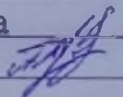


Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем і технологій

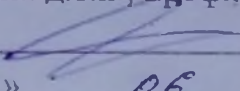
Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:

АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО
МНОЖИННОГО ДОСТУПУ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

Виконав: здобувач 4-го курсу, групи ПЗТ-216
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

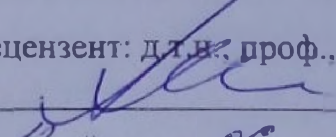
 Горобчук А. С.

Керівник: д.т.н., проф., професор каф. ІКСТ

 Михалевський Д.В.

« 12 » 06 2025 р.

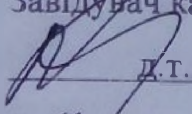
Рецензент: д.т.н., проф., завідувач каф. ІРТС

 Осадчук О.В.

« 12 » 06 2025 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІКСТ

 д.т.н., проф. Кичак В.М.

« 12 » 06 2025 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інфокомунікаційних систем та технологій
Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації
(шифр і назва)
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
(шифр і назва)
Освітня програма – Програмне забезпечення телекомунікаційних систем

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ІКСТ
д.т.н., професор В.М. Кичак
«5» 05 2025 року

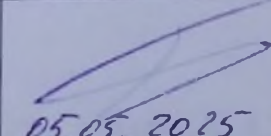
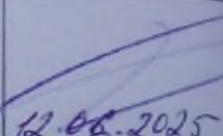
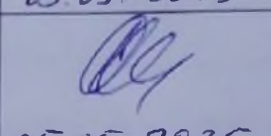
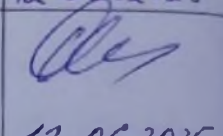
ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ
Горобчуку Артему Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Алгоритми підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж
керівник роботи Михалевський Дмитро Валерійович, докт. техн. наук, професор,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ВНТУ від «20» березня 2025 року № 97
- Строк подання здобувачем роботи: 09 червня 2025 року
- Вихідні дані до роботи: максимальна швидкість передачі даних до 20 Гбіт/с (DL), до 10 Гбіт/с (UL); тип модуляції – 16-QAM; затримка (Latency) < 1 мс; зниження SER при використанні M-NOMA (відносно NOMA) до 50%; зменшення інтерференції в M-NOMA (завдяки I/Q-розділенню) до 50%; підвищення швидкості передачі даних у M-NOMA (порівняно з NOMA) до 95%; зменшення обчислювальної складності на приймачі до 40%; спектральна ефективність ≥ 30 біт/с/Гц; середня енергетична ефективність > 10 Мбіт/Дж; ймовірність символічної помилки (SER) для M-NOMA у каналі AWGN (4-QAM) $\approx 10^{-2}$; ймовірність символічної помилки (SER) для M-NOMA у каналі Релея (16-QAM) $\approx 10^{-2}$; ефективність збору радіочастотної енергії (RFEH) у сценарії M-NOMA-SWIPT до 75%; модуляційні схеми, використані в симуляції 4-QAM, 16-QAM; кількість користувачів у сценаріях моделювання 2 та 4; використана ширина смуги каналу 20 МГц; потужність передавача (на одного користувача) до 23 дБм (200 мВт); підвищення пропускної здатності при переході з NOMA на M-NOMA до 1,9x.
Зміст розрахунково-пояснювальної записки роботи (перелік питань, які потрібно розробити): вступ, впровадження неортогонального множинного доступу (noma) у систему бездротового зв'язку, неортогональний множинний доступ на базі

модуляційних методів, оцінювання продуктивності неортогонального множинного доступу на основі модуляції, охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): неортогональний метод множинного доступу в низхідному каналі; неортогональний метод множинного доступу у висхідному каналі; схема інтеграції повного дуплексу (FD) з технологією NOMA; Схема зменшення взаємних завад для QPSK; схема зниження міжкористувацьких завад та усунення SIC.

6. Консультанти розділів роботи

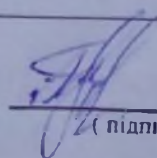
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання приймає
Спеціальна частина	Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ	 05.05.2025	 12.06.2025
Охорона праці	Дембіцька С.В., професор кафедри БЖДПБ	 05.05.2025	 12.06.2025

7. Дата видачі завдання «05» травня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

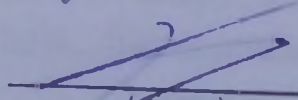
№ з/п	Назва етапів бакалаврської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Формування та затвердження теми та індивідуального завдання бакалаврської кваліфікаційної роботи (БКР)	06.05.2025р.	
2	Виконання спеціальної частини БКР. Перший рубіжний контроль виконання БКР	19.05.2025р.	
3	Виконання спеціальної частини БКР. Другий рубіжний контроль виконання БКР	02.06.2025р.	
4	Виконання розділу «Охорона праці»	06.06.2025р.	
5	Нормоконтроль БКР	09.06.2025р.	
6	Попередній захист БКР	10.06.2025р.	
7	Рецензування БКР	11.06.2025р.	
8	Захист БКР	13.06.2025р.	

Студент


(підпис)

Горобчук А.С.

Керівник роботи



Михалевський Д.В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.396

Горобчук А.С. Алгоритми підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж. Бакалаврська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма – програмне забезпечення телекомунікаційних систем. Вінниця: ВНТУ, 2025. 100 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 121 назв; рис.: 29; табл. 14.

У бакалаврській кваліфікаційній роботі розглянуто проблему підвищення ефективності систем нелінійного множинного доступу (NOMA), що є перспективною технологією для реалізації вимог п'ятого покоління мобільного зв'язку (5G). Основну увагу приділено зменшенню міжкористувацької інтерференції, зниженню обчислювальної складності процедури послідовного придушення завад (SIC), підвищенню спектральної та енергоефективності, а також покращенню показників безпеки і затримки. Запропоновано вдосконалену схему M-NOMA, яка впроваджує ортогональність на рівні модуляції, що дозволяє істотно зменшити рівень інтерференції, знизити ймовірність помилок у символах (SER) та підвищити швидкість передачі даних. Проведено аналітичне моделювання характеристик системи для різних сценаріїв зв'язку та модуляційних форматів (4-QAM, 16-QAM), що підтверджує переваги запропонованого підходу. Результати роботи можуть бути використані для подальшої оптимізації бездротових систем наступного покоління з урахуванням вимог до продуктивності, безпеки та енергоефективності.

