є їхньою перевагою, також призводить до значного рівня теплового шуму, що знижує якість зв'язку.

5. Потужність передачі в ТГц діапазоні обмежена, оскільки вихідна потужність зменшується з підвищенням частоти. У доступному для огляду майбутньому рівень потужності знаходиться на рівні децибел-міліватт. Це означає, що збільшення потужності передачі для розширення дистанції зв'язку є малоймовірним. Для подолання цих проблем необхідні наступні підходи:

1. Використання адаптивних антен та технологій формування променів може допомогти сконцентрувати сигнал в потрібному напрямку, зменшуючи втрати при поширенні.

2. Використання ретрансляторів та малих осередків дозволить зменшити відстань між передавачем і приймачем, що допоможе знизити втрати на поширення сигналу.

3. Високоєфективні матеріали та нові технології можуть значно зменшити втрати при передачі та прийомі сигналів у ТГц-діапазоні.

4. Використання частотних діапазонів з меншими втратами при поширенні може покращити загальну продуктивність системи. Таким чином, хоча виклики значні, вони стимулюють розвиток нових технологій та підходів,

які можуть забезпечити ефективне використання ТГц діапазону для зв'язку та зондування.

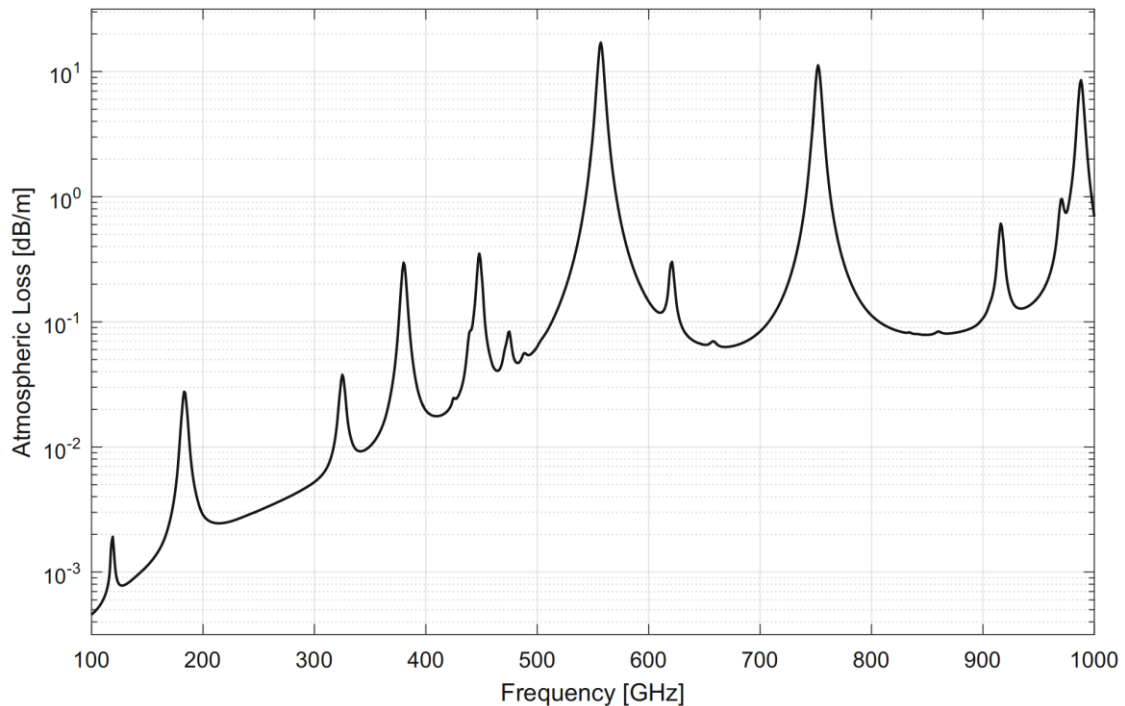


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнту загасання від робочої частоти за стандартних атмосферних умов

Для збільшення відстані передачі сигналу в ТГц-зв'язку і зондуванні понад кілька метрів необхідно використовувати спрямовані антени з високим коефіцієнтом підсилення, щоб компенсувати високі втрати при поширенні. Перевага коротких довжин хвиль дозволяє розміщувати велику кількість елементів близько один до одного на невеликій площі, забезпечуючи високий коефіцієнт підсилення для формування променя.

Високий коефіцієнт підсилення дозволяє сконцентрувати енергію в певному напрямку, зменшуючи втрати сигналу на відстані. Це досягається за рахунок щільного розміщення антенних елементів. Розробка відповідних алгоритмів формування олівцевого променя є ключовим завданням у ТГц-зв'язку. Ці алгоритми вирішують проблеми, пов'язані з величезною кількістю антенних елементів, косокутністю променя, вимогами до калібрування та частотними вікнами. Вони зосереджені на ефективному відстеженні пристроїв

у ТГц-діапазоні, використовуючи точні моделі каналів та оптимізовану сигналізацію.

Одним з альтернативних підходів є використання напівсферичних лінзових антен з високим коефіцієнтом підсилення, які живляться від планарної решітки з помірною кількістю антенних елементів. Це дозволяє отримати високу спрямованість та ефективність передачі сигналу. Плазмові антени на основі графену є перспективним напрямком, який може забезпечити високу ефективність і керованість променем. Такі антени можуть бути сумісні з нанорозмірними пристроями, що робить їх ідеальними для використання в майбутніх нанотехнологіях. Графенові патч-антенні решітки у конфігураціях з можливістю керування променем можуть забезпечити високу спрямованість і ефективність передачі сигналу. Ці антени можуть бути використані в мульти-антенних системах для покращення продуктивності ТГц-зв'язку.

Використання спрямованих антен з високим коефіцієнтом підсилення дозволяє збільшити дистанцію передачі сигналу та покращити якість зв'язку. Плазмові антени та графенові патч-антени відкривають нові можливості для розвитку нанотехнологій та інтегрованих систем. Серед основних викликів - високі втрати при поширенні сигналу, потреба в розробці ефективних алгоритмів формування променя, а також апаратні обмеження, які ускладнюють збільшення потужності передачі. Таким чином, розвиток технологій ТГц-зв'язку і зондування потребує комплексного підходу, що включає розробку нових антен, алгоритмів та матеріалів. Вирішення цих завдань відкриє нові горизонти для високошвидкісного зв'язку та точного зондування.

Мікро- і макромобільність є важливими аспектами для практичної реалізації бездротових каналів у ТГц-діапазоні, особливо у сценаріях мобільного доступу. Вони впливають на стабільність і якість зв'язку, оскільки навіть незначні зміни положення або обертання мобільних пристроїв можуть спричинити втрати сигналу через високий рівень спрямованості антен у ТГц-діапазоні. Мікромобільність стосується невеликих рухів або обертання

мобільних пристроїв, які можуть відбуватися через рухи рук користувачів або інші малі переміщення. Навіть коли користувачі не рухаються, ці малі переміщення можуть впливати на стабільність зв'язку, оскільки ТГц-сигнали мають високу спрямованість і можуть легко втрачатися через зміни в положенні антен.

Для компенсації цих невеликих переміщень необхідно ефективно відстежувати положення мобільних пристроїв. Це може включати використання алгоритмів для швидкого визначення нового положення і переорієнтації спрямованих антен. При блокуванні лінії прямої видимості (LoS) необхідно швидко знаходити альтернативні шляхи для забезпечення безперервного зв'язку. Макромобільність стосується більш значних переміщень користувачів, таких як переміщення по будівлі або між будівлями, що також потребує адаптації бездротових мереж для забезпечення стабільного зв'язку.

Для ефективної роботи з надспрямованими ТГц лініями зв'язку необхідні нові стратегії на каналному і мережевому рівнях. Використання високоспрямованих антен створює проблеми у стратегіях початкового доступу, виявленні стільників і користувачів. Однією з можливих стратегій є політики доступу до каналу, ініційовані приймачем, які засновані на опитуванні приймача замість боротьби за канал під керівництвом передавача. Інноваційні стратегії, які використовують повну діаграму спрямованості антени, можуть допомогти у швидшому виявленні сусідів. Це включає експериментально продемонстровані методи для швидшого визначення положення сусідніх пристроїв і забезпечення стабільного зв'язку. Використання спрямованих антен з високим коефіцієнтом підсилення допомагає компенсувати високі втрати при поширенні сигналу, але потребує складних алгоритмів формування променя і ефективного відстеження пристроїв. Сильний тепловий шум і апаратні обмеження обмежують потужність передачі і накладають додаткові вимоги на розробку ефективних антен і алгоритмів. Використання колаборативних мереж і ретрансляційних вузлів допомагає забезпечити альтернативні шляхи для сигналу, зменшуючи вплив блокування LoS. Мікро- і макромобільність

відіграють ключову роль у практичній реалізації ТГц-зв'язку, особливо в умовах мобільного доступу. Використання спрямованих антен з високим коефіцієнтом підсилення, розробка нових стратегій на каналному і мережевому рівнях, а також інноваційні алгоритми формування променя є важливими для забезпечення стабільного і якісного зв'язку. Вирішення цих викликів дозволить розкрити потенціал ТГц-діапазону для широкого спектру застосувань у майбутньому [4].

3.2 Оптичний бездротовий зв'язок / OWC

Оптичний бездротовий зв'язок (OWC) - це форма бездротового зв'язку, яка використовує інфрачервоні (ІЧ), видимі або ультрафіолетові (УФ) світлові хвилі як середовище передачі. Ця технологія має великі перспективи як додаткове рішення до традиційного бездротового зв'язку, що працює в радіочастотному діапазоні. Використання оптичного діапазону дозволяє отримати майже безмежну пропускну здатність без необхідності отримання дозволу від регуляторів спектру в усьому світі. Це, в свою чергу, забезпечує високошвидкісний і економічно ефективний доступ завдяки широкому розповсюдженню оптичних випромінювачів і детекторів.

Однією з важливих переваг використання інфрачервоних та ультрафіолетових хвиль, які поведуться подібно до видимого світла, є значне зниження ризиків безпеки та перешкод. Крім того, зменшуються занепокоєння щодо впливу радіовипромінювання на здоров'я людини. Як наслідок, OWC є особливо перспективним для сценаріїв розгортання, чутливих до електромагнітних завад, в тому числі для інтелектуальних транспортних систем зв'язку, освітлення пасажирських салонів літаків і медичного обладнання. Незважаючи на свої переваги, OWC не позбавлений проблем. Для забезпечення її оптимальної роботи необхідно усунути такі перешкоди, як шум навколишнього освітлення, атмосферні втрати, нелінійність світлодіодів (LED), багатопроменева дисперсія і помилки наведення [5].

