ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «Методи підвищення інформаційної ємності та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції»

на здобуття освітнього ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



(підпис) Олександр ХОРОШУН (Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АРДМ-62
Олександр ХОРОШУН

Керівник: Вікторія СКРИПНІК

Рецензент: Черевик

Київ – 2023

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

Кафедра Мобільних та відеоінформаційних технологій

Ступінь вищої освіти Магістр

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Освітньо-професійна програма Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувачка кафедрою МВТ
_____ Наталія РУДЕНКО
« » _____ 2023 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Хорошуну Олександру Олександровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Методи підвищення інформаційної ємності та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції»,
керівник кваліфікаційної роботи Вікторія Скрипнік, д.т.н., доктор філософії,
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від 19.10.2023 р. №145.

2. Строк подання кваліфікаційної роботи 25.12.2023 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
   1. Основні методи модуляції п'ятого покоління (5G).
   2. П'яте покоління мобільних технологій 5G. Застосування технологій MIMO та Massive MIMO.
   3. Неортогональний множинний доступ (NOMA). Спектральна ефективність та енергоефективність. Особливості та впливи NOMA.
   4. Науково-технічна література.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
   1. Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів (OFDMA).
   2. Ефективність застосування MIMO-RF технології з поляризаційною маніпуляцією.
   3. NOMA для вхідної та вихідної лінії зв'язку.
5. Перелік ілюстративного матеріалу: презентація.
6. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Підбір науково-технічної літератури	19.10.23	Викон.
2.	Основні методи модуляції п'ятого покоління (5G)	31.10.23	Викон.
3.	П'яте покоління мобільних технологій 5G. Застосування технологій MIMO та Massive MIMO.	15.11.23	Викон.
4.	Неортогональний множинний доступ (NOMA). Спектральна ефективність та енергоефективність. Особливості та впливи NOMA	29.11.23	Викон.
5.	Висновки, вступ, реферат	11.12.23	Викон.
6.	Розробка презентації	18.12.23	Викон.

Здобувач вищої освіти Олександр ХОРОШУН

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Керівник кваліфікаційної роботи Вікторія СКРИПНІК

(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 68 стор., 20 рис., 6 табл., 35 дж.

Мета роботи – аналіз методів підвищення інформаційної ємності із використанням просторових змінних параметрів та методів збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції.

Об'єкт дослідження - дослідження технологій просторово-часового представлення сигналу для мобільних мереж п'ятого покоління (5G) з використанням технологій систем MIMO та NOMA, а також Massive NOMA.

Предмет дослідження – методи підвищення інформаційної ємності із використанням просторових змінних параметрів та методи збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції.

Короткий зміст роботи: У цій роботі представлено та досліджено основи NOMA і продемонстровано її перевагу над традиційною OFDMA з точки зору сумарної пропускної здатності, енергоефективності та спектральної ефективності. Також згадано про вплив недосконалості приймача SIC на продуктивність системи. Завдяки своїм відмінним характеристикам, NOMA залишається найсильнішим кандидатом для майбутніх мереж 5G. Однак для успішного впровадження NOMA все ще існують певні виклики. По-перше, для запуску алгоритмів SIC потрібна висока обчислювальна потужність, особливо для великої кількості користувачів при високих швидкостях передачі даних. По-друге, оптимізація розподілу потужності залишається складною проблемою, особливо коли користувачі швидко переміщуються в мережі. Для підвищення надійності і, відповідно, зменшення помилок декодування, його можна реалізувати за допомогою інших методів рознесення, таких як множинний вхід-багаторазовий вихід (MIMO), або за допомогою схем кодування. Нещодавно з'явилися роботи, які реалізують MIMO для NOMA.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: OFDM, IFFT, 5G, МОДУЛЯЦІЇ, СПЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, БІТИ, КОНЦЕПЦІЇ, QPSK, NOMA.

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 68 pages, 20 pictures, 6 table, 35 sources.

The purpose of the work - analysis of methods for increasing information capacity using spatial variable parameters and methods for increasing spectral and energy efficiency, stability and noise immunity of signals using modern modulation methods.

Object of research – research of spatio-temporal signal representation technologies for fifth generation (5G) mobile networks using MIMO and NOMA systems, as well as Massive NOMA.

Subject of research – methods of increasing information capacity using spatial variable parameters and methods of increasing spectral and energy efficiency, stability and noise immunity of signals using modern modulation methods.

Summary of the work: This paper presents and investigates the fundamentals of NOMA and demonstrates its superiority over traditional OFDMA in terms of total throughput, energy efficiency, and spectral efficiency. The impact of SIC receiver imperfections on system performance is also mentioned. Due to its excellent performance, NOMA remains the strongest candidate for future 5G networks. However, there are still some challenges to successful NOMA implementation. First, high computing power is required to run SIC algorithms, especially for a large number of users at high data rates. Secondly, optimizing power allocation remains a challenging problem, especially when users move rapidly in the network. To improve reliability and, consequently, reduce decoding errors, it can be realized using other spreading methods, such as multiple-input-multiple-output (MIMO), or using coding schemes. Recently, there have been works that implement MIMO for NOMA.

KEYWORDS: OFDM, IFFT, 5G, MODULATIONS, SPECTRAL EFFICIENCY, PERFORMANCE, BITS, CONCEPTS, QPSK, NOMA.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ 10
ВСТУП 12
1 ОСНОВИ ТА МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ 5G 14
1.1 Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів (OFDMA) 16
1.2 Просторово-часове представлення ортогонального множинного доступу з частотним розділенням каналів 20
1.3 Застосування ортогонального множинного доступу з частотним розділенням каналів 22
1.4 Модель системи методу частотного мультиплексування з безліччю несучих (FBMC – Filter Bank Multi-Carrier) 24
1.5 Огляд методів частотного мультиплексування з безліччю несучих та маніпуляція з мінімальним зрушенням QAM 27
2 П'ЯТЕ ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ MIMO ТА MASSIVE MIMO. 32
2.1 5G і 4G: Ключові відмінності 37
2.2 Ефективність застосування MIMO-RF технології з поляризаційною маніпуляцією 40
2.3 Спектр 5G 44
2.4 Неортогональний множинний доступ (NOMA) для мереж 5G 46
2.5 Особливості застосування спектру ОС та ММД 47
2.6 Власне променеве формоутворення 49
2.7 Просторово-часове кодування 51
2.8 Просторове мультиплексування 52
3 НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ МНОЖИННИЙ ДОСТУП (NOMA). СПЕЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ОСОБЛИВОСТІ ТА ВПЛИВИ NOMA 54
3.1 Неортогональний множинний доступ (NOMA) 60
3.2 NOMA для вхідної лінії зв'язку 62
3.3 Система NOMA для вихідної лінії зв'язку 66
3.4 Недосконаліть системи NOMA 70

3.5 Спектральна ефективність та енергоефективність технології NOMA 71
3.6 Вплив недосконалого скасування 73
ВИСНОВКИ 74
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 75
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 81

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ACI	Adjacent Channel Interference
APK	Amplitude Phase Keying
BPSK	Binary Phase Shift Keying
BS	Beam Splitter
CMT	Cosine Modulated Multitone
CPFSK	Continuous-Phase Frequency Shift Keying
CPM	Continuous Phase Modulation
DSB	Double Sideband
DSB-SC	Double Sideband – Suppressed Carrier
FBMC	Filter Bank Multicarrier
FSK	Frequency Shift Keying
FSO – MIMO	Free Space Optical – Multiple Input, Multiple Output
FWA	Fixed Wireless Access
ICI	Intercarrier Interference
IF	Intermediate Frequency
ISI	Intersymbol Interference
MIMO	Multiple Input, Multiple Output
MPSK	M-ary Phase Shift Keying
MSK	Minimum Shift Keying
NOMA	None Orthogonal Multiple Access
OFDMA	Orthogonal Frequency – Division Multiple Access
OQPSK	Offset – Quadrature Phase Shift Keying
PAM	Pulse Amplitude Modulated
PAPR	Peak to Average Power Radio
PDM	Polarization Division Multiplexing
PolarSK	Polarization Shift Keying
PSK	Phase Shift Keying

QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QASK	Quadrature Amplitude Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF – MIMO	Radio Frequency – Multiple Input, Multiple Output
RoF	Radio over Fiber
SM	Spatial Modulation
SQPSK	Staggered Quadrature Phase Shift Keying
АМ	Амплітудна модуляція
БС	Базова станція
ММД	Міліметровий діапазон
ФМ	Фазова модуляція
ЦАП	Цифро-аналоговий перетворювач
ЧМ	Частотна модуляція

ВСТУП

У суспільстві головним ресурсом є інформація. Саме на основі володіння інформацією про різні процеси і явища можна ефективно і оптимально будувати будь-яку діяльність.

Важливо не тільки зробити велику кількість продукції, але й зробити необхідну продукцію в певний час. З певними витратами тощо. Тож у інформаційному суспільстві підвищується як якість споживання, а й якість виробництва; людина, яка використовує інформаційні технології, має кращі умови праці, праця стає творчою, інтелектуальною і так далі.

Інформація сьогодні коштує дорого та її необхідно охороняти. Масове застосування персональних комп'ютерів, на жаль, виявилося пов'язаним з появою програм, що самовідтворюються, вірусів, що перешкоджають нормальній роботі комп'ютера, руйнують файлову структуру дисків і завдають шкоди інформації, що зберігається в комп'ютері.

Інформацією володіють та використовують її всі люди без винятку. Кожна людина вирішує собі, яку інформацію їй необхідно отримати, яка інформація має бути доступна іншим тощо. Людині легко, зберігати інформацію, яка у неї в голові, а як бути, якщо інформація занесена до «мозку машини», до якої мають доступ багато людей.

Для запобігання втраті інформації розробляються різні механізми її захисту, які використовуються на всіх етапах роботи з нею. Захищати від пошкоджень та зовнішніх впливів треба і пристрої, на яких зберігається секретна та важлива інформація, та канали зв'язку [1].

Пошкодження можуть бути спричинені поломкою обладнання або каналу зв'язку, підробкою або розголошенням секретної інформації. Зовнішні впливи виникають як у результаті стихійного лиха, так і в результаті збоїв обладнання або крадіжки.

Для збереження інформації використовують різні способи захисту:

– безпека будівель, де зберігається секретна інформація;

– контроль доступу до секретної інформації;

– розмежування доступу;

– дублювання каналів зв'язку та підключення резервних пристроїв;

– криптографічні перетворення інформації;

Інформаційна ємність, безпека даних, якість зв'язку та доступність системи є властивостями цифрової модуляції, які роблять її вигіднішою, ніж аналогова модуляція. Інші переваги цифрової модуляції включають:

– висока пропускна здатність передачі даних - обсяг даних, що передаються через цифрову модуляцію, більше, ніж через аналоговий зв'язок.

– неймовірна ефективність смуги пропускання - може вмістити великі обсяги даних у межах обмеженої пропускної спроможності.

– гнучкі сигнали – є можливість мультиплексувати різні форми даних, такі як цифрова інформація, відео та голос.

– менша сприйнятливість до перехресних перешкод, спотворень форми сигналу, нелінійності та шуму.

– підвищена сила сигналу, яка запобігає небажаному вторгненню сигналу та комунікаційним шумам.

Також виявлено, що недоліки в процесі модуляції або кодування ключових бітів у квадратурах електромагнітного світлового поля можуть зробити безперервно-змінні квантові системи розподілу ключів сприйнятливими до витоку секретної інформації. Витік виникає через обмежене придушення квантово-інформаційної бічної смуги під час модуляції.

Тому подальші дослідження методів модуляції ефективних багатопозиційних сигналів та із використанням просторових змінних параметрів є ефективним напрямом для збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості та завадозахищенності зв'язку.

1 ОСНОВИ ТА МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ 5G

Згідно з останніми тенденціями, споживання даних зростає з кожним днем. Таким чином, сучасні технології 3G і 4G не можуть задовольнити ці потреби, тому швидкість передачі даних повинна бути покращена, щоб забезпечити кращий досвід при одночасному доступі до послуг передачі даних. Технології 5G мають вищу швидкість передачі інформації та більшу площу покриття. Вони споживають менше енергії і мають більшу безпеку, кращу спектральну ефективність та енергоефективність. Швидкість технології 5G сягає приблизно від 50 мбіт/с до 2G і навіть до 1000 Гбіт/с, що набагато швидше, ніж у технології 4G. Модуляція - це процес впливу даних на сигнал, що передається по радіоканалу, який є основою системи бездротового зв'язку. Більшість віддалених передач сьогодні комп'ютеризовані, і з обмеженим діапазоном доступності модуляція є більш важливою, ніж будь-коли. Ми живемо в цифрову еру, коли для зв'язку з близькими не потрібні дроти. Повідомлення, інформація та сигнали надсилаються по всьому світу за лічені хвилини. Процес модуляції є важливою технікою швидкої передачі сигналів. Основна мета процесу модуляції - втиснути якомога більше даних у якомога менший спектр, відомий як спектральна ефективність. Вона використовується для вимірювання швидкості передачі інформації в одній смузі частот. Одиниця виміру - біт/с/Гц (біт на секунду на Гц). Для досягнення високої спектральної ефективності в різних методах модуляції існують різні методи. Таким чином, у цій статті розглядаються різні методи модуляції, що використовуються для розробки системи зв'язку наступного покоління.

FDM - це просто ідея про те, що кілька каналів зв'язку можуть співіснувати, якщо для кожного каналу виділити певну частину частотного спектра. Поширеним прикладом цього є FM-радіо: загальний частотний діапазон (США) становить 87,8-108 МГц, розділений на канали шириною 0,2 МГц (рис. 1). Частотні розподіли FDM не повинні перекриватися і часто мають захисні смуги між каналами, щоб мінімізувати інтерференцію сусідніх каналів.

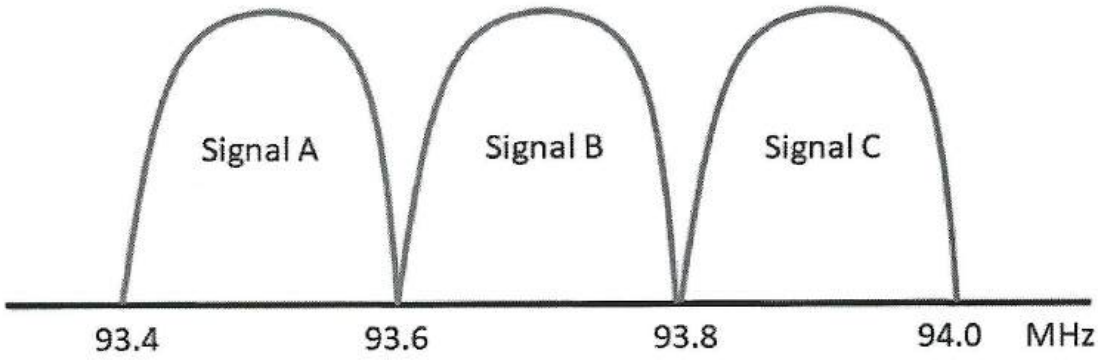


Рис. 1.1 При частотному мультиплексуванні сигнали передаються на сусідніх несучих частотах

Технологія OFDM - це потужний метод модуляції, який можна використовувати для багатьох застосувань. Вона підходить для широкого спектру бездротових систем зв'язку, включаючи стільникові мережі, бездротові локальні мережі, цифрове аудіомовлення і бездротові мультимедійні мережі. Майбутня сфера застосування технології OFDM дуже багатообіцяюча. Вона може бути використана в нових технологіях, таких як 5G, Інтернет речей (IoT) та інтелектуальні мережі. Вона також може бути використана для підвищення продуктивності існуючих систем, таких як Wi-Fi, WiMAX і стільникові мережі 3G/4G, забезпечуючи вищу швидкість передачі даних і кращу спектральну ефективність. Крім того, його стійкість до різних типів завмирань може бути ще більше підвищена завдяки впровадженню передових методів обробки сигналів. Очікується, що зі зростанням попиту на вищі швидкості передачі даних, кращу спектральну ефективність і підвищену надійність OFDM відіграватиме значну роль у майбутніх системах бездротового зв'язку [2].

1.1 Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів (OFDMA)

На рисунку 2 показано, як можна об'єднати N рівновіддалених піднесучих для формування масиву паралельних сигналів. Кожна з піднесучих модулюється за допомогою QAM. Ці модульовані піднесучі можуть використовуватися для підтримки незалежних сигналів базової смуги, але частіше вони об'єднуються для забезпечення максимальної пропускної здатності для одного потоку даних.

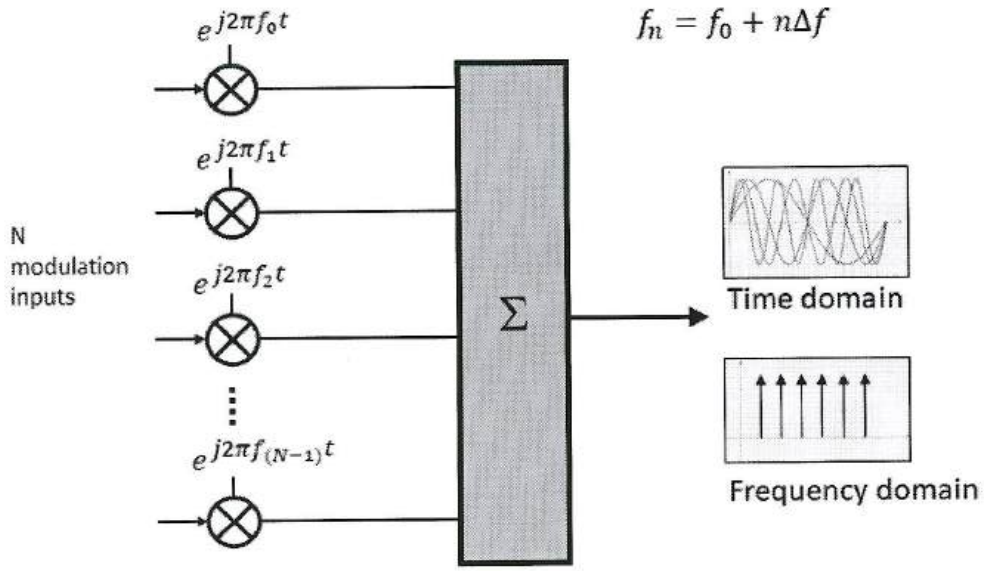


Рис. 1.2 OFDM модулятор підсумовує сигнали різних частот.

Ми можемо представити ці піднесучі математично, використовуючи комплексну форму, що відповідає використанню QAM.

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j2\pi f_n t} \tag{1.1}$$

Де,

$$f_n = f_0 + (n \cdot \Delta f) \tag{1.2}$$

Наведені вище рівняння є неперервними функціями, і системи OFDM були реалізовані в аналоговій формі. Однак сучасні системи майже всі є цифровими, використовуючи переваги новітніх напівпровідникових технологічних вузлів і цифрової обробки сигналів.

Сучасні OFDM-системи використовують піднесучі, які існують у дискретній (дискретизованій) формі з частотою дискретизації:

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \tag{1.3}$$

З N піднесучими, розташованими на відстані:

$$\Delta f = \frac{1}{N\,\Delta t} \tag{1.4}$$

Для простоти, на рисунку 3 показано лише чотири немодульовані піднесучі в часовій області. Чорна траса - це f0, а інші траси - більш високочастотні піднесучі, розташовані на відстані, кратній Δf.

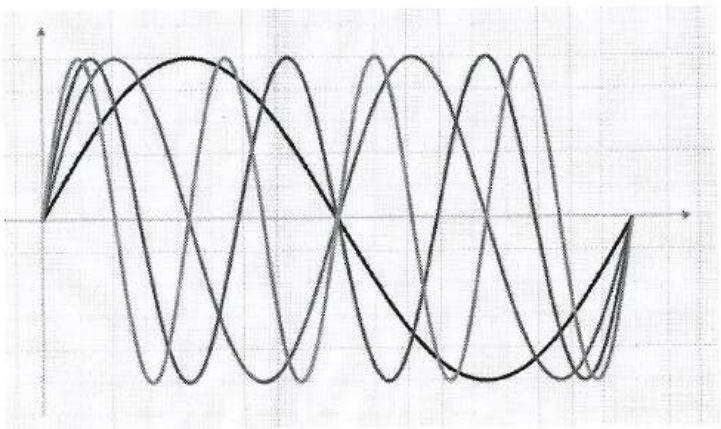


Рис. 1.3 Цей OFDM-сигнал містить чотири піднесучі, віддалені одна від одної на Δf, що відповідає f0, f1, f2, f3.

На рисунку 4 показано ці ж піднесучі в частотній області, але з деякою смугою модуляції, щоб показати перекриття між піднесучими. Піднесучі ортогональні одна до одної і створюють мінімальну інтерференцію з іншими піднесучими, що призводить до ефективного використання смуги пропускання. Зверніть увагу, що амплітуда кожної піднесучої перетинає нуль в центрі інших піднесучих, мінімізуючи вплив сусідніх піднесучих.