Ключові слова: спектральна ефективність, міжкористувацька інтерференція, енергоефективність, затримка, оптимізація бездротових систем.

ABSTRACT

UDC 621.396

Horobchuk A.S. Algorithms for Enhancing the Efficiency of Non-Orthogonal Multiple Access in Wireless Networks: Bachelor's Qualification Thesis in specialty 172 – Telecommunications and Radio Engineering, educational program – Software for Telecommunication Systems. – Vinnytsia: VNTU, 2025. – 100 p.

In Ukrainian. Bibliography: 121 titles. Figures: 29. Tables: 14.

This bachelor's thesis addresses the problem of improving the efficiency of non-orthogonal multiple access (NOMA) systems, which are considered a promising technology for meeting the requirements of fifth-generation (5G) mobile communication networks. The main focus is on reducing inter-user interference, lowering the computational complexity of the successive interference cancellation (SIC) procedure, and enhancing spectral and energy efficiency, as well as improving security and latency indicators. An improved M-NOMA scheme is proposed, which introduces orthogonality at the modulation level, significantly reducing interference, decreasing the symbol error rate (SER), and increasing data transmission rates. Analytical modeling of system characteristics was carried out for various communication scenarios and modulation formats (4-QAM, 16-QAM), confirming the advantages of the proposed approach. The results of the study can be applied to the further optimization of next-generation wireless systems, taking into account the requirements for performance, security, and energy efficiency.

Keywords: spectral efficiency, inter-user interference, energy efficiency, latency, wireless systems optimization.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	6
ВСТУП.....	7
1 ВПРОВАДЖЕННЯ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ (NOMA) У СИСТЕМУ БЕЗДРОТОВОГО ЗВ'ЯЗКУ	11
1.1 Неортогональний множинний доступ.....	11
1.2 Мультиплексування в домені потужності (PDM) у системах NOMA.....	14
1.3 NOMA для базової системи бездротового зв'язку	23
1.4 Використання NOMA в інтелектуальних транспортних системах.....	27
1.5 NOMA для бездротової передачі енергії (WPT) та одночасної бездротової передачі інформації й енергії (SWIPT)	30
1.6 NOMA для повнодуплексного бездротового зв'язку	33
1.7 Інтеграція повного дуплексу в 5G та системи Beyond 5G	38
1.8 Впровадження NOMA у технології за межами 5G	41
1.9 Висновки до розділу 1	44
2 НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ МНОЖИННИЙ ДОСТУП НА БАЗІ МОДУЛЯЦІЙНИХ МЕТОДІВ.....	46
2.1 Алгоритм неортогонального множинного доступу на основі модуляційних методів (M-NOMA).....	46
2.2 Напівдуплексна схема M-NOMA	48
2.3 Обчислення швидкості передачі даних.....	53
2.4 Висновки до розділу 2	56
3 ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ НА ОСНОВІ МОДУЛЯЦІЇ.....	57
3.1 Дослідження продуктивності HD M-NOMA.....	57
3.2 Моделювання M-NOMA в умовах плоского загасаючого каналу	62
3.3 Висновки до розділу 3	67
4 ОХОРОНА ПРАЦІ	68
4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи.....	69

	5
4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	72
4.3 Пожежна безпека.....	77
ВИСНОВКИ.....	81
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	83
Додаток А ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА	97
Додаток Б ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ . Помилка!	
Закладку не визначено.	

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

AI – штучний інтелект

AN – штучний шум

FD – повний дуплекс

IBFD – внутрішньосмуговий повний дуплекс

BS – базова станція

CSI – інформація про стан каналу

CJ – спільне придушення завад

HetNet – гетерогенна мережа

IoT – Інтернет речей

IIoT – промисловий Інтернет речей

ITS – інтелектуальна транспортна система

MLGA – генетичний алгоритм машинного навчання

NOMA – неортогональний множинний доступ

OFDMA – множинний доступ з ортогональним частотним розділенням

PS – розподіл потужності

RAN – мережа радіодоступу

P2P – точка-точка

QPSK – квадратурна фазова модуляція

QoS – якість обслуговування

RFEN – збирання радіочастотної енергії

SE – спектральна ефективність

SIC – послідовне придушення завад

STBC – просторово-часове блочне кодування

SWIPT – одночасна бездротова передача інформації та енергії

TDMA – множинний доступ з тимчасовим розділенням

UE – користувачське обладнання

URLLC – наднадійний зв'язок з малою затримкою

WSN – бездротові сенсорні мережі

ВСТУП

Актуальність теми. Історія розвитку бездротового зв'язку розпочалася ще у 1865 році й відтоді характеризується безперервним вдосконаленням. За цей час технології мобільного зв'язку пройшли етапи від першого покоління (1G) до четвертого (4G), і нині триває активна фаза впровадження систем п'ятого покоління (5G) та їх подальшого розвитку (B5G). Ці технології дедалі глибше інтегруються у повсякденне життя, впливаючи на соціальні, економічні та технологічні аспекти сучасного суспільства [1].

Попри значні досягнення, системи зв'язку 3G та 4G стикаються з рядом критичних технічних обмежень, серед яких – обмежена пропускна здатність, високі затримки передачі, енергозатратність, а також питання кібербезпеки та конфіденційності. Інноваційні рішення, що виникають у контексті новітніх технологій, розкривають нові можливості для підвищення ефективності зв'язку, проте водночас породжують нові виклики, зокрема пов'язані з обробкою даних, захистом інформації та складністю реалізації [2].