Системи оптичного бездротового зв'язку (OWC), що працюють у видимому діапазоні частот від 400 ТГц до 800 ТГц, зазвичай називають зв'язком у видимому діапазоні (VLC). Останнім часом ці технології привертають значну увагу як з боку академічних кіл, так і з боку промисловості. На відміну від радіочастотних технологій, які використовують антени і працюють у нижньому діапазоні ТГц, VLC покладається на світлодіоди та датчики зображення або фотодіодні матриці, що функціонують як приймачі. Такий підхід дозволяє VLC досягти великої пропускної здатності при мінімальному споживанні енергії (100 мВт для швидкості передачі даних від 10 Мбіт/с до 100 Мбіт/с), уникаючи при цьому електромагнітних або радіоперешкод. Переваги VLC численні, включаючи високу енергоефективність, тривалий термін служби (до 10 років) і економічну ефективність готових світлодіодів. Крім того, VLC виграє від неліцензійного доступу до спектру, що робить його привабливим рішенням для застосувань, для яких пріоритетом є час автономної роботи і вартість доступу, таких як масові мережі IoT і бездротові сенсорні мережі. Крім того, VLC демонструє кращі показники поширення порівняно з радіочастотними технологіями в певних неземних сценаріях, таких як аерокосмічна галузь і підводне середовище, що може виявитися життєво важливим для майбутньої екосистеми 6G.

Наземний оптичний бездротовий зв'язок (OWC) «точка-точка», який також називають оптичним зв'язком у вільному просторі (FSO) (Juarez et al., 2006), працює в ближньому інфрачервоному діапазоні. Завдяки використанню потужного, щільно сфокусованого лазерного променя на передавачі, система FSO досягає чудової швидкості передачі даних 10 Гбіт/с на довжину хвилі, навіть на великих відстанях до 10 000 км. Ця технологія забезпечує економічно ефективне рішення для усунення вузьких місць у наземних мережах. Крім того, FSO дозволяє встановлювати зв'язок між різними платформами, такими як космос, повітря і земля, а також підтримує міжсупутникові зв'язки високої пропускної здатності, що особливо вигідно для супутникового угруповання на

низькій орбіті. Останнім часом зростає інтерес до ультрафіолетового зв'язку, зумовлений досягненнями в галузі твердотільних оптичних передавачів і детекторів. Ультрафіолетовий зв'язок за межами прямої видимості забезпечує широке покриття і підвищену безпеку, що сприяє зростанню інтересу до цієї технології [6].

У системі OWC, як показано на рис. 3.2, передавач модулює біти інформації в оптичні хвилі.

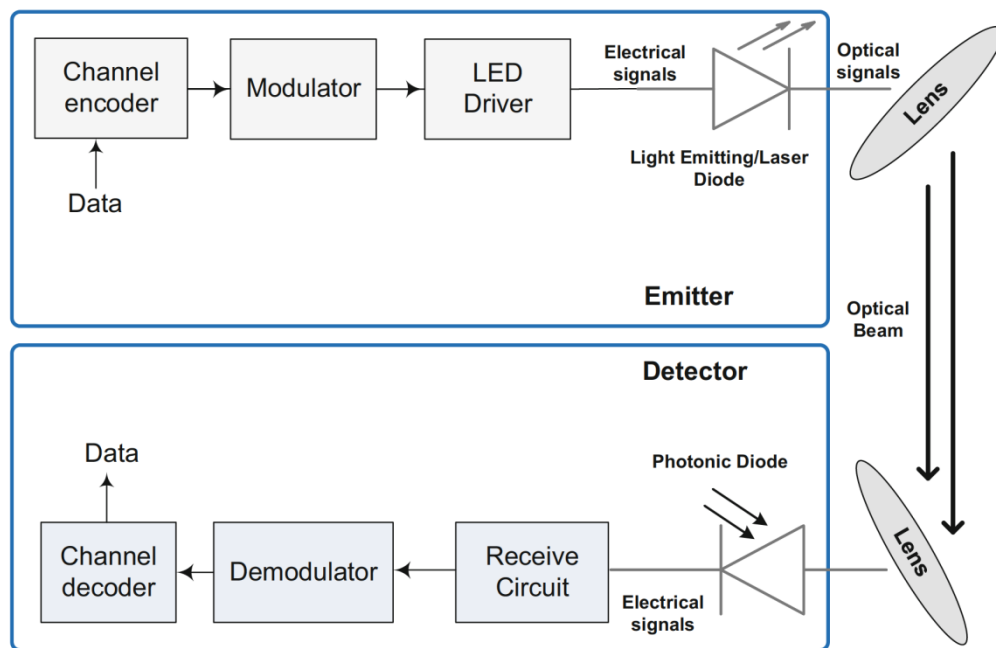


Рисунок 3.2 - Структурна схема оптичної бездротової системи зв'язку

Згодом вироблені оптичні сигнали передаються через атмосферу до віддаленого приймача. На приймальному боці використовується фотодіод для перетворення отриманого оптичного сигналу назад в електричний струм. Передавач складається з декількох компонентів, включаючи оптичне джерело зі схемою керування, кодер каналу, модулятор і лінзу, яка фокусує або формує оптичний промінь.

Процес передачі починається з того, що біти інформації з джерела піддаються кодуванню і модуляції для формування електричного сигналу. Цей

модульований сигнал потім керує оптичною інтенсивністю оптичного джерела. Перед передачею оптичний промінь концентрується за допомогою оптичної лінзи або формувача променя. Для бездротового зв'язку на короткі відстані зазвичай використовуються світлодіоди з коліматорами променя, тоді як для передачі на великі відстані в системах FSO зазвичай використовуються потужні лазерні діоди. Ці оптичні компоненти повинні мати невелику площу і низьке енергоспоживання, а також забезпечувати відносно високу оптичну потужність в широкому діапазоні температур з тривалим середнім часом напрацювання на відмову. Комерційні системи FSO зазвичай працюють у двох конкретних діапазонах довжин хвиль: 850 нм і 1550 нм. Ці довжини хвиль збігаються зі стандартними вікнами передачі волоконно-оптичних систем зв'язку і забезпечують загасання в атмосфері менше 0,2 дБ на кілометр. Отже, готові компоненти легко доступні для використання в цих діапазонах довжин хвиль.

Вертикально-резонансні поверхнево-випромінюючі лазери (VCSEL) в основному використовуються для передачі близько 850 нм, тоді як лазери Фабрі-Перо (FP) і лазери з розподіленим зворотним зв'язком (DFB) переважно використовуються для роботи на довжині хвилі 1550 нм [7].

3.3 Масштабний безстільниковий MIMO

Стільникові мережі є перспективними завдяки впровадженню інноваційної технології бездротового доступу під назвою масивний MIMO. Ця технологія передбачає, що базова станція оснащена великою антенною решіткою, що дозволяє їй обслуговувати декілька користувачів у стільниковій мережі одночасно, використовуючи один і той самий частотно-часовий ресурс. Переваги масивного MIMO включають підвищену пропускну здатність, надійність та енергоефективність, що досягається за рахунок простої лінійної обробки сигналів.

У масивній системі MIMO велика кількість службових антен може бути розгорнута двома способами: в колокаційній або розподіленій конфігураціях. У

колокаційних архітектурах всі службові антени розміщуються близько один до одного, що призводить до зниження вимог до транзитного тракту, простої синхронізації, легкого калібрування решітки і полегшує спільну обробку даних. Однак така конфігурація в першу чергу вигідна користувачам, розташованим поблизу центрів стільників, залишаючи користувачів на периферії стільника зі значно нижчою якістю обслуговування через такі проблеми, як високе загасання сигналу, міжстільникові перешкоди і проблеми з передачею даних, притаманні традиційній архітектурі стільникових мереж. У міру того, як стільникові мережі ущільнюються для забезпечення більшої пропускну здатності системи, проблема міжстільникових перешкод і частих хендверів стає більш вираженою, що ще більше впливає на загальну продуктивність мережі [7].

Як наслідок, більшість перевантажень трафіку в стільникових мережах виникає на межі стільника. Користувацька продуктивність, що визначається так званою 0,95% ймовірною швидкістю передачі даних користувача, залишається низькою в мережах 5G, оскільки вона може гарантувати задовільну продуктивність лише 0,95% користувачів. Щоб вирішити ці проблеми, потенційним рішенням є встановлення декількох з'єднань між кожним користувачем і безліччю розподілених антен. Такий підхід може бути особливо ефективним, коли мережа складається з одного великого стільника, усуваючи міжстільникові перешкоди і необхідність хендверів. У минулому для опису цього рішення використовувалися різні назви, такі як мережеве MIMO, розподілене MIMO, розподілена антенна решітка, а також передача і прийом CoMP (Coordinated Multi-Point). Ефективно використовуючи просторову різноманітність для протидії зникненню тіней, розподілена антенна система може значно підвищити ймовірність покриття порівняно з колокаційною системою. Однак важливо зазначити, що це покращення досягається за рахунок збільшення вимог до транзитного тракту.

У роботі [8] запропоновано нову розподілену масивну систему MIMO, призначену для обслуговування кількох користувачів, розкиданих по широкій

географічній території, з використанням великої кількості службових антен. Ці антени працюють в унісон через магістральну мережу, обслуговуючи всіх користувачів одночасно в одному і тому ж часовому і частотному ресурсі. Для мінімізації накладних витрат, пов'язаних з отриманням CSI (інформації про стан каналу), система працює в режимі TDD (тимчасового дуплексу), використовуючи взаємність каналів. Ця інноваційна система відрізняється тим, що в ній відсутнє поняття стільників або меж стільників, що дало їй назву безстільникової масивної MIMO. Поєднуючи принципи розподіленого MIMO і масивного MIMO, ця система ефективно використовує переваги обох технологій. Розподілене MIMO дозволяє поліпшити просторове розмаїття і покриття, тоді як масивне MIMO підвищує пропускну здатність і спектральну ефективність, що в результаті створює перспективне рішення для бездротового зв'язку.

Розподілені антени в безстільниковій системі масивного MIMO дозволяють уникнути проблем, пов'язаних з межами стільників, таких як міжстільникові перешкоди і необхідність хендверів. Це забезпечує більш рівномірний розподіл ресурсів і покращує якість обслуговування для користувачів, розташованих як поблизу центрів стільників, так і на їх периферії. Типова структура безстільникової масивної системи MIMO включає велику кількість M точок доступу (ТД) і меншу кількість K користувачів. В основному, як ТД, так і користувацькі термінали оснащені однією антеною і випадковим чином розподілені по заданій географічній області. Ці точки доступу підключені до центрального процесора (ЦП) через транзитну мережу, як показано на рис. 3.3. У цій схемі всі M точок доступу одночасно обслуговують всіх K користувачів, використовуючи один і той же частотно-часовий ресурс.

Нисхідна передача відбувається від точок доступу до користувачів, в той час як висхідна передача відбувається від користувачів до точок доступу, причому операція TDD ефективно розділяє нисхідну і висхідну лінії зв'язку. Кожен інтервал когерентності в системі поділяється на три фази: фаза

підготовки висхідної лінії зв'язку, фаза передачі даних корисного навантаження по низхідній лінії зв'язку і фаза передачі даних корисного навантаження по висхідній лінії зв'язку.