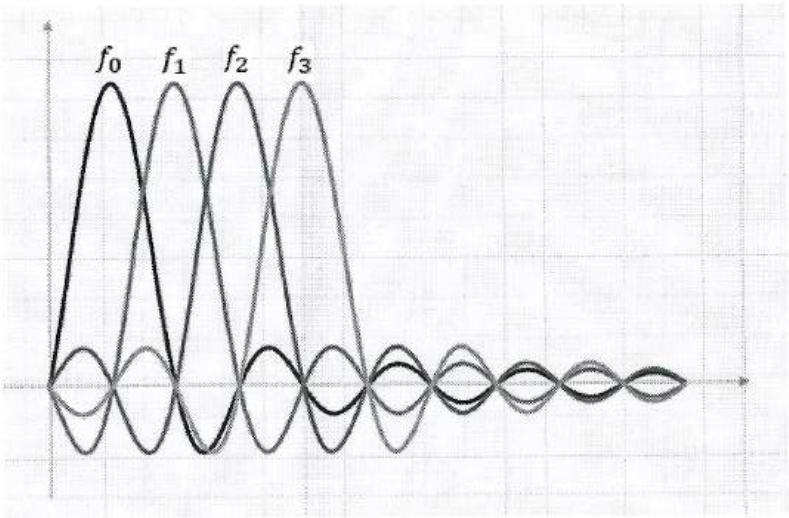


Рис. 1.4 Представлення в частотній області сигналу з чотирма несучими OFDM.

На рисунку 5 показана базова блок-схема повної наскрізної OFDM-системи, що складається з передавача і приймача. Бітовий потік надходить в систему з лівого боку схеми. Як правило, цей єдиний бітовий потік демультиплексується (DEMUX) на менші бітові потоки, які подаються на окремі QAM-модулятори для кожної з N піднесучих.

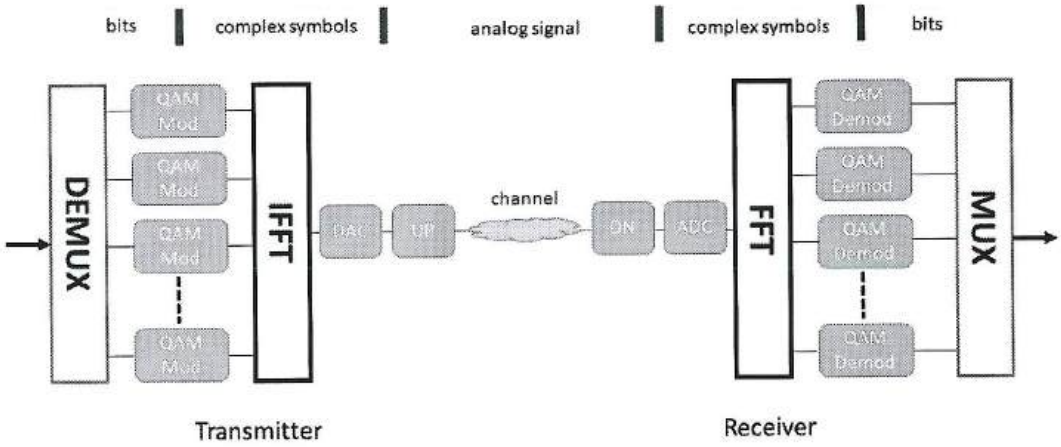


Рис. 1.5 Повна система OFDM складається з передавача (ліворуч) і приймача (праворуч). Підсилювач потужності в передавачі не показаний.

Результуючий OFDM-сигнал у цифровій формі керує цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП), який перетворює його в аналоговий сигнал.

Основними ідеями тут є:

1) Об'єднання багатьох піднесучих QAM для створення широкосмугової системи

2) Використання БПФ і IFFT для ефективного перетворення цих піднесучих в єдиний бездротовий сигнал. Може використовуватися цілий ряд QAM-модуляцій, починаючи з BPSK (один біт на символ) і закінчуючи 256QAM (8 біт на символ). Поєднання цього з використанням багатьох піднесучих (можливо, 4096) призводить до дуже високої швидкості передачі даних.

1.2 Просторово-часове представлення ортогонального множинного доступу з частотним розділенням каналів

На рисунку 6 показано вигляд OFDM-сигналу в часовій та частотній областях. Горизонтальна вісь - це частота, а вертикальна вісь - амплітуда. Третя вісь, що виходить зі сторінки, - це час, що дозволяє нам бачити, як OFDM-сигнал просувається від задньої частини графіка до передньої. Кожен символ, показаний на рисунку, є одним набором піднесучих OFDM, що передаються по каналу.

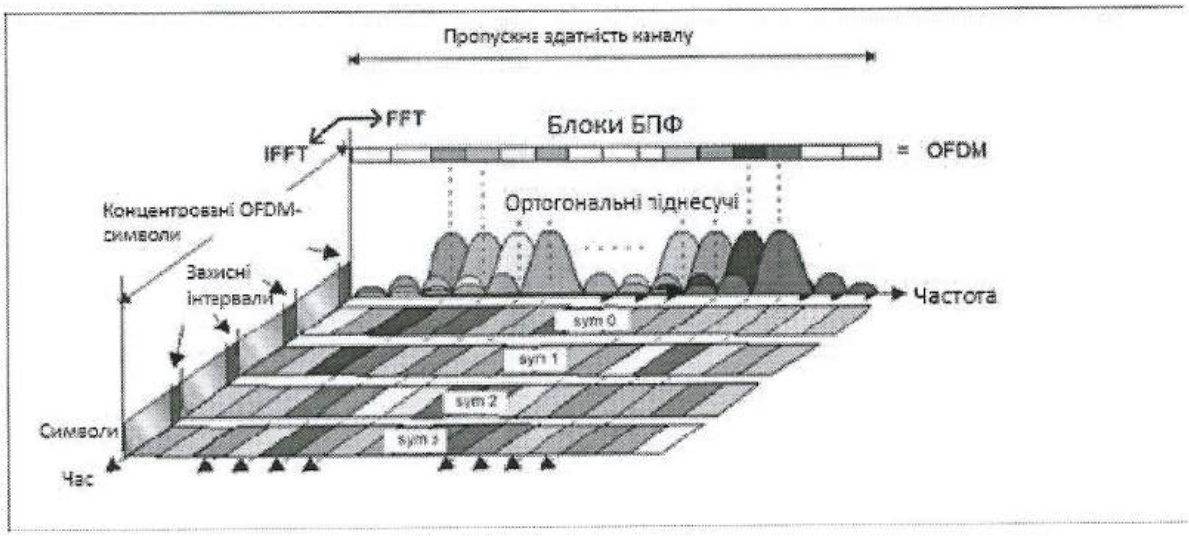


Рис. 1.6 Комбінований вигляд OFDM сигналу в часовій/частотній області.

Зверніть увагу на включення захисного інтервалу, щоб забезпечити певний часовий проміжок між символами. Це простий метод запобігання багатопроменевому поширенню в каналі, що спричиняє інтерференцію між символами. Більш просунутий метод вставляє циклічний префікс (CP) в захисний інтервал, в результаті чого утворюється форма OFDM, яка називається CP-OFDM.

В OFDM смуга пропускання сигналу є меншою (вузькосмуговою) порівняно зі смугою пропускання каналу (широкосмуговою). Для кращого пояснення поведінки каналу використовується інший термін - смуга

когерентності. Смуга когерентності визначається як діапазон частот, які зазнають майже однакових завмирань, тобто пласких завмирань [3].

Якщо смуга пропускання сигналу більша за смугу когерентності, як у схемі з однією несучою, не всі частотні компоненти зазнають однакових завмирань. Різні частотні компоненти сигналу зазнають різних рівнів завмирань, і кажуть, що вони зазнають частотно-селективних завмирань. Вирішення цієї проблеми є великим викликом, оскільки важко визначити, як канал впливає на сигнал в кожній частині, і застосувати методи обробки сигналу для кожної частини спектра [4]. Хоча ці помилки можна компенсувати, це вимагає більш складних апаратних засобів і методів обробки сигналів, що призводить до збільшення часу і вартості обробки. Схема OFDM передає вузькосмугові піднесучі сигнали по всій смузі частот, а отже, кожна піднесуча зазнає плоских завмирань, що призводить до покращення продуктивності порівняно з традиційними системами з однією піднесучою. Варто також зазначити, що схема OFDM робить оптимальний вибір співвідношення між смугою пропускання сигналу і очікуваним розкидом канальних затримок, тим самим усуваючи ефекти частотно-селективних завмирань і ISI в цілому, пропонуючи значно кращу продуктивність. Цей оптимальний вибір буде різним для різних застосувань, частоти роботи та умов каналу.

1.3 Застосування ортогонального множинного доступу з частотним розділенням каналів

Стандарт бездротової локальної мережі IEEE 802.11a був одним з перших стандартів, що використовував OFDM. Цей стандарт використовує 64 піднесучі з інтервалом 312 кГц, які можуть модулюватися кількома різними варіаціями QAM: Бінарна фазова маніпуляція (BPSK), квадратурна фазова маніпуляція (QPSK), 16QAM або 64QAM. Мобільні бездротові системи використовують OFDM для досягнення високої пропускної здатності каналів. Існуючий мобільний бездротовий зв'язок 4G (LTE) використовує OFDM для низхідної лінії зв'язку (базова станція - мобільний пристрій) з фіксованою відстанню між піднесучими 15 кГц. Модуляція на піднесучих може бути QPSK, 16QAM або 64QAM.

Стандарт 5G New Radio (NR) використовує OFDM як на висхідній, так і на низхідній лінії зв'язку. Специфікація NR розроблена з високим ступенем гнучкості, щоб охопити широкий спектр застосувань. Інтервал між несучими є гнучким (15 кГц, 30 кГц, 60 кГц, 120 кГц, 240 кГц, 480 кГц) з можливістю використання до 3300 піднесучих. Модуляція піднесучих може бути QPSK, 16QAM, 64QAM або 256QAM.

Сигнали, що передаються через систему OFDM, зазвичай містять всі піднесучі, які знаходяться в протифазі один з одним. Сигнали мають різні значення амплітуди один від одного при певних значеннях фази. Однак, якщо всі сигнали одночасно досягають максимального значення при заданій фазі, це призводить до стрибка вихідного сигналу, в результаті чого на вихідній огинаючій утворюється пік. Оскільки система OFDM містить незалежні піднесучі, пікове значення всієї системи може бути вищим за середню потужність системи. Це призводить до вищого відношення пікової до середньої потужності (PAPR) [5].

Підвищення PAPR є небажаним ефектом і знижує ефективність підсилювача потужності в системі OFDM. Підсилювачі потужності працюють в

лінійній області до попередньо визначеного рівня вихідної потужності. Раптові пікові сплески переведуть підсилювач в нелінійну область, що призведе до неефективності. Ці випадкові пікові сплески є одним з найбільших недоліків системи OFDM. Схема OFDM вимагає, щоб і передавач, і приймач були ідеально синхронізовані з піднесучими частотами. З підвищенням частоти підтримка ідеальної синхронізації піднесучих частот буде більш важливою, оскільки невеликий дрейф або зміщення призведе до порушення ортогональності піднесучих частот, що призведе до збільшення ISI і BER [6].

OFDM також чутлива до доплерівських зсувів, які спричиняють зміщення піднесучих частот. Вплив стає сильнішим, коли швидкість транспортного засобу збільшується, що призводить до збільшення зсуву. Як наслідок, технологія OFDM наразі не використовується у високошвидкісних автомобільних системах.

1.4 Модель системи методу частотного мультиплексування з безліччю несучих (FBMC – Filter Bank Multi-Carrier)

FBMC отримав потенційний виграш у мережах 5G порівняно з обмеженнями OFDM. Основними критеріями використання є висока спектральна ефективність і суворі обмеження на синхронізацію.

Система FBMC побудована на основі невеликої модифікації загальної системи OFDM. Кожна з різних піднесучих фільтрується для зменшення бічних пелюсток, які зменшують завади, що, в свою чергу, зменшує OOBE. Немає необхідності додавати CP, що збільшує досягнення високої швидкості передачі даних. FBMC і OFDM мають однакову щільність символів, але CP не використовується. Він працює за принципом спочатку проектування ПФ з p(t)=p(-t). Він є ортогональним за своєю природою для частоти і часового інтервалу, де часовий інтервал задається як $T=T_0$, а частотний інтервал задається як $F=2/T_0$. Ермітова ПФ для FBMC має вигляд:

$$p(t) = \frac{1}{\sqrt{T_0}} e^{-2\pi(\frac{t}{T_0})^2} \sum_{t=\{0,4,8,12,16,20\}} \alpha_l H_l(2\sqrt{\pi}\frac{t}{T_0}) \tag{1.5}$$

$$p(t) = \begin{cases} \frac{1+2\sum_{l=1}^{O-1} b_l \cos\left(\frac{2\pi l}{OT_0}\right)}{O\sqrt{T_0}} & if -\frac{OT_0}{2} < t < \frac{OT_0}{2} \\ 0 & Otherwise \end{cases} \tag{1.6}$$

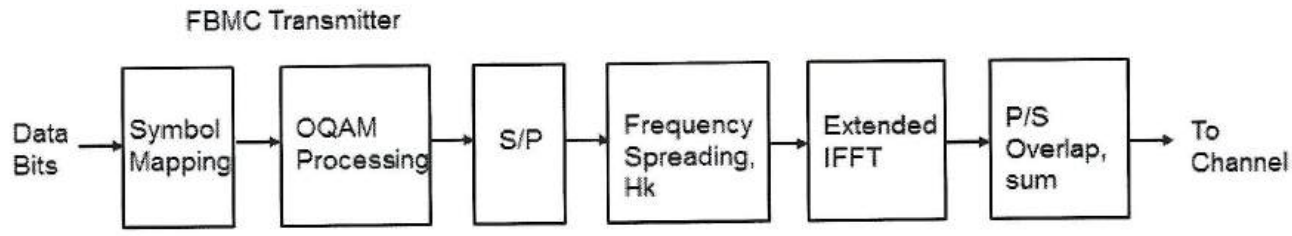
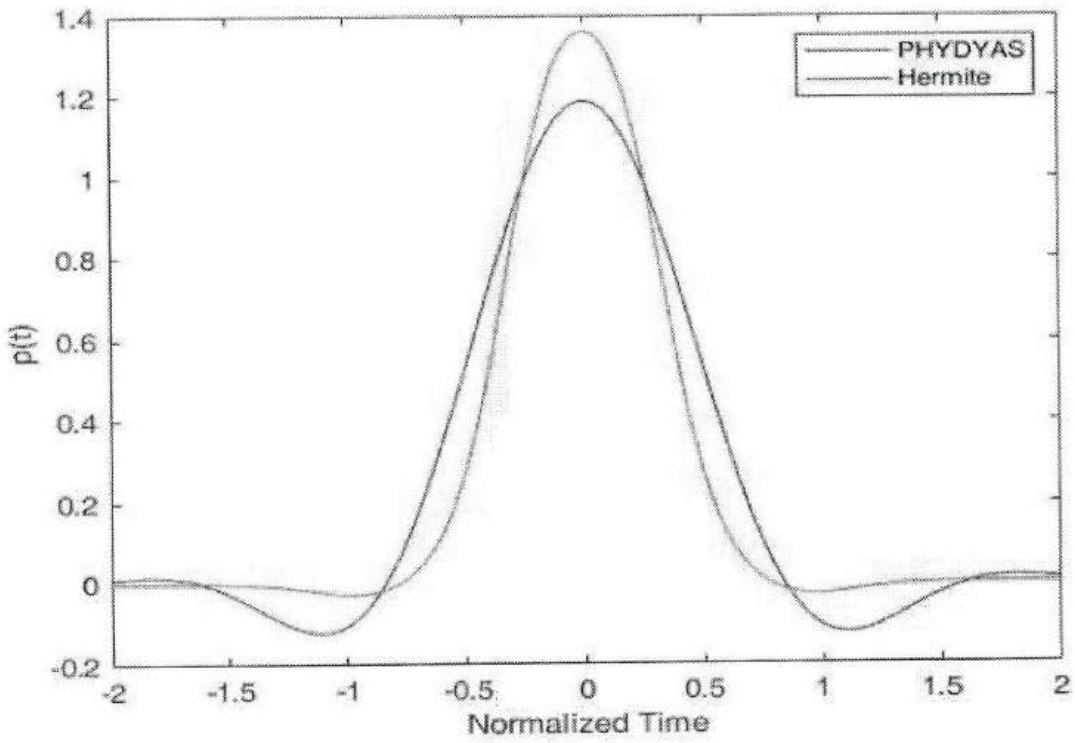
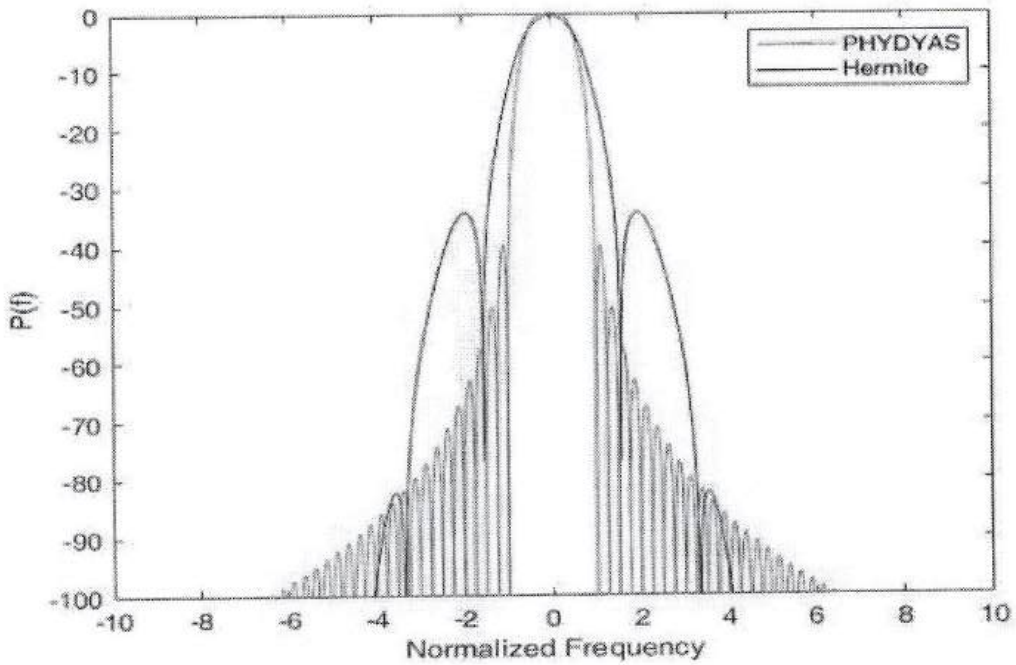


Рис. 1.7 Трансмітер частотного мультиплексування з безліччю несучих

Втрата комплексної ортогональності є обмеженням у FBMC. Фільтр Hermite PF і фільтр PHYDYAS PF з їх представлення у часовій та частотній областях показано на Рисунку 1.8:



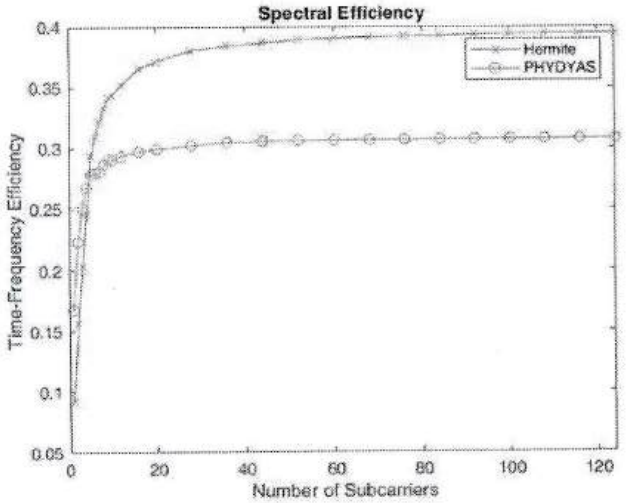
(a)



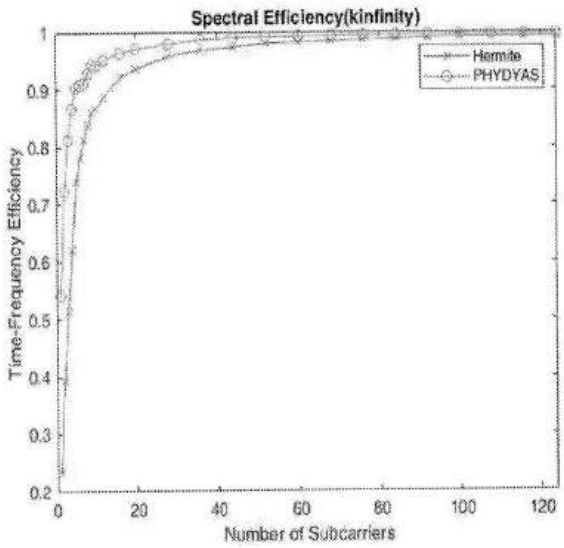
(b)

Рис. 1.8 Прототип фільтра для FBMC (a). Проміжок у часовій області (b). Проміжок у частотній області

Спектральна ефективність фільтра Герміта та фільтра PHYDYAS показана на Рисунку 1.9. Спектральна ефективність фільтра Герміта хороша, коли відстань між піднесучими приймається нормальним значенням, якщо ж відстань між піднесучими вважається нескінченною, то спектральна ефективність піднесучих вважається нескінченною, то спектральна ефективність фільтра PHYDYAS є кращою порівняно з фільтром Герміта.



