

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій  
(повна назва)

Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Аналіз напрямків удосконалення технологій бездротового  
абонентського доступу  
(тема)

Виконав:

Студент групи ІМІМ-22-1  
Кислий Д.С.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 172 «Телекомунікації  
та радіотехніка»  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-наукова  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Інформаційно-мережна інженерія»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Омельченко А.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Безрук В.М.  
(прізвище, ініціали)

Не містить відомостей заборонених до відкритого публікування.

Студент

*/ Кислий Д.С /*

Керівник

*/ Омельченко А.В. /*

Харківський національний університет радіоелектроніки

(повна назва вищого навчального закладу)

Факультет Інфокомунікацій  
Кафедра Інформаційно-мережної інженерії  
Освітній рівень другий (магістерський)  
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка  
Тип програми освітня  
Освітня програма Інформаційно-мережна інженерія  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІМІ

проф. Безрук В.М.

“ 24 ” 10 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студенту Кислому Дмитру Сергійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Аналіз напрямків удосконалення технологій бездротового абонентського доступу

затверджена наказом університету від «23» 10 2023 р. №1233Ст    .

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 30.11. 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи Об'єкт дослідження – технології бездротового абонентського доступу з високою спектральною ефективністю.

Виконати аналіз особливостей та відмінностей технологій Wi-Fi, WiMAX та LTE  
Проаналізувати особливості застосування технології OFDM та методи зменшення PAPR стосовно OFDM. Проаналізувати залежності пропускних спроможностей від SNR для систем MIMO

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

Вступ

1. Огляд і класифікація мереж радіодоступу

2. Аналіз технологій бездротового доступу

3. Аналіз телекомунікаційної технології OFDM

4. Аналіз ефективності технології MIMO

Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Слайди презентації (назва, мета і актуальність кваліфікаційної роботи, розвиток технології стільникового зв'язку, характеристики основних стандартів, застосування технології OFDM, зменшення PARP при застосуванні OFDM, технологія MIMO, дослідження пропускної здатності MIMO-каналів, висновки)

---

---

---

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ	24.10.23	Виконано
2	Підбір літератури за темою роботи	24.10-27.10	Виконано
3	Виконання розділу 1	28.10-3.11	Виконано
4	Виконання розділу 2	4.11-10.11	Виконано
5	Виконання розділу 3	11.11-16.11	Виконано
6	Виконання розділу 4	17.11-20.11	Виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	10.11-23.11	Виконано
9	Оформлення презентаційного матеріалу, підготовка до захисту у ЕК	24.11-30.11.23	Виконано

Дата видачі завдання 24.10.2023 р.

Студент \_\_\_\_\_ (Кислий Д.С.)  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ (доц. Омельченко А.В.)  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 51 сторінки, 16 рисунків, 3 таблиці, 17 джерел.

Об'єкт дослідження – технології бездротового абонентського доступу з високою спектральною ефективністю.

Мета кваліфікаційної роботи – аналіз напрямків удосконалення технологій бездротового абонентського доступу

Кваліфікаційна робота "Аналіз напрямків удосконалення технологій бездротового абонентського доступу" присвячена глибокому вивченню та системному аналізу сучасних технологій бездротового зв'язку для кінцевих користувачів. Дослідження охоплює різноманітні аспекти, починаючи від використання технології МІМО та високочастотних діапазонів, і завершуючи аналізом перспектив розвитку стандарту 5G.

У роботі розглядаються ключові вдосконалення в області пропускної здатності, надійності та енергоефективності мереж бездротового абонентського доступу. Аналізуються технології МІМО як один із важливих елементів оптимізації, а також вивчається вплив гібридних архітектур та розширення частотного спектру на якість обслуговування та продуктивність мереж.

Дослідження вказує на ключові тенденції в розвитку бездротових технологій, спрямовані на високоефективний обмін даними та забезпечення високоякісного зв'язку для кінцевих користувачів. Здобуті результати можуть слугувати основою для подальших наукових досліджень та реалізації нових стандартів в галузі бездротового зв'язку.

БЕЗДРОТОВЕ З'ЄДНАННЯ, БЕЗДРОТОВИЙ ЗВ'ЯЗОК, WI-FI, МІМО, 5G, 4G, LTE.

## ABSTRACT

Explanatory Note: 51 pages, 16 figures, 3 table, 17 sources.

The object of the research is wireless subscriber access technologies with high spectral efficiency.

The aim of the certification work is to analyze the directions for improving wireless subscriber access technologies.

The diploma thesis "Analysis of Directions for Improving Wireless Subscriber Access Technologies" is devoted to an in-depth study and systematic analysis of modern wireless communication technologies for end-users. The research covers various aspects, starting from the use of MIMO technology and high-frequency ranges, and concluding with an analysis of the prospects for the development of the 5G standard.

The work discusses key improvements in the area of throughput, reliability, and energy efficiency of wireless subscriber access networks. Technologies such as MIMO are analyzed as essential elements of optimization, and the impact of hybrid architectures and frequency spectrum expansion on service quality and network performance is examined.

The research points out key trends in the development of wireless technologies aimed at efficient data exchange and ensuring high-quality communication for end-users. The obtained results can serve as a foundation for further scientific research and the implementation of new standards in the field of wireless communication.

WIRELESS CONNECTION, WIRELESS COMMUNICATION, WI-FI, MIMO, 5G, 4G, LTE

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП.....	10
1 ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ.....	11
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ.....	14
2.1 Основні стандарти Wi-Fi.....	14
2.2 Стандарт WiMAX .....	17
2.3 Технологія Long Term Evolution.....	19
3 АНАЛІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ OFDM.....	22
3.1 Структура та параметри OFDM-сигналу.....	23
3.2 Формування сигналу в нижньому каналі LTE.....	24
3.3 Формування сигналу у вихідному каналі LTE.....	28
3.4 Переваги OFDM-модуляції у земних передачах радіосигналів.....	29
3.5 Аналіз методів зменшення PAPR у технології OFDM.....	29
3.6 Означення PAPR.....	30
3.7 Функція розподілу ймовірностей PAPR.....	31
3.8 Вивчення методів зменшення PAPR.....	32
3.9 Методи кодування.....	33
4 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ MIMO.....	34
4.1. Передумови виникнення.....	34
4.2 Застосування технології MIMO.....	34
4.3 Дослідження інформаційної ефективності технології MIMO.....	36
4.4. Переваги MIMO.....	39
ВИСНОВОК.....	41
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	42
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ.....	44

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

MIMO-  
(Multiple Input Multiple Output) багатоканальний  
вхідбагатоканальний вихід;

OFDM – (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing)

Wi-Fi - це технологія бездротового зв'язку, яка дозволяє пристроям  
обмінюватися даними через радіохвилі.

5G - це п'яте покоління мобільних зв'язкових технологій.

4G - це четверте покоління мобільних зв'язкових технологій.

WiMax (Worldwide Interoperability for Microwave Access) - це технологія  
бездротового зв'язку, яка використовує радіохвилі для передачі даних на  
великі відстані.

Peak-to-Average Power Ratio (PAPR) - відношення пікової потужності  
коливань до середньої.

3GPP – 3rd Generation Partnership Project;

CP – Cyclic Prefix;

ICIC – Inter Cell Interference;

FDMA – Frequency Division Multiple Access;

FSS – Frequency Selective Scheduling;

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers;

HSPA – High Speed Packet Access;

LLC – Logical Link Control;

MAC – Media Access Control;

MAN – Metropolitan Area Network;

MCS – Modulation and Coding Scheme;

OFDMA – Orthogonal Frequency Multiple Access;

PAPR – Peak-to-average power ratio;

QoS – Quality of Service;

SISO – Single Input – Single Output;

SC-FDMA – Single-Carrier Frequency Division Multiple Access;

TDMA – Time Division Multiple Access;

WAN – Wide Area Network;

WLAN – Wireless Local Area Network;

WLL – Wireless Local Loop;

WMAN – Wireless Metropolitan Area Network;

UE – User Equipment.

## ВСТУП

На сьогоднішній день бездротові технології є однією з найшвидше розвиваючих галузей інфокомунікаційних технологій, особливо важливих у сфері бізнесу та ІТ. Користувачі, які мають бездротовий доступ, можуть працювати більш продуктивно порівняно з колегами, які обмежені дротяними комп'ютерними мережами, оскільки зростає значення мобільності користувачів.

Наразі технологія бездротових мереж Wi-Fi визнана найзручнішою в тих випадках, коли необхідна мобільність користувачів та простота встановлення обладнання. Wi-Fi (від англ. Wireless fidelity - бездротовий зв'язок) - це стандарт широкосмугового бездротового зв'язку, який належить до сімейства 802.11 [1]. Ця технологія Wi-Fi використовується для організації бездротових локальних комп'ютерних мереж і створення точок доступу hot-spot для надання високошвидкісного інтернет-доступу.

Бездротові мережі мають численні переваги порівняно з традиційними дротовими мережами, такими як простота будівництва, гнучкість архітектури з можливістю динамічної зміни топології мережі, безперешкодний перехід мобільних користувачів між точками доступу без значних затримок, швидкість планування та будівництва, що важливо за високих вимог до характеристик мережі. Крім того, бездротові мережі потребують значно менше кабелів.

Проте сучасні бездротові мережі все ще мають серйозні недоліки, такі як залежність швидкості передачі даних та радіусу дії від наявності перешкод між приймачем і передавачем. Для підвищення ефективності та зони покриття бездротової мережі використовується розподілена мережа бездротового доступу, відома як самоорганізуючі мережі AD-HOC.

## 1. ОГЛЯД І КЛАСИФІКАЦІЯ МЕРЕЖ РАДІОДОСТУПУ

У перший час термін "бездротовий" в телекомунікаціях широко застосовувався для опису різних систем радіозв'язку, що передавали інформацію через радіоканали. Поступово цей термін став використовуватися як альтернатива "радіо" або "радіочастота". На сьогодні ці терміни розглядаються як взаємозамінні, особливо коли йдеться про діапазон частот від 3 кГц до 300 ГГц. Проте "радіо" частіше застосовується для опису традиційних технологій, таких як радіомовлення, супутниковий зв'язок, радіолокація та інші. У той час як термін "бездротовий" використовується для новіших технологій, таких як мікростільникова і стільникова телефонія, пейджинг, абонентський доступ тощо[1].