Однією з перспективних технологій, здатних забезпечити ефективну роботу бездротових систем зв'язку наступних поколінь, є неортогональний множинний доступ (NOMA, Non-Orthogonal Multiple Access). На відміну від традиційних схем, заснованих на ортогональному розподілі частотного спектра (наприклад, FDMA, TDMA), NOMA дозволяє кільком користувачам одночасно використовувати однакові частотні ресурси, розподіляючи потужність сигналів відповідно до їхнього каналного стану. Такий підхід дозволяє значно підвищити спектральну та енергетичну ефективність системи, зменшити затримки, забезпечити більш рівномірний доступ до ресурсів мережі (системну справедливість) та підвищити рівень захисту переданих даних [3].

Технологія NOMA особливо актуальна в контексті розвитку Інтернету речей (IoT), систем обробки великих даних (Big Data) та тактильного Інтернету (Tactile Internet), де потрібна одночасна передача великої кількості даних за умов високої щільності користувачів. Проте реалізація NOMA супроводжується

рядом технічних труднощів. Зокрема, зростання кількості користувачів призводить до підвищеного рівня взаємних завад, що ускладнює реалізацію алгоритмів послідовного придушення перешкод (SIC, Successive Interference Cancellation), підвищує обчислювальну складність системи, а також створює додаткові виклики щодо забезпечення конфіденційності інформації. У цій дипломній роботі основну увагу приділено аналізу актуальних проблем, пов'язаних із впровадженням NOMA в системах бездротового зв'язку наступних поколінь, та дослідженню можливих підходів до їхнього ефективного вирішення [4].

Аналіз останніх досліджень. У сфері Інтернету речей (IoT), неортогонального множинного доступу (NOMA), а також мереж мобільного зв'язку п'ятого та наступних поколінь, було проведено значну кількість наукових досліджень багатьма фахівцями. Серед провідних дослідників, що зробили вагомий внесок у розвиток відповідної наукової галузі, варто відзначити таких як A.S.A. Muthanna, T. Rappoport, D.C. Liang, H.S. Ali, Z. Ding, M. Dohler, C. Toker, F. Baccelli, S. Singh, S. Rangan та інших [5]. Усі зазначені дослідження зробили суттєвий внесок у формування теоретичних основ та практичної реалізації систем бездротового зв'язку п'ятого і наступних поколінь з використанням NOMA. Разом з тим, актуальним залишається завдання подальшого вдосконалення технічних характеристик даної технології шляхом застосування системного аналізу, зокрема із залученням математичних методів оптимізації, таких як метод Лагранжа, а також інструментів штучного інтелекту, зокрема методів машинного навчання (ML), адаптованих до конкретних сценаріїв функціонування систем [6].

Застосування таких підходів дозволяє не лише підвищити ефективність роботи бездротових мереж та соціальних сервісів, але й вирішити ряд критичних завдань у сфері IoT. З метою глибшого розуміння концепції NOMA, а також виявлення її потенційних обмежень, було здійснено систематичний огляд літературних джерел. У процесі аналізу було ідентифіковано два ключові

недоліки NOMA: підвищена обчислювальна складність та наявність значного рівня міжкористувачьких перешкод [7].

Враховуючи зазначене, перспективним напрямом є часткове впровадження елементів ортогональності у систему доступу, що відкриває можливості для оптимізації її параметрів. Таким чином, основна мета цієї дипломної роботи полягає в оптимізації швидкісних та якісних характеристик системи шляхом визначення раціонального балансу між ортогональними та неортогональними компонентами у механізмах множинного доступу. Це, у свою чергу, визначає наукове завдання дослідження, а також його об'єкт і предмет [8].

Мета та постановка задачі. Метою даної бакалаврської кваліфікаційної роботи є розробка ефективних алгоритмів, спрямованих на підвищення загальної продуктивності систем NOMA з урахуванням таких аспектів, як міжкористувачькі завади, обчислювальна складність процедури послідовного придушення завад (SIC), питання безпеки, енергоефективності, збору радіочастотної енергії, досяжної швидкості передачі даних і затримки.

Задачами бакалаврської кваліфікаційної роботи є:

1. Провести критичний аналіз існуючих алгоритмів NOMA та оцінити їх ефективність на основі огляду сучасної наукової літератури.
2. Розробити вдосконалений алгоритм для підвищення надійності та захищеності користувачів, які використовують спільні ресурси каналу.
3. Інтегрувати запропонований алгоритм у модель системи для впровадження в сучасні мережі Інтернету речей (IoT).
4. Побудувати математичну модель розробленого алгоритму для аналітичного обґрунтування та порівняння з існуючими підходами.
5. Розробити вирази для оцінки енергоефективності та ефективності збору радіочастотної енергії.
6. Провести імітаційне моделювання параметрів системи, отримати числові результати, порівняти їх з базовими моделями NOMA та оцінити ефективність запропонованих підходів.

Апробація результатів роботи. Основні ідеї роботи доповідались і обговорювались на науковій конференції ВНТУ у 2025 році.

1 ВПРОВАДЖЕННЯ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ (NOMA) У СИСТЕМУ БЕЗДРОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Неортогональний множинний доступ

Перехід від технології OFDM до концепції неортогонального множинного доступу (NOMA) сприяє підвищенню спектральної ефективності, забезпечує підтримку масового з'єднання пристроїв, покращує системну справедливість та знижує затримку передачі даних. Крім того, NOMA позитивно впливає на якість обслуговування (QoS), зменшує навантаження на бездротову мережу, підвищує доступність користувацьких пристроїв (включаючи здешевлення їх виробництва) та сприяє широкомасштабному впровадженню технологій Інтернету речей (IoT).

На рівні передавання NOMA реалізує накладання (суперпозицію) сигналів декількох користувачів у спільному частотно-часовому ресурсі, використовуючи мультиплексування за доменом потужності або коду. На приймальній стороні застосовуються алгоритми розділення змішаного сигналу для виділення компонентів, що відповідають окремим користувачам.

Існує декілька варіантів реалізації NOMA, зокрема: SCMA (Sparse Code Multiple Access — множинний доступ із розрідженим кодуванням), MUSA (Multi-User Shared Access — спільний доступ багатьох користувачів), FBMC (Filter Bank Multicarrier — багатоносійна передача із фільтрацією по банку фільтрів), BDM (Bit Division Multiplexing — мультиплексування з розділенням по бітам). Ці підходи відіграють ключову роль у реалізації основних функціональних вимог до майбутніх мереж зв'язку шостого покоління (6G).