(a)



(b)

Рис. 1.9 Спектральна ефективність фільтрів Герміта та PHYDYAS. (a) K = мінімальна. (b) K = нескінченна

1.5 Огляд методів частотного мультиплексування з безліччю несучих та маніпуляція з мінімальним зрушенням QAM

Методи зв'язку FBMC були вперше розроблені в середині 1960-х років. Чанг представив умови, необхідні для передачі паралельного набору послідовностей символів PAM через банк фільтрів, що перекриваються, в межах мінімальної смуги пропускання. Для ефективного використання смуги пропускання Чанг запропонував сигналізацію рудиментарної бічної смуги (VSB) для піднесучих послідовностей. Зальцберг розвинув цю ідею і показав, як метод Чанга можна модифікувати для передачі символів QAM у форматі з подвійною бічною смугою (DSB – Double Sideband) модуляції. Для того, щоб зберегти ефективність використання смуги пропускання цього методу подібною до ефективності сигналізації Чанга, Зальцберг зазначив, що синфазна і квадратурна складові кожного QAM-символу повинні бути рознесені в часі на половину символьного інтервалу. Ефективна цифрова реалізація системи Зальцберга з багатьма несучими за допомогою поліфазних структур була вперше представлена Беллангером і Дагетом, а пізніше досліджена Хіросакі. Ще одна ключова розробка з'явилася в роботі, де автори відзначили, що метод Чанга/Зальцберга може бути застосований для узгодження канальних варіацій в каналах з подвійною дисперсією і, отже, мінімізації міжсимвольної інтерференції (minimize intersymbol interference - ISI) і міжпіднесучих інтерференції (intercarrier interference - ICI) [7].

Метод Зальцберга отримав широку увагу в літературі і отримав різні назви. Більшість авторів використовують назву (Offset QAM - OQAM), щоб відобразити той факт, що синфазна і квадратурна складові передаються зі зсувом у часі відносно одна одної. Крім того, щоб підкреслити особливість методу, пов'язану з багатопроменевою несучою, було додано суфікс OFDM, звідси і назва OQAM-OFDM. Інші вважають за краще називати його (Staggered QAM - SQAM), що еквівалентно SQAM-OFDM. Ми ж ввели коротшу назву (Staggered Multitone - SMT) [8].

Метод Чанга, з іншого боку, отримав дуже обмежену увагу. Ті, хто його цитував, лише визнавали його існування, не надаючи, наприклад, багато деталей. Зокрема, Хіросакі, який детально вивчав і розробляв цифрові структури для реалізації методу Зальцберга, зробив коротку згадку про метод Чанга і зазначив, що оскільки він використовує VSB-модуляцію, а отже, його реалізація вимагає гільбертового перетворення, то він складніший у реалізації, ніж метод Зальцберга. Це твердження є неточним, оскільки, як ми продемонстрували, методи Чанга і Зальцберга є еквівалентними і, таким чином, з невеликою модифікацією, реалізація одного з них може бути застосована до іншого. Детальніше про це йдеться у Розділі 5. Також, як зазначалося раніше, у великій літературі з цифрової обробки сигналів вивчався клас систем з багатьма несучими, який було названо DWMT [9]. Пізніше було зазначено, що DWMT використовує ті ж самі банки фільтрів аналізу і синтезу, що й банки косинусоїдальних фільтрів (CMFB). CMFB, з іншого боку, можна розглядати як переосмислення методу Чанга, але для зовсім іншого застосування. Ми також ввели коротшу назву косинусно-модульований багатотональний фільтр (cosine modulated multitone - CMT) для заміни DWMT та/або CMFB.

Ще одним цікавим спостереженням є те, що в літературі з'явився ще один клас банків фільтрів, які були названі модифікованими банками фільтрів DFT (MDFT). Ретельне вивчення MDFT показує, що він, хоча і був отриманий незалежно, насправді є переформулюванням банку фільтрів Зальцберга в дискретному часі і з акцентом на стисненні/кодуванні. Література про MDFT починається з піонерських робіт Фліге і пізніше була розширена, наприклад, іншими авторами [10].

Нарешті, перед тим, як перейти до решти нашої презентації, слід повторити, що ми виділили три типи систем FBMC: (1) CMT: побудовані на основі оригінальної ідеї Чанга; (2) SMT: побудовані на основі розширення, зробленого Зальцбергом; і (3) FMT: побудовані на основі традиційного методу мультиплексування з частотним розділенням каналів (FDM).

Можливість бітової помилки при модуляції QAM

Для прямокутної сукупності, гаусового каналу та прийому за допомогою узгоджених фільтрів, ймовірність появи бітової помилки виражається наступним чином.

$$P_B = \frac{2(1-L^{-1})}{\log_2 L} Q\left[\sqrt{\left(\frac{3\log_2 L}{L^2-1}\right)\frac{2E_b}{N_0}}\right] \tag{1.7}$$

Тут Q(x) визначено у формулі (1.7), а L являє кількість рівнів амплітуди в одному вимірі.

Передбачається, що при відображенні послідовності log2 L біт L-арний символ використовується код Грея.

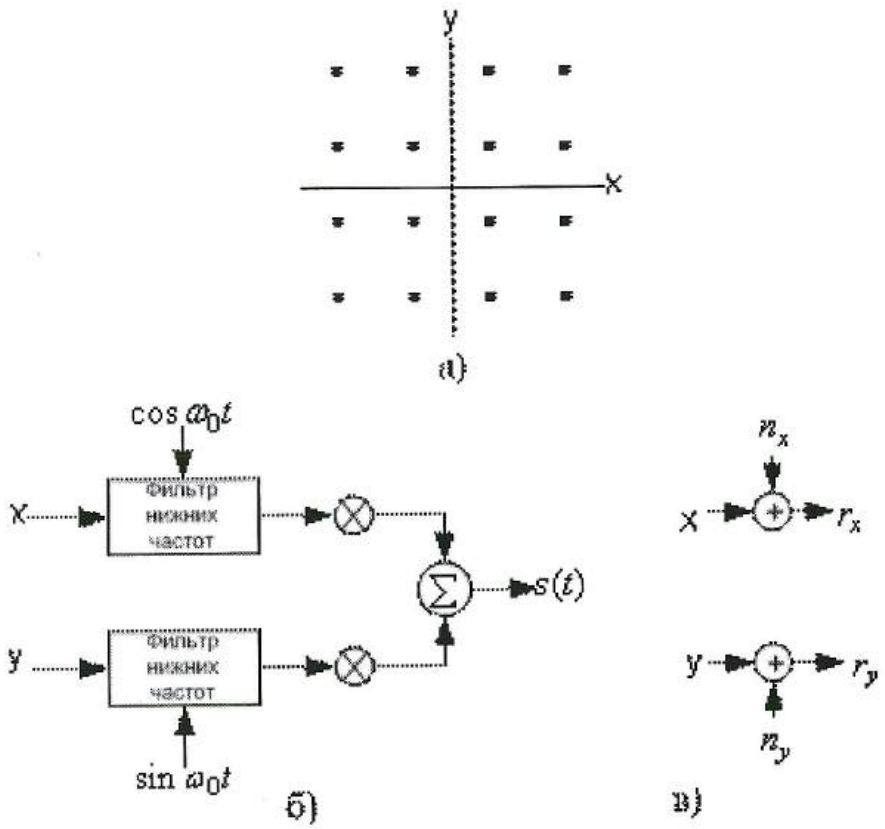


Рис. 1.10 Схема модуляції QAM: а) 16-річний простір сигналів; б) канонічний модулятор QAM; в) модель каналу QAM

Компроміс між смугою пропускання та потужністю

На Рис. 1.10 представлена площина ефективності використання смуги частот, на якій показаний компроміс між смугою пропускання та потужністю при L-арної модуляції QAM, якщо ймовірність бітової помилки дорівнює 10-5, а значення на осі абсцис вимірюються в середньому Eb/N0. Передбачається, що немодульовані імпульси фільтруються по Найквісту, отже двостороння смуга пропускання на проміжній частоті (Intermediate Frequency — IF) дорівнює WIF =1/T, де T — тривалість передачі символу. Отже, ефективність використання лінії частот дорівнює R/W= log2 M, де M — розмір набору символів. Для реальних каналів і сигналів достовірність передачі нижче зазначеної, оскільки реалізації реальних фільтрів потрібна велика смуга пропускання. З рис. 1.8 видно, що QAM це метод зниження вимог до смуги пропускання при передачі цифрових даних. Як і при M-арній PSK, за рахунок зниження ефективності використання смуги частот можна отримати виграш у потужності або Eb/N0; проте при QAM можна реалізувати більш вигідний компроміс, ніж при M-арної PSK.

Нехай потік даних зі швидкістю R=144 Мбіт/с передається радіочастотним каналом з використанням двосмугової схеми модуляції. Передбачається фільтрація по Найквісту та наявність двосторонньої смуги 36 МГц. Яку модуляцію варто вибрати за цих вимог? Якщо доступне Eb/N0, дорівнює 20, якою буде можливість бітової помилки?

Рішення:

Напишемо потрібну спектральну ефективність.

$$\frac{R}{W} = \frac{144 Мбит/с}{36 МГц} = 4 бит/с/Гц \tag{1.8}$$

16-річна QAM з теоретичною спектральною ефективністю 4 біт/с/Гц вимагає нижчого значення Eb|N0, ніж 16-арна PSK. Тому вибираємо модем QAM.

Вважаючи Eb|N0 рівним 20 і використовуючи формулу (1.9), обчислюємо очікувану можливість бітової помилки [11].

$$P_B = \frac{3}{4} Q\left(\sqrt{\frac{4 E_b}{5 N_0}}\right) = 2{,}5 \times 10^{-5} \tag{1.9}$$

2 П'ЯТЕ ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ MIMO ТА MASSIVE MIMO.

5G - це п'яте покоління бездротової технології стільникового зв'язку, що пропонує вищі швидкості завантаження і вивантаження, більш стабільне з'єднання і кращу пропускну здатність, ніж попередні мережі. 5G набагато швидший і надійніший, ніж популярні нині мережі 4G, і має потенціал змінити спосіб, у який ми використовуємо інтернет для доступу до додатків, соціальних мереж та інформації. Наприклад, такі технології, як безпілотні автомобілі, сучасні ігрові програми та потокове мультимедійне мовлення, які потребують дуже надійного і швидкісного з'єднання, отримають значну вигоду від зв'язку 5G.

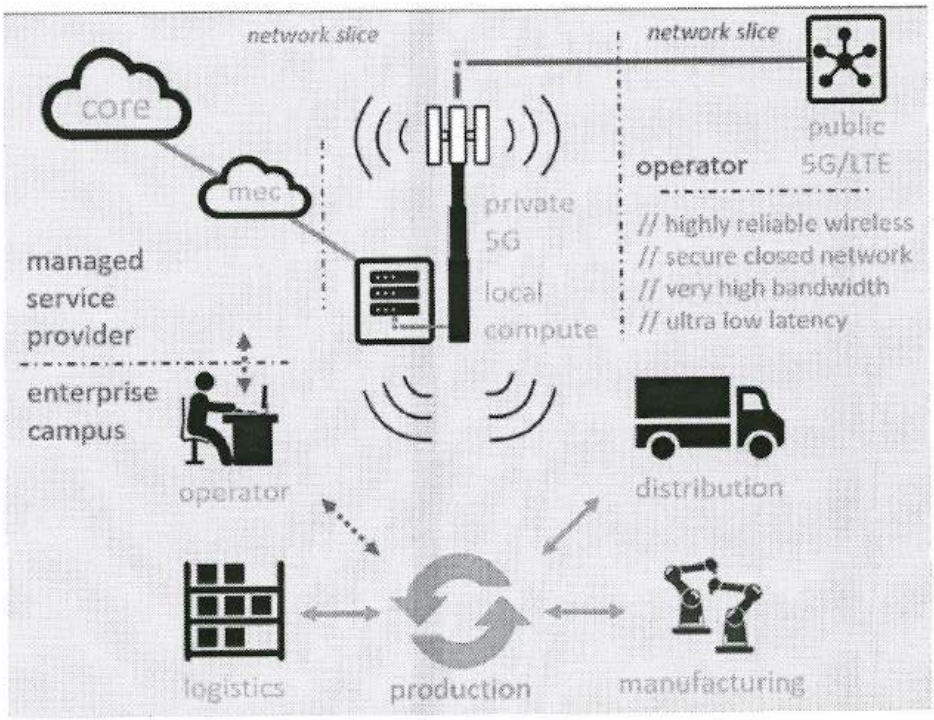


Рис. 2.1 Можливості п'ятого покоління

Мережі 5G можуть додати велику цінність технологіям у сфері охорони здоров'я. Наприклад, низька затримка дозволить обмінюватися інформацією в режимі реального часу за допомогою відео високої чіткості, що потенційно зробить віддалену хірургію більш звичним явищем. Прогнозується, що носимі та

ковтальні пристрої також стануть більш поширеними і надаватимуть медичним працівникам дані зворотного зв'язку. Моніторинг у реальному часі призведе до все більш персоналізованої медичної допомоги пацієнтам і допоможе лікарям раніше виявляти ознаки захворювань [12].

Існує потенціал для того, щоб 5G допоміг зменшити глобальні викиди. Однією з переваг 5G є ефективність передачі даних і низьке енергоспоживання порівняно з попередніми мережами. Він також підтримуватиме моніторинг викидів, якості повітря, води та інших екологічних показників у режимі реального часу. 5G також сприятиме розвитку електромобілів, "розумних" будівель, проектів "розумних" електромереж і віддаленої роботи - все це принесе користь планеті завдяки ефективному використанню ресурсів і зменшенню забруднення.

У чому переваги 5G?

Незважаючи на те, що недоліки 5G очевидні, якщо врахувати, наскільки легко можна заблокувати мм-хвилі, або менш очевидні, якщо врахувати обмеження радіочастотного (РЧ) впливу, 5G все ще має багато гідних переваг, таких як наступні:

- використання більш високих частот;
- висока пропускна здатність;
- розширений мобільний широкосмуговий зв'язок;
- менша затримка на 5 мс;
- вища швидкість передачі даних, що дозволить використовувати нові технологічні можливості в мережах 5G, такі як потокове передавання 4K або потокове передавання віртуальної реальності (VR) в режимі, близькому до реального часу; потенціал мобільної мережі 5G, що складається з низько-, середньо- і міліметрового діапазонів частот.

5G базується на OFDM (ортогональному мультиплексуванні з частотним розділенням каналів) - методі модуляції цифрового сигналу по декількох різних каналах для зменшення перешкод. 5G використовує повітряний інтерфейс 5G NR

поряд з принципами OFDM. 5G також використовує технології з більш широкою смугою пропускання, такі як суб-6 ГГц і mmWave. Як і 4G LTE, 5G OFDM працює на основі тих самих принципів побудови мобільних мереж. Однак новий повітряний інтерфейс 5G NR може ще більше вдосконалити OFDM, щоб забезпечити набагато вищий рівень гнучкості і масштабованості. Це може забезпечити доступ до 5G більшій кількості людей і речей для різноманітних сценаріїв використання. 5G забезпечить більш широку смугу пропускання завдяки розширенню використання спектральних ресурсів - від діапазону до 3 ГГц, що використовується в 4G, до 100 ГГц і вище. 5G може працювати як у нижніх діапазонах (наприклад, до 6 ГГц), так і в мм-хвилях (наприклад, 24 ГГц і вище), що забезпечить надзвичайну ємність, пропускну здатність у кілька Гбіт/с і низьку затримку. 5G не тільки забезпечує швидший і якісніший мобільний широкосмуговий зв'язок порівняно з 4G LTE, але й може поширюватися на нові сфери послуг, такі як критично важливий зв'язок і підключення масового Інтернету речей (IoT). Це стало можливим завдяки багатьом новим методам проектування повітряного інтерфейсу 5G NR, таким як новий автономний дизайн підкадру TDD.

Окрім використання 5G для голосового зв'язку, технологія підтримує розширені функції Інтернету речей. Наприклад, 5G уможливлює більш складні технології "розумного дому", включаючи замки, освітлення та побутову техніку; більш досконалі "розумні" медичні пристрої, такі як монітори рівня цукру в крові та артеріального тиску; а також покращує досвід роздрібної торгівлі, сприяючи таким новинкам, як віртуальні демонстрації продуктів і "фігітальні" покупки (поєднання простоти онлайн-покупок з досвідом відвідування магазину) [13].

Технологія 5G потенційно може покращити кожну сферу діяльності. Наприклад, містобудівники, які створюють розумні міста, можуть перейти від магнітних петель, вбудованих у дороги для виявлення транспортних засобів (і запуску світлофорів і відкриття воріт), до більш ефективних і економічно вигідних бездротових камер, оснащених штучним інтелектом. Муніципальний вивіз сміття може працювати на вимогу, концентруючись на ключових сміттєвих

зонах і в оптимальний час, замість того, щоб працювати за розкладом, відірваним від потреб у реальному часі. Недорогі підключені датчики можуть дозволити фермерам дистанційно (і частіше) контролювати воду і поживні речовини в ґрунті, а архітектори та інженери можуть більш ефективно переглядати інформацію про інфраструктурні системи і операції, і все це дистанційно на своїх смартфонах або планшетах; вони навіть можуть брати участь у будівництві та обслуговуванні будівель в режимі реального часу за допомогою програмного забезпечення доповненої реальності. 5G може уможливити і покращити дистанційне навчання працівників, особливо в галузях, де існує катастрофічний дефіцит працівників, який виникає внаслідок частої плинності кадрів і тривалих періодів навчання, як це часто буває в надзвичайних ситуаціях і медицині. Віртуальна реальність, наприклад, сьогодні широко використовується при підготовці пожежників, а фахівці екстреної медичної допомоги (ЕМД) можуть не тільки підтримувати кращий зв'язок з колл-центрами 911 і відділеннями швидкої допомоги, а й отримувати більш ефективне і результативне інтерактивне навчання на своїх персональних телефонах і планшетах за допомогою ультрареалістичних симуляцій екстрених ситуацій, і все це завдяки високошвидкісній технології 5G з низькою затримкою [14].

5G породив різноманітні побоювання щодо здоров'я та теорії змови. Одна з поширених думок полягає в тому, що електромагнітні промені, які випромінює технологія, можуть викликати рак, опіки, безпліддя, пухлини серця та хворобу Альцгеймера. Але наукові дані не підтверджують таких тверджень. Крім того, "неіонізуючі" радіочастотні (РЧ) хвилі, що передаються мобільними телефонами, не мають такої сили, як "іонізуюче" випромінювання (наприклад, рентгенівські, гамма- та деякі ультрафіолетові промені), яке може викликати рак; до того ж, рівень впливу РЧ від мобільних телефонів є дуже низьким. Деякі спостерігачі, однак, вважають, що необхідно провести більше досліджень щодо можливих побічних ефектів цієї технології [15]. Відповідно, сотні вчених і лікарів звернулися до Європейського Союзу з проханням ввести мораторій на розгортання 5G до проведення подальших досліджень.

Широко розповсюджена теорія змови, пов'язана з 5G, з'явилася під час пандемії COVID-19. Оскільки і 5G, і SARS-CoV-2, вірус, який викликає COVID-19, з'явилися приблизно в один і той же час (у 2019 році), деякі спостерігачі припустили зв'язок між технологією та поширенням хвороби. Однак, як вірус, SARS-CoV-2 не може бути створений або поширюватися за допомогою радіохвиль та електромагнітних полів, а також не може завдати шкоди людському імунітету і зробити людей сприйнятливими до хвороби. Тим не менш, радикально налаштовані прихильники цієї теорії підпалили сотні веж мобільного зв'язку у 2020 році на знак протесту проти нової технології.

2.1 5G і 4G: Ключові відмінності

Кожне покоління стільникових технологій відрізняється швидкістю передачі даних і методами кодування, що вимагає від кінцевих користувачів модернізації обладнання. 4G може підтримувати швидкість до 2 Гбіт/с і повільно продовжує вдосконалюватися. Швидкість 4G у 500 разів вища, ніж у 3G. 5G може бути в 100 разів швидшим за 4G.

Однією з головних відмінностей між 4G і 5G є рівень затримок, який у 5G буде набагато меншим. 5G буде використовувати кодування з ортогональним частотним мультиплексуванням (OFDM), подібно до 4G LTE. 4G, однак, використовуватиме канали 20 МГц, об'єднані між собою на частоті 160 МГц. 5G матиме від 100 до 800 МГц каналів, що вимагає більших блоків ефіру, ніж 4G.

Новий тип мобільної мережі не був би новим, якби він не відрізнявся від існуючих у чомусь докорінно. Однією з основних відмінностей є використання 5G унікальних радіочастот для досягнення того, що не під силу мережам 4G.

Радіочастотний спектр розбитий на смуги, кожна з яких має унікальні особливості в міру переходу на більш високі частоти. 4G використовує частоти нижче 6 ГГц, тоді як деякі мережі 5G використовують більш високі частоти, наприклад, близько 30 ГГц або більше [16].

Ці високі частоти є чудовими з багатьох причин, однією з найважливіших з яких є те, що вони підтримують величезну пропускну здатність для швидкої передачі даних. Вони не тільки менш перевантажені існуючими стільниковими даними і можуть бути використані в майбутньому для збільшення пропускної здатності, вони також мають високу спрямованість і можуть використовуватися поруч з іншими бездротовими сигналами, не створюючи перешкод.