Існують три основних типи бездротових мереж залежно від територіальних характеристик: WWAN (бездротова широкомасштабна мережа), WLAN (бездротова локальна мережа) і WPAN (бездротова персональна мережа)[1].

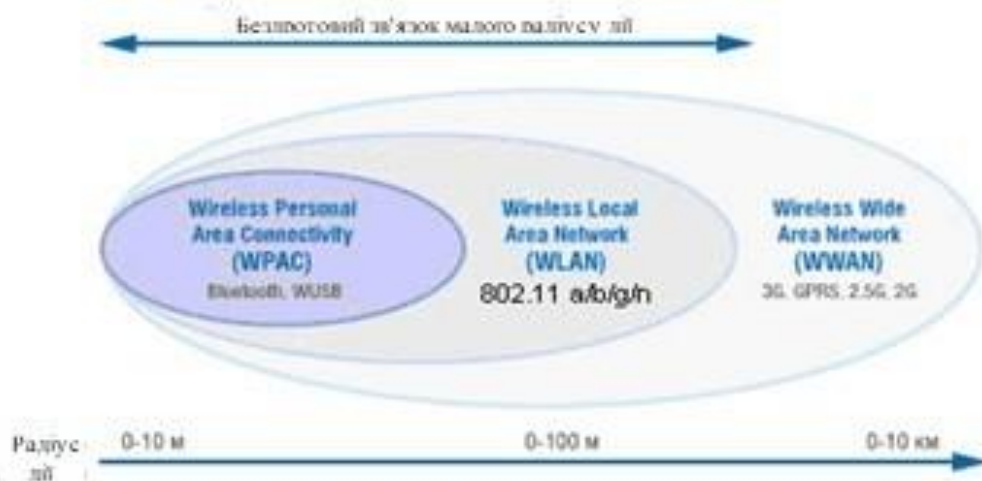


Рисунок 1.1 – Класифікація бездротових мереж за радіусом дії

Основна відмінність між різними бездротовими технологіями, як зазначено на рис. 1.2, полягає в діапазоні робочих частот та характеристиках радіо-інтерфейсу. Мережі WLAN та WPAN операційно

працюють у вільних неліцензійних діапазонах частот 2,4 та 5 ГГц. Це означає, що при їхньому впровадженні не потрібно здійснювати координацію частотного діапазону з іншими радіомережами, які можуть функціонувати в тому ж самому діапазоні. З іншого боку, мережі BWA (Broadband Wireless Access) операційно працюють як у ліцензійних, так і в неліцензійних діапазонах (від 2 до 66 ГГц) одночасно[3].

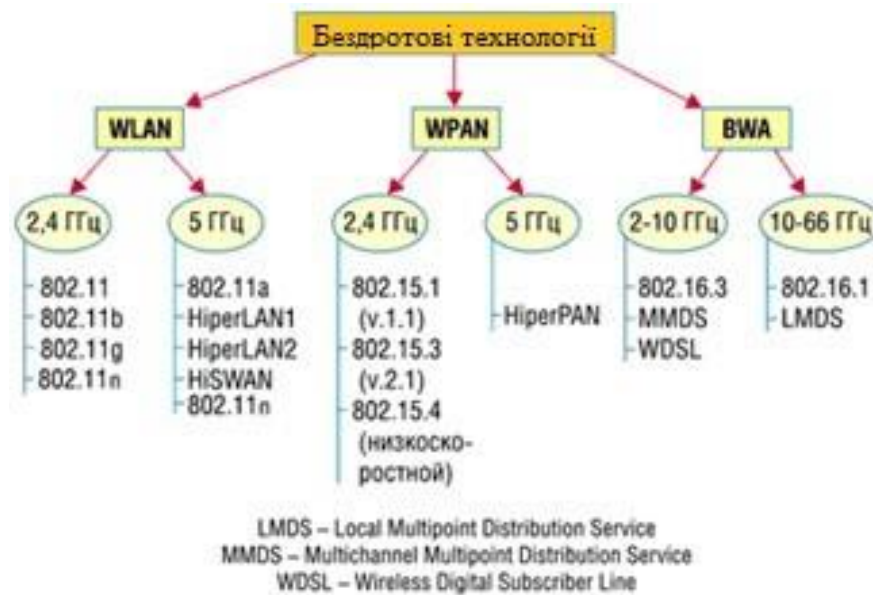


Рисунок 1.2 - Класифікація бездротових технологій

Основна роль бездротових локальних мереж (WLAN) полягає в організації доступу абонентів до інформаційних ресурсів на обмеженій території. Також, до функцій WLAN відноситься встановлення комерційних точок доступу у громадських місцях, таких як готелі, аеропорти, кафе, торговельні комплекси та інші.

Бездротові локальні мережі базуються на стандартах сімейства IEEE 802.11. Ці мережі часто відомі як Wi-Fi (Wireless Fidelity), і хоча термін Wi-Fi не чітко визначений у стандартах, в світі цей бренд отримав найширше визнання.

Мережі радіодоступу включають в себе різноманітні складові, такі як базові станції, антени, приймачі та передавачі. Вони дозволяють передавати

бездротові сигнали між різними пристроями та точками доступу.

Мережі радіодоступу можна класифікувати за зонами покриття на великі та малі. Великі зони покриття часто характеризуються високою потужністю та далекосяжністю, що робить їх ефективними для обслуговування широких територій. Малі зони покриття, навпаки, призначені для надання високошвидкісного доступу на обмежених територіях, таких як офіси або кафе.

Мережі радіодоступу також можна класифікувати за використовуваною технологією передачі даних. Наприклад, технології, такі як Wi-Fi, Bluetooth, та LTE, представляють різні стандарти та протоколи для бездротового зв'язку.

В залежності від призначення, мережі радіодоступу можуть бути спрямовані на задоволення конкретних потреб. Наприклад, мережі для мобільного зв'язку можуть бути оптимізовані для передачі голосу, тоді як мережі для бездротового Інтернету можуть фокусуватися на високій швидкості передачі даних.

Усі ці аспекти важливі для розуміння різноманітності та ефективного використання мереж радіодоступу в сучасному світі бездротових технологій[2].

## 2. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗДРОТОВОГО ДОСТУПУ

### 2.1 Основні стандарти Wi-Fi

На сьогоднішній день широко використовується переважно три стандарти технології IEEE 802.11 (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Основні параметри стандартів групи IEEE 802.11

Стандарт	802.11g	802.11a	802.11n
Частотний діапазон, ГГц	2,4-2,483	5,15-5,25	2,4 або 5,0
Метод передачі	DSSS,OFDM	DSSS,OFDM	MIMO
Швидкість, Мбіт/с	1-54	6-54	6-300
Сумісність	802.11 b/n	802.11 n	802.11 a/b/g
Метод модуляції	BPSK, QPSK OFDM	BPSK, QPSK OFDM	BPSK, 64-QAM
Дальність зв'язку в приміщенні, м	20-50	10-20	50-100
Дальність зв'язку поза приміщенням, м	250	150	500

Стандарт IEEE 802.11g, прийнятий у 2003 році, представляє собою логічний етап у розвитку стандарту 802.11b, і його особливість полягає у передачі даних у тому ж самому частотному діапазоні, але з вищими швидкостями. Крім того, стандарт 802.11g є повністю сумісним з 802.11b, що означає, що будь-який пристрій 802.11g може взаємодіяти з пристроями 802.11b. Максимальна швидкість передачі даних в стандарті 802.11g становить 54 Мбіт/с [2].

Стандарт IEEE 802.11a передбачає швидкість передачі даних до 54 Мбіт/с. На відміну від базового стандарту 802.11, специфікація 802.11a передбачає роботу в новому частотному діапазоні 5 ГГц. Для методу модуляції сигналу обрано ортогональне частотне мультиплексування (OFDM), що гарантує високу стійкість зв'язку в умовах множинного поширення сигналу [1].

Щодо техніки модуляції, протокол 802.11a схожий на 802.11g. На низьких швидкостях передачі для модуляції піднесучих частот використовуються двійкова BPSK і квадратурна фазова модуляція QPSK. У BPSK, один інформаційний біт кодується в одному символі, а при QPSK-модуляції в одному символі кодуються два інформаційних біти. Модуляція BPSK використовується для передачі даних на швидкостях 6 і 9 Мбіт/с, а QPSK - на швидкостях 12 і 18 Мбіт/с.

Для передачі вищих швидкостей у стандарті 802.11a використовуються квадратурні амплітудні модуляції 16-QAM і 64-QAM. У першому випадку використовується 16 станів сигналу, які можна використовувати для кодування 4 біт в одному символі, а в другому - 64 стани сигналів, що дозволяє кодувати послідовність з 6 біт одним символом.

Модуляція 16-QAM використовується на швидкостях 24 і 36 Мбіт/с, тоді як 64-QAM використовується на швидкостях 48 і 54 Мбіт/с.

Стандарт IEEE 802.11n був схвалений 11 вересня 2009 року, і його швидкість передачі даних можна порівняти з провідними стандартами. Максимальна швидкість передачі в стандарті 802.11n приблизно в 5 разів перевищує продуктивність класичного Wi-Fi [4]. Збільшення швидкості передачі в стандарті IEEE 802.11n було досягнуто шляхом подвоєння ширини каналу з 20 до 40 МГц та використання технології MIMO.

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) передбачає одночасне використання декількох передавальних і приймальних антен (рис. 1.3). Попередні стандарти використовували системи з однією передавальною і однією приймаючою антеною - SISO (Single Input Single Output). Стандарт IEEE 802.11n використовує одночасно технології OFDM і MIMO. В ньому є елементи, запозичені зі стандарту 802.11a, але 802.11n передбачає роботу на

двох частотних діапазонах: або 5, або 2,4 ГГц [4].