Міжнародний союз електрозв'язку (MCE) виділяє три ключові напрями розвитку 5G, які зберігають актуальність і для 6G: URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications — наднадійний зв'язок із наднизькою затримкою), mMTC (massive Machine-Type Communications — масові машинні з'єднання), eMBB (enhanced Mobile Broadband — розширене мобільне широкосмугове

з'єднання). У цьому контексті перспективною вважається гетерогенна NOMA (H-NOMA), яка дозволяє одній базовій станції (BS) обслуговувати різні типи трафіку (URLLC, mMTC, eMBB). Використання H-NOMA в архітектурі неортогонального радіодоступу (Non-Orthogonal RAN) демонструє переваги над традиційними ортогональними методами передачі. Водночас повна інтеграція NOMA у практичні системи можлива лише за умов дотримання низки суворих технічних вимог, реалізація яких може бути нетривіальною з точки зору інженерного впровадження. У цьому розділі розглядаються теоретичні засади NOMA, її потенціал у контексті 6G, а також окреслюється внесок даної дисертаційної роботи в дослідження NOMA, зокрема у зв'язку з такими напрямками як: передача енергії одночасно з даними (SWIPT), безпека мереж, застосування методів машинного навчання (ML) для оптимізації параметрів зв'язку.

Оскільки повноцінна заміна OFDMA на NOMA є наразі технічно складною, перспективним вважається гібридний підхід, що поєднує обидві технології. Активні дослідження NOMA у контексті архітектури 6G продовжуються, і цей розділ містить аналітичний огляд найактуальніших наукових публікацій, присвячених цій тематиці.

Мультиплексування в домені потужності (PDM) та в домені коду (CDM) — це дві ключові схеми, які використовуються для реалізації неортогонального множинного доступу (NOMA). Схема PDM передбачає розподіл рівня передавальної потужності на передавачі між користувачами залежно від умов їхніх каналів зв'язку, що дозволяє підвищити ефективність системи, максимізувати пропускну здатність і забезпечити розпізнавання сигналів усіх користувачів. На приймальній стороні застосовуються методи поетапного скасування перешкод (SIC), які дозволяють знижувати відношення сигналу до шуму й перешкод (SINR) за допомогою послідовного декодування сигналів користувачів та їх видалення з прийнятого суперпозиційного сигналу.

У багатостільникових мережах застосування NOMA супроводжується зниженням продуктивності через міжсотові інтерференції. Для ефективного

доступу до даних користувачів і інформації про стан каналу (CSI) на базових станціях може бути реалізована схема спільного прекодування, проте ефективність такого підходу залежить від оптимального вибору прекодера.

Спектральна ефективність у NOMA додатково підвищується за рахунок застосування підходів MIMO. Початково використовувалася схема з однією антеною, яку згодом замінила система MISO із двоетапним формуванням променя, і в підсумку — сучасна концепція MIMO. Для перевищення ефективності MIMO-OMA, у MIMO-NOMA були запропоновані нові методи динамічного формування кластерів користувачів та розподілу потужності. Зокрема, для оптимізації розподілу потужності застосовувався алгоритм бісекційного пошуку. Додаткове покращення досягалося впровадженням багатокористувацького MIMO (MU-MIMO), у якому міжкористувацькі завади усуваються за допомогою алгоритму SIC.

У контексті прямої взаємодії пристроїв (Device-to-Device, D2D NOMA), технологія демонструє високу ефективність, хоча супроводжується низкою відкритих дослідницьких проблем. До них належать: спарювання користувачів, продуктивність при мобільності, взаємні інтерференції між D2D-парами, управління ресурсами та підтримка гетерогенних мереж. Для вирішення цих завдань було запропоновано структуру D2D-комунікації на базі NOMA, що передбачає можливість зв'язку одного пристрою з кількома іншими (multi-D2D). Проблема міжканальних перешкод у таких мережах вирішується шляхом оптимального повторного використання частотного ресурсу групами D2D відповідно до заданої архітектури.

Кооперативна NOMA (C-NOMA) є ще одним підходом до підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності, а також покращення надійності передачі даних. Як і в PDM, вона враховує умови радіоканалу, включно з самозавадами та варіаціями відстаней до користувачів. У межах цієї схеми сильні користувачі виконують функції ретрансляторів для передачі інформації слабким. Завдяки цьому забезпечується високий рівень справедливості — слабкі користувачі отримують сигнали з вищою потужністю.

Моделювання показує, що швидкість передачі даних у NOMA перевищує аналогічний показник у системах OMA. Крім того, спектральну ефективність можна підвищити за допомогою когнітивних радіомереж (CRN), зокрема шляхом інтеграції CRN із NOMA на рівні первинного передавача (PT). Це дозволяє гнучко керувати потужністю базової станції. Водночас напрям розподілу потужності для CRN-NOMA залишається практично недослідженим.

Варто зазначити, що використання NOMA супроводжується зростанням енергоспоживання через збільшені обчислювальні навантаження, пов'язані з високою щільністю з'єднань. Це створює нові виклики в контексті енергоефективності. Стандартних акумуляторів недостатньо для підтримки вимог мереж 5G, а перспективним напрямом є збір енергії з навколишнього середовища. У цьому контексті поєднання концепцій NOMA та одночасної передачі енергії й інформації (SWIPT) є природним шляхом до створення енергоефективних систем нового покоління [19].

1.2 Мультиплексування в домені потужності (PDM) у системах NOMA

Мультиплексування в домені потужності (PDM) у системах NOMA — це метод неортогонального розділення користувачів шляхом призначення їм різних рівнів потужності сигналу на передавальному боці. Основна ідея полягає в тому, щоб користувачі з кращими умовами каналу отримували меншу потужність, тоді як користувачам зі слабшими каналами призначається вища потужність. Такий підхід дозволяє передавати кілька сигналів одночасно в одному частотному ресурсі, що значно підвищує спектральну ефективність та ефективність використання ресурсів.