Це дуже відрізняється від веж 4G, які випромінюють дані в усіх напрямках, потенційно витрачаючи енергію і потужність на випромінювання радіохвиль у місцях, які навіть не потребують доступу до інтернету.

5G також використовує коротші довжини хвиль, а це означає, що антени можуть бути набагато меншими, ніж існуючі, але при цьому забезпечувати точне

керування напрямком. Оскільки одна базова станція може використовувати ще більше спрямованих антен, це означає, що 5G може підтримувати на 1 000 пристроїв на метр більше, ніж 4G.

Все це означає, що мережі 5G можуть передавати надшвидкісні дані набагато більшій кількості користувачів з високою точністю і малою затримкою.

Однак більшість цих надвисоких частот працюють лише за умови чіткої прямої видимості між антеною і пристроєм, що приймає сигнал. Крім того, деякі з цих високих частот легко поглинаються вологою, дощем та іншими об'єктами, а це означає, що вони не поширюються на велику відстань [17].

Саме з цих причин потужне з'єднання 5G прямо там, де ви знаходитесь, може знизитися до швидкості 4G, коли ви пройдете всього кілька футів від нього. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання стратегічно розміщених антен, або крихітних у певних кімнатах чи будівлях, які їх потребують, або великих, розташованих по всьому місту.

Оскільки 5G розширюється, виникає потреба у великій кількості ретрансляційних станцій, які поширюють радіохвилі якнайдалі, щоб забезпечити підтримку 5G на великій відстані.

Ще одна відмінність між 5G і 4G полягає в тому, що новіші мережі легше розуміють тип запитуваних даних і здатні перемикатися в режим меншої потужності, коли вони не використовуються або коли подають низьку швидкість на певні пристрої, але потім перемикаються в режим більшої потужності для таких речей, як потокове відео високої чіткості. Насправді, згідно з деякими дослідженнями, 5G на 90% енергоефективніший за старіші мережі, такі як 4G.

Пропускна здатність - це обсяг даних, який може бути переданий (завантажений або викачаний) через мережу за певний проміжок часу. Це означає, що в ідеальних умовах, коли інших пристроїв або перешкод, які впливають на швидкість, дуже мало, пристрій теоретично може працювати на так званій піковій швидкості [18].

З точки зору пікової швидкості, 5G у 20 разів швидший за 4G. Це означає, що за час, необхідний для завантаження одного фрагмента даних за допомогою

4G (наприклад, фільму), той самий фрагмент можна було б завантажити 20 разів через мережу 5G. Якщо поглянути на це по-іншому: ви могли б завантажити близько 10 фільмів, перш ніж 4G змогла б доставити навіть першу половину одного з них!

5G має мінімальну пікову швидкість завантаження 20 Гбіт/с, тоді як 4G - лише 1 Гбіт/с. Ці цифри стосуються пристроїв, які не рухаються, як у випадку фіксованого бездротового доступу (FWA), де є пряме бездротове з'єднання між стільниковою вишкою та пристроєм користувача. Швидкість змінюється, як тільки ви починаєте рухатися, наприклад, в автомобілі або поїзді [19].

Однак, зазвичай ці швидкості не називають "нормальними", оскільки на пропускну здатність впливає багато факторів. Натомість важливіше звернути увагу на реалістичні швидкості, або середню виміряну пропускну здатність.

Покриття 5G постійно зростає, але більшість людей, ймовірно, все ще не мають доступу на рівні 5G постійно, тому несправедливо коментувати неодноразовий реальний досвід. Тим не менш, деякі звіти показують, що щоденна швидкість завантаження становить щонайменше 100 Мбіт/с (домашня послуга 5G від Verizon доставляє дані зі швидкістю від 300 Мбіт/с до 1 Гбіт/с).

2.2 Ефективність застосування MIMO-RF технології з поляризаційною маніпуляцією

Різні види поляризованих електромагнітних хвиль і зміна їх стану поляризації отримують додаванням горизонтальних та вертикальних компонентів поля двох лінійно поляризованих хвиль, що відрізняються один від одного площинами поляризації та фазами коливань, але розповсюджуються в одному напрямку. У випадку, якщо лінійно поляризовані за напрямками ОУ та ОХ хвилі (тобто ортогонально поляризовані складові) мають однакові амплітуди та збігаються по фазі, то результуюча хвиля також лінійно поляризована у напрямку з орієнтацією під кутом 45 град. Якщо амплітуди рівні, а зрушення фаз становить π, то результуюча хвиля є лінійно поляризованою та має орієнтаційний кут – 45 град. Коли амплітуди ортогональних складових не дорівнюють і при фазовому зрушенні $\Delta\varphi=n\pi$ (n=0, 1, 2…) результуюча хвиля буде лінійно поляризованою з азимутом β=arctg(E_x/E_y).

Для підвищення спектральної ефективності систем радіопередачі використовується технологія MIMO з одним радіочастотним сигналом для масиву передаючих антен із просторовою поляризаційною модуляцією. У такому випадку спектральна ефективність мультиплексування, 1 біт на використання каналу:

$$R = \log_2 P, \text{ bpcu}, \tag{2.1}$$

bpcu - кількість бітів за кожне використання каналу (англ. bits per channel use). P – число станів поляризації (лінійні, кругові, еліптичні), P $\{x_0, x_1, \cdots, x_{P-1}\}$ із середньою потужністю на 1 символ $E[|x_p|^2] = 1$ [20].

Схему модуляції з узагальненою поляризаційною маніпуляцією (PolarSK, англ. Polarization Shift Keying), яка використовує стани поляризації в передавальній антенній решітці з подвійною поляризацією як один біт

інформації для підвищення загальної спектральної ефективності, представлена на рис.2.2.

Математичний аналіз стану поляризації зазвичай здійснюється векторами

$$\text{Джонса: } x_p = \begin{bmatrix} x_{p,V} \\ x_{p,H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_p \exp\left(j\varphi_{p,V}\right) \\ \sin\varepsilon_p \exp\left(j\varphi_{p,H}\right) \end{bmatrix}, \tag{2.2}$$

де p = 0, 1, 2, ..., P-1 є індексом стану поляризації, x_p, $\varphi_{p,V}$ та $\varphi_{p,H}$ - параметри поляризації, що визначають поляризовані стани сигналу (передавальні антени з вертикальною V та горизонтальною H поляризацією відповідно), ε_p позначає кут поляризації.

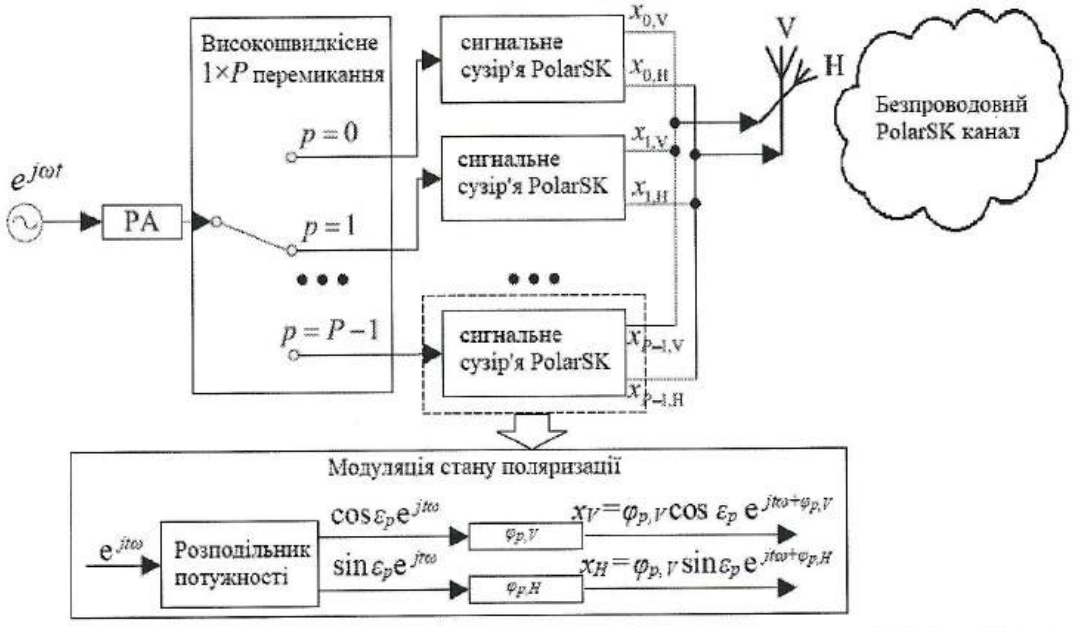


Рис. 2.2 Схема MIMO-RF передавальної одночастотної PolarSK антенної решітки.

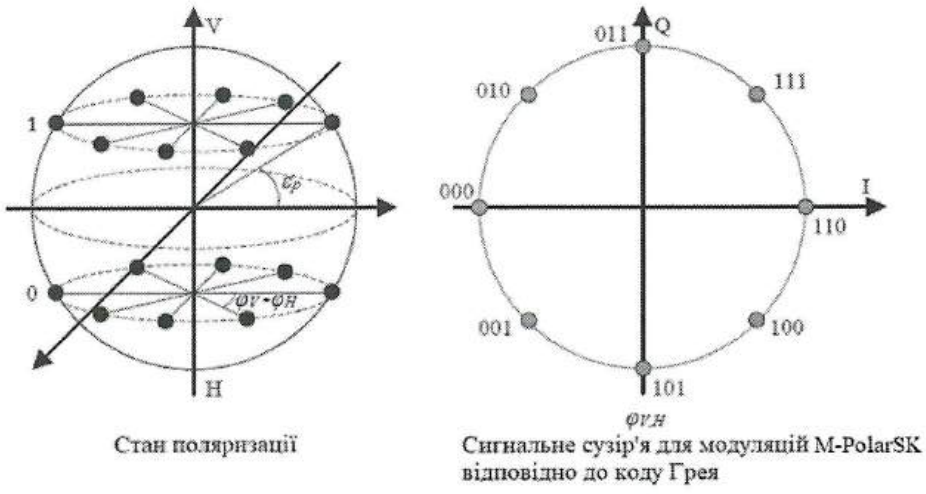
У блоці PolarSK інформаційні біти відображаються на індекси різних станів поляризації (лінійні, кругові, еліптичні) в одній антені з подвійною поляризацією

Якщо використовувати схему PolarSK як $\varphi_{p,V} = \frac{2\pi q_V}{M}$, $\varphi_{p,H} = \frac{2\pi q_H}{M}$, де q_V, q_H = 1, 2, ...,M - фазові індекси сигналів, що передаються вертикальною і горизонтальною передавальними антенами, M - порядок модуляції. Тоді стан поляризації можна описати:

$$x_k = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_k \exp\left(j\frac{2\pi q_V}{M}\right) \\ \sin\varepsilon_k \exp\left(j\frac{2\pi q_H}{M}\right) \end{bmatrix}, \tag{2.3}$$

k = 1, 2, ...,K — номер(число) ε_p.

На Рис. 2.3 представлено приклад сигнального сузір'я PolarSK.



Стан поляризації

Сигнальне сузір'я для модуляцій M-PolarSK відповідно до коду Грея

Рис. 2.3 Сузір'я сигнальних точок для схем модуляції PolarSK.

У відповідності з (2.3)-(2.5) кількість бітів за кожне використання каналу можна виразити:

$$R = \log_2(M^2K), \text{ bpcu.} \tag{2.4}$$

Не кожна радіочастотна система може використовувати ці три технології. Однак, взяті окремо або об'єднані в комплексне рішення, всі три методи передачі MIMO покращують продуктивність, що виходить за рамки можливостей однієї антенної системи: Контроль траєкторії і фокусування в обмеженому просторі за допомогою керування променем дозволяє розгортання радіочастотного зв'язку високої щільності, як це планується в 5G, стати реальністю. Просторове мультиплексування дозволить збільшити швидкість передачі даних в обмеженому просторі, якщо канали зможуть підтримувати подібне співвідношення сигнал/шум [21]. Диверсифікація ідеально підходить для забезпечення того, щоб важливі дані не втрачалися при передачі через зашумлений канал, особливо коли пропускна здатність не настільки обмежена.

У сукупності ці технології MIMO дозволяють збільшити дальність сигналу, зменшити кількість бітових помилок, знизити енергоспоживання, зменшити рівень завад і навіть покращити зв'язок за межами прямої видимості (NLOS) або квазі-NLOS. Таким чином, надані переваги швидко переважають будь-які недоліки, пов'язані з початковою вартістю або складністю проектування, особливо в умовах, коли 5G починає переосмислювати бездротову технологію для підтримки підвищеного підключення пристроїв і швидкості передачі даних. Системи MIMO стануть домінуючою архітектурою радіочастотної передачі в додатках, що вимагають високої швидкості передачі даних, екстремальної якості обслуговування (QoS), високої щільності і збільшеного радіусу дії [22].

2.3 Спектр 5G

Ключовими технологіями для реалізації є метод MIMO (множинні входи, множинні виходи), NOMA (неортогональний множинний доступ), міліметровий діапазон (ММД) хвиль. Домени потужності NOMA, задіяні в MIMO, формуванні променя, просторово-часовому кодуванні. Спектр 5G охоплює не тільки діапазони нижче 6 ГГц, до яких входять діапазони, що використовуються в даний час мереж 4G LTE, але також поширюється на набагато вищі частотні діапазони, які раніше не розглядалися для мобільного зв'язку. Саме використання смуг частот у діапазоні від 24 ГГц до 100 ГГц створює нові проблеми та переваги для мереж 5G. Хоча спектр міліметрових діапазонів (ММД) хвиль простягається до 300 ГГц, очікується, що для 5G використовуватимуться діапазони від 24 ГГц до 100 ГГц. Системи міліметрових діапазонів до 100 ГГц здатні підтримувати ширину каналів до 2 ГГц без необхідності агрегувати смуги разом для підвищення пропускної здатності даних [23].

Завдяки технічному прогресу в області супутникових технологій реалізуються на дані моменти проекти низькоорбітальних систем, які в даний час розробляються, і на основі яких передбачається реалізація мобільних систем наступних поколінь. У нових супутникових проектах передбачається використання ММД та оптичного спектра ОС. Використання ОС і ММД в космосі має ще більший потенціал у порівнянні з наземними системами, так як відсутність фізичної середовища поглинання сигналу дозволить отримати високу швидкість передачі інформації [24]. Однак для оптичного бездротового наземного каналу властиве сильне поглинання (розсіювання) в гідрометеорах та вплив турбулентності на мерехтіння каналу. Для ММД, зокрема в діапазоні від 100 ГГц, поки не створено малогабаритні технології, що випромінюють малошумові потужні сигнали на достатньо велику відстань. Також канали в ОС і ММД поширюються тільки в межах прямої видимості. Гібридне застосування ОС та ММД може об'єднати переваги технологій.

Massive MIMO ефективно використовує ресурси радіомережі для підвищення пропускної здатності мережі, що призводить до більшої пропускної здатності та багатокористувацької підтримки. Вона використовує техніку формування променя для фокусування потужності передачі в певних напрямках, що розширює покриття мережі, мінімізуючи при цьому перешкоди [25].

Перевага мережі MIMO над звичайною мережею полягає в тому, що вона може збільшити пропускну здатність бездротового з'єднання, не вимагаючи більше спектру. Чим більше антен має передавач/приймач, тим більше можливих шляхів проходження сигналу і тим кращі показники швидкості передачі даних і надійності з'єднання. Більша кількість антен у масивній мережі MIMO також зробить її набагато стійкішою до перешкод і навмисного глушіння, ніж сучасні системи, які використовують лише кілька антен [26].

Слід також зазначити, що мережі Massive MIMO використовуватимуть технологію формування променя, що дозволить цілеспрямовано використовувати спектр. Сучасні мобільні мережі досить тупо розподіляють єдиний пул спектру між усіма користувачами, що знаходяться поблизу, що призводить до зниження продуктивності в густонаселених районах. Завдяки Massive MIMO і формуванню променя цей процес відбувається набагато розумніше і ефективніше, тому швидкість передачі даних і затримки будуть набагато рівномірнішими по всій мережі [27].

2.4 Неортогональний множинний доступ (NOMA) для мереж 5G

У цьому розділі ми розглянемо концепцію неортогонального множинного доступу (NOMA) для майбутніх мереж 5G. Усі сучасні стільникові мережі використовують методи ортогонального множинного доступу (OMA), такі як множинний доступ з часовим поділом каналів (TDMA), множинний доступ з частотним поділом каналів (FDMA) або множинний доступ з кодовим поділом каналів (CDMA) разом. Однак жоден з цих методів не може задовольнити високі вимоги майбутніх систем радіодоступу.

Характеристики схем NOMA можна підсумувати наступним чином. У TDMA інформація для кожного користувача надсилається у часових інтервалах, що не перекриваються, тому мережі на основі TDMA потребують точної синхронізації часу, що може бути складним завданням, особливо у висхідній лінії. У реалізаціях FDMA, таких як множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA), інформація для кожного користувача призначається підмножині піднесучих. CDMA використовує коди для того, щоб розділити користувачів в одному каналі [28]. NOMA принципово відрізняється від цих схем множинного доступу, які надають користувачам ортогональний доступ у часі, частоті, коді або просторі. У NOMA кожен користувач працює в одній і тій же смузі частот і в один і той же час, де вони розрізняються за рівнем потужності. NOMA використовує суперпозиційне кодування на передавачі таким чином, що приймач з послідовним придушенням завад (SIC) може розділити користувачів як у висхідному, так і в низхідному каналах.

NOMA була запропонована як кандидатура технології радіодоступу для стільникових систем 5G. Практична реалізація NOMA в стільникових мережах вимагає високих обчислювальних потужностей для реалізації алгоритмів розподілу потужності в реальному часі та послідовного придушення завад [29].

2.5 Особливості застосування спектру ОС та ММД

Хвилі ММД, ОС мають величезний спектральний ресурс, а також застосування цих діапазонів поки що не вимагає ліцензування. Другою перевагою використання високочастотних діапазонів ММД та ОС є можливість створення дуже вузьких спрямувань антен. Так як за фізичними закономірностями формування і поширення електромагнітних хвиль зі зменшенням довжини хвилі з'являється можливість зменшення кута розкриву антени. Створення вузько направлених випромінювань для ММД в кілька градусів і навіть часткою одного градуса пов'язано з можливістю реалізації багатопроменевого поширення сигналу, що також підвищує продуктивність та енергоефективність таких систем. Розвиток технології керуванням спрямованості антенних решіток має серйозні обмеження, що притаманні електричним пристроям. Наприклад, мідні провідники мають високі втрати на високих частотах, що призводить до обмеженої смуги пропускання тракту передачі. Крім того, електричні компоненти формування променя мають відносно велику вагу, що також обмежує їх використання [30].

Оптоелектронні (фотонні) методи ефективно використовуються для формування та передачі радіосигналів міліметрового та терагерцового діапазонів, а також створення вузькоспрямованого випромінювання у фазованих антенних решітках. Методи оптичного гетеродинування та поляризаційного мультиплексування з успіхом використовуються у формуванні та передачі радіосигналів у гібридних волоконно-ефірних системах. Однак, привабливий оптичний спектральний потенціал для використання у відкритому просторі має істотні недоліки, такі як поглинання, спотворення форми сигналу, завмирання, фазові флуктуації і т. д., викликанні турбулентністю атмосфери [31].

У високочастотних областях ММД та ОС сигналів використання оптоелектронних методів є ефективним, і навіть у деяких випадках єдиним можливим способом. Оптоелектронні технології покращують масо-габаритні

характеристики та спрощують схеми діаграмоутворення, розширюють миттєву смугу обробки до 10 ГГц та вище, широкий та швидкий (в режимі реального часу) динамічний діапазон з кроком менше 125 кГц, підвищують прихованість функціювання за рахунок роботи на фоні сильних завад.

Для ОС сильно проявляється залежність від гідрометеорів, наявності диму, пилу та інших забруднень повітря. У сильний туман або снігопад загасання може досягати 60-70 дб/км. У ясних погодних умовах атмосферні турбулентності виявляються основним джерелом мерехтіння пучка [32]. Це виникає через перепади температури та тиску, що призводять до зміни показника заломлення. Незважаючи на зазначені проблеми, атмосферний лазерний зв'язок виявився цілком надійним на відстані близько 1-2 км, і коефіцієнт доступності атмосферних оптичних ліній оцінюється як 99%. Для відстаней 5-10 км і вище перевага може мати технології передачі ММД, внаслідок різних фізичних характеристик поширення сигналів ОС і ММД (Рис.1).