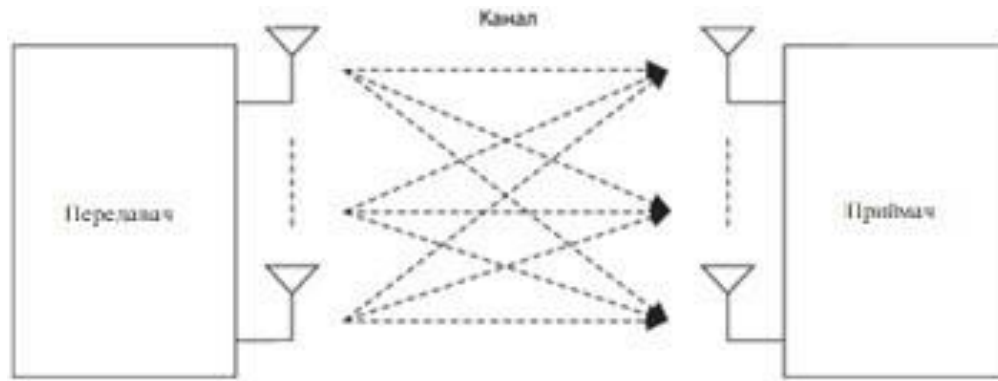


Рисунок 1.3 - Принцип реалізації технології MIMO

Вся передавальна послідовність розбивається на паралельні потоки, з яких приймач відновлює вихідний сигнал. Цей процес включає складні аспекти, оскільки кожна антена отримує суперпозицію сигналів, які потрібно відокремлювати. На приймачі застосовується спеціальний алгоритм просторового виявлення сигналу, який розділяє ці сигнали. Проте використання технології MIMO має свої недоліки, такі як складність та громіздкість системи, високе споживання енергії та вартість. Для забезпечення сумісності із станціями попередніх стандартів передбачено три режими роботи: успадкований, змішаний і режим зеленого поля.

У успадкованому режимі передача пакетів відбувається між двома станціями, які мають по одній антені. Змішаний режим дозволяє обмін пакетами як між системами MIMO, так і між звичайними станціями. Режим зеленого поля використовує всі переваги технології MIMO та дозволяє передачу між багатоантенними станціями при наявності успадкованих приймачів.

Кожен режим має свою структуру преамбули, яка містить інформацію про довжину пакета, тип модуляції, метод кодування та інші параметри. Ці преамбули допомагають у вирішенні конфліктів та забезпечують ефективне використання каналу[4].



Рисунок 1.4 – Схема організації доступу Wi-Fi

## 2.2 Стандарт WiMAX

WiMAX є технологією бездротового широкосмугового доступу, що ґрунтується на протоколі Інтернету. Завдяки великому охопленню та високій якості обслуговування, вона конкурує з Wi-Fi (802.11). Повна назва WiMAX вказує на "Worldwide Interoperability for Microwave Access". Інший термін для цієї технології - IEEE 802.16, що подібно до WiMAX, розроблено для бездротових MAN (мереж міських районів)[3].

Навіть призначений для міських мереж, WiMAX може охоплювати до 8000 квадратних кілометрів, надаючи бездротовий доступ віддаленим сільським районам. Здатна забезпечувати широкосмуговий бездротовий доступ (BWA) на відстані до 50 км для стаціонарних станцій і 5–15 км для мобільних станцій. Різні версії мають відповідні описи та швидкості передачі даних.

Система WiMAX складається з вежі WiMAX, що може охоплювати велику територію, і абонентських станцій WiMAX, які дають абонентам

доступ до мережі. Перша версія стандарту, яка утворила основу WiMAX (IEEE 802.16), оперує в діапазоні від 10 до 66 ГГц та використовує дві різні технології на фізичному рівні: модуляція однієї несучої частоти (SC) та OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Стандарт OFDM був впроваджений у 2004 році з появою стандарту WiMAX 802.16-2004, який усунув міжсимвольні завади. Пізніше, в наступних версіях, параметри OFDM були значно змінені, включаючи перехід до масштабованого OFDM (SOFDM) та виділення підканалів для абонентів (SOFDMA). Оновлений стандарт 802.16e, відомий як мобільний WiMAX, став базовим для діючих мереж WiMAX. У 2011 році затверджено новий варіант - 802.16m, спрямований на побудову мереж з високою пропускнуою здатністю та новими послугами.

Таблиця 2.1 – Етапи вдосконалення стандарту WiMAX

Стандарт	Принято	Смуги частот, ГГц	Мобільність	Технології	Ширина каналу, МГц
802.16	12.2001	11 - 66	нема	Одна несуча (SC)	20, 25, 28
802.16-2004	06.2004	2 - 11	нема	SC або OFDM (256)[1]	1,75; 3,5; 7; 14; 1,25; 5; 10; 15; 8,75
802.16e	12.2005	11 - 66 2 - 11 (фіикс.) 2 - 6 (моб.)	є	SC або OFDM (256), або SOFDM (128, 512, 1024, 2048)	1,25; 5; 10; 20
802.16k	2007	11 - 66 2 - 11 (моб.)	є	SC або OFDM (256), або SOFDM (128, 512, 1024, 2048)	1,25; 5; 10; 20
802.16-2009	2009	Ті ж	є	Ті ж + 802.16i	Та ж
802.16j	2009	Ті ж	є	Ті ж + ретрансляція	Та ж
802.16m	2011	Нижче 3,6	є	SOFDMA	1– 20

Стандарт 802.16 передбачає використання технології MIMO в WiMAX для поліпшення діапазону та швидкості передачі даних, а також для значного підвищення спектральної ефективності.

У конфігурації MIMO, визначеній стандартом 802.16, динамічно узгоджується між кожною базовою станцією та мобільною станцією. Специфікація 802.16 дозволяє підтримувати комбінацію мобільних станцій з різними можливостями MIMO, що допомагає максимізувати пропускну здатність сектора за рахунок використання різноманітних можливостей різних мобільних станцій[3].

Специфікація 802.16 також підтримує техніку рознесення передачі з кількома входами та одним виходом (MISO), відому як просторово-часовий код (STC). Цей метод використовує дві або більше антени на передавачі та одну антену на приймачі. Використання кількох приймальних антен (MIMO) допомагає покращити прийом сигналів, що передаються STC.

Специфікація 802.16 також підтримує техніку MIMO просторового мультиплексування (SMX), відому як швидкість рознесення передачі. Цей метод одночасно передає два біти даних від двох різних антен на символ.

Наразі технологія MIMO використовується кінцевими користувачами досить рідко, застосовується для з'єднання Wi-Fi точок, надає широкосмуговий доступ до мережі та забезпечує транспортування даних на високих швидкостях - до 1 Гбіт/секунду на одну комірку даних[4].

### 2.3 Технологія Long Term Evolution

Подальшим розвитком технологій у сфері мобільного зв'язку є впровадження стандартів четвертого покоління, спрямованих на забезпечення ще більших швидкостей передачі даних та покращення якості обслуговування користувачів при одночасному зниженні експлуатаційних вимог до телекомунікаційного обладнання. Однією з ключових технологій для вирішення викликів у сучасних телекомунікаціях є технологія Long Term

Evolution (LTE), яка утворила основу для розвитку LTE-мереж.

LTE є новим радіоінтерфейсом 3GPP для бездротового доступу, спроможним підтримувати відеосервіси. Виникши в результаті еволюції універсальної телекомунікаційної системи (UMTS) у напрямку мереж, що повністю ґрунтуються на IP-протоколі, він забезпечує збільшення пропускної здатності, ефективне використання спектра, поліпшення характеристик на межі стільника та зменшення затримок у передачі інформації. Розвиток LTE відображений у щорічних релізах 3GPP.

Проект партнерства третього покоління (3GPP) – це загальний термін для ряду організацій зі стандартизації, що розробляють протоколи для мобільних телекомунікацій. Специфікація для Long Term Evolution (LTE) була випущена у рамках випуску 8 3GPP, розпочавши роботу в 2004 році і завершивши в 2009 році, а перше розгортання відбулося в 2010 році. LTE підтримує як FDD (дуплекс з частотним розподілом), так і TDD (часовий розподіл) мультиплексування. Основною перевагою LTE є висока пропускна здатність при низьких затримках, що наразі становить 120 Мбіт/с, залежно від умов мережі[4].

LTE-Advanced, визначено у 3GPP Rel-10, впроваджено в червні 2011 року. Він відповідає вимогам IMT-Advanced і вважається технологією 4G. Основними нововведеннями LTE-Advanced є агрегація несучих, розширене використання кількох антен та підтримка релейних вузлів.

LTE-A Pro, узгоджено у жовтні 2015 року, є маркером для розвитку 5G після LTE-Advanced. Прийнятий у березні 2016 року, LTE-A Pro відзначає значні покращення щодо LTE-Advanced і визначає новий етап розвитку технології. Основні характеристики LTE, LTE-Advanced та LTE-A Pro наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Основні характеристики технологій LTE, LTE-A та LTE-A Pro

	LTE	LTE-A	LTE-A Pro
3GPP Release	Rel.8~9	Rel.10~12	Rel.13 and Beyond
LTE Category	CAT1~5	CAT6~16	CAT17~19
Max Download	150Mbps	1Gbps	3Gbps
Carrier Aggregation	0	Up to 5	Up to 32,LAA,LWA
Carrier Bandwidth	10MHz	100MHz	640MHz
Latency	100ms	10ms	2ms
MIMO(Max)	2	8	32
QAM	64	64	256

Отже, Long Term Evolution (LTE) Advanced Pro є однією з останніх технологій LTE-мереж, спрямованою на досягнення максимальної пропускної здатності та надання високих бітрейтів і пікових швидкостей передачі даних, таких як UL 1,5 Гбіт/с і DL 3 Гбіт/с. Вона використовує покращені функції, такі як DL 2X2 MIMO та агрегація несучих (CA), для покращення продуктивності периферійних комірок[6].