Під час фази навчання висхідної лінії користувачі передають опорні сигнали до точок доступу, і кожна точка доступу незалежно оцінює канали з усіма користувачами. Використовуючи взаємність каналів, притаманну системам TDD, базова станція отримує знання про канал низхідної лінії зв'язку від оціненого CSI висхідної лінії зв'язку. Ці отримані оцінки каналу відіграють життєво важливу роль в системі: вони використовуються для попереднього кодування сигналів, що передаються в низхідній лінії, а також для виявлення сигналів, що передаються від користувачів у висхідній лінії. Таким чином, безстільникова масивна MIMO система поєднує переваги розподіленого та масивного MIMO, надаючи можливість ефективного використання просторової різноманітності та збільшення спектральної ефективності. Це робить її перспективним рішенням для майбутніх бездротових мереж, забезпечуючи рівномірний розподіл ресурсів і поліпшену якість обслуговування для всіх користувачів, незалежно від їхнього розташування в географічній області.

Ми можемо написати

$$g_{mk} = \sqrt{\beta_{mk}} h_{mk} \quad (3.1)$$

для моделювання каналу завмирань між типовою точкою доступу $m = 1, \dots, M$ і типовим UE $k = 1, \dots, K$, де β_{mk} і h_{mk} представляють великомасштабні та дрібномасштабні завмирання відповідно [9]. У безстільниковій масивній системі MIMO для просторового мультиплексування інформаційних символів, призначених для K терміналів, що позначаються через $\mathbf{u} = [u_1, u_2, \dots, u_K]^T$, де символи є нормалізованими, застосовуються два лінійні методи попереднього кодування, тобто спряжене формування променя і попереднє кодування з нульовим прискоренням

$$\mathbb{E}[|u_k|^2] = 1, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (3.2)$$

Безкоміркова масивна система MIMO із спряженим формуванням променя працює наступним чином:

- Типовий AP m вимірює β_{mk} , $k = 1, 2, \dots, K$, і повідомляє їх центральному процесору. Зазвичай, великомасштабні завмирання залишаються постійними протягом відносно тривалого періоду часу відносно часу когерентності каналу. Отже, знання β_{mk} можна вважати досконалим, а накладні витрати на вимірювання і розподіл невеликі.

- Процесор обчислює коефіцієнти керування потужністю η_{mk} , $\forall m$, $\forall k$ як функцію β_{mk} і надсилає їх відповідним точкам доступу.

Тим часом центральний процесор розподіляє інформаційні символи u між усіма точками доступу. Зауважте, що β_{mk} може бути однаковим для десятків символічних періодів, і тому передавати потрібно лише u .

- Точки доступу розглядають оцінки каналів як справжні канали і використовують спряжене формування променя для генерації сигналів, що передаються. m -та точка доступу надсилає сигнал

$$s_m = \sqrt{\eta_{mk} P_m} \hat{\mathbf{g}}_m^H \mathbf{u} = \sqrt{P_m} \sum_{k=1}^K \sqrt{\eta_{mk}} \hat{g}_{mk}^* u_k, \quad (3.3)$$

де P_m - гранична потужність передачі AP m . Вибір коефіцієнтів регулювання потужності підпорядкований наступним умовам

$$\mathbb{E}[|s_m|^2] \leq P_m, \quad \forall m = 1, 2, \dots, M, \quad (3.4)$$

що можна інтерпретувати як

$$\sum_{k=1}^K \eta_{mk} \mathbb{E}[|\hat{g}_{mk}|^2] \leq 1. \quad (3.5)$$

Філософія попереднього кодування з нульовим піднесенням полягає в тому, щоб повністю придушити інтерференцію між різними користувачами, враховуючи знання каналів низхідної лінії зв'язку [10].

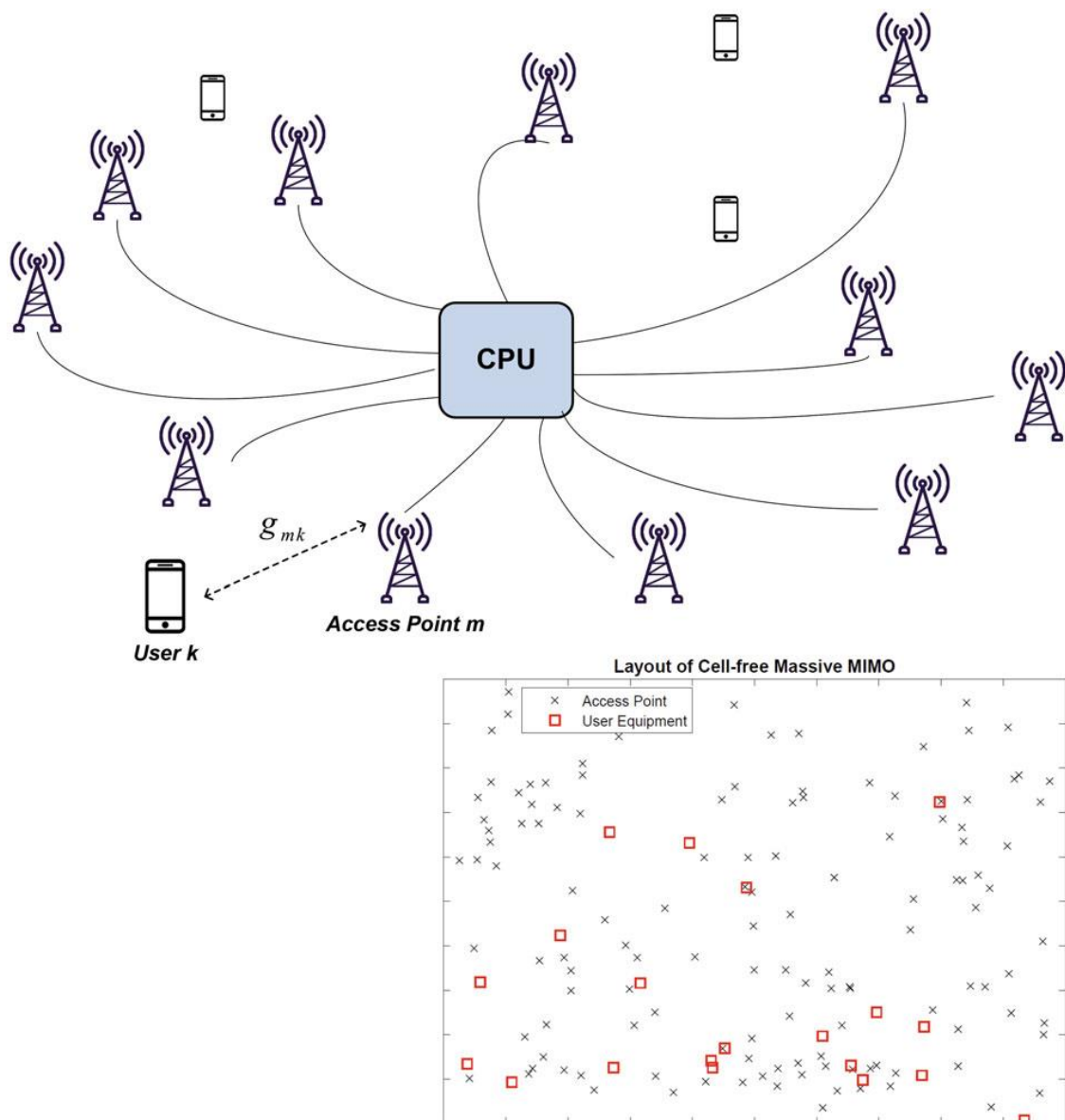


Рисунок 3.3 - Безстільникова масивна система MIMO

Масивна система MIMO без стільникового зв'язку, що застосовує попереднє кодування з нульовим піднесенням, працює наступним чином:

- AP m вимірює β_{mk} , $k = 1, 2, \dots, K$, і повідомляє їх центральному процесору.
- Як спряжене формування променя, центральний процесор обчислює коефіцієнти керування потужністю в термінах β_{mk} .
- Кожна точка доступу надсилає свою локальну CSI до центрального процесора, і тому центральний процесор отримує глобальну CSI.
- CPU спільно кодує інформаційні символи в термінах

$$\mathbf{s} = \hat{\mathbf{G}}^H (\hat{\mathbf{G}} \hat{\mathbf{G}}^H)^{-1} \mathbf{D}_\eta \mathbf{u}, \quad (3.6)$$

де $\mathbf{D}_\eta \in \mathbb{C}^{K \times K}$ - діагональна матриця, що складається з коефіцієнтів керування потужністю, тобто $\mathbf{D}_\eta = \text{diag}\{\sqrt{\eta_1}, \dots, \sqrt{\eta_K}\}$.

- Центральний процесор розподіляє попередньо закодований символ s_m між точками доступу m , і ці точки доступу синхронно надсилають відповідні символи, що передаються, користувачам.

3.4 Інтелектуальна відбиваюча поверхня / IRS

Сучасні вимоги до бездротового зв'язку дійсно ставлять перед розробниками складні завдання. Усі три підходи досягнення високої продуктивності мережі — щільне розгортання мережі, використання масивів антен та збільшення смуги пропускання — мають свої обмеження через значне підвищення витрат, енергоспоживання та ризик інтерференції. Розгортання нових базових станцій у гетерогенній мережі забезпечує більшу пропускну здатність, проте потребує великих інвестицій в інфраструктуру і створює складнощі з інтерференцією сигналів між станціями. Інтеграція антен на базових станціях, зокрема використання масивних антен, дозволяє збільшувати кількість одночасних з'єднань та покращувати якість зв'язку. Однак, цей підхід

теж дорого коштує та вимагає значної енергетичної підтримки для обробки сигналу.

Збільшення ширини смуги частот підвищує пропускну здатність, але обмеженість спектра змушує операторів звертатися до все вищих частот. Такі частоти мають низьку здатність до поширення, що вимагає розміщення більшої кількості базових станцій на меншій відстані одна від одної, збільшуючи витрати та енергоспоживання. Ці проблеми справді вимагають інноваційного підходу, здатного забезпечити високу ефективність, економічність та енергозбереження в умовах швидко зростаючого навантаження на мережу. Одним із перспективних напрямів може бути впровадження таких технологій, як інтелектуальні поверхні (RIS) для керування поширенням сигналів, адаптивні підходи до управління спектром і використання штучного інтелекту для оптимізації мережевих ресурсів, що дозволить зменшити витрати й підвищити надійність зв'язку [11].

Виклики, пов'язані з природою бездротових каналів, дійсно обмежують продуктивність мереж, особливо через втрати при поширенні, затінення та багатопроменеве поширення. Традиційні методи, як-от адаптивне управління, модуляція та кодування, дозволяють частково компенсувати ці втрати, проте потребують великих накладних витрат і мають обмежену ефективність в умовах складного і мінливого бездротового середовища.

У цьому контексті інтелектуальна поверхня, що відбиває (IRS), представляє перспективну інновацію, яка може суттєво покращити ефективність бездротового зв'язку. IRS — це плоска поверхня, яка складається з масиву маленьких пасивних рефлекторів (рис. 3.4). Кожен елемент поверхні здатний вносити фазові зсуви та амплітудні зміни до вхідної електромагнітної хвилі, керуючи відбиттям та напрямком сигналів у потрібному напрямку. Завдяки налаштуванню коефіцієнтів відбиття цієї поверхні можна зменшувати втрати при поширенні, збільшувати силу сигналу в заданих напрямках і компенсувати втрати, пов'язані з затіненням або перешкодами. Використання IRS може суттєво зменшити потребу в додатковому обладнанні, знизити

енергоспоживання та забезпечити більш стабільний зв'язок навіть у динамічному середовищі з високим рівнем випадковості [12].