На приймальному боці для розділення суперпозиційного сигналу використовується алгоритм Successive Interference Cancellation (SIC), який передбачає поетапне декодування сигналів користувачів — починаючи з найбільш потужного сигналу і поступово видаляючи його з прийнятого сигналу

для декодування слабших. Це дозволяє мінімізувати вплив міжкористувацьких завад та покращити якість обслуговування.

Схема PDM є фундаментальним компонентом NOMA і відіграє ключову роль у реалізації мультимедіа з розділенням за потужністю в майбутніх мережах зв'язку покоління 5G і 6G, особливо в умовах високої щільності підключених пристроїв, таких як в Інтернеті речей (IoT) [22].

Як правило, методи неортогонального множинного доступу (NOMA) класифікують за двома основними схемами: мультиплексування в домені потужності (Power Domain Multiplexing, PDM) та мультиплексування в домені коду (Code Domain Multiplexing, CDM). У схемі PDM користувачам призначаються різні рівні потужності відповідно до умов їхніх каналів зв'язку з метою максимізації продуктивності системи та ефективного розділення сигналів окремих абонентів.

Для зменшення міжкористувацьких завад на приймальному боці застосовується алгоритм послідовного скасування завад (Successive Interference Cancellation, SIC) [9]. Цей підхід дозволяє знизити ефективний рівень співвідношення сигнал/шум + завади (SINR), зокрема в умовах ефекту близькості (near-far effect) або при нерівномірному розподілі потужності між користувачами на передавальній стороні.

У контексті PDM окремим користувачам призначаються специфічні рівні потужності для формування суперпозиційного сигналу. Це дозволяє оптимізувати сумарну швидкість передачі та забезпечити більш рівномірний розподіл пропускної здатності між користувачами [9].

Дослідження показують, що PDM здатна забезпечити вищу пропускну здатність, підвищену спектральну ефективність та зменшення затримки у порівнянні з традиційними методами множинного доступу [32]. У системі NOMA передавач одночасно транслює сигнал, що містить інформацію для всіх користувачів. Для реалізації суперпозиційного кодування (Superposition Coding, SC) у домені потужності передавач призначає нижчу потужність для

користувачів із кращими умовами каналу (ближчих користувачів) та вищу потужність — для віддалених користувачів.

Кожен користувач приймає сумарний сигнал, що містить компоненти сигналів усіх користувачів. Для виділення цільового сигналу ближній користувач виконує SIC — спочатку декодує сигнали користувачів з вищими рівнями потужності (тобто віддалених користувачів), після чого виділяє власний сигнал. Таким чином, для системи з N користувачами, ближній користувач повинен виконати декодування $N-1$ сигналів за допомогою SIC, що значно ускладнює реалізацію та збільшує обчислювальну складність і енергоспоживання на стороні приймача. Водночас, віддалені користувачі, сигнал яких передається з вищою потужністю, сприймають сигнали ближніх користувачів як фонові завади та здійснюють безпосереднє декодування без використання SIC.

Розподіл потужності між користувачами у системі неортогонального множинного доступу (NOMA) в напрямку низхідного зв'язку (downlink, DL) є складним завданням для базової станції (BS), оскільки від цього безпосередньо залежить ефективність роботи механізму послідовного скасування завад (SIC). Віддалені користувачі, як правило, мають гірші умови радіоканалу і потребують більшої потужності для прийому інформації, тому базова станція адаптивно призначає їм вищий рівень передавальної потужності.

Усі користувачі одночасно отримують суперпозиційний сигнал, що є сумою сигналів, призначених усім користувачам у системі. Для виділення свого інформаційного сигналу приймачі застосовують алгоритм SIC: вони послідовно декодують сигнали інших користувачів, починаючи з найпотужнішого, та ітеративно видаляють їх із сумарного сигналу до моменту отримання власного. Схематичне зображення принципу роботи DL-NOMA наведено на рисунку 1.1.

Нижче наведено рівняння, яке описує сигнал, що передається базовою станцією

$$x(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{\alpha_m P_T} x_m(t), \quad (1.1)$$

де $x_m(t)$ — індивідуальна інформація користувача, представлена у формі OFDM-сигналу;

P_T — загальна потужність, доступна на базовій станції (BS);

α_m — коефіцієнт розподілу потужності для конкретного користувача.

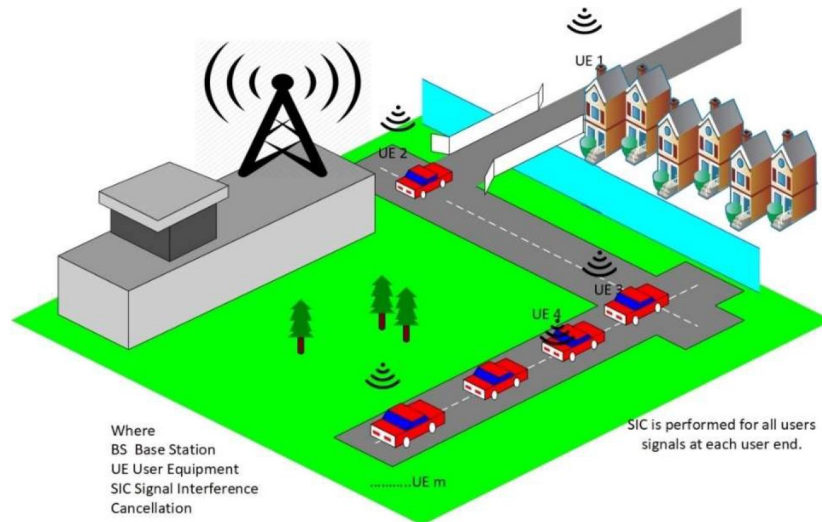


Рисунок 1.1 – Неортогональний метод множинного доступу для передачі в низхідному каналі зв'язку

У наведеному вище рівнянні добуток коефіцієнта розподілу потужності та загальної потужності сигналу визначає потужність сигналу, що виділяється для конкретного користувача.