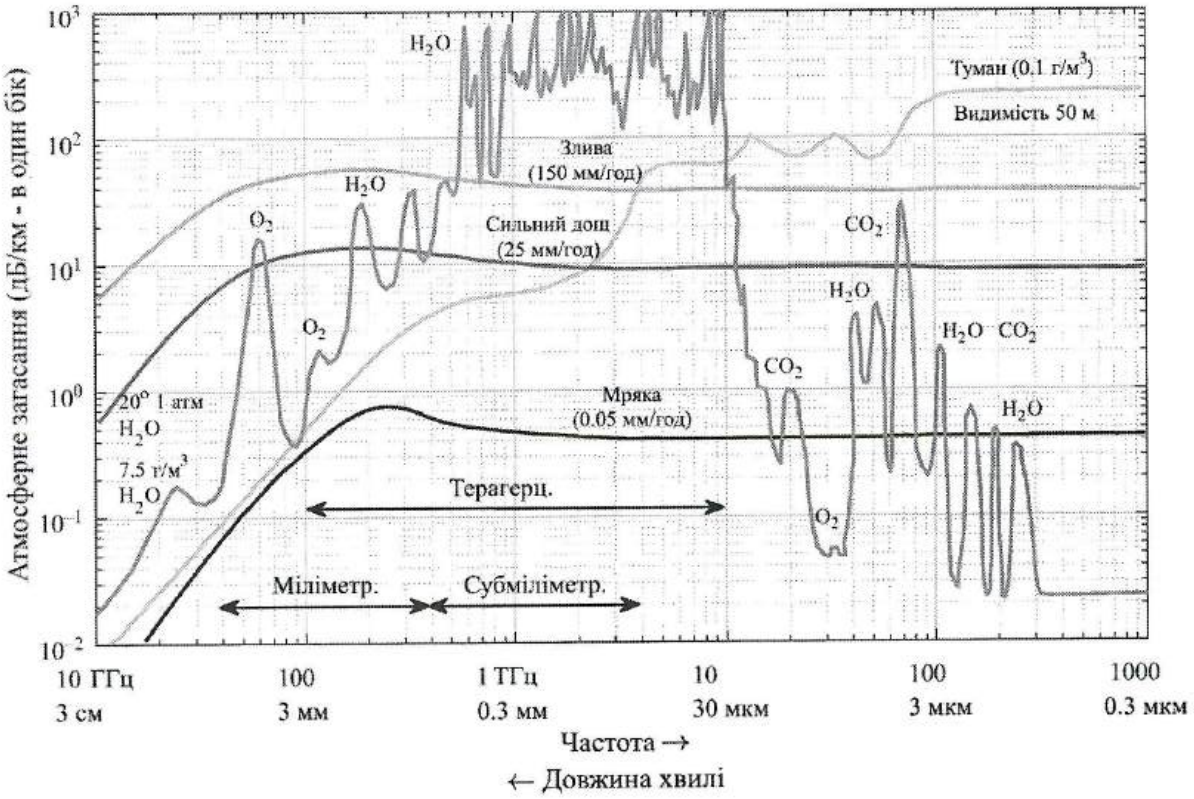


Рис. 2.4 Залежність атмосферного поглинання температури у смузі з частотами 10 ГГц – 1000 ТГц через різні фактори

2.6 Власне променеве формоутворення

Формування власного променя може здійснюватися як на стороні передачі, так і на стороні прийому. Класичне формування променя схоже на використання антени з високим коефіцієнтом підсилення, але таку, яку не потрібно переорієнтовувати, щоб спрямовувати в різні боки, а при власному формуванні променя досягається той самий коефіцієнт підсилення, але вона нечутлива до орієнтації антени або до елементів розсіювання поблизу антени. Багато хто думає про такі системи, як радіолокаційні станції з фазованою антенною решіткою, коли вводиться ідея формування променя, і дійсно, фазована антенна решітка - це метод використання декількох антенних елементів для управління спрямованістю антенного кластера в різних напрямках, формуючи передавальний або приймальний антенний "промінь" [33].

Незважаючи на те, що "фазована решітка" має, здавалося б, просунутий імідж через її використання у надзвичайно дорогих військових системах, насправді вона є простішою формою формування променя, ніж це може бути зроблено за допомогою сучасної системи MIMO. Системи з фазованими решітками виконують формування променя, використовуючи обмежені можливості фазового зсуву і комбінування сигналів в аналоговій області, що має деякі суттєві недоліки, включаючи той факт, що перевага в продуктивності погіршується зі збільшенням смуги пропускання каналу, і що вона, як правило, працює тільки в ситуаціях чистої прямої видимості (LOS) за відсутності будь-яких розсіювачів або багатопроменевих перешкод, які спричиняють значне погіршення продуктивності [34].

З іншого боку, MIMO Eigen-beamforming перетворює сигнали від усіх антен у цифрову область, де можна використовувати складну цифрову обробку сигналів (DSP). Таким чином, формування власної діаграми спрямованості може здійснюватися незалежно для кожної з вузькосмугових піднесучих системи мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM). Зокрема, системи MIMO можуть використовувати тип формування променя,

відомий як власне формування променя. Власне формування променя не обмежується формуванням простого променя в тривимірному просторі. На нього не впливають об'єкти розсіювання або багатопроменеві відбиття. Власний формувач променя, що приймає сигнал в умовах відсутності прямої видимості (NLOS) з численними віддзеркаленнями, може сформувати ефективну діаграму спрямованості антени, яка збільшує коефіцієнт підсилення в декількох напрямках, що відповідають окремим віддзеркаленням. Використовуючи цифрову обробку сигналів, системи MIMO мають можливість адаптувати ці діаграми спрямованості на пакетній основі [35].

2.7 Просторово-часове кодування

Просторово-часове кодування - це механізм, який може бути використаний для передачі через кілька антен і досягти аналогічного виграшу, як і при прийомі на кілька антен. Просторово-часове кодування означає, що дані, які зазвичай передаються з однієї антени, приймаються з використанням методу кодування обробки сигналу з метою передачі математично зміненої версії того ж інформаційного вмісту на додаткові антени таким чином, щоб підвищити здатність приймача відокремлювати дані від фонового шуму. Просторово-часове кодування може бути природною відповідністю до прийому з формуванням променя або прийому з диверсифікацією. Візьмемо, наприклад, ситуацію, коли радіостанція, встановлена на транспортному засобі, може легко мати чотири антени, тоді як невеликий портативний пристрій може бути обмежений двома або навіть однією антеною. Якщо портативний пристрій передає на одну антену, то автомобільний блок може використовувати рознесення приймача або формування променя для покращення прийому [36]. Просторово-часове кодування дає транспортному засобу можливість передавати на всі чотири антени і досягати аналогічного посилення, коли портативний пристрій обмежений однією приймальною антеною, що робить зв'язок симетричним і набагато більш корисним для двонаправленого зв'язку.

2.8 Просторове мультиплексування

Просторове мультиплексування часто є технологією, в яку людям важко повірити, не кажучи вже про те, щоб зрозуміти. Ця технологія MIMO фактично передає кілька унікальних інформаційних "потоків" з різних антен, кожен з яких працює на ідентичній центральній частоті. Приймач, який використовує принаймні стільки антен, скільки переданих потоків, може декодувати їх окремо і таким чином збільшити обсяг даних, що проходять через фіксовану смугу пропускання каналу. Система 4×4 MIMO може забезпечити чотири потоки за оптимальних умов і, таким чином, передавати в чотири рази більше даних, ніж система SISO, за тієї ж смуги пропускання каналу.

Якщо у нас є передавач, який передає чотири потоки (A, B, C і D), ці потоки зливаються в повітрі, і на кожну з чотирьох приймальних антен надходить спотворена комбінація wA+xB+yC+zD, де w, x, y і z представляють спотворення каналу, викликані багатопроменевим каналом, які змінюються на кожній антені.

Саме завдяки дуже складній цифровій обробці сигналів MIMO приймач характеризує всі ці ефекти каналу w, x, y, z, щоб відновити вихідні потоки A, B, C і D, виконуючи те, що дорівнює розв'язанню чотирьох рівнянь з чотирма невідомими, які багато хто може пам'ятати з уроків лінійної алгебри. Перевага просторового мультиплексування MIMO полягає в тому, що воно дозволяє збільшити спектральну ефективність (біт на секунду на частоту каналу) без зниження стійкості зв'язку, як при переході до сузір'їв вищого порядку. Наприклад, близько 4 біт/с/Гц можна досягти за допомогою 16-QAM з досить надійним кодуванням FEC, використовуючи два потоки [37]. Без MIMO системі довелося б використовувати 64-QAM і менш стійку швидкість кодування FEC, щоб досягти аналогічної пропускної здатності в тому ж каналі, що значно обмежило б його діапазон або вимагало б набагато більшої потужності передачі.

Всі ці технології, незалежно від того, використовуються вони окремо або в певній комбінації, забезпечують переваги, які можна виміряти в термінах меншої

необхідної потужності передачі, більшого радіусу дії, більшої завадостійкості або вищої пропускної здатності.

Технологія Massive MIMO є ключовим компонентом надшвидких мереж 5G, які зараз розгортаються.

Якщо ви знайомі зі стандартним MIMO в мережах 4G LTE, то прикметник "масивний" може наштовхнути вас на думку лише про одне - це дійсно великий MIMO. Хоча немає конкретного визначення того, що саме означає "масивний" у масивному MIMO, технологія MIMO в мережах 5G New Radio (NR) використовує набагато більші антенні решітки, ніж у мережах 4G LTE.

Технологія MIMO не нова, і вона вже відіграє важливу роль у мережах 4G LTE, а також у сучасних мережах Wi-Fi. Однак Massive MIMO - це нове вдосконалення, яке було впроваджено в мережах 5G NR. Два ключові аспекти технології MIMO, які відрізняють Massive MIMO від стандартного MIMO, - це кількість антенних елементів і можливість багатокористувацької роботи в антенних решітках. Найсучасніша мережа LTE, LTE Advanced Pro, використовує максимальну конфігурацію MIMO 8 x 8, що означає вісім антенних елементів для передачі і вісім для прийому. З Massive MIMO ця конфігурація антен стає набагато більшою, і 64 x 64 вже можлива в базових станціях 5G від ключових постачальників мереж. Однак можлива також конфігурація антени 256 x 256. Хоча кількість елементів антени, безумовно, є ключовим фактором для Massive MIMO, іншим аспектом, який відрізняє його від стандартного MIMO, є багатокористувацька можливість, яка дозволяє підтримувати кілька пристроїв одночасно.

3 НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ МНОЖИННИЙ ДОСТУП (NOMA). СПЕЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ОСОБЛИВОСТІ ТА ВПЛИВИ NOMA

Система неортогонального множинного доступу (NOMA) вважається важливою технологією, яка дозволяє бездротовим системам п'ятого покоління (5G) і не тільки задовольняти різні вимоги, такі як висока ефективність, масивні мережі, складна оптимізація і стабільна якість. Крім того, схема NOMA забезпечує такі переваги і привабливі характеристики, як низька затримка, надщільне обслуговування, велика справедливість, інноваційна архітектура форми сигналу, ефективне використання смуги пропускання і масове підключення пристроїв порівняно з попередніми схемами множинного доступу. Тому для досягнення оптимальної продуктивності система NOMA потребує ефективних методів розподілу ресурсів, таких як схеми об'єднання користувачів (UP) і розподілу потужності (PA). Отже, в цій статті ми детально обговорюємо важливість розподілу ресурсів в NOMA в мережах 5G і не тільки.

В результаті, по-перше, ми розглянемо класифікацію схем множинного доступу, різні типи методів NOMA і характеристики NOMA. Потім в статті аналізується питання розподілу ресурсів шляхом класифікації різних схем розподілу ресурсів в 5G. Далі розглядається короткий огляд рішень поточних проблем розподілу ресурсів. Насамкінець ми пропонуємо майбутні дослідницькі виклики, на яких слід зосередитися. У зв'язку з масовим підключенням і зростаючими вимогами різних сервісів і вимогливих до даних додатків, повномасштабне впровадження бездротових систем п'ятого покоління (5G) вимагає більш ефективних методів радіодоступу. У зв'язку з цим неортогональний множинний доступ (NOMA) останнім часом привертає все більшу увагу як з боку науковців, так і з боку промисловості. У порівнянні з ортогональним множинним доступом (OMA), NOMA перевершує його за спектральною ефективністю і, таким чином, підходить для 5G і наступних поколінь [38]. У цій статті ми надаємо огляд принципів і застосувань NOMA.

Існує сплеск активності, пов'язаний з різними неортогональними схемами множинного доступу для стільникового зв'язку 5G, що викликає інтерес у великих гравців бездротової індустрії. NOMA була включена в різні Білі книги з 5G, в тому числі від ZTE Corporation, SK Telecom і консорціуму Mobile and wireless communications Enablers for the Twenty-twenty Information Society (METIS). В рамках концепції 5G DOCOMO і MediaTek спільно досліджують можливості поєднання технологій NOMA від DOCOMO з технологіями багатокористувацького придушення завад від MediaTek. Як показано на Рис. 3.1, базова станція (БС) надсилає накладені сигнали двом користувачам, де користувач 1 має вищий коефіцієнт підсилення каналу, ніж користувач 2. У NOMA користувач з вищим коефіцієнтом підсилення каналу і користувач з нижчим коефіцієнтом підсилення каналу зазвичай називаються сильним і слабким користувачем відповідно. З гіршим коефіцієнтом підсилення каналу і більшою кількістю перешкод, слабкому користувачеві призначається більша потужність в NOMA.

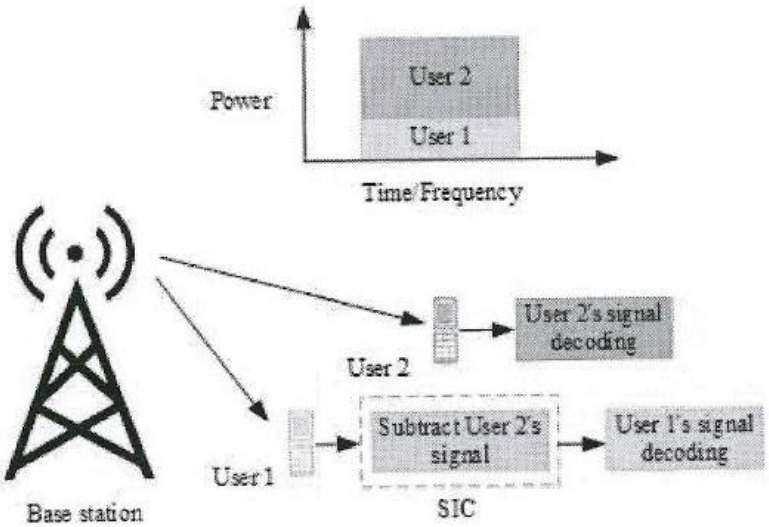


Рис. 3.1 Стільниковий зв'язок NOMA в одній комірці з однією БС і двома користувачами

Існує значна робота зі стандартизації неортогональних схем множинного доступу. Що стосується NOMA, то вона була включена в дослідження низхідної багатокористувацької передачі суперпозиції для LTE Проектом партнерства 3-го

покоління (3GPP) в його 13-й версії. NOMA також розглядалася в початковому дослідженні, присвяченому новому радіо (NR) 5G версії 14, в якому було визнано, що NR 5G повинен розглядати принаймні висхідні неортогональні схеми множинного доступу, особливо для масового зв'язку машинного типу. Крім того, дослідження неортогональних схем множинного доступу для 5G NR, включаючи NOMA, буде продовжено у версії 15. Ці дослідження передбачають співпрацю між різними "блакитними фішками", такими як DOCOMO, Huawei, Intel, Qualcomm і Samsung. Зауважимо, що вищезгадані роботи обмежуються одноклітинною системою.

Продуктивність NOMA можна ще більше підвищити, об'єднавши її з технологією багатоканального вводу-виводу (MIMO). У MIMO-NOMA користувачі об'єднуються в кластери, а NOMA застосовується лише між користувачами в одному кластері. Отримати оптимальне об'єднання користувачів є нетривіальною задачею, оскільки потрібен вичерпний перебір. Для зменшення обчислювального навантаження в роботі прийнято випадкове сполучення. Крім того, на основі кореляції каналів та різниці коефіцієнтів підсилення в запропонованому алгоритми жадібного об'єднання користувачів, який забезпечує майже оптимальну продуктивність. Після того, як користувачі об'єднані в кластери, загальний вектор попереднього кодування використовується користувачами в одному кластері, що перетворює канал MIMO в декілька паралельних каналів SISO. В результаті, перевага NOMA над OMA все ще зберігається. Ця робота передбачає ідеальну миттєву інформацію про стан каналу (CSI), що може бути непрактично для сценаріїв MIMO. Нещодавно дослідники почали вивчати продуктивність NOMA в багатостільниковій мережі, де міжстільникові завади (ICI) є основною перешкодою.

Вирівнювання завад (IA) і неортогональний множинний доступ (NOMA) є ключовими технологіями для досягнення масштабування пропускної здатності, необхідної мережам наступного покоління для подолання безпрецедентного зростання трафіку мереж передачі даних. Доведено, що кожна з цих технологій

демонструє відмінну продуктивність для систем MIMO. У цій статті ми пропонуємо спільну концепцію IA та розподілу потужності (PA) для багатокористувацьких систем MIMO (MU-MIMO) на основі NOMA. Будуть розглянуті різні підходи до застосування IA в низхідних системах MU-MIMO на основі NOMA при реалізації методу PA, який в повній мірі використовує характеристики систем на основі NOMA. Запропонована концепція має на меті максимізувати сумарну швидкість системи MU-MIMO на основі NOMA шляхом поєднання IA з ПА. Процес починається з початкового групування користувачів системи в кластери для оптимальної реалізації NOMA. Максимізація сумарної швидкості здійснюється в умовах обмеженого бюджету потужності кластера, якості обслуговування користувачів (QoS) і надійного послідовного придушення завад (SIC). При цьому використовується стратегія мультиплексування за потужністю, що дозволяє користувачам у кожному кластері спільно використовувати потоки даних, не створюючи перешкод один одному. Для систем MU-MIMO на основі NOMA запропоновано три ітеративні спільні алгоритми IA та PA. Крім того, ці алгоритми порівнюються з аналогом MU-MIMO на основі ортогонального множинного доступу (OMA), а також з найсучаснішими методами, представленими для систем MU-MIMO на основі NOMA. Чисельне моделювання підтверджує, що запропонована структура може значно покращити продуктивність систем MU-MIMO на основі NOMA з точки зору досяжної швидкості передачі даних у порівнянні з MU-MIMO на основі OMA та сучасними системами MU-MIMO на основі NOMA.

Однією з ключових проблем, що стоять перед мобільними мережами п'ятого покоління (5G), є стрімке зростання трафіку мереж передачі даних. Відповідно, неортогональний множинний доступ (NOMA) останнім часом привертає багато уваги як перспективна технологія радіодоступу в мобільних мережах 5G завдяки своїй чудовій спектральній ефективності. Концепція NOMA полягає у використанні енергетичної області для реалізації механізму множинного доступу в мобільних мережах. Зокрема, сигналам користувачів NOMA присвоюються різні коефіцієнти розподілу потужності (PA) відповідно до умов каналу.

Користувачам з поганими умовами каналу призначається більший рівень потужності, а користувачам з кращими умовами каналу - менший рівень потужності. Однією з основних переваг методу NOMA є його чудова здатність балансувати між сумарною швидкістю та справедливістю, і відповідно досягати оптимізованої спектральної ефективності для всіх користувачів, що обслуговуються.

У було проведено порівняння між NOMA та її ортогональними аналогами з точки зору досяжної швидкості передачі даних, і результати продемонстрували перевагу NOMA як технології радіодоступу для майбутніх стільникових мереж 5G. В метод NOMA використовується для реалізації стратегії кооперативної передачі для когнітивних радіомереж з розподілом спектра. Техніка NOMA також використовується в мережах когнітивного радіозв'язку для підтримки деяких заздалегідь визначених умов якості обслуговування (QoS). Зокрема, вони застосовують MIMO-NOMA як до стільникових, так і до когнітивних бездротових мереж.

Протягом останнього десятиліття метод вирівнювання завад (IA) також пропонується як відмінне рішення проблеми завад, що виникають в бездротових багатокористувацьких (MU) мережах зв'язку, що значно покращує їх сумарну швидкість. Зокрема, застосування методу IA в бездротових мережах призводить до того, що сумарна швидкість може лінійно і без обмежень масштабуватися залежно від кількості користувачів у мережі при високому відношенні сигнал/шум (SNR). Ключова ідея методу IA полягає у вирівнюванні сигналів завад у підпростір меншої розмірності, залишаючи решту підпростору для передачі корисного сигналу без будь-яких завад. Відповідно, можна досягти максимальних ступенів свободи (DoF) для всієї мережі. Схема IA вивчається для багатьох різних мереж, наприклад, для X-каналу, K-користувацького каналу завад (IC), гетерогенних мереж та мереж когнітивного радіозв'язку. Оцінка пропускної здатності загального каналу завад все ще залишається складним завданням для дослідників бездротових комунікацій та теорії інформації. Однак, метод IA представлений як оптимальний підхід до управління завадами з точки

зору DoFs. Це означає, що він дозволяє досягти пропускної здатності IC при високому значенні SNR. Зауважимо, що підхід IA може бути застосований у часовому, частотному та просторовому вимірах. Однак, застосування підходу IA в просторовому вимірі є найбільш популярним через широке використання технології MIMO. У мережах MIMO метод IA застосовується з використанням матриць формування променя передачі, які допомагають утримувати всі небажані прийняті сигнали на кожному приймачі в межах одного підпростору мінімального розміру, залишаючи бажані підпростори сигналів вільними від завад. Останнім часом максимізація пропускної здатності і, відповідно, сумарної швидкості для мереж зв'язку MU-MIMO на основі NOMA стає метою багатьох дослідницьких робіт. В роботі досліджується задача максимізації сумарної швидкості для систем зв'язку MIMO на основі NOMA при обмеженнях як на загальну потужність передачі, так і на мінімальну швидкість на одного користувача. Однак у цьому дослідженні не приділено уваги застосовності методу послідовного придушення завад (SIC) для мереж з великою кількістю користувачів. У цій роботі запропоновано схему PA на основі CSI, що відповідає умовам повношвидкісної передачі. Зокрема, автори використовували стохастичну геометрію для оцінки продуктивності запропонованої структури передачі як з випадково розміщеними користувачами, так і з завадами [39].