На відміну від традиційних методів, які лише пасивно адаптуються до середовища передачі, IRS застосовує проактивний підхід, забезпечуючи контроль над радіосигналами шляхом інтелектуального управління відбиттями. Завдяки цьому IRS може формувати промінь в заданому напрямку з високою точністю, підвищуючи ефективність передачі. Завдяки налаштуванню коефіцієнтів відбиття елементів IRS можна досягти конструктивної інтерференції відбитих сигналів, щоб підвищити рівень корисного сигналу на приймачі. Одночасно IRS може створювати деструктивну інтерференцію для небажаних сигналів, знижуючи рівень шуму та багатоканальних перешкод. Це дозволяє створити новий тип керованого середовища, яке значно підвищує гнучкість та адаптивність бездротових систем. Таке програмоване середовище поширення забезпечує нові можливості для підвищення надійності та стабільності бездротового зв'язку навіть у складних і динамічних умовах, де традиційні методи демонструють обмежену ефективність.

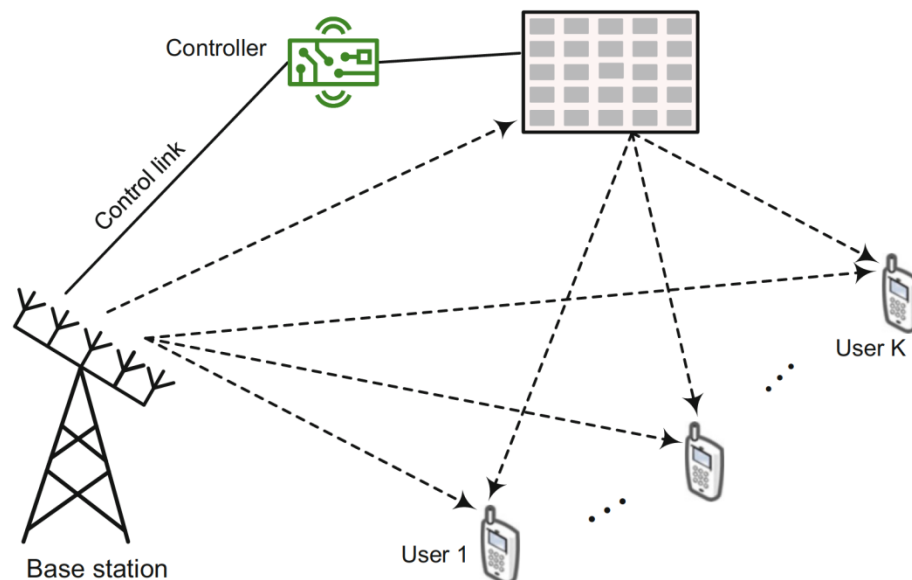


Рисунок 3.4 - Системи бездротового зв'язку із використанням IRS

Завдяки своїй пасивній природі, IRS забезпечує суттєві переваги порівняно з традиційними антенними решітками. Відбиваючі елементи IRS, наприклад, недорогі друковані диполі, працюють без потреби в радіочастотних ланцюгах для передачі й прийому сигналу. Це значно знижує витрати на обладнання та енергоспоживання, оскільки пасивні елементи лише відбивають електромагнітні хвилі, не використовуючи енергію для підсилення або обробки сигналів, як у випадку з активними антенами.

Економічна ефективність IRS обумовлена також тим, що відбиваючі елементи є легкими, недорогими та можуть мати конформну геометрію. Це дозволяє створювати IRS, що адаптуються до різних форм і розмірів, підвищуючи можливості їх інтеграції в різноманітні сценарії розгортання. IRS може легко вбудовуватися в існуючі бездротові мережі як допоміжне обладнання, забезпечуючи гнучкість та сумісність для підвищення продуктивності мереж. Таким чином, IRS вважається революційною технологією завдяки її низькій складності, вартості та енергоспоживанню, водночас забезпечуючи потенціал для значного підвищення продуктивності бездротових систем, що робить її перспективною альтернативою для наступних поколінь зв'язку [13].

IRS має ряд значних переваг над спорідненими технологіями, такими як бездротові реле, зворотне розсіювання і активні масиви MIMO. Основна перевага IRS над бездротовими ретрансляторами полягає в її здатності працювати у режимі повного дуплексу, що підвищує ефективність спектра. Бездротові реле зазвичай працюють у напівдуплексному режимі, а реалізація повного дуплексу вимагає дорогих і складних технологій придушення перешкод. На відміну від цього, IRS працює пасивно, без підсилювачів потужності та передавальних модулів, що дозволяє уникнути посилення шуму.

Крім того, IRS відрізняється від технологій зворотного розсіювання, таких як RFID, які працюють завдяки модуляції відбитого сигналу, випромінюваного зчитувачем. На відміну від зворотного розсіювання, IRS підтримує існуючі лінії зв'язку, відбиваючи сигнали для підсилення основного зв'язку без передачі

власних даних. Це усуває необхідність придушення самоперешкод, яке є необхідним для зчитувачів у системах RFID. Щодо відмінностей із активними поверхневими масивами MIMO, IRS має іншу архітектуру — вона є пасивною системою, що відбиває, тоді як активний масив MIMO працює шляхом передачі сигналів, використовуючи значно більше енергоспоживання. Завдяки своїм пасивним відбиваючим елементам IRS може когерентно об'єднувати відбиті й прямі сигнали, збільшуючи потужність і стабільність сигналу на приймачі. Ці особливості позиціонують IRS як ефективне та унікальне рішення в галузі бездротового зв'язку, що забезпечує високі показники при мінімальних витратах на енергію та обладнання [14].

Інтелектуальні відбивальні поверхні (IRS) дійсно мають значний потенціал для покращення сучасних бездротових мереж за рахунок підвищення спектральної та енергоефективності. Їх застосування може суттєво змінити архітектуру систем MIMO, дозволяючи перейти від великих масивів активних антен до середньомасштабних систем з меншою кількістю активних елементів. Це досягається завдяки використанню великих площ пасивних поверхонь, що здатні контролювати відбиття сигналів, створюючи прецизійні промені без значного споживання енергії.

Завдяки своїй здатності налаштовувати відбиття електромагнітних хвиль, IRS підвищує ефективність передачі сигналу, збільшує покриття та зменшує інтерференцію. Використання IRS у комбінації з системами MIMO середнього масштабу дозволяє зменшити кількість активних передавачів, що, у свою чергу, знижує витрати на енергоспоживання та апаратне забезпечення, особливо важливо для систем, що використовують високі частоти (наприклад, міліметрові хвилі), де загасання сигналу є більш вираженим. Перехід до гібридних мереж з підтримкою IRS також відкриває нові можливості для розробки та вдосконалення схем маршрутизації і покращення покриття, що робить їх привабливими для застосування у великих міських та промислових зонах. Загалом, інтеграція IRS є багатообіцяючим напрямком для побудови більш ефективних та економічних бездротових систем нового покоління [15].

Існуюча багаторівнева архітектура бездротових мереж, яка використовує макро-, мікро-, малі базові станції, віддалені радіоголовки, реле та розподілені антени, має свої переваги, але стикається з проблемами у вигляді зростаючих витрат на координацію та усунення завад між активними компонентами. Це збільшує складність і накладні витрати на управління мережею, обмежуючи економічно ефективне підвищення пропускної здатності, необхідне для задоволення зростаючих вимог до передачі даних. Інтеграція інтелектуальних відбивальних поверхонь (IRS) пропонує вихід із цієї ситуації. Використовуючи пасивні компоненти, які не генерують власних сигналів, IRS можуть ефективно управляти напрямком і характеристиками відбитих сигналів, підтримуючи або покращуючи якість зв'язку без значних енергетичних витрат. Це дозволяє будувати гібридні мережі, де поєднання активних вузлів із пасивними IRS забезпечує оптимальне управління трафіком і зниження інтерференцій без високих витрат на інфраструктуру. Щільне розгортання IRS, яке відрізняється нижчою вартістю порівняно з активними вузлами, може забезпечити точкове покриття і покращення якості сигналу в тих зонах, де потрібне посилення сигналу. Це, в свою чергу, сприяє створенню економічно вигідної мережі, що може збільшувати пропускну здатність, залишаючись екологічно чистішою завдяки зниженню енергоспоживання. Оптимальний баланс між активними елементами та IRS допомагає створити масштабовану та стабільну мережу, яка відповідає сучасним вимогам користувачів та стандартам екологічної відповідальності [16].

3.5 Висновки до розділу 3

Розвиток технологій 6G спрямований на підтримку нових проривних сценаріїв використання і додатків, що потребують високої продуктивності та інноваційного підходу. До ключових технологій 6G належать:

1. Нові спектральні можливості: 6G передбачає використання частот у терагерцовому (ТГц) діапазоні, що відкриває значно ширшу смугу пропускання

для передачі даних. Це дозволяє досягти неймовірно високих швидкостей передачі даних, необхідних для нових застосувань, таких як голографічний зв'язок і розширена реальність. Досліджуються також оптичні діапазони, що можуть стати додатковим інструментом для забезпечення надвисоких швидкостей.

2. Новий повітряний інтерфейс: Включає інновації, такі як безстільниковий масивний MIMO, що розширює межі традиційних мереж за рахунок розподілених антен, і надмасивний MIMO для надзвичайної продуктивності. Інтелектуальні відбиваючі поверхні (IRS) сприяють підвищенню ефективності покриття та якості сигналу завдяки керуванню відбиттям сигналів. Також розробляються технології множинного доступу нового покоління, які забезпечують більш гнучкий і ефективний доступ багатьох користувачів до мережі.

3. Нові перспективи побудови мереж: Одна з ключових новацій 6G — це відкриті мережі радіодоступу (Open RAN), що забезпечують гнучкість і взаємодію різних виробників і постачальників технологій. Неземні мережі, включаючи супутникові та повітряні платформи, інтегруються для надання глобального покриття, включаючи віддалені та важкодоступні райони.

4. Конвергенція зв'язку, штучного інтелекту та сенсорних технологій: 6G матиме тісніший зв'язок із технологіями штучного інтелекту, що дозволить забезпечити автономне управління мережею, зменшення затримок і покращення якості обслуговування. Інтеграція сенсорних технологій із комунікаційними можливостями дозволить створювати багатофункціональні системи, які одночасно забезпечують передачу даних і виконують функції вимірювання, моніторингу і розпізнавання. Ці категорії технологій об'єднуються для формування цілісної системи зв'язку 6G, яка надає широкі можливості для інновацій та створення нових сценаріїв використання, що підвищують продуктивність і забезпечують більш розвинені сервіси та застосунки для майбутніх поколінь користувачів. Таким чином, 6G стане основою для нових технологій, що створять нові сценарії використання та

забезпечать підвищення продуктивності, гнучкості й якості комунікаційних сервісів для майбутніх поколінь.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Комерційний та технологічний аудит науково-технічної розробки

Метою даного розділу є проведення технологічного аудиту, в даному випадку програмного засобу інформаційно-орієнтованих безпроводних мереж зв'язку. Під час розробки проводиться аналіз та оптимізація методів передачі даних, які базуються на їх інформаційній важливості, оцінюється ефективність використання ресурсів, відбувається підвищення надійності комунікацій. Це дозволяє створювати адаптивні, масштабовані та енергоефективні мережі для задоволення сучасних вимог до передачі великих обсягів даних в умовах динамічного та мобільного середовища.