Сигнал, прийнятий користувачем, може бути записаний у такому вигляді:

$$y_m(t) = x(t)g_m + w_m(t), \quad (1.2)$$

де $y_m(t)$ — прийнятий сигнал,

w_m — адитивний білий гаусівський шум з спектральною щільністю потужності N_0 (Вт/Гц) і нульовим середнім значенням.

Віддалений користувач безпосередньо декодує власний сигнал, розглядаючи сигнали інших користувачів як завади, оскільки завдяки

найвищому рівню потужності його сигнал можна легко відокремити. Відповідно, відношення сигнал/шум (SNR) для користувача з найбільшою потужністю можна записати у такому вигляді:

$$SNR_M = \frac{P_M g_M^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{M-1} P_i g_M^2}. \quad (1.3)$$

У наведеному вище рівнянні W позначає смугу пропускання каналу передачі. Найближчий до базової станції користувач у підсумку декодує власний сигнал. Для такої ситуації співвідношення сигнал/шум (SNR) можна подати у вигляді такого рівняння:

$$xSNR_1 = \frac{P_1 g_1^2}{N_0 W}. \quad (1.4)$$

Таким чином, як правило, співвідношення сигнал/шум (SNR) для кожного користувацького обладнання (UE) може бути записане у такій формі:

$$SNR_m = \frac{P_m g_m^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{m-1} P_i g_m^2}. \quad (1.5)$$

Пропускна здатність (біт/с) для технології NOMA відносно користувацького обладнання (UE) може бути виражена у такому вигляді:

$$R_m = W \log_2 \left(1 + \frac{P_m g_m^2}{N + \sum_{i=1}^{m-1} P_i g_m^2} \right). \quad (1.6)$$

Для технології OFDMA пропускна здатність може бути подана у такій формі:

$$R_m = W_m \log_2 \left(1 + \frac{P_m g_m^2}{N_m} \right). \quad (1.7)$$

У наведеному вище рівнянні $W_m = \frac{W}{K}$, $N_m = N_0 W_m$.

Відповідно,

$$R_T = \sum_{m=1}^M R_m, \quad (1.8)$$

демонструє підсумовування потужностей для технологій NOMA та OFDMA. Для обґрунтування справедливого розподілу потужності між усіма користувачами можна обчислити індекс справедливості за допомогою наступного виразу:

$$F = \frac{(\sum R_m)^2}{K \sum R_m^2}, \quad (1.9)$$

Якщо значення F наближається до 1, це свідчить про справедливий розподіл ресурсів. З метою виконання вимог технології NOMA щодо максимізації сумарної пропускної здатності в реальному часі R_T шляхом раціонального розподілу потужності з урахуванням обмеження на справедливість, наступне рівняння формулює відповідну задачу оптимізації:

$$\sum_{m=1}^M P_m \leq P_T, \quad (1.10)$$

$$R_T = \text{maximize } W \log_2 \left(1 + \frac{P_m g_m^2}{N + \sum_{i=1}^{m-1} P_i g_m^2} \right) \text{ subject to: } P_m \geq 0, \forall m$$

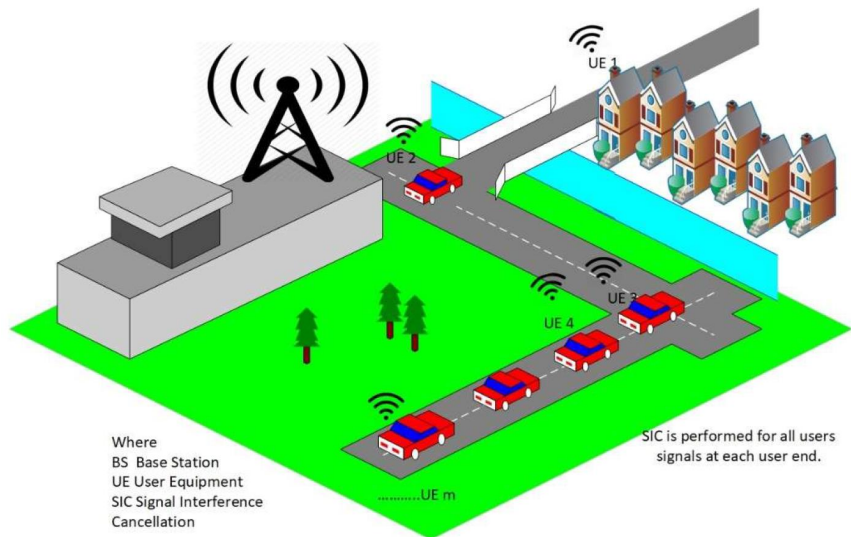


Рисунок 1.2 – Неортогональний метод множинного доступу для передачі у висхідному каналі зв'язку

Як показано на наведеній вище схемі, базова станція (BS) приймає сигнал від кількох користувачів через висхідний канал зв'язку.

Сигнал, що приймається базовою станцією, може бути записаний у такій формі:

$$y(t) = \sum_{m=1}^M x_m(t)g_m + w(t), \quad (1.11)$$

де m — кількість користувачів,

g_m — коефіцієнт підсилення з урахуванням втрат у каналі,

$x(t)$ — форма інформаційного сигналу,

$w(t)$ — адитивний білий гаусівський шум (AWGN), присутній на стороні базової станції (BS).

У висхідному каналі зв'язку базова станція спочатку декодує сигнал, отриманий від найближчого користувача, та застосовує метод послідовного багатоетапного усунення завад (SIC), використовуючи різницю у рівнях потужності сигналів, що зумовлена різною віддаленістю користувачів. Інші

сигнали розглядаються як завади. Відповідно, сигнал, отриманий від користувача UE1, записується у такій формі:

$$R_1 = \frac{P g_1^2}{N + \sum_{i=2}^M P g_i^2}, \quad (1.12)$$

У цьому випадку P — потужність, що передається користувацькими пристроями (UE),

$N = N_0 W$, де N_0 — спектральна щільність потужності шуму, а W — смуга пропускання. Під час декодування сигналу від найбільш віддаленого користувача співвідношення сигнал/шум (SNR) для UE_M може бути подане у такому вигляді:

$$SNR_M = \frac{P g_M^2}{N}. \quad (1.13)$$

Як правило, це можна записати у такій формі:

$$SINR_M = 1 + \frac{P g_M^2}{N + \sum_{i=m+1}^M P g_i^2}. \quad (1.14)$$

Для кожного користувацького пристрою (UE) пропускна здатність може бути подана у такій формі:

$$R_m = W \log_2 \left(1 + \frac{P g_m^2}{N + \sum_{i=m+1}^M P g_i^2} \right). \quad (1.15)$$

Однак для технології OFDMA пропускна здатність для кожного користувацького пристрою (UE) може бути подана у такій формі:

$$R_m = W_m \log_2 \left(1 + \frac{P_m g_m^2}{N_m} \right), \quad (1.16)$$

тут $N_m = N_0 W_m$ та $W_m = \frac{W}{K}$.