3.1 Неортогональний множинний доступ (NOMA)

Ми розглядаємо ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) як схему модуляції, а NOMA - як схему множинного доступу. У звичайних мережах 4G, як природне розширення OFDM, використовується ортогональне частотне розділення каналів (OFDMA), де інформація для кожного користувача призначається підмножині піднесучих. З іншого боку, в NOMA всі піднесучі можуть використовуватися кожним користувачем. Рисунок 1 ілюструє розподіл спектру для OFDMA і NOMA для двох користувачів. Концепція застосовується як до висхідної, так і до низхідної передачі.

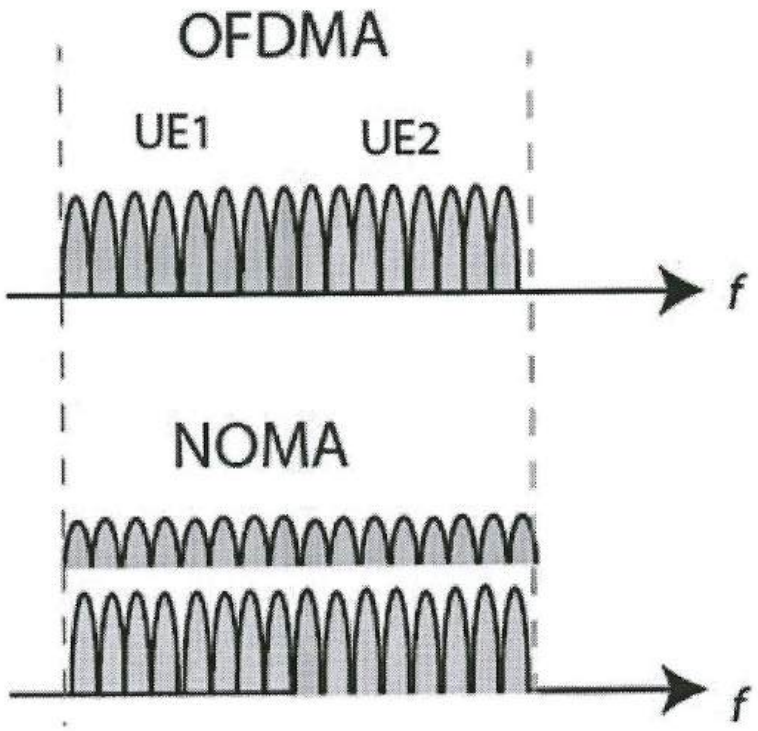


Рис. 3.2 Спільне використання спектру для OFDMA і NOMA для двох користувачів.

Суперпозиційне кодування на передавачі та послідовне придушення завад (SIC) на приймачі дозволяє використовувати один і той самий спектр для всіх користувачів. На передавачі всі окремі інформаційні сигнали накладаються в єдину форму сигналу, а на приймачі SIC декодує сигнали один за одним, поки не

знайде потрібний сигнал. Рисунок 3.2 ілюструє цю концепцію. На Рисунку 3.3 три інформаційні сигнали, позначені різними кольорами, накладаються на передавачі. Прийнятий сигнал на приймачі SIC включає всі ці три сигнали. Перший сигнал, який декодує SIC, є найсильнішим, а інші - перешкодами. Потім перший декодований сигнал віднімається від прийнятого сигналу, і якщо декодування ідеальне, то точно отримується форма сигналу з рештою сигналів. SIC повторює процес, поки не знайде потрібний сигнал.

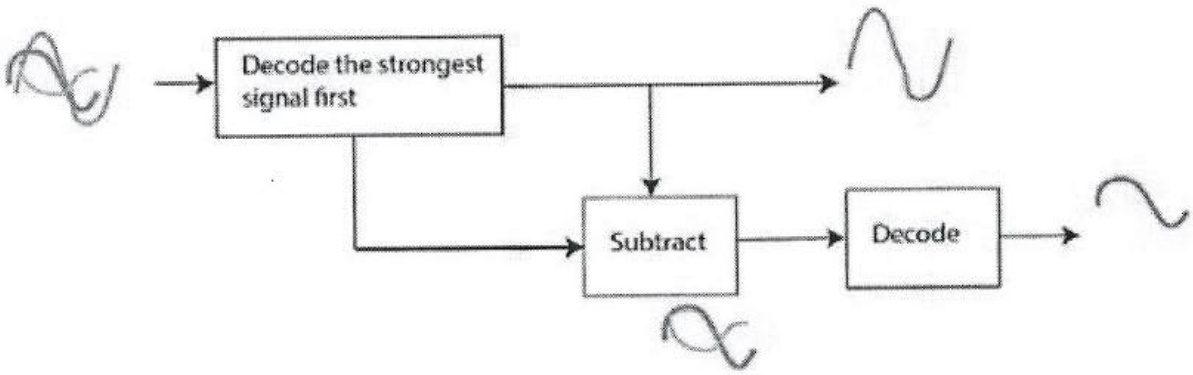


Рис. 3.3 Послідовне усунення перешкод.

Успіх SIC залежить від ідеального гасіння сигналів на кроках ітерації. Передавач повинен точно розділити потужність між інформаційними сигналами користувача і накласти їх. Методологія розподілу потужності відрізняється для висхідних і низхідних каналів.

3.2 NOMA для вхідної лінії зв'язку

У низхідній лінії зв'язку NOMA базова станція накладає інформаційні сигнали для користувачів, яких вона обслуговує. Кожне обладнання користувача (UE) використовує SIC для виявлення власних сигналів. На рисунку 3.4 показано БС і K кількість UE з приймачами SIC. В мережі передбачається, що UE_1 є найближчим до базової станції (BS), а UE_K - найвіддаленішим.

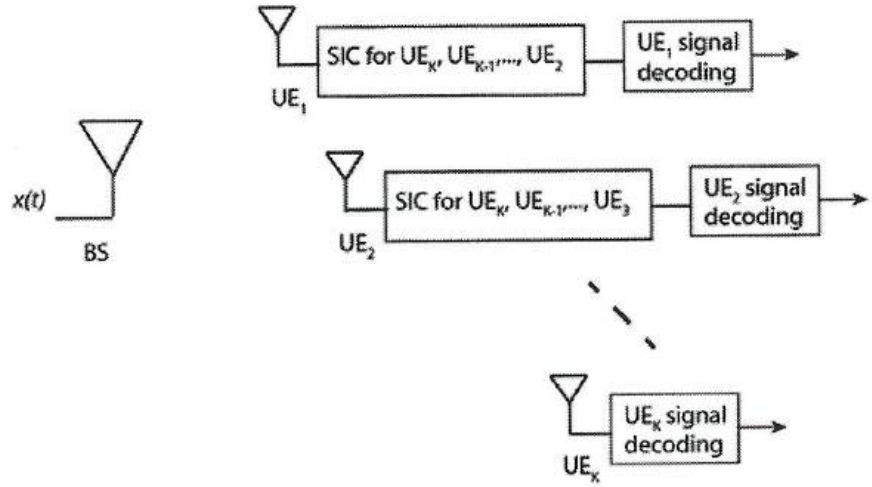


Рис. 3.4 Downlink NOMA for K users.

Сигнал, що передається БС, можна записати у вигляді:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{\alpha_k P_T}\, x_k(t) \tag{3.1}$$

де xk(t) індивідуальна форма сигналу OFDM, що передає інформацію, αk коефіцієнт розподілу потужності для UE_K, а PT загальна доступна потужність на БС. Потужність, виділена для кожного UE_K, тоді стає $P_k=\alpha_k P_T$. Потужність розподіляється відповідно до відстані UE_S до BS: UE_1 є найближчим до BS, тому

йому виділяється найменша потужність, тоді як UE_K є найвіддаленішим і виділяється найбільша потужність.

Прийнятий сигнал на UE_K має вигляд:

$$y_k(t) = x(t)g_k + w_k(t) \tag{3.2}$$

де g_k – коефіцієнт загасання каналу для зв'язку між БС та UE_k, а $w_k(t)$ – адитивний білий гаусівський шум на UE_k із середнім нулем та густиною N_0 (Вт/Гц).

Розглянемо спочатку найвіддаленішого користувача. Сигнал, який він декодує першим, буде його власним сигналом, оскільки йому виділяється найбільша потужність порівняно з іншими. Сигнали інших користувачів будуть розглядатися як перешкоди.

Тому відношення сигнал/шум (SNR) для UE_K можна записати як:

$$SNR_K = \frac{P_K g_K^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{K-1} P_i g_K^2} \tag{3.3}$$

де W - ширина смуги пропускання.

Для найближчого UE_1 останнім декодованим сигналом буде його сигнал. Припускаючи ідеальне придушення, SNR для UE_1 стає:

$$SNR_1 = \frac{P_1 g_1^2}{N_0 W} \tag{3.4}$$

В загальному випадку, для UE_k SNR стає:

$$SNR_k = \frac{P_k g_k^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{k-1} P_i g_k^2} \tag{3.5}$$

Коли використовується NOMA, пропускна здатність (біт/с) для кожного UE може бути записана як:

$$R_k = W log_2 \left(1 + \frac{P_k g_k^2}{N + \sum_{i=1}^{k-1} P_i g_k^2} \right) \tag{3.6}$$

З іншого боку, в OFDMA, для отримання інформації, що передається, UE призначаються до групи піднесучих. Коли загальна смуга пропускання і потужність розподіляються між UE порівну, пропускна здатність для кожного UE для OFDMA стає:

$$R_k = W_k log_2 \left(1 + \frac{P_k g_k^2}{N_k} \right) \tag{3.7}$$

де $W_k = \frac{W}{K}$ і $N_k = N_0 W_k$.

Сумарна пропускна здатність для OFDMA і NOMA може бути записана як:

$$R_T = \sum_{k=1}^{K} R_k \tag{3.8}$$

Далі ми визначимо індекс справедливості як:

$$F = \frac{\left(\sum R_k\right)^2}{K\sum R_k^2} \tag{3.9}$$

який показує, наскільки справедливо розподілена пропускна здатність системи між UE, тобто, коли F наближається до 1, пропускна здатність для кожного UE наближається одна до одної.

Ми можемо поставити за мету механізму розподілу потужності максимізувати сумарну пропускну спроможність R_T за умови обмеження справедливості для систем NOMA. Тоді оптимізаційна задача формулюється наступним чином:

$$\underset{\alpha_k}{\text{maximize}} W\log_2\left(1+\frac{P_k g_k^2}{N+\sum_{i=1}^{k-1} P_i g_k^2}\right) \quad \text{subject to}: \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{K} P_k \le P_T \\ P_k \ge 0, \forall k \\ F = F' \end{array} \tag{3.10}$$

де F′ - цільовий індекс справедливості в мережі. Коефіцієнти розподілу потужності α_k для кожного UE_k можна отримати за допомогою вичерпного перебору.

3.3 Система NOMA для вихідної лінії зв'язку

Реалізація NOMA у висхідному каналі дещо відрізняється від низхідного. На рисунку зображено мережу, яка мультиплексує K UE_S у висхідній лінії з використанням NOMA. Цього разу БС використовує SIC для того, щоб розрізняти сигнали користувачів.

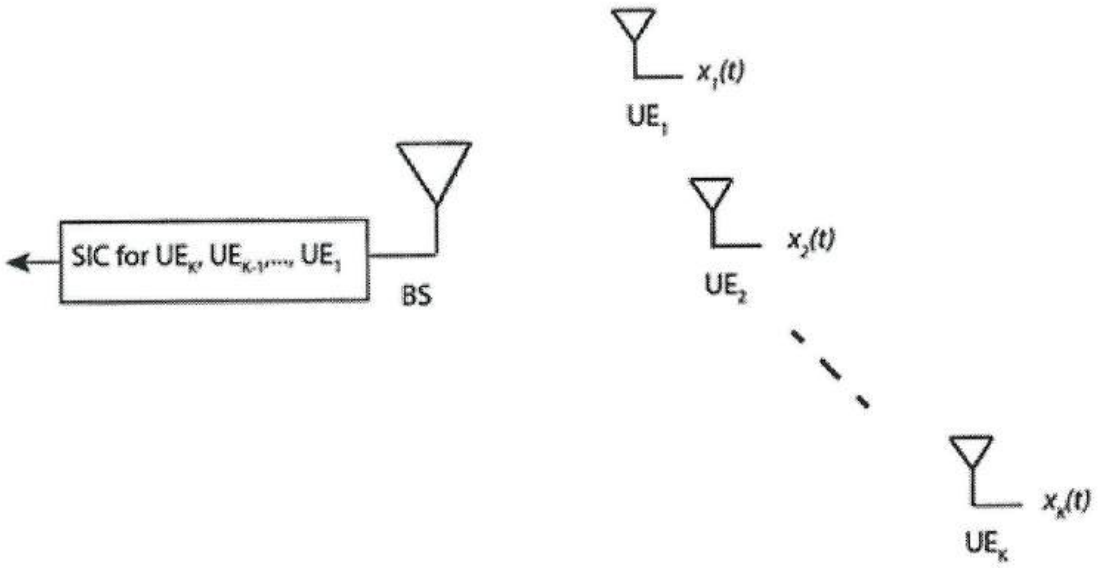


Рис. 3.5 Схема базової станції для вихідної лінії зв'язку

У вихідній лінії зв'язку отриманий БС сигнал, що включає всі сигнали користувачів, записується як

$$y(t) = \sum_{k=1}^{K} x_k(t) g_k + w(t) \tag{3.11}$$

де g_k - коефіцієнт підсилення каналу загасання для зв'язку між БС та UE_k, $x_k(t)$ - інформаційний сигнал для k-го UE, а w(t) - адитивний білий гаусівський шум на БС із середнім нулем та густиною N_0 (Вт/Гц). У висхідній лінії, як і в низхідній, UE можуть знову оптимізувати свою потужність передачі відповідно

до свого розташування. Однак тут ми припускаємо, що користувачі добре розподілені в зоні покриття стільникового зв'язку, і рівні потужності, отримані від різних користувачів, вже добре розділені. Таке припущення є більш природним з практичної точки зору, оскільки оптимізація потужності вимагає встановлення зв'язку між усіма абонентами, що може бути важко реалізувати.

На приймачі БС реалізує SIC. Першим сигналом, який вона декодує, буде сигнал від найближчого користувача. SNR для сигналу для UE_1 можна записати як, включаючи інші як завади,

$$R_1 = \frac{Pg_1^2}{N + \sum_{i=2}^{K} Pg_i^2} \tag{3.12}$$

де P – потужність передачі UE та $N=N_0W$.

Останній сигнал, який декодує БС, є сигналом для найвіддаленішого користувача UE_K. Припускаючи ідеальне завмирання, SNR для UE_K можна записати як:

$$SNR_K = \frac{Pg_K^2}{N} \tag{3.13}$$

Загалом, для k-го UE, SNR стає рівним,

$$SNR_k = 1 + \frac{Pg_k^2}{N + \sum_{i=k+1}^{K} Pg_i^2} \tag{3.14}$$

Пропускну здатність (біт/с) для кожного UE можна записати як:

$$R_k = Wlog_2\left(1+\frac{Pg_k^2}{N+\sum_{i=k+1}^{K}Pg_i^2}\right) \tag{3.15}$$

В OFDMA, з іншого боку, для отримання інформації користувачеві виділяються ортогональні несучі. Коли загальна пропускна здатність і потужність розподіляються між UE_S порівну, пропускна здатність для кожного UE для OFDMA стає:

$$R_k = W_k log_2\left(1+\frac{P_k g_k^2}{N_k}\right) \tag{3.16}$$

де $W_k = W/K$ і $N_k = N_0 W_k$

Сумарна пропускна здатність для OFDMA і NOMA може бути записана як:

$$R_T = \sum_{k=1}^{K} R_k \tag{3.17}$$

Далі ми визначимо індекс справедливості як:

$$F = \frac{\left(\sum R_k\right)^2}{K\sum R_k^2} \tag{3.18}$$

який показує, наскільки справедливо розподілена пропускна здатність системи між UE, тобто, коли F наближається до 1, пропускна здатність для кожного UE наближається одна до одної. Ми можемо поставити за мету механізму розподілу потужності максимізувати сумарну пропускну спроможність за умови обмеження справедливості для систем NOMA.

Тоді оптимізаційна задача формулюється наступним чином:

$$\underset{\alpha_k}{\text{maximize}} W\log_2\left(1+\frac{P_k g_k^2}{N+\sum_{i=1}^{k-1} P_i g_k^2}\right) \quad \text{subject to}: \begin{array}{l} \sum_{k=1}^{K} P_k \le P_T \\ P_k \ge 0, \forall k \\ F = F' \end{array} \tag{3.19}$$

де F′ - цільовий індекс справедливості в мережі. Коефіцієнти розподілу потужності α_k для кожного UE_k можна отримати за допомогою вичерпного перебору.

3.4 Недосконалість системи NOMA

У попередніх розділах ми припускали, що в приймачі SIC є ідеальне шумозаглушення. У реальній SIC досить складно безпомилково відняти декодований сигнал від прийнятого. У цьому розділі ми повернемося до концепції NOMA з урахуванням помилки завмирання в приймачі SIC.

Тут ми розглядаємо лише низхідну лінію зв'язку, але обговорення можна легко поширити і на висхідну лінію зв'язку. Нагадаємо, що приймач SIC декодує інформаційні сигнали один за одним інтерактивно, щоб отримати бажаний сигнал. У SIC після декодування сигналу потрібно регенерувати вихідну індивідуальну форму сигналу, щоб відняти її від отриманого сигналу. Хоча теоретично можливо виконати цей процес без помилок, на практиці очікується певна помилка віднімання.

У низхідному каналі SNR для k-го користувача з помилкою скасування записується як

$$SNR_k = \frac{P_k g_k^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{k-1} P_i g_k^2 + \epsilon \sum_{i=k+1}^{K} P_i g_k^2} \tag{3.20}$$

де є - член помилки завмирання, який представляє залишок сигналу завмерлого повідомлення. У попередньому розділі третій доданок у знаменнику не включено, оскільки там передбачалося ідеальне завмирання.

3.5 Спектральна ефективність та енергоефективність технології NOMA

До цього часу більшість аналізів стосувалася пропускної здатності мережі. На додаток до спектральної ефективності (SE) NOMA, в цьому розділі ми проаналізуємо енергетичну ефективність (EE) систем NOMA. У нашому аналізі ми враховуємо статичну потужність, споживану мережею через підсилювачі потужності, на додаток до потужності, споживаної для формування інформаційного сигналу.

Загальне енергоспоживання на передавачі можна представити як суму потужності інформаційного сигналу і потужності, споживаної ланцюгами (в основному підсилювачами потужності). Розглядаючи низхідну лінію зв'язку, загальну потужність, споживану БС, можна записати як:

$$P_{total} = P_T + P_{static} \tag{3.21}$$

де P_T повна потужність сигналу, як згадувалося раніше, а P_{static} потужність, яку споживає схема.

Енергоефективність (EE) визначається як сумарний показник від загальної спожитої потужності базової станції,

$$EE = \frac{R_T}{P_{total}} = SE\frac{W}{P_{total}} \text{ (bits/joule)} \tag{3.22}$$

де SE - спектральна ефективність (R_T/W) в bps/W.

Залежність енергоефективності та спектральної ефективності (EE-SE) в теорії Шеннона не враховує енергоспоживання схеми і, отже, є монотонною, де вища SE завжди призводить до нижчої EE. Коли потужність схеми враховується, EE збільшується в області низького SE і зменшується в області високого SE. Пік кривої (або відповідна похідна залежності EE-SE) знаходиться там, де система має максимальну енергоефективність. Ця точка називається "зеленою точкою". Для фіксованого P_{total} залежність EE-SE є лінійною з позитивним нахилом RT/P_{total} де збільшення SE одночасно призводить до збільшення EE. Як ми продемонструємо в наступному розділі, NOMA забезпечує вищу енергоефективність, ніж OFDMA [40].

3.6 Вплив недосконалого скасування

На рисунку ми повторюємо ті самі умови для несиметричного низхідного каналу, що і в попередньому розділі, з недосконалим SIC. Випадок ідеального завмирання наведено як еталонний, що відповідає результатам на рисунку. Потім ми проаналізуємо вплив недосконалого завмирання, встановивши коефіцієнт помилки завмирання (ϵ) на рівні 1, 5 та 10%. Наприклад, при ϵ=1% UE_1 не може ідеально придушити сигнал для UE_2 в першій ітерації, і 1% потужності сигналу другого користувача все ще залишається як завада. Коли ϵ=1%, окремі пари швидкостей і, відповідно, загальна пропускна здатність дещо зменшуються. Коли ϵ=10% з іншого боку, зменшення є більш помітним.