Актуальність дослідження інформаційно-орієнтованих безпроводних мереж зв'язку визначається стрімким розвитком цифрових технологій, збільшенням обсягів переданої інформації та новими вимогами до мережевої інфраструктури [1].

Особливість дослідження інформаційно-орієнтованих безпроводних мереж зв'язку полягає у розробці принципово нових підходів до управління інформаційними потоками в мережах, які ґрунтуються на їхній інформаційній цінності, адаптивності до умов середовища та інноваційних методах оптимізації ресурсів.

Назвати конкретну комерційну систему, яка повністю реалізує всі функції інформаційно-орієнтованої безпроводної мережі зв'язку, складно, оскільки подібні мережі перебувають на етапі наукових розробок і тестувань. Проте аналоги у вигляді IoT-платформ, NDN/CCN-мереж або МЕС-рішень можуть бути використані для порівняння. Ціни варіюються від десятків тисяч гривень (маломасштабні рішення) до мільйонів доларів (корпоративні системи) [2].

Виберемо найпростіший аналог вартістю 16 200 грн.

Для проведення комерційного та технологічного аудиту залучають не менше 3-х незалежних експертів [20]. Оцінювання науково-технічного рівня

розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням п'ятибальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, у відповідності із табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання комерційного потенціалу розробки та їх можлива бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
Кри- терій	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено роботоздатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів

Продовження табл. 4.1

Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практик на здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї
9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Усі дані по кожному параметру занесено в таблиці 4.2

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання комерційного потенціалу розробки

Критерії оцінювання	ПІБ експертів		
	Експерт 1	Експерт 2	Експерт 3
	Бали		
Технічна здійсненність концепції	3	4	4
Наявність аналогів на ринку	3	3	3
Цінова політика	4	4	4
Технічні та споживчі властивості виробу	4	3	3
Експлуатаційні витрати	4	3	3
Ринок збуту	4	4	4
Конкурентоспроможність	3	3	3
Фахівці з технічної і комерційної реалізації	4	3	4
Фінансування	4	4	3
Матеріально-технічна база	3	3	3
Термін реалізації ідеї	4	4	4
Супровідна документація	3	3	4
Сума	43	41	42
Середньоарифметична сума балів	$(43+41+42) / 3 = 42$		

За даними таблиці 4.2 можна зробити висновок щодо рівня комерційного потенціалу даної розробки. Для цього доцільно скористатись рекомендаціями, наведеними в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Рівні комерційного потенціалу розробки

Середньоарифметична сума балів, розрахована на основі висновків експертів	Рівень комерційного потенціалу розробки
0 - 10	Низький
11-20	Нижче середнього
21-30	Середній
31-40	Вище середнього
41-48	Високий

Як видно з таблиці, рівень комерційного потенціалу розроблюваного нового програмного продукту є високим, що досягається за рахунок розробці принципово нових підходів до управління інформаційними потоками в мережах, які ґрунтуються на їхній інформаційній цінності, адаптивності до умов середовища та інноваційних методах оптимізації ресурсів.

4.2 Прогнозування витрат на виконання науково-дослідної (дослідно-конструкторської) роботи

4.2.1 Основна заробітна плата розробників

Основна заробітна плата розробників, яка розраховується за формулою:

$$Z_o = \frac{M}{T_p} \cdot t, \quad (4.1)$$

де M – місячний посадовий оклад конкретного розробника (дослідника), грн.;

T_p – число робочих днів за місяць, 23 днів;

t – число днів роботи розробника (дослідника).

Результати розрахунків зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Основна заробітна плата розробників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн.	Оплата за робочий день, грн.	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн.
Керівник проекту	36500	1586,96	34	53956,522
Програміст	33000	1434,78	34	48782,609
Всього				102739,13

Так як в даному випадку розробляється програмний продукт, то розробник виступає одночасно і основним робітником, і тестувальником розроблюваного програмного продукту.

4.2.2 Додаткова заробітна плата розробників, які брати участь в розробці обладнання/програмного продукту

Додаткову заробітну плату прийнято розраховувати як 13,8 % від основної заробітної плати розробників та робітників:

$$З_д = З_о \cdot 13,8 \% / 100 \% \quad (4.2)$$

$$З_д = (102739,13 \cdot 13,8 \% / 100 \%) = 14178,00 \text{ (грн.)}$$

4.2.3 Нарахування на заробітну плату розробників

Згідно діючого законодавства нарахування на заробітну плату складають 22 % від суми основної та додаткової заробітної плати.

$$Н_з = (З_о + З_д) \cdot 22 \% / 100\% \quad (4.3)$$

$$Н_з = (102739,13 + 14178,00) \cdot 22 \% / 100 \% = 25721,77 \text{ (грн.)}$$

4.2.4 Витрати на матеріали і комплектуючі

Оскільки для розроблювального пристрою не потрібно витрачати матеріали та комплектуючі, то витрати на матеріали і комплектуючі дорівнюють нулю [20].

4.2.5 Амортизація обладнання, яке використовувалось для проведення розробки

Амортизація обладнання, що використовувалось для розробки в спрощеному вигляді розраховується за формулою:

$$A = \frac{Ц}{T_6} \cdot \frac{t_{\text{вик}}}{12} \text{ [грн.]}. \quad (4.4)$$

де Ц – балансова вартість обладнання, грн.;

T – термін корисного використання обладнання згідно податкового законодавства, років

$t_{\text{вик}}$ – термін використання під час розробки, місяців

Розрахуємо, для прикладу, амортизаційні витрати на обладнання:

– комп'ютер - балансова вартість становить 25000 грн.;

– принтер - балансова вартість становить 13 000 грн;

сканер - балансова вартість становить 5 000 грн.;

термін фактичного використання обладнання – 1,48 міс.

$$A_{\text{обл}} = \frac{430000}{2} \times \frac{1,48}{12} = 2775 \text{ грн.}$$

Аналогічно визначаємо амортизаційні витрати на інше обладнання та приміщення. Розрахунки заносимо до таблиці 4.5. Так як вартість ліцензійної ОС та спеціалізованих ліцензійних нематеріальних ресурсів менше 20000 грн, то даний нематеріальний актив не амортизується, а його вартість включається у вартість розробки повністю, $V_{\text{нем.ак.}} = 6300$ грн.

Таблиця 4.5 – Амортизаційні відрахування на матеріальні та нематеріальні ресурси для розробників

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн.	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн.
Комп'ютер та комп'ютерна периферія	28000	2	1,48	2775
Офісне обладнання (меблі)	25000	4	1,48	769,928
Приміщення	1500000	20	1,48	9239,130
Всього				12784,03

4.2.6 Витрати на силову електроенергію

Тарифи на електроенергію для непобутових споживачів (промислових підприємств) відрізняються від тарифів на електроенергію для населення. При цьому тарифи на розподіл електроенергії у різних постачальників (енергорозподільних компаній), будуть різними. Крім того, розмір тарифу залежить від класу напруги (1-й або 2-й клас). Тарифи на розподіл електроенергії для всіх енергорозподільних компаній встановлює Національна комісія з регулювання енергетики і комунальних послуг (НКРЕКП) [21]. Витрати на силову електроенергію розраховуються за формулою:

$$B_e = B \cdot \Pi \cdot \Phi \cdot K_{\Pi}, \quad (4.5)$$

де B – вартість 1 кВт-години електроенергії для 1 класу підприємства з ПДВ в 2024 році для Вінницької області за даними Енера-Вінниця, $B = 10,42$ грн./кВт;

Π – встановлена потужність обладнання, кВт. $\Pi = 0,3$ кВт;

Φ – фактична кількість годин роботи обладнання, годин.

K_{Π} – коефіцієнт використання потужності, $K_{\Pi} = 0,9$.

$$B_e = 0,9 \cdot 0,3 \cdot 8 \cdot 34 \cdot 10,42 = 765,2448 \text{ (грн.)}$$

4.2.7 Інші витрати та загальновиробничі витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками. Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуються як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників:

$$I_{\epsilon} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{ib}}{100\%}, \quad (4.6)$$

де H_{ib} – норма нарахування за статтею «Інші витрати».

$$I_{\epsilon} = 102739,13 * 58\% / 100\% = 59588,7 \text{ (грн.)}$$

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін. Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуються як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників:

$$H_{нзв} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.7)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати».

$$H_{нзв} = 102739,13 * 135 \% / 100 \% = 138698 \text{ (грн.)}$$

4.2.8 Витрати на проведення науково-дослідної роботи

Сума всіх попередніх статей витрат дає загальні витрати на проведення науково-дослідної роботи:

$$B_{заг} = 102739,13 + 14178,00 + 25721,77 + 11733,70 + 6300 + 765,24 + 59588,7 + \\ + 138698 = 360774,7 \text{ грн.}$$

4.2.9 Загальні витрати на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи

Розрахунок загальних витрат на науково-дослідну (науково-технічну) роботу та оформлення її результатів.

Загальні витрати на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховуються за формулою:

$$ЗВ = \frac{B_{заг}}{\eta} \text{ (грн)}, \quad (4.8)$$

де η – коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи.

Так, якщо науково-технічна розробка знаходиться на стадії: науково-дослідних робіт, то $\eta=0,1$; технічного проектування, то $\eta=0,2$; розробки конструкторської документації, то $\eta=0,3$; розробки технологій, то $\eta=0,4$; розробки дослідного зразка, то $\eta=0,5$; розробки промислового зразка, то $\eta=0,7$; впровадження, то $\eta=0,9$. Оберемо $\eta = 0,5$, так як розробка, на даний момент, знаходиться на стадії дослідного зразка:

$$ЗВ = 360774,7 / 0,5 = 721549,4 \text{ грн.}$$

4.3 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнювальним позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку. Саме зростання чистого прибутку забезпечить потенційному інвестору надходження додаткових коштів,

дозволить покращити фінансові результати його діяльності, підвищить конкурентоспроможність та може позитивно вплинути на ухвалення рішення щодо комерціалізації цієї розробки.

Для того, щоб розрахувати можливе зростання чистого прибутку у потенційного інвестора від можливого впровадження науково-технічної розробки необхідно:

а) вказати, з якого часу можуть бути впроваджені результати науково-технічної розробки;

б) зазначити, протягом скількох років після впровадження цієї науково-технічної розробки очікуються основні позитивні результати для потенційного інвестора (наприклад, протягом 3-х років після її впровадження);

в) кількісно оцінити величину існуючого та майбутнього попиту на цю або аналогічні чи подібні науково-технічні розробки та назвати основних суб'єктів (зацікавлених осіб) цього попиту;

г) визначити ціну реалізації на ринку науково-технічних розробок з аналогічними чи подібними функціями.

При розрахунку економічної ефективності потрібно обов'язково враховувати зміну вартості грошей у часі, оскільки від вкладення інвестицій до отримання прибутку минає чимало часу. При оцінюванні ефективності інноваційних проектів передбачається розрахунок таких важливих показників:

- абсолютного економічного ефекту (чистого дисконтованого доходу);
- внутрішньої економічної дохідності (внутрішньої норми дохідності);
- терміну окупності (дисконтованого терміну окупності).