Прогнозується, що ринок LTE Advanced Pro буде зростати зі зведеним щорічним темпом зростання 8,75% протягом прогнозованого періоду до 2028 року. Звіт Data Bridge Market Research щодо LTE Advanced Pro надає аналіз та розуміння різних факторів, які очікується, що будуть визначати його зростання протягом прогнозованого періоду та впливатимуть на ринок.

### 3 АНАЛІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ OFDM

Мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM) - це метод передачі, в якому використовується велика кількість близько розташованих несучих, які модулюються даними з низькою швидкістю. Зазвичай ці сигнали можуть перешкоджати один одному, але, зробивши їх ортогональними один одному, взаємних перешкод немає. Передавані дані розподіляються по всіх несучих для забезпечення стійкості до впливу селективного впадіння сигналу внаслідок розсіювання світла. Фактична реалізація технології буде відрізнятися для напрямку знизу вгору (тобто від базової станції до мобільної станції) і напрямку зверху вниз (тобто від мобільної до базової станції) через різні вимоги між цими напрямками та обладнанням на обох кінцях. Однак OFDM був обраний як формат сигналу через його високу стійкість до перешкод. Останнім часом також накопичено значний досвід використання його різних форм в трансляції, які використовують його разом із Wi-Fi та WiMAX. OFDM також є форматом модуляції, який дуже підходить для передачі великих швидкостей передачі даних - одного з ключових вимог для LTE. Крім того, OFDM може використовуватися як у форматах FDD, так і TDD. Це стає додатковою перевагою[4].

Одним з ключових елементів LTE є використання OFDM, технології мультиплексування з ортогональним частотним розділенням, як каналу передачі сигналів та пов'язаних схем доступу, таких як OFDMA (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів) і SC-FDMA (множинний доступ з одним частотним розділенням каналів).

Технологія OFDM використовується в ряді інших систем, таких як WLAN, WiMAX для технологій з великою пропускну здатністю, включаючи DVB і DAB. OFDM має безліч переваг, включаючи його стійкість до ефектів багатопроменевого замирання та перешкод. Крім того, не дивлячись на те, що це може здатися особливо складною формою модуляції, воно піддається

цифровій обробці сигналів. Завдяки своїм перевагам використання OFDM та пов'язаних із ним технологій доступу, таких як OFDMA і SC-FDMA, стає природним вибором для нового стандарту мобільного зв'язку LTE[6-8].

### 3.1 Структура та параметри OFDM-сигналу

На рисунку а відображені відрізки часу, протягом яких на модулятор одного з несучих надходять символи переданого підпотoku даних  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  і так далі (в залежності від використовуваного методу модуляції кількість біт в символі може бути різною). Перед початком передачі символу  $S_2$  формується захисний інтервал на рисунку б, протягом якого на вході демодулятора в приймачі ще можуть присутні бути відбиті сигнали, що містять попередній символ  $S_1$  (рисунок в). Далі протягом інтервалу часу  $T_{p2}$  передається символ  $S_2$ . Аналогічно формується захисний інтервал 2 перед символом  $S_3$  і так далі[8].

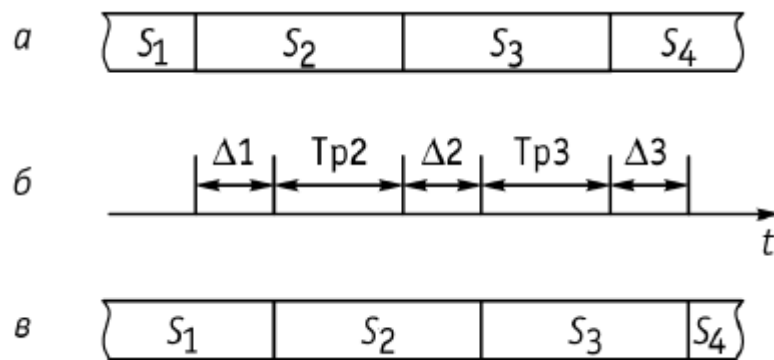


Рисунок 3.1 – Схема формування захисних інтервалів

У процесі модуляції загальну тривалість символу OFDM  $T_s$  збільшують, і частину її на початку символу відводять під захисний інтервал  $T_G$  (рисунок 3.10). Таким чином, корисна тривалість символу визначається відношенням  $T_U = T_S - T_G$ . При цьому структура і заповнення захисного інтервалу повинні зберігати ортогональність переданих несучих. Тому захисний інтервал - це не просто пауза між корисними символами, достатньою для вщухання сигналу

символу до початку наступного. В захисному інтервалі передається фрагмент корисного сигналу, що і гарантує збереження ортогональності несучих отриманого сигналу. Це забезпечується лише у випадку, якщо ехо-сигнал при багатопроменевому поширенні затриманий не більше тривалості захисного інтервалу[2].

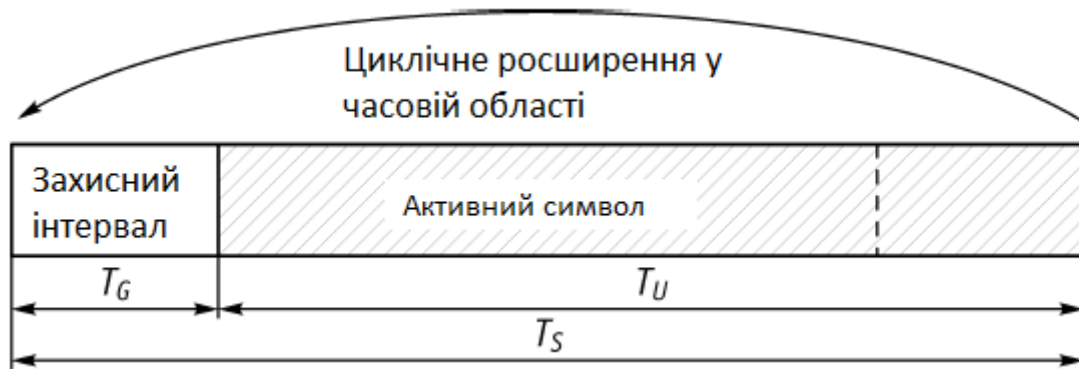


Рисунок 3.2 – Формування повного символу OFDM

Чим більше час затримки, тим більше повинна бути тривалість захисного інтервалу. З іншого боку, для забезпечення максимальної швидкості передаваного потоку даних захисний інтервал повинен бути якомога коротшим[8].

### 3.2 Формування сигналу в нижньому каналі LTE

В каналах зворотного та прямого напрямку LTE використовуються технології OFDM, застосовані з різними призначеннями. В прямому напрямку ця технологія використовується не лише для передачі сигналу, але також для реалізації техніки ортогонального частотного мультиплексування (OFDMA), що дозволяє мультиплексувати абонентські канали.

Формування сигналу в прямому напрямку включає стандартні етапи для систем цифрової передачі інформації (див. рис. 3.3). Це включає в себе процедури каналного кодування, скремблювання, формування модуляційних

символів, їх розподіл по антенним портам і ресурсним елементам, а також синтез OFDM-символів. Канальне кодування включає в себе вирахування контрольних сум (CRC-24) для блоків даних, які надходять з рівня MAC (Media Access Control). Потім блоки з контрольними сумами обробляються кодером із швидкістю кодування 1/3. У LTE передбачено використання або згорткового коду, або турбо-коду. Кодована послідовність після перемішування (інтерлівінгу) обробляється скремблером (для вхідної послідовності  $\{x(i)\}$  виконується процедура  $dscr(i) = x(i) + c(i)$ , де  $c(i)$  – визначена скремблююча послідовність). Далі формуються комплексні модуляційні символи (QPSK, 16- або 64-QAM), які розподіляються по ресурсним елементам. На завершальному етапі відбувається синтез OFDM-символів, і їх послідовність подається на модулятор, що формує вихідний ВЧ-сигнал у визначеному частотному діапазоні. На стороні прийому всі ці процедури виконуються в зворотньому порядку[7].

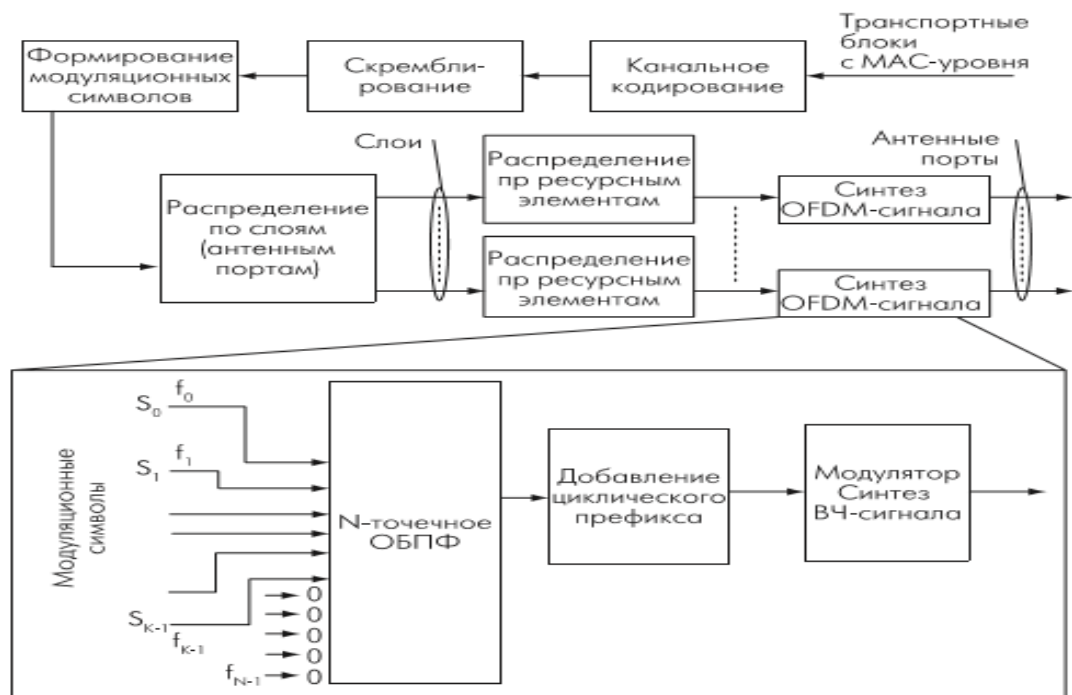


Рисунок 3.3 – Схема формування сигналу в понижувальному каналі

LTE-Advanced Pro eMBMS Rel-14 представляє собою одну з найновіших стандартизованих технологій LTE. У загальній блок-схемі передавача, яка зображена на рис. 3.4, можна передати один або два транспортних блоки (ТБ),

що містять дані. Кількість кодових слів безпосередньо пов'язана з ТВ і завжди однакова або менша за кількість рівнів і антенних портів.