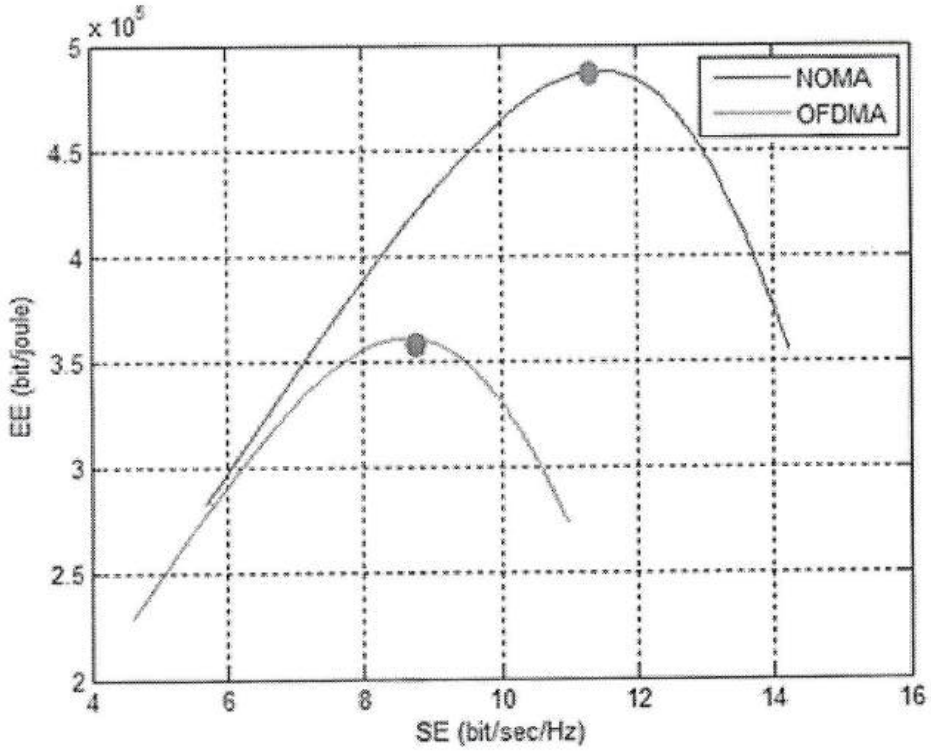


Рис. 3.6 Криві компромісу EE-SE для NOMA та OFDMA.

ВИСНОВКИ

У цій роботі представлено та досліджено основи NOMA і продемонстровано її перевагу над традиційною OFDMA з точки зору сумарної пропускної здатності, енергоефективності та спектральної ефективності. Також згадано про вплив недосконалості приймача SIC на продуктивність системи. Завдяки своїм відмінним характеристикам, NOMA залишається найсильнішим кандидатом для майбутніх мереж 5G. Однак для успішного впровадження NOMA все ще існують певні виклики. По-перше, для запуску алгоритмів SIC потрібна висока обчислювальна потужність, особливо для великої кількості користувачів при високих швидкостях передачі даних. По-друге, оптимізація розподілу потужності залишається складною проблемою, особливо коли користувачі швидко переміщуються в мережі. Нарешті, приймач SIC чутливий до помилок відміни, які можуть легко виникати в каналах із завмираннями. Для підвищення надійності і, відповідно, зменшення помилок декодування, його можна реалізувати за допомогою інших методів рознесення, таких як множинний вхід-багаторазовий вихід (MIMO), або за допомогою схем кодування. Нещодавно з'явилися роботи, які реалізують MIMO для NOMA; вплив інформації про стан каналу (CSI) вивчається проблема максимізації пропускної здатності обговорюється в, а вирази для ймовірності відмов виводяться. Однак, сучасний стан NOMA все ще далекий від свого потенціалу і потребує подальших досліджень.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. "Digital modulation basics, part 1", Bob Witte, Feb. 20, 2020, https://www.5gtechnologyworld.com/digital-modulation-basics-part-1/.

2. "Digital modulation basics, part 2: QAM and EVM", Bob Witte, Mar. 4, 2020, https://www.5gtechnologyworld.com/digital-modulation-basics-part-2-qam-and-evm/, .

3. "The History of Orthogonal Frequency-Division Multiplexing", Stephen B. Weinstein, IEEE Communications Magazine, November 2009 https://ieeexplore.ieee.org/document/5307460

4. "Concepts of Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) and 802.11 WLAN", Keysight Technologies web page, http://rfmw.em.keysight.com/wireless/helpfiles/89600B/WebHelp/Subsystems/wlan-ofdm/Content/ofdm_basicprinciplesoverview.htm

5. "Digital Modulation in Communications Systems- An Introduction," Application Note, Publication Number, Keysight Technologies, 2014. http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5965-7160E.pdf

6. "Understanding the 5G NR Physical Layer," Presentation, Javier Campos, Keysight Technologies, November 2017, https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Understanding_the_5G_NR_Physical_Layer.pdf

7. "FBMC vs. OFDM Modulation"https://www.mathworks.com/help/comm/ug/fbmc-vs-ofdm-modulation.html

8. D. Tse and P. Vishwanathan, Multiuser Capacity and Opportunistic Communication, Fundamentals of Wireless Communication, Cambridge University Press, 2005.
9. Y. Saito et al, System Level Performance Evaluation of Downlink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), in Proceedings of IEEE Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Sept. 2013.

10. Y. Saito et al, Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Future Radio Access, in Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring), pp. 1–5, Sept. 2013.

11. Jain, Raj, Dah-Ming Chiu, and William R. Hawe. A Quantitative Measure of Fairness and Discrimination for Resource Allocation in Shared Computer System. Vol. 38. Hudson, MA: Eastern Research Laboratory, Digital Equipment Corporation, 1984. pp. 20–21.

12. J.G. Andrews and T.H. Meng, Optimum Power Control for Successive Interference Cancellation with Imperfect Channel Estimation, IEEE Trans. Wireless Comm., vol. 2, no. 2, pp. 375–383, 2003.

13. C. Xiong, G.Y.Li, S. Zhang, Y.Chen, and S. Xu, 2011. Energy-and Spectral-Efficiency Tradeoff in Downlink OFDMA Networks. IEEE transactions on wireless communications, 10(11), pp.3874–3886.

14.S. Han, C.-H. I, Z. Xu, Q. Sun, Energy Efficiency and Spectrum Efficiency Co-Design: From NOMA to Network NOMA, IEEE COMSOC MMTC E-Letter, vol. 9, no. 5, pp. 21–25, 2014.

15.Chih-Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li, and Z. Pan, Toward Green and Soft: A 5G Perspective, IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 66–73, 2014.

16.Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, The Application of MIMO to Non-Orthogonal Multiple Access, IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 15, no. 1, pp. 537–552, 2016.

17.Z. Ding and H. V. Poor, "Design of Massive-MIMO-NOMA with Limited Feedback," IEEE Signal Processing Letters, vol. 23, no. 5, pp. 629–633, 2016.

18.Sun, S. Han, C.-L. I, and Z. Pan, "On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 4, no. 4, pp. 405–408, 2015.

19.Z. Yang, Z. Ding, P. Fan, and G.K. Karagiannidis, "On the Performance of Non-Orthogonal Multiple Access Systems with Partial Channel Information," IEEE Trans. Commun., vol. 64, no. 2, pp. 654–667, 2016.

20.W. Y. Chen, *DSL Simulation Techniques and Standards Development for Digital Subscriber Line Systems*, Macmillan Publishing, Indianapolis, Ind, USA, 1998.

21.J. C. T. Starr and P. Silverman, *Understanding Digital Subscriber Line Technology*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.

22.R. V. Nee and R. Prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications*, Arthec House, Boston, Mass, USA, 2000.

23.Y. Li and G. Stüber, Eds., *Orthogonal Frequency Division Multiplexing for Wireless Communications*, Springer, New York, NY, USA, 2006.

24.M. Morelli, C.-C. J. Kuo, and M.-O. Pun, "Synchronization techniques for orthogonal frequency division multiple access (OFDMA): a tutorial review," *Proceedings of the IEEE*, vol. 95, no. 7, pp. 1394–1427, 2007.

25.D. Huang and K. B. Letaief, "An interference-cancellation scheme for carrier frequency offsets correction in OFDMA systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 7, pp. 1155–1165, 2005.

26.K. Lee and I. Lee, "CFO compensation for uplink OFDMA systems with conjugated gradient," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '11)*, pp. 1–5, Kyoto, Japan, June 2011.

27.K. Lee, S.-R. Lee, S.-H. Moon, and I. Lee, "MMSE-based CFO compensation for uplink OFDMA systems with conjugate gradient," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 8, pp. 2767–2775, 2012.

28.Farhang, N. Marchetti, and L. E. Doyle, "Low complexity LS and MMSE based CFO compensation techniques for the uplink of OFDMA systems," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '13)*, pp. 5748–5753, IEEE, Budapest, Hungary, June 2013.

29.H. Saeedi-Sourck, Y. Wu, J. W. M. Bergmans, S. Sadri, and B. Farhang-Boroujeny, "Complexity and performance comparison of filter bank multicarrier and OFDM in uplink of multicarrier multiple access networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 59, no. 4, pp. 1907–1912, 2011.

30.S. Brandes, I. Cosovic, and M. Schnell, "Sidelobe suppression in OFDM systems by insertion of cancellation carriers," in *Proceedings of the 62nd IEEE Vehicular Technology Conference (VTC '05)*, vol. 1, pp. 152–162, September 2005.

31.Z. Yuan, S. Pagadarai, and A. M. Wyglinski, "Cancellation carrier technique using genetic algorithm for OFDM sidelobe suppression," in *Proceedings of the Military Communications Conference (MILCOM '08)*, pp. 1–5, IEEE, 2008.

32.Selim, I. Macaluso, and L. Doyle, "Efficient sidelobe suppression for OFDM systems using advanced cancellation carriers," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC '13)*, pp. 4687–4692, Budapest, Hungary, June 2013.

33.S. N. Premnath, D. Wasden, S. K. Kasera, B. Farhang-Boroujeny, and N. Patwari, "Beyond ofdm: best-effort dynamic spectrum access using filterbank multicarrier," in *Proceedings of the 4th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS '12)*, January 2012.

34.S. N. Premnath, D. Wasden, S. K. Kasera, N. Patwari, and B. Farhang-Boroujeny, "Beyond OFDM: best-effort dynamic spectrum access using filterbank multicarrier," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 21, no. 3, pp. 869–882, 2013.

35.B. Farhang-Boroujeny and R. Kempter, "Multicarrier communication techniques for spectrum sensing and communication in cognitive radios," *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 4, pp. 80–85, 2008.

36.B. Farhang-Boroujeny, "Prolate filters for nonadaptive multitaper spectral estimators with high spectral dynamic range," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 15, pp. 457–460, 2008.

37.B. Farhang-Boroujeny, "Filter bank spectrum sensing for cognitive radios," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 5, pp. 1801–1811, 2008.

38.B. Farhang-Boroujeny, "OFDM versus filter bank multicarrier," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 28, no. 3, pp. 92–112, 2011.

39.Sahin, I. Guvenc, and H. Arslan, "A survey on multicarrier communications: prototype filters, lattice structures, and implementation aspects," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1312–1338, 2013.

40.M. Bellanger, "FBMC physical layer: a primer," Tech. Rep. 06/2010, 2010.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ



ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ЄМНОСТІ ТА ЗАВАДОЗАХИЩЕННОСТІ СИГНАЛІВ З ВТКОРИСТАННЯМ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ МОДУЛЯЦІЇ

ДОПОВІДАЧ:
студент групи АРДМ-62
Хорошун Олександр Олександрович
Керівник Скрипнік В. В.

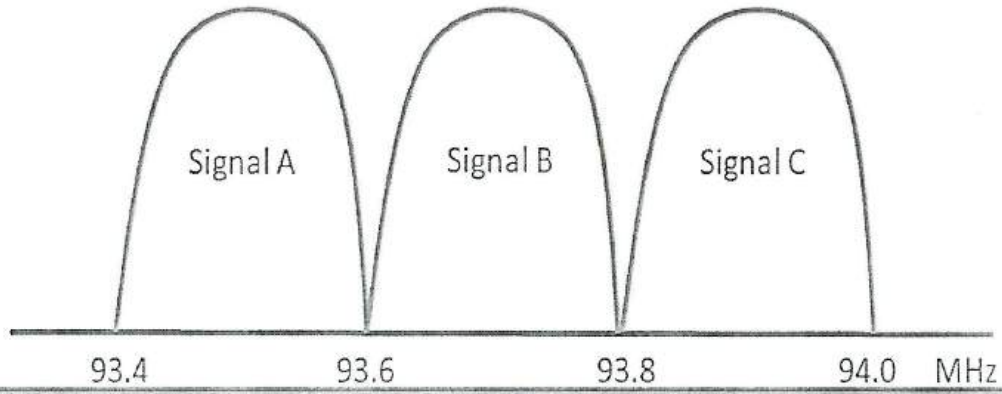
Мета – аналіз методів підвищення інформаційної ємності із використанням просторових змінних параметрів та методів збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції.

Об'єкт дослідження – дослідження технологій просторово-часового представлення сигналу для мобільних мереж п'ятого покоління (5G) з використанням технологій систем MIMO та NOMA, а також Massive NOMA.

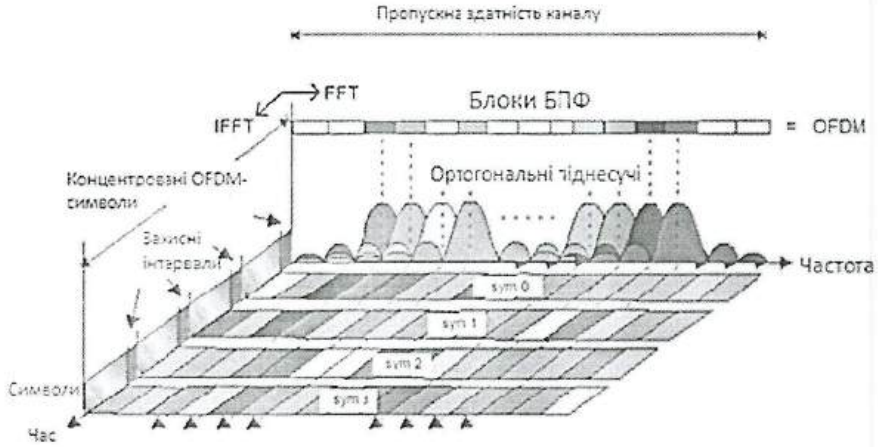
Предмет дослідження – методи підвищення інформаційної ємності із використанням просторових змінних параметрів та методи збільшення спектральної та енергетичної ефективності, стійкості та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції.

Метод дослідження – на основі теоретичного дослідження ентропії, спектральноефективності, стійкості, захищеності сигналів.

ОСНОВИ ТА МЕТОДИ МОДУЛЯЦІЇ 5G

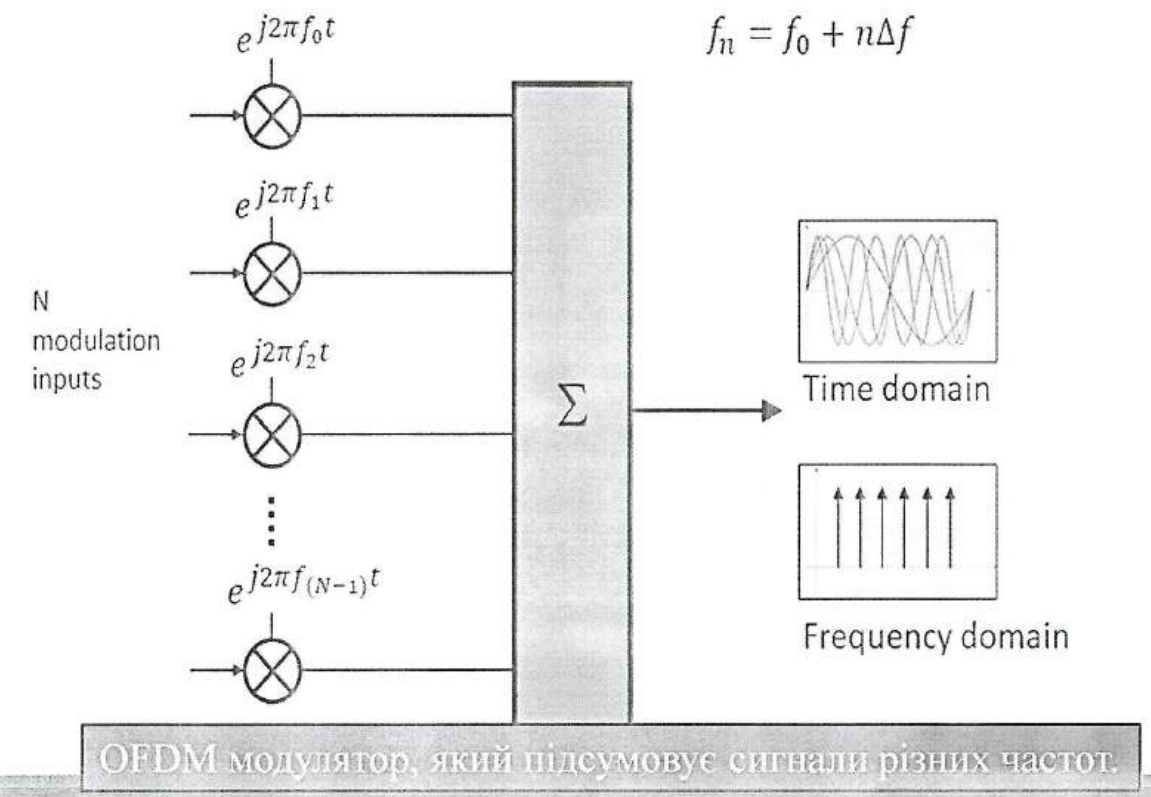


При частотному мультиплексуванні сигнали передаються на сусідніх несучих частотах



Комбінований вигляд OFDM сигналу в часовій/частотній області.

Ортогональний множинний доступ з частотним розділенням каналів (OFDMA)



OFDM модулятор, який підсумовує сигнали різних частот.

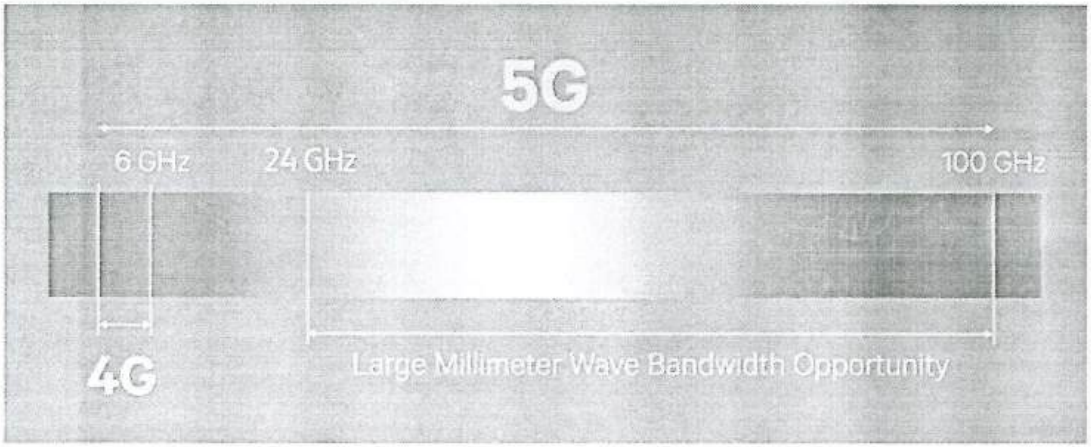
$$f_n = f_0 + n\Delta f$$

$$x(t) = \sum_{n=0}^{N-1} c_n e^{j2\pi f_n t}$$

$$f_n = f_0 + (n \cdot \Delta f)$$

$$f_s = \frac{1}{\Delta t} \qquad \Delta f = \frac{1}{N\,\Delta t}$$

П’ЯТЕ ПОКОЛІННЯ МОБІЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ 5G. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ MIMO ТА MASSIVE MIMO.



$$x_k = \begin{bmatrix} \cos\varepsilon_k \exp\left(j\dfrac{2\pi q_V}{M}\right) \\ \sin\varepsilon_k \exp\left(j\dfrac{2\pi q_H}{M}\right) \end{bmatrix}$$