Аналізуючи напрямки проведення науково-технічних розробок, розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки за її можливої комерціалізації потенційним інвестором можна об'єднати, враховуючи визначені ситуації з відповідними умовами.

4.3.1 Розробка чи суттєве вдосконалення програмного засобу (програмного забезпечення, програмного продукту) для використання масовим споживачем

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta\Pi_o \cdot N + \Pi_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{g}{100}\right), \quad (4.9)$$

де $\pm\Delta\Pi_o$ – зміна вартості програмного продукту (зростання чи зниження) від впровадження результатів науково-технічної розробки в аналізовані періоди часу;

N – кількість споживачів які використовували аналогічний продукт у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки;

Π_o – основний оціночний показник, який визначає діяльність підприємства у даному році після впровадження результатів наукової розробки, $\Pi_o = \Pi_{\phi} \pm \Delta\Pi_o$;

Π_{ϕ} – вартість програмного продукту у році до впровадження результатів розробки;

ΔN – збільшення кількості споживачів продукту, в аналізовані періоди часу, від покращення його певних характеристик;

λ – коефіцієнт, який враховує сплату податку на додану вартість. Ставка податку на додану вартість дорівнює 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$.

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність продукту;

g – ставка податку на прибуток, у 2024 році $g = 18\%$.

Припустимо, що при прогнозованій ціні 7500 грн. за одиницю виробу, термін збільшення прибутку складе 3 роки. Після завершення розробки і її вдосконалення, можна буде підняти її ціну на 500 грн. Кількість одиниць реалізованої продукції також збільшиться: протягом першого року – на 3000

шт., протягом другого року – на 2500 шт., протягом третього року на 2000 шт. До моменту впровадження результатів наукової розробки реалізації продукту не було:

$$\Delta\Pi_1 = (0*500 + (7500 + 500)*3000)*0,8333*0,27*(1 - 0,18) = 4151249,834 \text{ грн.}$$

$$\Delta\Pi_2 = (0*500 + (7500 + 500)*(3000+2500))*0,8333*0,27*(1 - 0,18) = 8117999,675 \text{ грн.}$$

$$\Delta\Pi_3 = (0*500 + (7500 + 500)*(3000+2500+2000))*0,8333*0,27*(1 - 0,18) = 11069999,557 \text{ грн.}$$

Отже, комерційний ефект від реалізації результатів розробки за три роки складе 23339249,07 грн.

4.3.2 Розрахунок ефективності вкладених інвестицій та періоду їх окупності

Розраховуємо приведену вартість збільшення всіх чистих прибутків $\Pi\Pi$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^t}, \quad (4.10)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному із років, протягом яких виявляються результати виконаної та впровадженої науково-дослідної (науково-технічної) роботи, грн;

T – період часу, протягом якою виявляються результати впровадженої науково-дослідної (науково-технічної) роботи, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,05 \dots 0,15$;

t – період часу (в роках).

Збільшення прибутку ми отримаємо, починаючи з першого року:

$$\text{ПП} = (4151249,834/(1+0,1)^1) + (8117999,675/(1+0,1)^2) + (11069999,557/(1+0,1)^3) = 3773863,49 + 6709090,641 + 8317054,513 = 18800008,64 \text{ грн.}$$

Далі розраховують величину початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки. Для цього можна використати формулу:

$$PV = k_{inv} * ZB, \quad (4.11)$$

де k_{inv} – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію. Це можуть бути витрати на підготовку приміщень, розробку технологій, навчання персоналу, маркетингові заходи тощо; зазвичай $k_{inv}=2...5$, але може бути і більшим;

ZB – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, грн.

$$PV = 2 * 721549,4 = 1443099 \text{ грн.}$$

Тоді абсолютний економічний ефект E_{abc} або чистий приведений дохід (NPV , *Net Present Value*) для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{abc} = \text{ПП} - PV, \quad (4.12)$$

$$E_{abc} = 18800008,64 - 1443099 = 17356910 \text{ грн.}$$

Оскільки $E_{abc} > 0$ то вкладання коштів на виконання та впровадження результатів даної науково-дослідної (науково-технічної) роботи може бути доцільним.

Для остаточного прийняття рішення з цього питання необхідно розрахувати внутрішню економічну дохідність або показник внутрішньої норми дохідності (*IRR, Internal Rate of Return*) вкладених інвестицій та порівняти її з так званою бар'єрною ставкою дисконтування, яка визначає ту мінімальну внутрішню економічну дохідність, нижче якої інвестиції в будь-яку науково-технічну розробку вкладати буде економічно недоцільно.

Розрахуємо відносну (щорічну) ефективність вкладених в наукову розробку інвестицій E_ϵ . Для цього використаємо формулу:

$$E_\epsilon = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (4.13)$$

$T_{жс}$ – життєвий цикл наукової розробки, роки.

$$E_\epsilon = \sqrt[3]{(1 + 17356910/1438897,45)} - 1 = 2,609$$

Визначимо мінімальну ставку дисконтування, яка у загальному вигляді визначається за формулою:

$$\tau = d + f, \quad (4.14)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2024 році в Україні $d = (0,09...0,14)$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладень; зазвичай, величина $f = (0,05...0,5)$.

$$\tau_{\min} = 0,14 + 0,05 = 0,19.$$

Так як $E_v > \tau_{\min}$, то інвестор може бути зацікавлений у фінансуванні даної наукової розробки.

Розрахуємо термін окупності вкладених у реалізацію наукового проекту інвестицій за формулою:

$$T_{ок} = \frac{1}{E_v}, \quad (4.15)$$

$$T_{ок} = 1 / 2,609 = 0,38 \text{ р.}$$

Оскільки $T_{ок} < 3$ -х років, а саме термін окупності рівний 0,38 року, то фінансування даної наукової розробки є доцільним.

4.4 Висновки до розділу 4

Економічна частина даної роботи містить розрахунок витрат на розробку нового програмного продукту, сума яких складає 721549,4 гривень. Було спрогнозовано орієнтовану величину витрат по кожній з статей витрат. Також розраховано чистий прибуток, який може отримати виробник від реалізації нового технічного рішення, розраховано період окупності витрат для інвестора та економічний ефект при використанні даної розробки. В результаті аналізу розрахунків можна зробити висновок, що розроблений програмний продукт за ціною дешевший за аналог і є висококонкурентоспроможним. Період окупності складе близько 0,38 року.

ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено комплексний аналіз технологій та рішень для розвитку телекомунікаційних мереж.

У першому розділі досліджено ключові технології в мережах четвертого покоління (4G), такі як OFDM, MIMO, eMBMS, що забезпечили високошвидкісну передачу даних, збільшення спектральної ефективності та підтримку мобільних сервісів.

У другому розділі виконано аналіз існуючих рішень для програмно-конфігурованих мереж (SDN) та віртуалізації мережевих функцій (NFV), які є основою для реалізації мереж п'ятого покоління (5G). Окрему увагу приділено управлінню ресурсами, низькій затримці та масштабованості мереж.

У третьому розділі досліджено перспективні технології для мереж шостого покоління (6G), зокрема, використання міліметрового діапазону, голографічного зв'язку, інтеграції з IoT, а також технологій штучного інтелекту для оптимізації мереж.

У четвертому розділі проведено економічне обґрунтування доцільності реалізації даної науково-дослідної роботи, що демонструє перспективність запропонованих рішень з точки зору інвестиційної привабливості, зниження витрат та підвищення ефективності мереж.

Загалом, робота підтверджує актуальність впровадження інноваційних технологій для створення високоефективних телекомунікаційних систем майбутнього, враховуючи технічні, економічні та наукові аспекти. Мережі 4G стали ключовим етапом еволюції бездротових технологій, впровадивши такі інновації, як ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), багатоантенні системи (MIMO) та IP-орієнтовану архітектуру. Це забезпечило високу спектральну ефективність, швидкість передачі даних та масштабованість мережі, створивши основу для розвитку наступних поколінь.

Перехід до 5G був зумовлений потребою в покращенні швидкості, зниженні затримок і підтримці масового підключення пристроїв IoT.

Впроваджено три ключові сценарії: розширений мобільний широкосмуговий зв'язок (eMBB), наднадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) та масовий зв'язок машинного типу (mMTC). Архітектура 5G забезпечила гнучкість і ефективність, а технологія NR відкрила нові можливості використання спектра.

Розвиток 6G спрямований на досягнення проривних показників продуктивності, включаючи терагерцові діапазони, надмасивний MIMO, інтелектуальні відбиваючі поверхні та інтеграцію неземних мереж. Інтеграція штучного інтелекту та сенсорних технологій дозволить створити автономні, багатофункціональні системи зв'язку для нових сценаріїв використання. Загалом, еволюція від 4G до 6G демонструє поступовий перехід до більш гнучких, ефективних і продуктивних мереж, які відповідають сучасним і майбутнім вимогам цифрової ери. Кожне покоління створює нові можливості для інновацій, значно підвищуючи якість і масштаб послуг зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3GPP TS 23.501. (2022). 5G; System architecture for the 5G System (5GS), Specification TS 23.501 version 15.13.0 Release 15, The 3rd Generation Partnership Project.
2. 3GPP TS 23.501. (2023). 5G; Security architecture and procedures for 5G System, Specification TS 33.501 version 15.17.0 Release 15, The 3rd Generation Partnership Project.
3. Васильківський, М., Коломієць, А., & Грабчак, Н. (2022). Дослідження функціональних параметрів інфокомунікаційних мереж 6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 46–52. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-46-52>.
4. Васильківський, М., Коломієць, А., & Будащ, М. (2022). Оцінювання параметрів радіотрактів інфокомунікаційних систем 5G/6G. Вісник Хмельницького національного університету, (6), 53–60. <https://www.doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-53-60>
5. 3GPP TS 38.212. (2022). 5G; NR; Multiplexing and channel coding, Specification TS 38.212 version 15.13.0 Release 15, The 3rd Generation Partnership Project.
6. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей, Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G. Львів, Україна: Видавництво "Львівська політехніка", 2020. ISBN: 978-966-941-552-3
7. М. Васильківський, М. Будащ, О. Болдирева «Забезпечення інформаційного захисту в телекомунікаційних мережах 6G», КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ: ОСВІТА, НАУКА, ВИРОБНИЦТВО, (50), 142-150. <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2023-50-22>
8. М. Васильківський, О. Городецька, Б. Климчук, В. Говорун «Стратегії технологічного розвитку апаратного забезпечення інфокомунікаційних радіомереж», Інформаційні технології та комп'ютерна

інженерія. ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>

9. Jiang, W., & Luo, F.-L. (2023). 6G Key technologies: A comprehensive guide. IEEE Press/Wiley.
10. Jiang, W., & Schotten, H. (2022a). Deep learning-aided delay-tolerant zero-forcing precoding in cell-free massive MIMO. In Proceedings of 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), London, UK.
11. М. Васильківський, О. Городецька, О. Стальченко, Б. Климчук «Підвищення ефективності інтелектуальних мереж МІМО на основі 6G», Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. ІТКІ, вип. 56, вип. 1, с. 83–91, Бер 2023. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-56-1-83-91>
12. Jiang, W., & Schotten, H. D. (2022c). Initial access for millimeter-wave and terahertz communications with hybrid beamforming. In Proceedings of 2022 IEEE International Communications Conference (ICC), Seoul, South Korea.
13. Jiang, W., & Schotten, H. D. (2022d). Initial beamforming for millimeter-wave and terahertz communications in 6G mobile systems. In IEEE Conference on Wireless Communications and Networking (WCNC), Austin, USA.
14. Jiang, W., & Schotten, H. (2023a). Orthogonal and non-orthogonal multiple access for intelligent reflection surface in 6G systems. In Proceedings of 2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Glasgow, Scotland, UK.
15. Jiang, W., & Schotten, H. (2023b). Performance impact of channel aging and phase noise on intelligent reflecting surface. IEEE Communications Letters, 27(1), 347–351.
16. М. Васильківський, Д. Нікітович, Н. Грабчак, і Н. Якубівська, «Оптимізація адаптивних радіосистем із використанням алгоритмів ШІ та МН», ВОТТІ, вип. 2, с. 112–124, Чер 2023. doi.org/10.31891/2219-9365-2023-74-15
17. Liu, A., Huang, Z., Li, M., Wan, Y., Li, W., Han, T. X., Liu, C., Du, R., Tan, D. K. P., Lu, J., et al. (2022). A survey on fundamental limits of integrated

sensing and communication. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 24(2), 994–1034.