Таким чином, як для технології NOMA, так і для OFDMA загальна пропускна здатність може бути представлена у такій формі:

$$R_T = \sum_{m=1}^M R_m. \quad (1.17)$$

Практично дуже складно ідентифікувати сигнали, які розглядаються як завади після декодування сигналу, до якого застосовується послідовне багатоступеневе усунення завад (SIC). Відповідно, співвідношення сигнал/шум (SNR) з урахуванням помилок скасування можна подати у вигляді наступного рівняння:

$$SNR_m = \frac{P_m g_m^2}{N_0 W + \sum_{i=1}^{m-1} P_i g_m^2 + \epsilon \sum_{i=m+1}^M P_i g_m^2}, \quad (1.18)$$

Тут ϵ включено у наведене вище рівняння для представлення залишкового сигналу після скасування та характеризує похибку видалення в процесі усунення завад (SIC). Загальна потужність, споживана базовою станцією (BS), може бути виражена за допомогою наступного рівняння:

$$P_{total} = P_T + P_{static}, \quad (1.19)$$

де P_{total} — загальна потужність, споживана або необхідна базовою станцією;
 P_T — потужність, споживана інформаційним сигналом;

P_{static} — потужність, що споживається схемою, зокрема підсилювачем потужності. Енергоефективність може бути визначена за допомогою наступного рівняння:

$$\varepsilon_{energy} = \frac{R_T}{P_{total}}, \quad (1.20)$$

де ε — енергоефективність.

З точки зору спектральної ефективності наведені вище рівняння можуть бути записані у такій формі:

$$\varepsilon_{energy} = \frac{R_T}{P_{total}} = \varepsilon_{spectral} \frac{W}{P_{total}}, \quad (1.21)$$

де $\varepsilon_{spectral}$ — спектральна ефективність.

Відповідно, спектральна ефективність $\varepsilon_{spectral}$ може бути записана як $\varepsilon_{spectral} = \frac{R_T}{W}$ в одиницях біт/с/Гц.

Якщо графічно зобразити залежність між енергоефективністю та спектральною ефективністю з урахуванням потужності ланцюга, максимальна енергоефективність досягається в точці, яка називається «зеленою точкою». При цьому спостерігається лінійна залежність між (енергоефективністю) ε_{energy} та $\varepsilon_{spectral}$ (спектральною ефективністю).

1.3 NOMA для базової системи бездротового зв'язку

Технологія 5G частково базується на OMA, як і попередні покоління мобільного зв'язку. Однак подальший розвиток технології та вдосконалення її прототипів у майбутньому дозволить розширити застосування від локальних мобільних пристроїв до масштабних систем «розумного міста».

Виконання технологічних вимог до пропускної здатності (зокрема для обробки Big Data та інших ресурсомістких задач) не може бути досягнуто в межах традиційних методів ОМА. Класичні методи ОМА включають TDMA, FDMA, OFDMA та CDMA. Проте кілька недоліків ОМА призвели до зниження якості обслуговування (QoS) при переході від систем 1G до нових поколінь у зв'язку зі значним зростанням навантаження. Системи 4G базуються переважно на OFDMA. Методи OFDM складають основу більшості сучасних методів множинного доступу, проте вони мають суттєві недоліки, серед яких — втрата потужності через самоперешкоди, небажане випромінювання та інтермодуляційні спотворення. З цієї причини для передачі висхідного каналу у LTE застосовується SC-FDMA [33].

У порівнянні з ОМА, NOMA є надзвичайно спектрально ефективною технологією завдяки можливості передачі кількох сигналів у межах однієї смуги пропускання. Вона здатна задовольнити численні вимоги системи, включно з високою швидкістю передачі даних, QoS, енергоефективністю, спектральною ефективністю, рівнем конфіденційності, низькою затримкою та низькою ймовірністю розриву зв'язку [32].

Для задоволення високих технологічних вимог NOMA пропонується як ключова технологія майбутніх систем 6G [2]. Вона забезпечує низку переваг, таких як системна справедливість, надвисока швидкість передачі, покращена спектральна ефективність, зменшена затримка, вища ергодічна пропускна здатність, а також ефективність множинного доступу. У [34] зазначено, що ймовірність розриву зв'язку в NOMA залежить від вибору відповідної швидкості та потужності передачі.

Виділення в ролі субпередавачів користувачів із найгіршими каналами значно впливає на спектральну ефективність у системах ОМА. Впровадження NOMA у 5G може подолати цей недолік за рахунок більш ефективного використання спектра всіма користувачами, застосовуючи різні або стандартні стратегії розподілу потужності [35, 36]. В ОМА іноді обслуговувалися лише користувачі з прийнятними умовами каналу, тоді як у NOMA всі користувачі є

рівноправними, що забезпечує рівноцінне обслуговування з високою надійністю та низькою затримкою [37]. Методи підвищення спектральної ефективності MIMO-NOMA та інтеграція когнітивного радіо з NOMA розглядаються у [37].

Переваги NOMA над OMA (зокрема OFDMA) підтверджені численними результатами моделювання [38]. Компроміс між пропускнуою здатністю та енергоефективністю у контексті OMA та проблеми, пов'язані з NOMA, детально розглянуті в [39].