Біти даних кодуються за допомогою комбінації виявлення помилок, виправлення помилок і узгодження швидкості. По-перше, до кожного ТВ додається послідовність бітів циклічної перевірки надмірності (CRC). Якщо розмір ТВ перевищує максимальний розмір кодового блоку (CB) у 6144 біти, вхідна послідовність даних сегментується, і до кожного CB додається додаткова послідовність CRC[2].

Вихідні біти для кожного CB потім кодуються за допомогою турбо-коду (TC) із кодуванням  $1/3$ . Після цього виконується узгодження швидкості, так що біти кожного CB чергуються, циклічно буферизуються та повторюються для забезпечення конкретного кодового розширення (CR), пов'язаного із схемою модуляції та кодуванням вхідного сигналу (MCS).

Згенеровані біти потім об'єднуються, скремблюються, розбиваються на групи бітів відповідно до порядку модуляції та відображаються на символи сузір'я. В eMBMS доступні сузір'я такі, як квадратурна фазова маніпуляція (QPSK), 16QAM, 64QAM і 256QAM. Комплекснозначні символи модуляції розташовуються в елементах ресурсів, доступних у відповідному підкадрі, і модулюються для передачі за допомогою сигналу мультиплексування з ортогональним частотним поділом (OFDM). Нарешті, циклічний префікс (CP) вставляється на початку кожного символу OFDM із певною тривалістю[5].

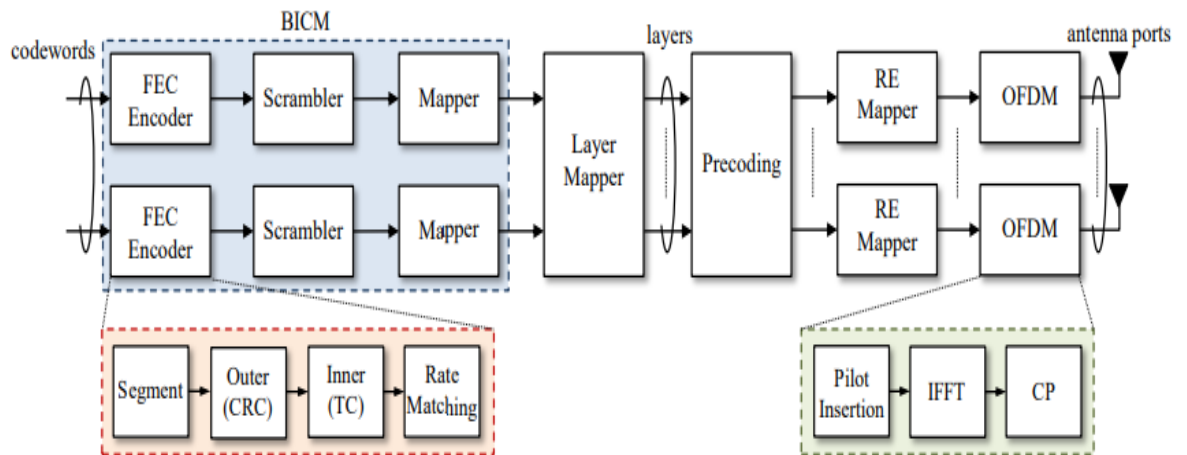


Рисунок 3.4 – Блок-схема передавача фізичного рівня LTE-Advanced Pro

Технологія LTE-Advanced Pro Rel-14 забезпечує різноманітні можливості розподілу ширини смуги, такі як 1,4, 3, 5, 10 і 20 МГц. Від Rel-13 воно також дозволяє максимальне агрегування несучих на рівні 32 несучих РЧ. Це означає, що максимальна загальна ширина смуги становить 640 МГц, хоча на даний момент комерційні мережі з такою шириною смуги ще не були розгорнуті. Фізичний рівень eMBMS має дві опції: передача здійснюється через одну комірку (SC-PTM) або через комірок, які синхронізовані за допомогою передачі SFN (MBSFN).

Single-Cell Point-to-Multipoint: Рішення SC-PTM спрямоване на поліпшення гнучкості розподілу ресурсів для розгортання PTM. Воно дозволяє одній комірці транслювати вміст для групи користувачів на спільному фізичному каналі для низхідної лінії зв'язку (PDSCH), який використовується для одноадресної передачі. Спільне використання фізичного каналу також передбачає використання однакового інтервалу несучої 15 кГц. SC-PTM може використовувати як звичайний CP (5,2 мкс перший символ і 4,7 мкс решта), так і розширений CP (16,7 мкс). Використання конфігурації з декількома входами та декількома виходами (MIMO) із до чотирьох антен передавача та приймача дозволяється в цьому випадку[8].

### 3.3 Формування сигналу у вихідному каналі LTE

На відміну від радіоінтерфейсу DL, де інформація одного користувача може передаватись через різні підключені, в UL дані кожного користувача передаються в одній смузі частоти, причому в один і той же час. Однак це не означає, що інформаційні потоки накладаються один на одного або спотворюються. Це досягається завдяки використанню множинного доступу з частотним розподілом із використанням єдиного неіснуючого частотного ресурсу SC-FDMA (множинний доступ із розподілом частоти із єдиною несучою). Розглянемо основні принципи роботи SC-FDMA – модулятора[6].

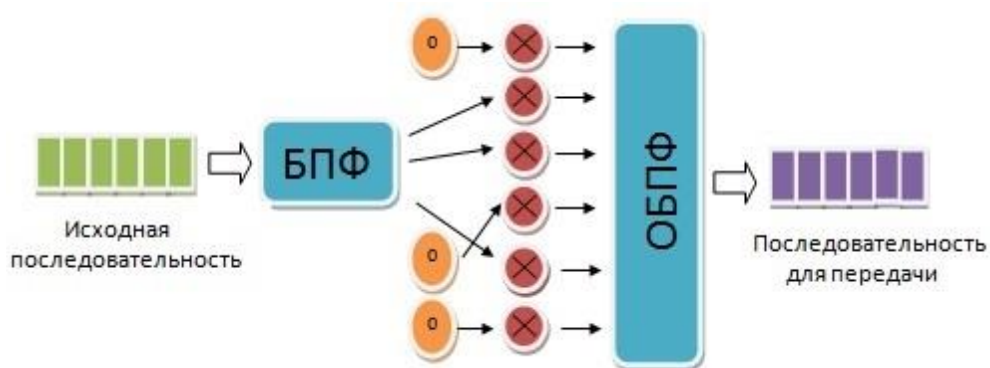


Рисунок 3.5 – Принцип побудови SC-FDMA – модулятора

У першому етапі вихідна послідовність інформації, яку передає абонент, проходить процес перетворення за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Після цього, залежно від швидкості потоку від конкретного абонента, мережа визначає кілька додаткових піднесучих, на які розподіляється перетворений потік. Піднесучі, які використовуються іншими користувачами, не використовуються в даному абонентському терміналі, і відповідні піднесучі множаться на "0". Після цього застосовується зворотне швидке перетворення Фур'є (ЗБПФ), і модульовані потоки об'єднуються та конвертуються назад у часовий домен. Навіть при одночасній передачі даних від різних пристроїв в мережі на одній і тій же частоті, в результаті описаних вище процедур можна виділити інформаційні потоки від окремих абонентів.

Використання SC-FDMA в системі LTE дозволило досягти трьохразового збільшення спектральної ефективності в напрямку "вгору" у порівнянні з мережами 3G[7].

### 3.4 Переваги OFDM-модуляції у земних передачах радіосигналів

Основні переваги OFDM-модуляції є наступними.

1) Здатність протистояти складним умовам в каналі (наприклад, боротьба з узкосмуговими перешкодами та частотно-вибірковим затуханням).

2) Канальна еквалізація (обробка звукового сигналу еквалайзером, наприклад, корекція амплітуди або зміна відношення частот) спрощується через те, що OFDM-сигнал може розглядатися як множина повільно модульованих узкосмугових сигналів, а не як один швидко модульований широкосмуговий сигнал.

3) Низька символна швидкість дозволяє використовувати захисний інтервал між символами, що дозволяє вирішувати проблеми з часовим розсіюванням та усуває міжсимвольні спотворення.

Послідовності модулятора розбиваються на пари - на 2-бітові символи, і при переході від символу до символу початкова фаза сигналу змінюється на величину, яка визначається бітами символу за алгоритмом[7].

### 3.5 Аналіз методів зменшення PAPR у технології OFDM

Одним із основних недоліків технології OFDMA є високе співвідношення пікової та середньої потужності сигналу (PAR). Це пояснюється тим, що в часовій області спектр OFDM-сигналу стає схожим на гаусівський шум, що відзначається великим PAR.

Миттєвий вихід OFDM-системи часто виявляє значні коливання порівняно з традиційними системами із однією несучою. Це вимагає, щоб

системні компоненти, такі як підсилювачі потужності, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, мали великі лінійні динамічні діапазони. Якщо це вимогу не виконано, можуть виникати небажані перешкоди, такі як високочастотне випромінювання та інтермодуляційні спотворення, коли піковий сигнал потрапляє в нелінійну область пристроїв передавача. Таким чином, методи зменшення PAPR мають велике значення для OFDM-систем[8].