18. Васильківський, М., Болдирева, О., Варгатюк, Г., & Будащ, М. (2023). Оптимальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G. *Вісник Хмельницького національного університету, Технічні науки*. – 2023. – № 2. (319). – С. 48–55. doi: 10.31891/2307-5732-2023-319-1-48-55

19. Yan, L., Chen, Y., Han, C., & Yuan, J. (2022). Joint inter-path and intra-path multiplexing for terahertz widely-spaced multi-subarray hybrid beamforming systems. *IEEE Transactions on Communications*, 70(2), 1391–1406.

20. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.

21. Тарифи на електроенергію [2024] Тарифи на світло в Україні

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА
ІНФОРМАЦІЙНО-ОРІЄНТОВАНІ БЕЗПРОВІДНІ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ

назва магістерської кваліфікаційної роботи

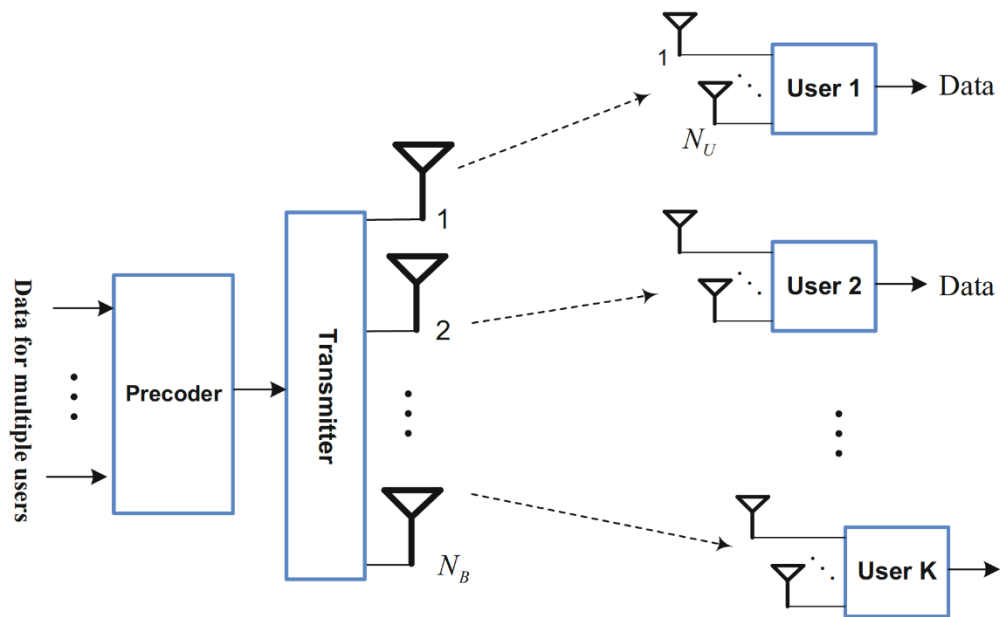


Рисунок 1 – Структурна схема бездротової системи MU-MIMO

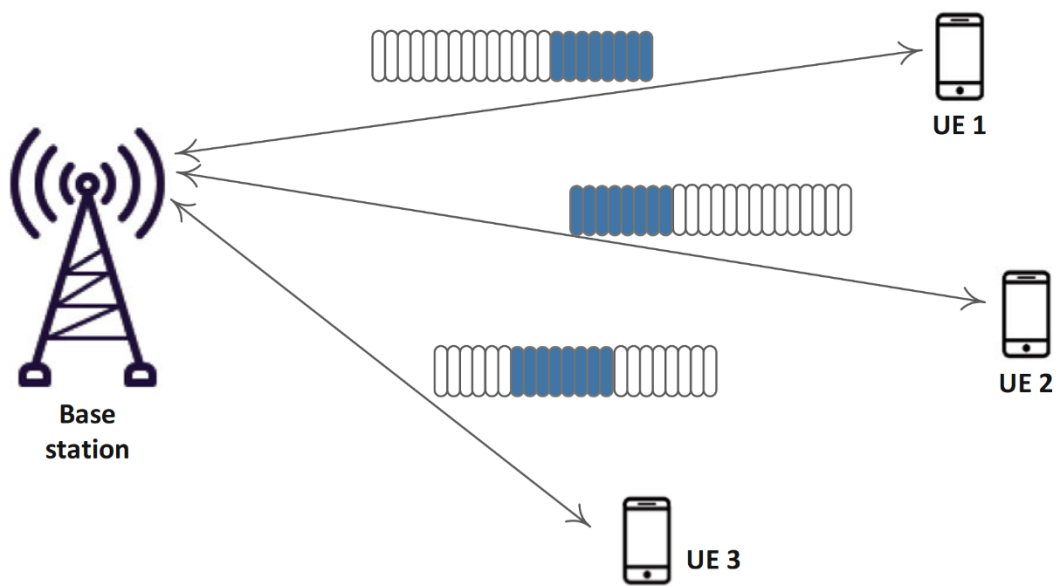


Рисунок 2 – Структура бездротової системи на основі OFDMA

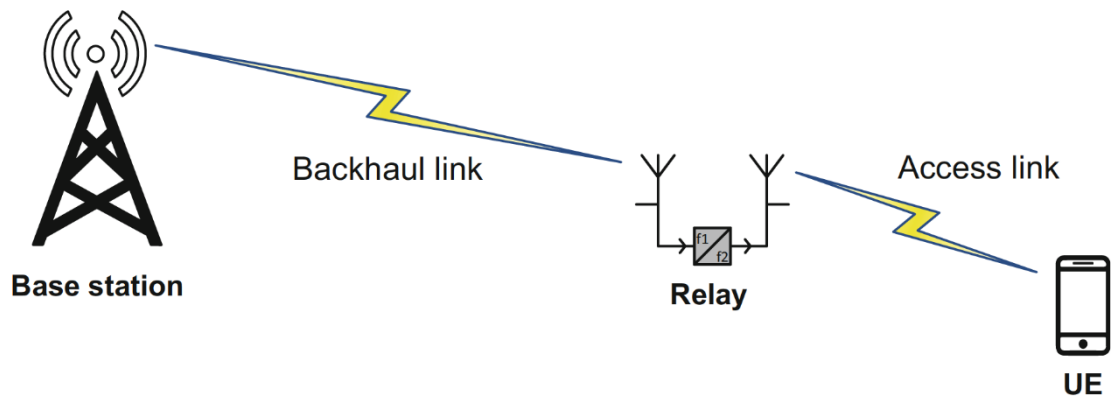


Рисунок 3 – Транзитні канали та канали доступу в архітектурі на основі ретрансляції