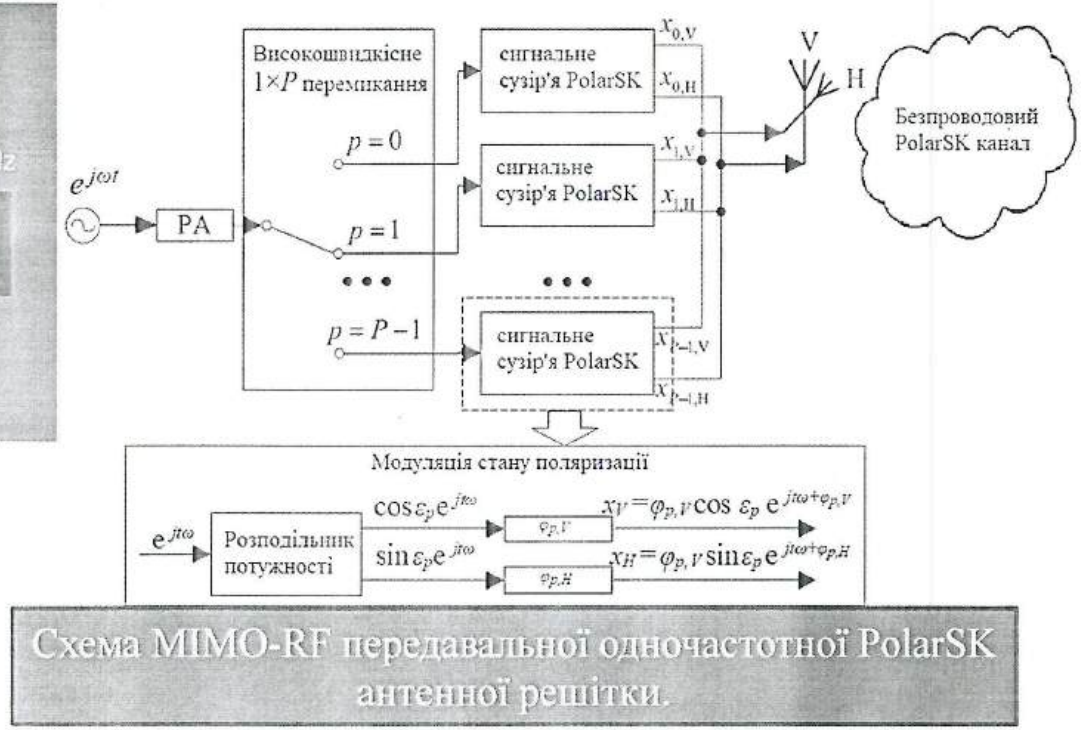
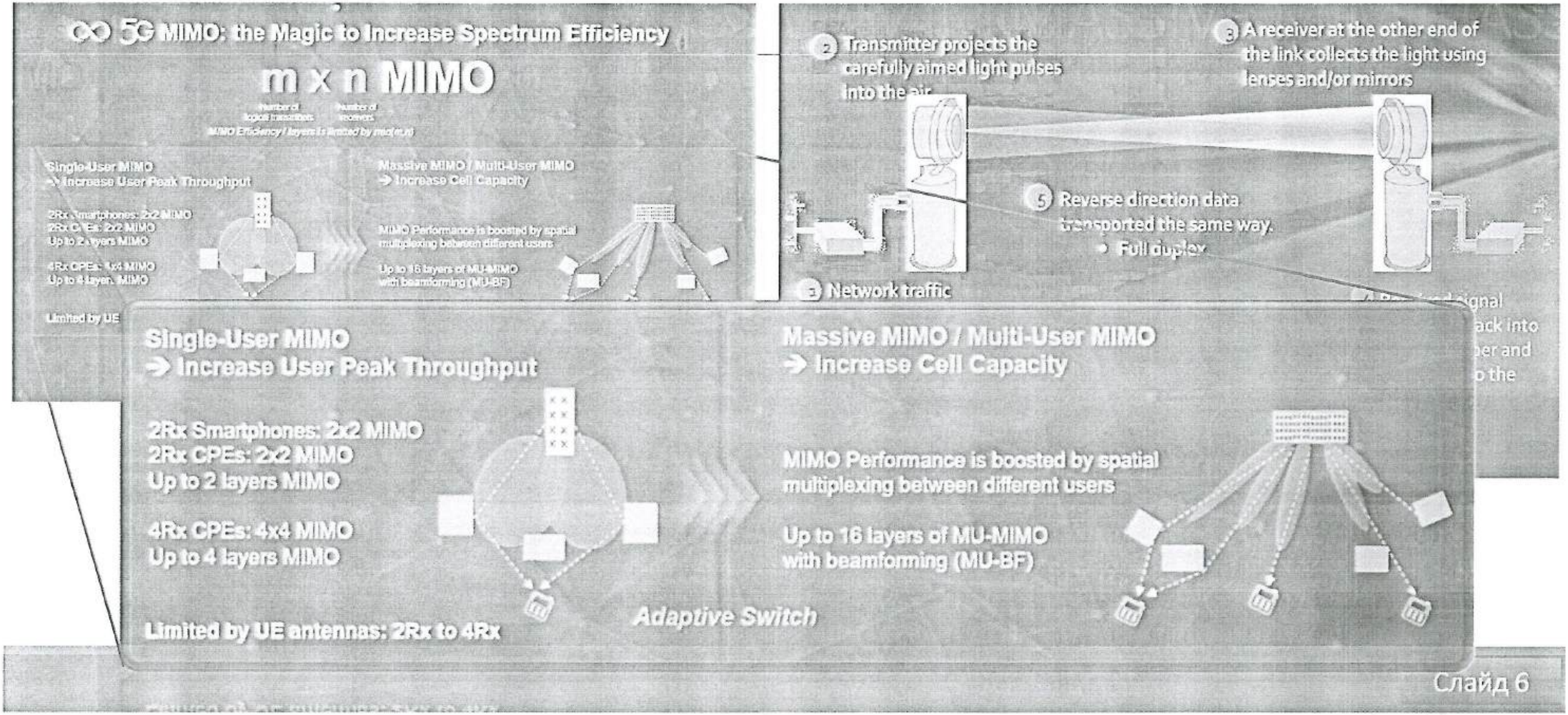
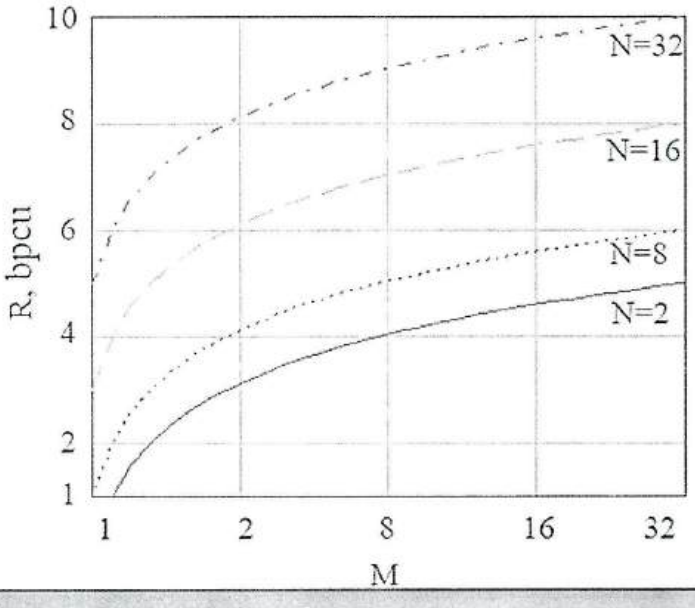


Схема MIMO-RF передавальної одночастотної PolarSK антенної решітки.

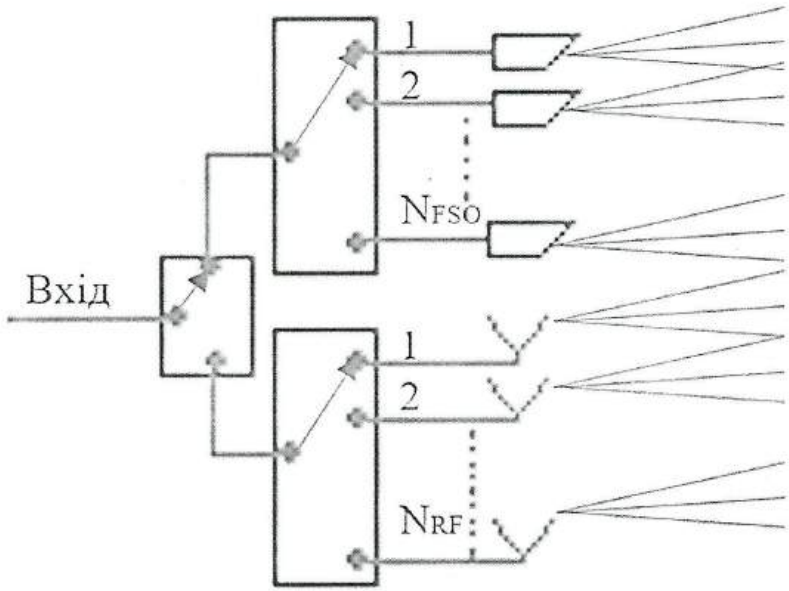
MIMO, FSO-MIMO



Принципіальні схеми роботи технології MIMO

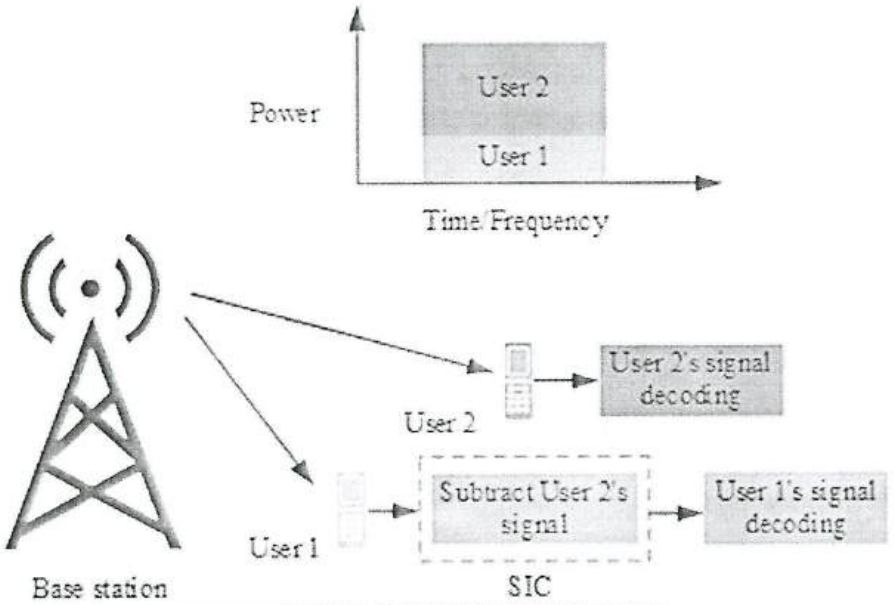


Залежність *R* для різного порядку модуляції *M* та кількості випромінюючих елементів *N* передавальної антенної решітки

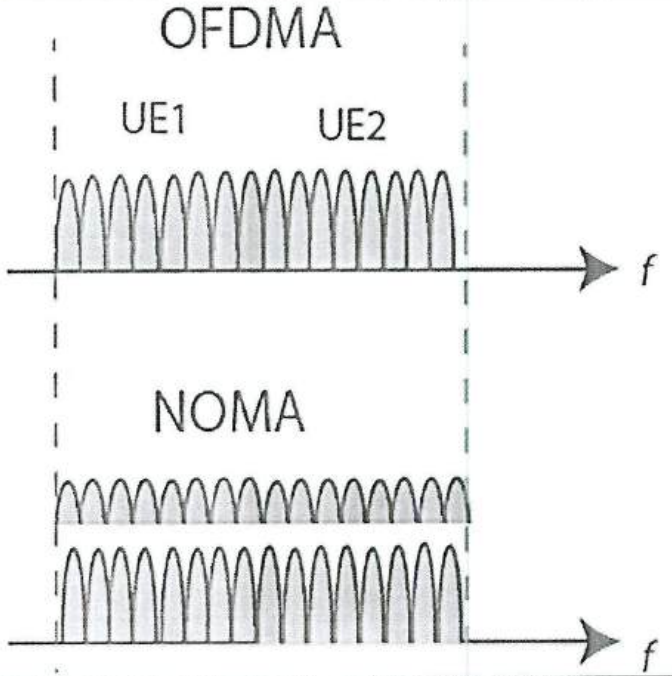


Принципіальна схема гібридної конфігурації FSO-MIMO і RF-MIMO у міліметровому діапазоні

НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ МНОЖИННИЙ ДОСТУП (NOMA). СПЕЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ОСОБЛИВОСТІ ТА ВПЛИВИ NOMA



Стільниковий зв'язок NOMA в одній комірці з однією БС і двома користувачами



Спільне використання спектру для OFDMA і NOMA для двох користувачів.

NOMA для вхідної лінії зв'язку

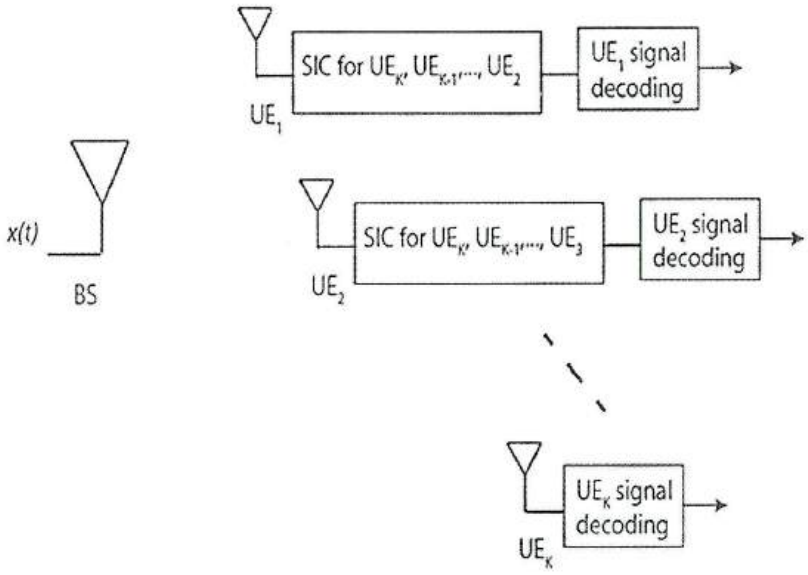


Схема базової станції для вхідної лінії зв'язку

Сигнал, що передається БС, можна записати у вигляді:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{K} \sqrt{\alpha_k P_T}\, x_k(t)$$

де xk(t) індивідуальна форма сигналу OFDM, що передає інформацію, αk коефіцієнт розподілу потужності для UE_K, а PT загальна доступна потужність на БС. Потужність, виділена для кожного UE_K, тоді стає $P_k=\alpha_k P_T$. Потужність розподіляється відповідно до відстані UE_S до BS: UE_1 є найближчим до BS, тому йому виділяється найменша потужність, тоді як UE_K є найвіддаленішим і виділяється найбільша потужність.

Система NOMA для вихідної лінії зв'язку

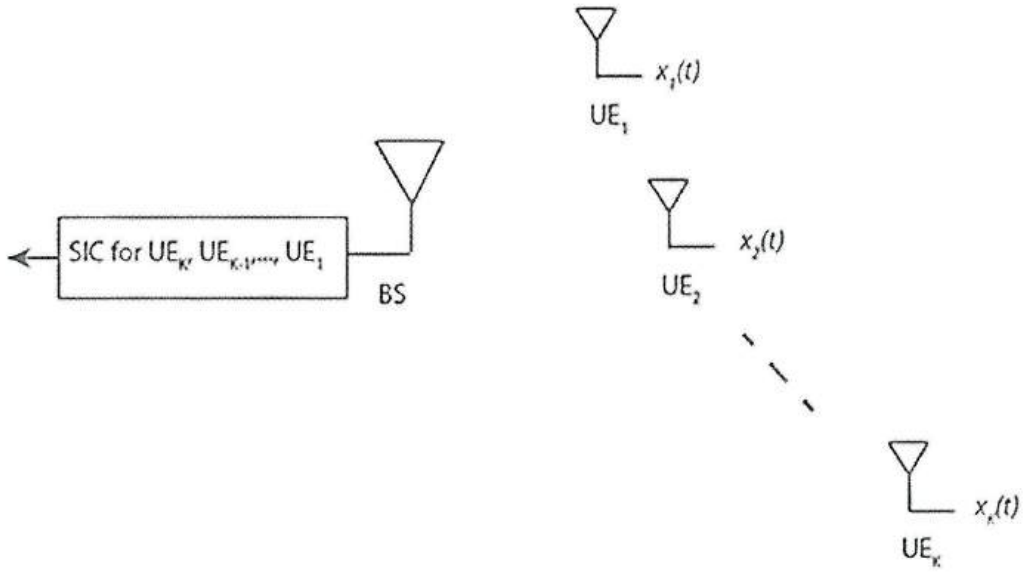


Схема базової станції для вихідної лінії зв'язку

У вихідній лінії зв'язку отриманий БС сигнал, що включає всі сигнали користувачів, записується як

$$y(t) = \sum_{k=1}^{K} x_k(t) g_k + w(t)$$

де g_k - коефіцієнт підсилення каналу загасання для зв'язку між БС та UE_k, $x_k(t)$ - інформаційний сигнал для k-го UE, а w(t) - адитивний білий гаусівський шум на БС із середнім нулем та густиною N_0 (Вт/Гц). У висхідній лінії, як і в низхідній, UE можуть знову оптимізувати свою потужність передачі відповідно до свого розташування.

Висновки

У цій роботі представлено та досліджено основи NOMA і продемонстровано її перевагу над традиційною OFDMA з точки зору сумарної пропускної здатності, енергоефективності та спектральної ефективності. Також згадано про вплив недосконалості приймача SIC на продуктивність системи. Завдяки своїм відмінним характеристикам, NOMA залишається найсильнішим кандидатом для майбутніх мереж 5G. Однак для успішного впровадження NOMA все ще існують певні виклики.

По-перше, для запуску алгоритмів SIC потрібна висока обчислювальна потужність, особливо для великої кількості користувачів при високих швидкостях передачі даних.

По-друге, оптимізація розподілу потужності залишається складною проблемою, особливо коли користувачі швидко переміщуються в мережі. Нарешті, приймач SIC чутливий до помилок відміни, які можуть легко виникати в каналах із завмираннями. Для підвищення надійності і, відповідно, зменшення помилок декодування, його можна реалізувати за допомогою інших методів рознесення, таких як множинний вхід-багаторазовий вихід (MIMO), або за допомогою схем кодування.

Апробація результатів магістерської роботи

Основні результати магістерської роботи доповідалися на Науково-практичній конференції «ТЕХНОЛОГІЧНІ ГОРИЗОНТИ: ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОГРЕСУ УКРАЇНИ І СВІТУ», Київ: ДУІКТ, 28 листопада 2023 р.

Основні наукові результати магістерської роботи опубліковано в науковому журналі "Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, – 2023, – №2".

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА

на кваліфікаційну магістерську роботу

здобувача вищої освіти Хорошуна Олександра Олександровича
на тему: «Методи підвищення інформаційної ємності та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції»

Актуальність:

Одним з визначальних елементів будь-якої системи мобільного зв'язку є форма сигналу, що використовується для радіолінії в мережі радіодоступу. На етапі розробки технології 5G постулювалися різні форми хвиль і методи модуляції, але для 5G New Radio, 5G NR, циклічний префіксний OFDM, CP-OFDM був обраний як основний кандидат, а DFT-s-OFDM, дискретне перетворення Фур'є з ортогональним мультиплексуванням з частотним поділом каналів, використовувалося в деяких областях. Важливо мати фундаментальне розуміння мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM), оскільки ця технологія є базовим будівельним блоком для багатьох сучасних схем модуляції. Основні принципи OFDM будуть представлені на прикладі простої аналогової реалізації OFDM, а потім ці концепції будуть поширені на цифрову область за допомогою простої цифрової реалізації OFDM.

Позитивні сторони:

1. Зміст магістерської роботи відповідає завданню. Її автор показав високий рівень знань і ступінь підготовленості до майбутньої роботи за фахом.

2. Текст викладений грамотно, ясно, послідовно. Графічний матеріал оформлений якісно. Широко використовується сучасна науково-технічна література, включаючи англомовні видання.

Недоліки:

1. В роботі занадто багато уваги приділено теоретичним засадам роумінгу за технологією 802.11.

2. В роботі чітко не визначено, яке програмне забезпеченням використовується для вимірювання швидкості обміну даними.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку кваліфікаційної роботи.

Висновок: кваліфікаційна робота заслуговує оцінку «відмінно», а здобувач ХОРОШУН Олександр Олександрович заслуговує присвоєння кваліфікації: «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Рецензент: к.т.н. доцент каф. КІ — *(науковий ступінь, вчене звання)*; *(підпис)*; В.М. Чоревин — *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Олександр ХОРОШУН

Назва: Методи підвищення інформаційної ємності та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції

Координатор: Вікторія СКРІПНИК

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:3.1

Коефіцієнт подібності 2:0

Тривога: 12

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

☑ виявлені в роботі запозичення є сумлінними і не мають ознак плагіату. Тому робота визнається самостійною і допускається до захисту;

☐ виявлені в роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і самостійності її автора. Роботу направити на доопрацювання;

☐ виявлені в роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень. У зв'язку з чим, робота не допускається до захисту.

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій

ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Хорошун О.О. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
освітньо-професійної програми Апаратура радіозв'язку, радіомовлення і телебачення

на тему: Методи підвищення інформаційної ємності та завадозахищенності сигналів з використанням сучасних методів модуляції

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

Директор ННІТ _____ Владислав КРАВЧЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Хорошун Олександр Олександрович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти технологіями нового покоління, вміло працювати з програмно-апаратними засобами мобільного зв'язку, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які доручались керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до інженерної роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу Хорошуна Олександра Олександровича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію «Магістр з телекомунікацій та радіотехніки».

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Вікторія СКРИПНІК
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

"___" _____ 2023 року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Хорошун О.О.
(прізвище та ініціали)

допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувачка кафедри
Мобільних та відеоінформаційних технологій _____ Наталія РУДЕНКО
(підпис) *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

"___" _____ 2023 року