### 3.6 Означення PAPR

Теоретично значущі піки в системі OFDM можуть бути визначені як відношення пікової потужності до середньої потужності, в інших джерелах це також позначається як PAPR (Peak-to-Average Power Ratio) або PAR. Зазвичай цей показник визначається як:

$$PAPR = 10 \log_{10} \frac{\max \left[ |x_n|^2 \right]}{E \left[ |x_n|^2 \right]}, \quad (3.1)$$

де  $E[ ]$  означає символ математичного сподівання виразу у квадратних дужках[10];

відліки  $x_n$  отримуються шляхом виконання операції IFFT на модульованих вхідних символах  $X_k$ .

Математично операція IFFT виражається так:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k W_N^{nk} . \quad (3.2)$$

У системі OFDM з  $N$  піднесучими максимальна потужність прийнятих сигналів перевищує середню потужність у  $N$  разів, коли фазові значення однакові. Наприклад, для системи з 16 піднесучими максимальний показник PAPR становить 12 дБ. Треба відзначити, що це лише теоретична гіпотеза, і ймовірність досягнення цього максимуму є дуже низькою в реальних умовах.

Хоча поява пікових амплітуд є рідкісною, використання для визначення пікових значень у реальних сценаріях немає сенсу. Таким чином, ефективність PAPR сигналів OFDM зазвичай оцінюється конкретними числовими значеннями, пов'язаними з ймовірністю[10].

### 3.7 Функція розподілу ймовірностей PAPR

Згідно з центральною граничною теоремою теорії ймовірностей, при великій кількості піднесучих у сигналі з декількома несучими, реальні та уявні частини значень вибірки в часовій області підлягають розподілу Гаусса з середнім значенням 0 та дисперсією 0,5. Таким чином, амплітуда сигналів з кількома несучими слідує розподілу Релея з нульовим середнім та дисперсією, яка в  $N$  разів більше, ніж дисперсія однієї комплексної синусоїди. Значення цього розподілу підкоряються розподілу з нульовим середнім та 2 ступенями свободи. Кумулятивна функція розподілу (CDF) виражається наступним чином:

$$F(z) = 1 - \exp(-z) . \quad (3.3)$$

Припускаючи, що значення вибірки різних підканалів є взаємно незалежними та не мають надлишкової дискретизації, функція розподілу ймовірностей для PAPR, менша за певне порогове значення, виражається як:

$$P(PAPR < z) = F(z)^N = (1 - \exp(-z))^N . \quad (3.4)$$

На практиці бажано брати ймовірність перевищення PAPR порогового значення як індекс вимірювання для представлення розподілу PAPR. Це можна описати як «додаткову кумулятивну функцію розподілу» (CCDF), а її математичний вираз як[10]:

$$P(PAPR > z) = 1 - (1 - \exp(-z))^N . \quad (3.5)$$

На рис. 3.6 представлено теоретичний розподіл CCDF PAPR з різною кількістю піднесучих (зокрема,  $N = 32$ ,  $N = 128$ ,  $N = 1024$ ), який був розрахований відповідно до формули (3.3). На вісі абсцис відзначені порогові значення PAPR, а на вісі ординат – ймовірність CCDF. З графіка видно, що для визначеного порогу PAPR ймовірність появи символів OFDM, які перевищують цей поріг  $PAPR_0$ , зменшується зі збільшенням кількості піднесучих  $N$ . В даній роботі ми віддаємо перевагу використанню CCDF для оцінки ефективності різних методик зниження PAPR[10].

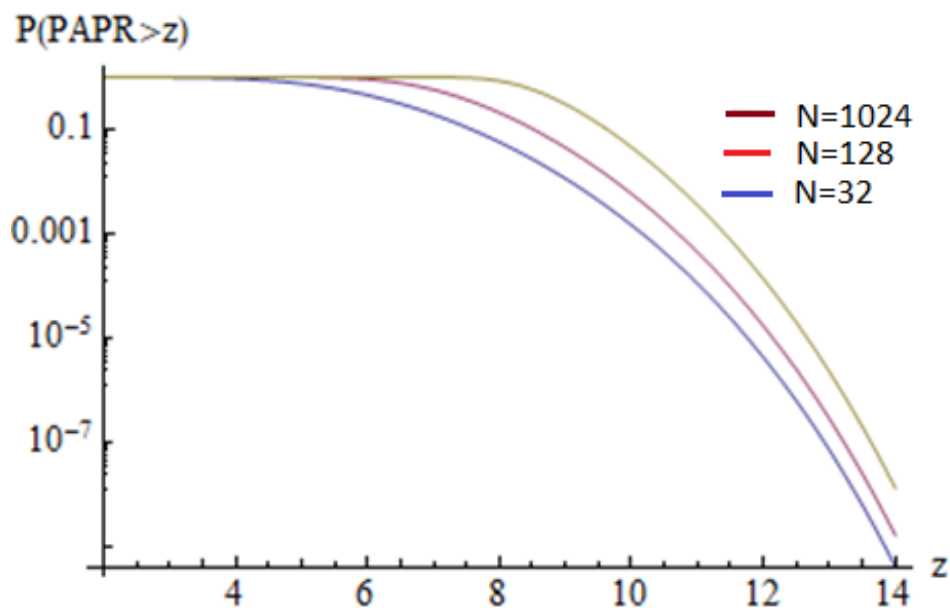


Рисунок 3.6 – Теоретичний розподіл CCDF PAPR з різною кількістю піднесучих

### 3.8 Вивчення методів зменшення PAPR

Існує різноманіття алгоритмів, які були розроблені для вирішення проблеми високого відношення пікової до середньої потужності (PAPR) в системах OFDM. Ось один з алгоритмів для зниження PAPR:

1. Відсікання сигналу. Це один з найпрактичніших та простих підходів, що включає відсікання та фільтрацію сигналу для усунення високих піків, що перевищують певний рівень. Цей процес може бути реалізований шляхом

обрізання дискретних зразків до цифро-аналогового перетворювача (DAC) або за допомогою проектування аналого-цифрового перетворювача (ADC) та/або підсилювача з рівнями насичення, які нижчі за динамічний діапазон. Однак через нелінійні спотворення, внесені цим процесом, ортогональність може бути деякою мірою пошкоджена, що призводить до серйозного смугового та позасмугового шуму.

Внутрішньосмуговий шум неможливо видалити за допомогою фільтрації, що призводить до зниження частоти бітових помилок (BER). Позасмуговий шум знижує ефективність смуги пропускання, але застосування фільтрації в частотній області може допомогти мінімізувати позасмугову потужність. Навіть якщо фільтрація ефективно пригнічує шум, вона може спричинити зростання пікової потужності[9].

### 3.9 Методи кодування

Метод кодування ґрунтується на використанні спеціальної техніки прямої корекції помилок для елімінації сигналів OFDM з високим відношенням пікової до середньої потужності (PAPR). Традиційні схеми включають лінійний блоковий код, коди Голея та код Ріда-Мюллера [10]. Щодо методу лінійного блокового коду, він є придатним лише для сценарію з обмеженою кількістю піднесучих, що призводить до обмежених можливостей застосування. Код Ріда-Мюллера є високоефективною схемою кодування, знижуючи PAPR для кодів сумісних класів другого порядку шляхом класифікації спектра перетворення Уолша-Адамара (WHT) кодових слів. Використовуючи код Ріда-Мюллера, можна досягти зниження PAPR до 3 дБ з високою ефективністю виправлення помилок[10].

## 4 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ МІМО

### 4.1. Передумови виникнення

Виникнення технології МІМО обумовлено необхідністю забезпечення високошвидкісних з'єднань, які одночасно здатні забезпечувати високий рівень обслуговування (QoS) незалежно від місця знаходження абонента в межах зони покриття або соті. Багато бездротових технологій не можуть гарантувати ефективне обслуговування на краю зони покриття через істотні втрати сигналу, затінення та відбиття. Встановлення великої кількості базових станцій для вирішення цієї проблеми виявляється дорогим методом, що може призвести до збільшення вартості послуг і зниження конкурентоспроможності системи. Також слід зазначити потенційний негативний вплив на здоров'я людей від значної кількості базових станцій. Таким чином, виникає потреба в новому технологічному рішенні, яке не передбачає будівництва нових базових станцій (чи інших об'єктів) та розширення частотного діапазону[3].

### 4.2 Застосування технології МІМО

У наш час технологія МІМО широко застосовується в усіх високошвидкісних системах зв'язку. Принцип роботи цієї технології впливає з її назви: МІМО - Multiple Input Multiple Output (множинний вхід, множинний вихід). При використанні МІМО інформаційний потік направляється між сторонами обміну інформацією кількома "шляхами", що дозволяє ефективніше використовувати частотно-часовий ресурс (див. рис. 4.1).