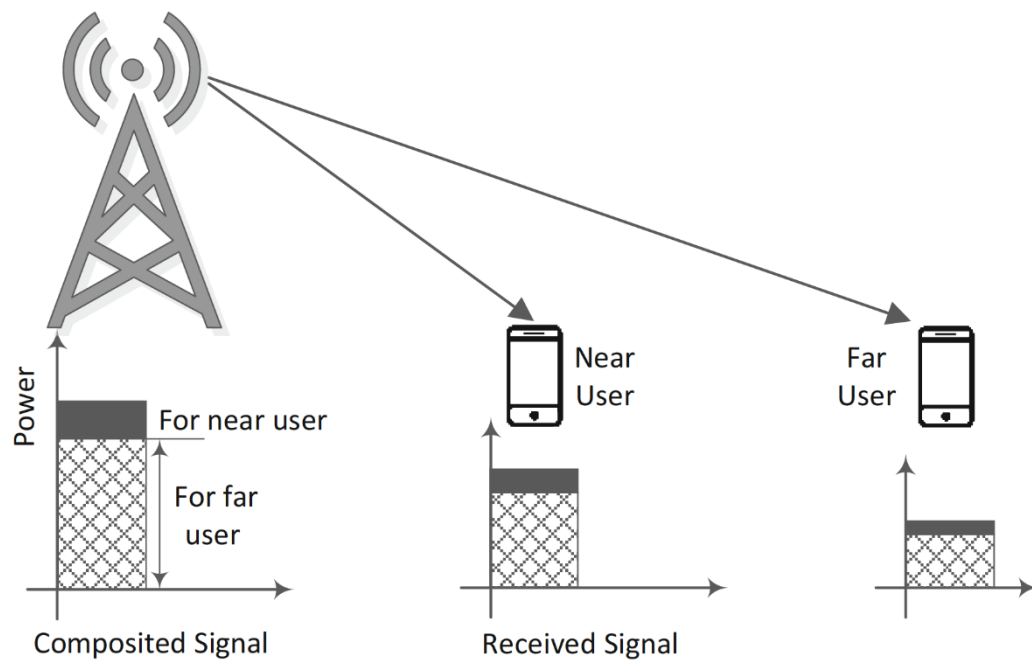


Рисунок 4 – Схема роботи низхідної лінії зв'язку NOMA

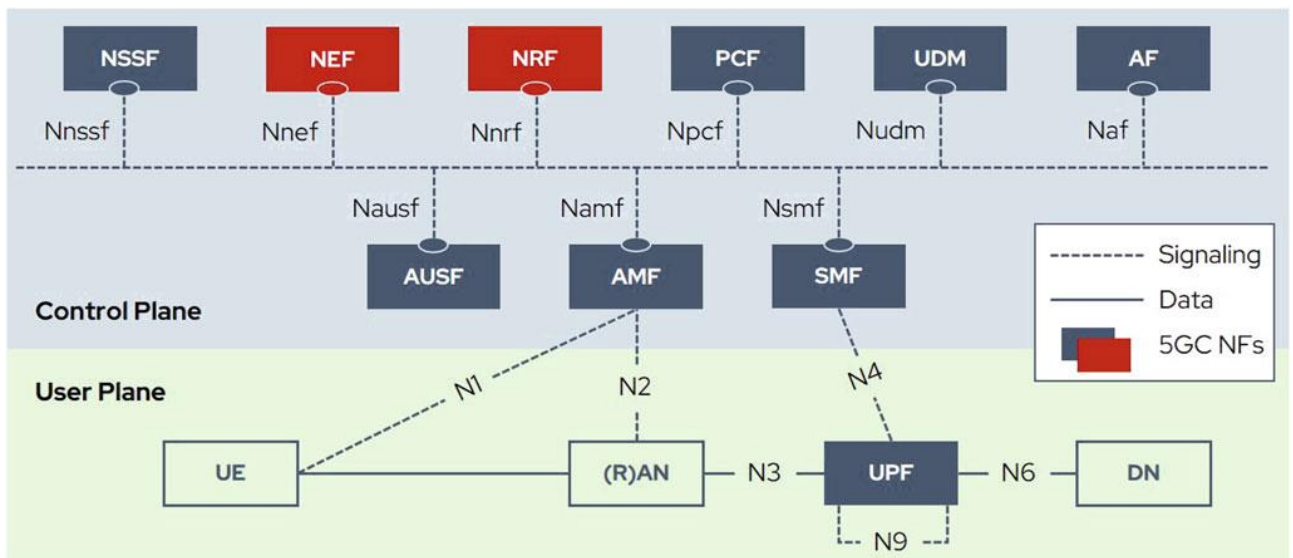


Рисунок 5 – Архітектура системи 5G

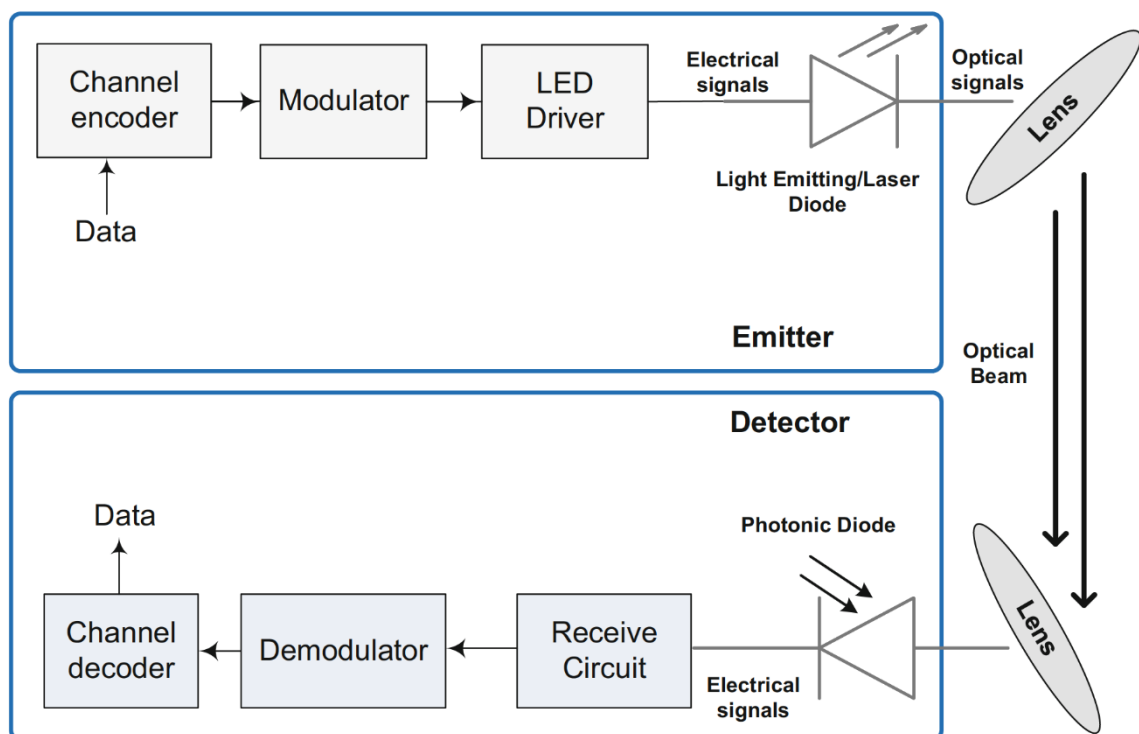


Рисунок 6 – Структурна схема оптичної бездротової системи зв'язку

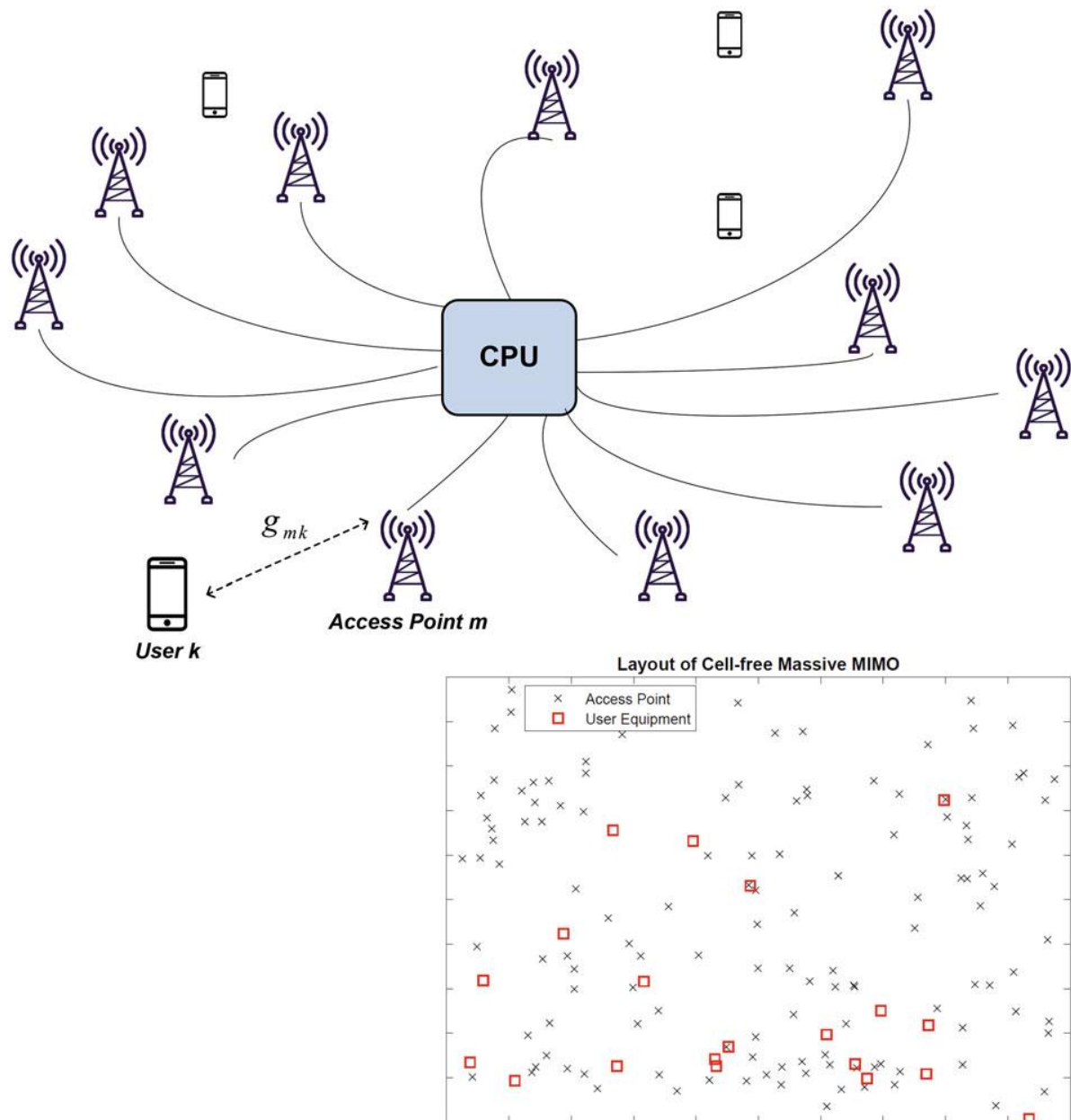


Рисунок 7 – Безстільникова масивна система MIMO

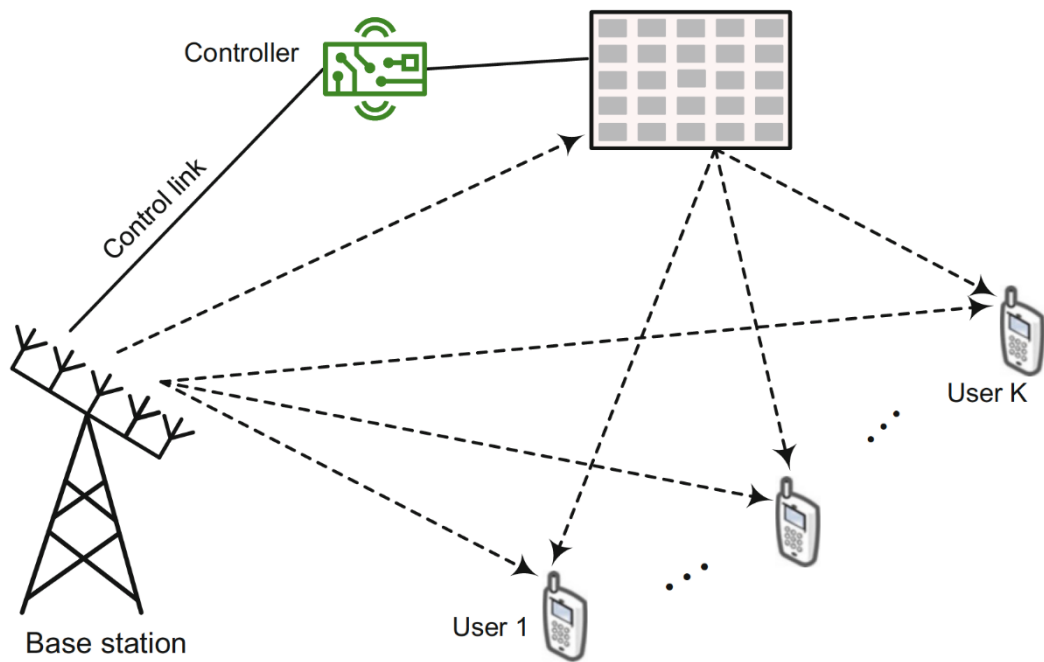


Рисунок 8 – Системи бездротового зв'язку із використанням IRS

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Інформаційно-орієнтовані безпроводні мережі зв'язку

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС

Керівник Васильківський М.В., к.т.н., доцент

Показники звіту подібності

Turnitin

Оригінальність

98 %

Загальна схожість

2 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

- Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання.
- ☐ Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Заявляю, що ознайомлений (-на) з повним звітом подібності, який був згенерований Системою щодо роботи (додається)

Автор

(підпис)

Козяр С. О.

(прізвище, ініціали)

Опис прийнятого рішення

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Васильківський М.В.

(прізвище, ініціали)

Експерт

(за потреби) (підпис)

(прізвище, ініціали, посада)