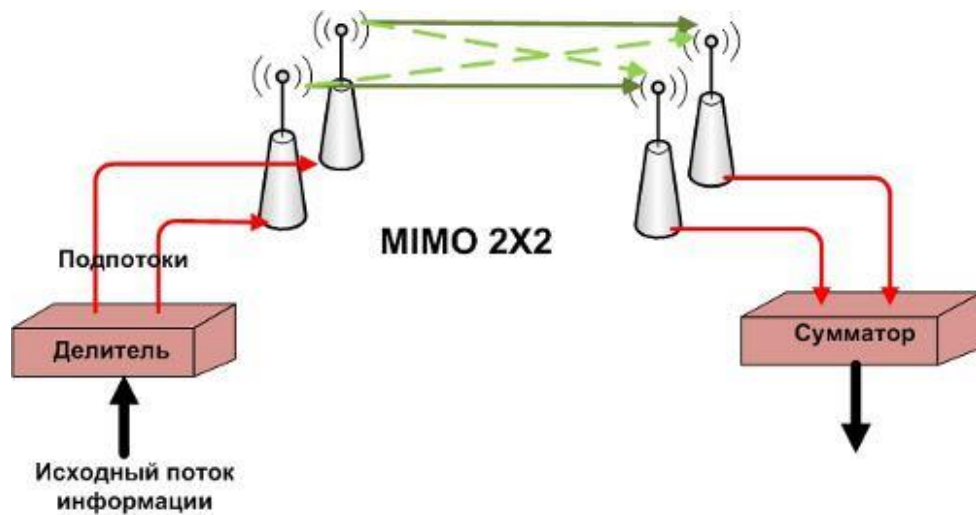


Рисунок 4.1 – Принцип технології MIMO

Як і в усіх сучасних технологіях бездротового зв'язку, LTE підтримує системи MIMO. Стандарт враховує MIMO-схеми з 1, 2 та 4 передавальними та приймальними антенами у різних комбінаціях. У MIMO-системах існують два основні типи передачі: просторовий мультиплекс та диверсифікована передача. У першому режимі кожен канал антени передає незалежний потік інформації, при цьому самі канали повинні бути некорельованими. Існують два види просторового мультиплексу - для одного точкового доступу (SU-MIMO) та для групи точкових доступу (MU-MIMO). У першому випадку базова станція передає кілька незалежних потоків даних одній точці доступу, при цьому у точки доступу повинно бути не менше антен, ніж у базовій станції. У MU-MIMO ресурсні елементи з однаковими частотно-часовими параметрами повинні бути призначені різним пристроям [3].

У висхідному каналі можлива схема просторового мультиплексування для безлічі абонентів MU-MIMO. Декілька приймальних установок, кожна з однією антеною, можуть використовувати однакові частотно-часові ресурси, проте завдяки декореляції антенних каналів базова станція може одночасно працювати з усіма ними.

### 4.3 Дослідження інформаційної ефективності технології MIMO

Один із ключових показників для MIMO-систем - це питома пропускна спроможність (інформаційна ємність) каналу. Це визначає максимальну швидкість передачі інформації, яку можна досягти в даному каналі зв'язку на 1 Гц ширини пропускання.

У MIMO-системі  $N_t$  передавальних антен випромінюють  $N_t$  потоків, які формують сигнали для кожної з  $N_r$  приймальних антен. Іншими словами, сигнал у кожній приймальній антені представляє собою комбінацію  $N_t$  випромінюваних сигналів, кожен з яких помножений на комплексні передавальні функції (федінги) від відповідних передаючих антен до приймальної антени. Це можна виразити у вигляді вектору прийнятих сигналів  $r$ , що дорівнює добутку матриці каналу  $H$  на вектор випромінюваних сигналів  $d$ :  $r = Hd$  [11].

Для випадкових MIMO-каналів, які часто існують у радіоканалах мобільного зв'язку, ергодична (середня питома) ємність виражається наступним чином:

$$C = M \left[ \log_2 \left| I + \frac{SNR}{N_t} \cdot H \bar{H}^t \right| \right], \quad [\text{бит} / \text{с} / \text{Гц}], \quad (4.1)$$

де  $M[\cdot]$  – символ математичного сподівання;

$SNR = \frac{P_c}{P_{ш}}$  – середнє значення відношення сигнал-шум на вході

приймача.

З аналізу виразу (4.1) випливає, що зі збільшенням значень  $i$  також зростатиме значення  $C$ . Підвищення кількості антен на передавачі та приймачі дозволяє значно підвищити швидкість передачі в системах з технологією MIMO. Це веде до підвищення їх спектральної ефективності в порівнянні із системами SISO. Дане поліпшення є важливим для сучасних систем, оскільки

їхні спектральні ресурси вже практично вичерпані відповідно до питомої пропускної спроможності цих каналів. Наприклад, на рис. 4.2 показана залежність спектральної ефективності систем SISO в стандарті LTE від співвідношення сигнал/шум SNR для різних значень індексу модуляції та схеми кодування MCS (Modulation and Coding Scheme). Товстою жовтою кривою також показано границю Шенона[11].

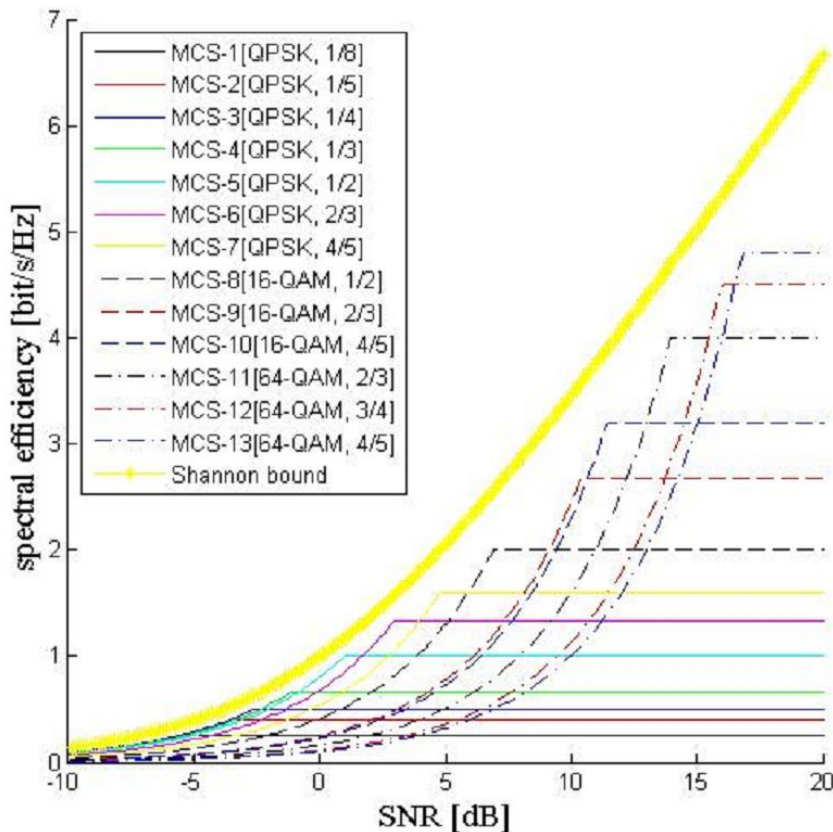


Рисунок 4.2 – Залежності спектральних ефективностей SISO систем LTE від співвідношення сигнал/шум SNR

Для отримання значень питомих пропускних здібностей різних MIMO-систем виконувалося моделювання у середовищі програмування Mathematica 10. При моделюванні всі фідінги поклалися незалежними гаусівськими комплексними величинами з нульовими середніми значеннями і однаковими дисперсіями.

Вплив числа передвальних антен на пропускну здатність систем MIMO з двома приймальними антенами показано на рис. 4.3. Аналіз графіків,

наведених на рис. 4.3 показує, що перехід від системи  $2 \times 2$  MIMO до системи  $3 \times 2$  MIMO забезпечує енергетичний виграш на 1,2 дБ, а перехід від  $2 \times 2$  MIMO до системи  $4 \times 2$  MIMO – енергетичний виграш на 1,5 дБ.

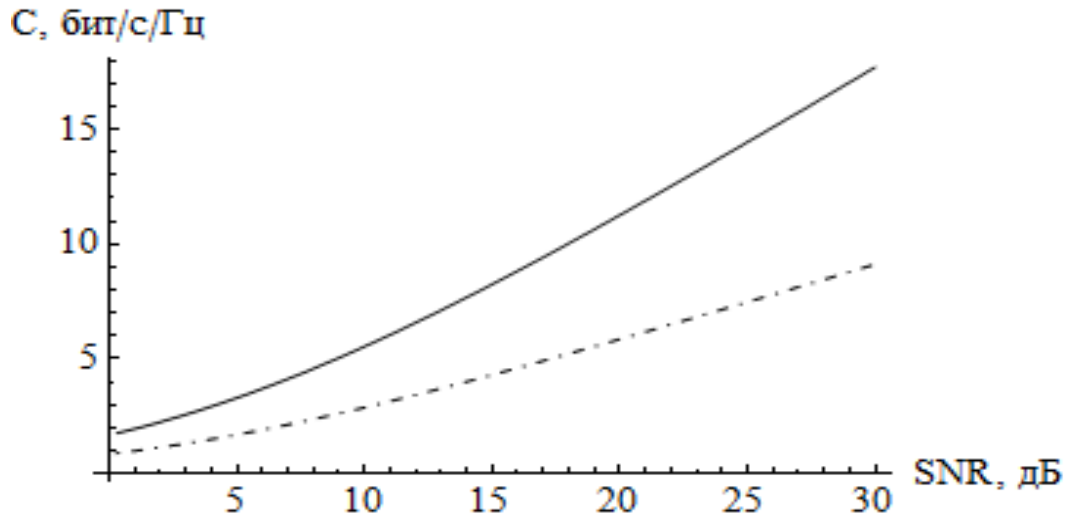


Рисунок 4.3 – Залежності пропускних можливостей систем SISO та MIMO типу  $2 \times 2$  від SNR

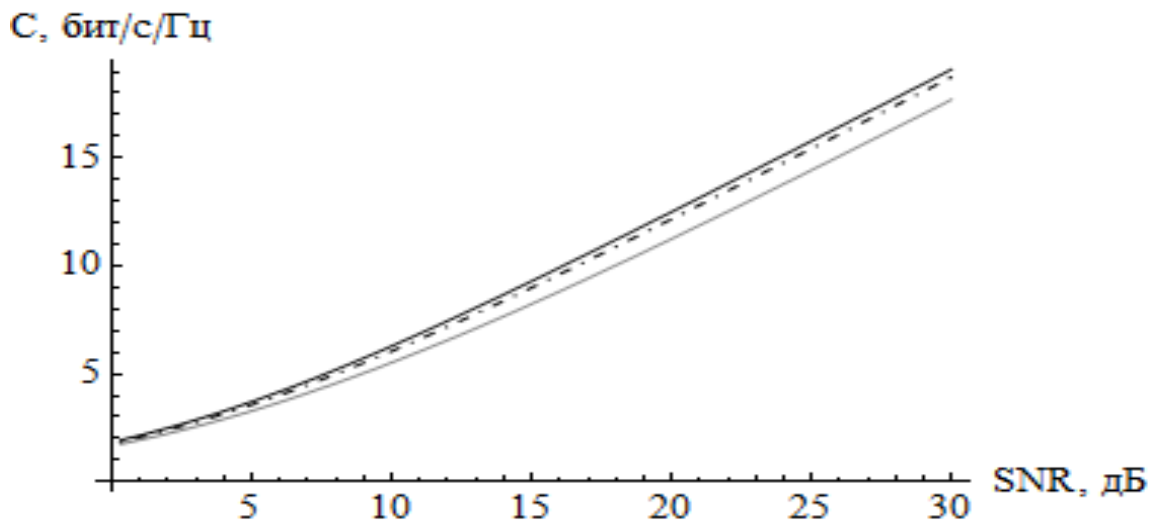


Рисунок 4.4 – Залежності пропускних можливостей від SNR для систем MIMO наступних типів:  $2 \times 2$ ,  $3 \times 2$  та  $4 \times 2$

#### 4.4. Переваги MIMO

Технологія MIMO (Multiple-input and multiple-output) є бездротовою системою, яка виявляє значне підвищення продуктивності порівняно з традиційною системою з одним входом і одним виходом. Ця ключова технологія використовує переваги багатьох антен у передавачі та/або приймачі, що дозволяє істотно покращити пропускну здатність, ємність і покриття мережі, не потребуючи додаткової пропускну здатності чи рівня передачі потужності. На сьогодні технологія MIMO широко використовується у стандартах бездротового зв'язку четвертого покоління (4G), таких як LTE, IEEE 802.11n і WiMAX. Використання антен MIMO у поєднанні з форматами модуляції, такими як OFDMA, може не лише збільшити пропускну здатність каналу, але й захистити від багатопроменевого завмирання завдяки їхній властивості ефективного розсіювання, що сприяє поліпшенню спектральної ефективності[9-10].

Технологія MIMO добре вивчена і розуміється, зокрема з точки зору точкових з'єднань, щоб підвищити надійність радіоліній за допомогою рознесення та збільшення швидкості передачі даних за рахунок мультиплексування.

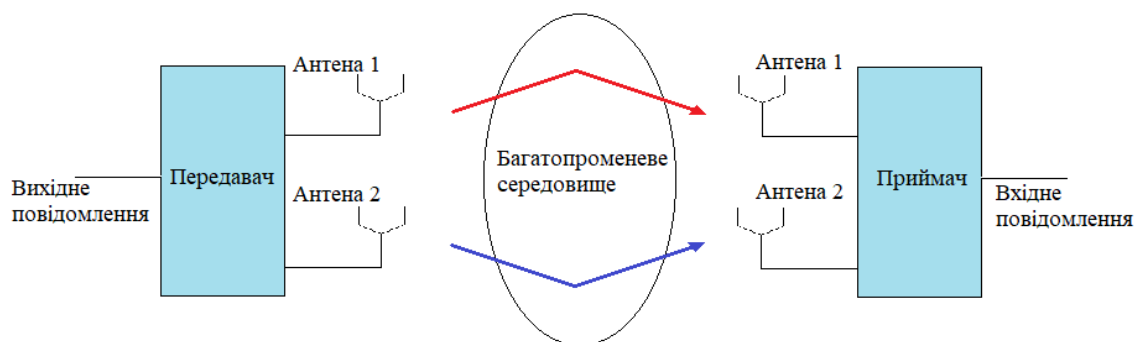


Рисунок 4.5 - Point-to-point MIMO з'єднання

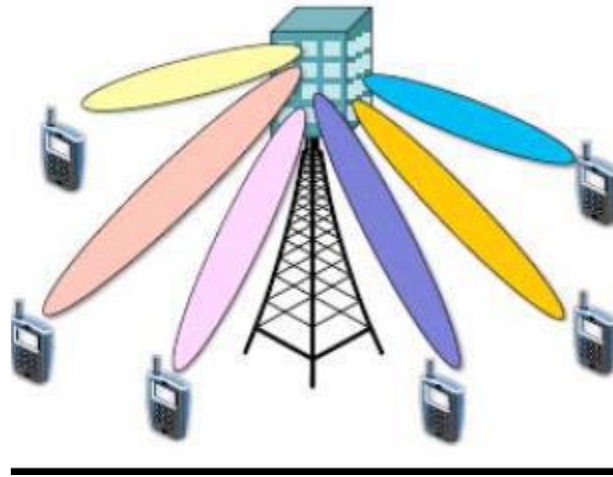


Рисунок 4.6 - MU-MIMO антенна система

Останні досягнення в області MIMO призвели до переходу від однокористувацької MIMO до багатокористувацької MIMO (MU-MIMO) для вирішення проблеми розташування багатьох антен у мобільному терміналі з обмеженим розміром. Система антен MU-MIMO включає базову станцію (БС) з кількома антенами, яка одночасно обслуговує набір користувачів за допомогою одного антенного виходу, і коефіцієнт мультиплексування може спільно використовуватися всіма користувачами[11].

Розширюючи переваги MU-MIMO, були представлені масивні MIMO, відомі також як дуже великі MIMO, повнорозмірні MIMO (FD-MIMO) і великомасштабні антенні системи. У цих системах БС оснащена значно більшою кількістю антен, наприклад, 100 або більше. Масивні MIMO продемонстрували більш ніж 10-кратне підвищення ефективності порівняно з однокористувацькими MIMO в реальних умовах поширення за допомогою простіших алгоритмів обробки сигналів. Таким чином, в цій кваліфікаційній роботі планується розглядати масивні MIMO як одну з ключових технологій у стандарті бездротового зв'язку п'ятого покоління (5G).

Теоретично, масивні MIMO-технології пропонують деякі переваги для систем бездротового зв'язку[10].

## ВИСНОВОК

Кваліфікаційна робота є результатом глибокого аналізу та системного огляду сучасних технологій бездротового абонентського доступу. Охоплюючи різноманітні аспекти від покращення пропускну здатності до забезпечення надійності та ефективності мереж, дослідження надає інформацію про ключові напрямки удосконалення цих технологій.

Переваги технологій MIMO, високочастотних діапазонів, а також переходу до стандартів 5G дозволяють підняти ефективність бездротового абонентського доступу на новий рівень. Інтеграція багат шарових MIMO-систем, розширення частотного спектру та оптимізація алгоритмів обробки сигналів дозволяють забезпечити високий рівень послуг для кінцевих користувачів.

Додатково, дослідження вказує на значущий внесок технологій багатокористувацького MIMO та гібридних архітектур у зниження енергоспоживання та поліпшення продуктивності мереж. Враховуючи великий обсяг передачі даних та вимог до якості обслуговування, ці технології стають ключовим елементом в еволюції бездротових мереж.

Загалом, дана кваліфікаційна робота пропонує аналіз сучасних технологій бездротового абонентського доступу та визначає перспективи їхнього подальшого розвитку. Отримані результати можуть бути використані як основа для подальших наукових досліджень та практичних застосувань в області бездротових комунікацій.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. White Paper 5G Evolution and 6G. NTT DOCOMO, INC. January 2022 (Version 4.0). :), 60 p.
2. Fuentes, M.; Mi, D.; Chen, H.; Garro, E.; Carcel, JL.; Vargas, D.; Mouhouche, B.... (2019). Physical Layer Performance Evaluation of LTE-Advanced Pro Broadcast and ATSC 3.0 Systems.
3. Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учеб. пособие / Рашич А.В. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 179 с.
4. Пролетарский А.В., Баскаков И.В., Чирков Д.Н. Беспроводные сети Wi-Fi. Интернет-Университет Информационных технологий; БИНОМ; Лаборатория знаний, 2007. – 216 с.
5. Laura García, Jose M. Jiménez, Miran Taha, Jaime Lloret. Wireless Technologies for IoT in Smart Cities. Network Protocols and Algorithms ISSN 1943-3581 2018, Vol. 10, No. 1. 3. 23-64
6. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
7. Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 204 с.
8. 3GPP TR 25.814 Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA), Release 7, V7.1.0, 2006
9. Банкет В.Л., Незгазинская Н.В., Токарь М.С. Методы пространственно-временного кодирования для систем радиосвязи. Цифрові технології, 2009, №6, 5-16 с.
10. Wang Yi. An Investigation of Peak-to-Average Power Reduction in MIMO-OFDM Systems. Blekinge Institute of Technology October, 2009, 65 p.
11. Коляденко Ю.Ю., Муслим А.Д. Исследование пропускной способности MIMO-системы. Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций», № 1 (1), 2010, С. 76-82.

12. IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirements — Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2007.pdf>.

13. WEP (wired equivalent privacy) // Networkworld [Електронний ресурс]. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.networkworld.com/details/715.html>.

14. Дорошко Р.С. Методика оцінювання електромагнітної сумісності бездротових локальних мереж [Текст] // Р.С. Дорошко, О.Ю. Перевало, Н.А. Харченко // тези доповідей восьмої міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми інформатизації» 26-27 листопада 2020 року., Харків, Т1 секції 1-3, С. 62.

15. Телекомунікаційні системи та мережі. Абонентський доступ і технології локальних мереж / В. В. Поповський та ін. Т. 2. Харків: СМІТ. Друге видання, доповнене. 2018.

16. Поповський В.В. Основи теорії телекомунікаційних систем: підручник. Харків: ХНУРЕ, 2018. 368 с.

17. Берлін, А.Н. Стільникові системи зв'язку: навч. посіб. / О.М. Берлін: БІНОМ. ЛЗ, ІНТУЇТ, 2013. 360 с.