NOMA є ключовим чинником для суттєвого підвищення спектральної ефективності у системах 6G та забезпечення глобального доступу. У цьому методі кодування розподілених просторово-часових блоків [40] користувачі з кращими каналами спільно регулюють рівень потужності передачі всіх користувачів. Користувачі з кращими умовами можуть застосовувати схему розподіленого кодування Alamouti для підтримки користувачів із гіршими каналами замість того, щоб розподіляти суперпозиційний сигнал між собою [40].

У [34] розглянуто два випадки хаотично розподілених користувачів у схемі передачі DL NOMA. У першому випадку кожен користувач має виконувати мінімальні вимоги QoS, що має особливе значення при аналізі ймовірності розриву зв'язку NOMA. Автори також надали аналітичні та симуляційні результати, що демонструють переваги NOMA порівняно з OMA щодо спектральної ефективності [7].

Послідовно у [41] запропоновано нову процедуру розподілу спектра з використанням NOMA для мереж 5G, застосовуючи гібридний метод послідовного поділу смуги пропускання (SBD), що поєднує характеристики традиційних систем NOMA та OMA. У [42] досліджено тенденції розриву зв'язку в DL NOMA, де кожен користувач передає на базову станцію лише 1-бітну інформацію про стан каналу (CSI). Це було докладно проаналізовано у задачі оптимізації динамічного розподілу потужності з метою мінімізації ймовірності розриву при одно-бітовій зворотній передачі CSI.

Просторова модуляція з використанням NOMA [43] зменшує міжкористувацькі перешкоди без погіршення спектральної ефективності. Хоча

послідовне усунення завад на стороні користувача ефективно усуває такі перешкоди, це призводить до збільшення обчислювальної складності. Інша схема NOMA із підтримкою просторової модуляції, запропонована в [44], спрямована на усунення внутрішньокластерних перешкод. Аналогічно, у [45] запропоновано використання просторової модуляції з підтримкою DL NOMA MIMO. Обґрунтування нижньої межі обчислювальної ефективності дозволило отримати наближення інформації для характеристики досяжної спектральної ефективності [102].

Інші новітні напрями досліджень у галузі NOMA охоплюють питання спільного кодування розподілених просторово-часових блоків [40], вплив хаотично розподілених користувачів на NOMA [34], нові методи спільного використання спектра для 5G з використанням NOMA [41, 46], аналіз продуктивності при відмовах [42], а також NOMA на основі просторової модуляції [43, 44, 45].

Віртуальне поєднання користувачів OMA з прикордонних зон зв'язку з центральними користувачами NOMA, відоме як VP-NOMA [47], дозволяє зв'язати одного центрального користувача з кількома користувачами OMA із прикордонних зон. Для VP-NOMA кількість користувачів периферійних комірок має бути більшою, ніж центральних користувачів. Результати моделювання підтвердили, що VP-NOMA перевершує як NOMA, так і OMA.

Для пошуку компромісу між спектральною та енергоефективністю у [48] запропоновано метод розв'язання задач оптимізації. Для аналізу використовувалися гетерогенні мережі на основі NOMA (HetNets). Результати моделювання показали кращу продуктивність енергоефективності (EE) та спектральної ефективності (SE) у системах NOMA-HetNets порівняно з OFDMA.

У [31] було максимізовано досяжну швидкість передачі даних у багаторівневій мережі, використовуючи інформацію про перешкоди каналу на припущеній базовій станції. Запропонований сценарій охоплює як когнітивні радіомережі, так і гетерогенні мережі (HetNets) [102].

1.4 Використання NOMA в інтелектуальних транспортних системах

Інтелектуальні транспортні системи (ІТС) потребують високої пропускної здатності, мінімальної затримки та надійного зв'язку для забезпечення безпечного та ефективного управління транспортними засобами, а також реалізації функцій автономного водіння і обміну даними у реальному часі. Традиційні методи множинного доступу, такі як OFDMA, мають обмеження у спектральній ефективності та стійкості при збільшенні кількості підключених користувачів і високій щільності трафіку.

Технологія неортогонального множинного доступу (NOMA) є перспективним рішенням для задоволення цих вимог завдяки можливості одночасного обслуговування декількох користувачів в одному частотному ресурсі шляхом суперпозиційного кодування та послідовного придушення завад (SIC). У рамках ІТС це забезпечує:

- Підвищення спектральної ефективності шляхом спільного використання частотних ресурсів кількома транспортними засобами одночасно.
- Забезпечення надійного зв'язку з низькою затримкою, що є критично важливим для застосувань із жорсткими вимогами до часу реакції, таких як екстрені повідомлення та кооперативне керування рухом.
- Покращення якості обслуговування (QoS) для користувачів із різними вимогами та умовами каналу, включаючи транспортні засоби на різних відстанях від базової станції чи дорожньої інфраструктури.
- Зменшення енергоспоживання завдяки оптимальному розподілу потужності між користувачами, що є важливим для енергоефективних комунікаційних систем у мобільних середовищах із обмеженими ресурсами живлення.

Сучасні дослідження підтверджують, що інтеграція NOMA з технологіями 5G та перспективними 6G мережами в ІТС сприяє значному підвищенню пропускної здатності та надійності передачі даних, що є необхідним для розвитку «розумних міст» та автономного транспорту. Крім того, поєднання

NOMA з MIMO та когнітивними радіомережами відкриває додаткові можливості для підвищення продуктивності та гнучкості мережі у високонавантаженому транспортному середовищі. Отже, NOMA є ключовою технологією, яка сприяє реалізації інтелектуальних транспортних систем нового покоління, забезпечуючи високу спектральну ефективність, надійність зв'язку та масштабованість мережі.

Передові технологічні вимоги спрямовані на зміну світової парадигми в бік концепції «розумного міста». Очікувана значна трансформація обсягів даних вимагає підвищеної надійності, енергоефективності (EE), низьких затримок та масштабних можливостей підключення. Основним компонентом Інтернету речей (IoT) виступає технологія машинного типу зв'язку (Machine Type Communication, MTC) [49]. Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) поділяє MTC на наднадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) та масовий MTC (massive MTC) [50]. У роботі, серед іншого, розглядаються питання інтеграції URLLC. URLLC є ключовим прикладним підходом для підтримки технологій «розумного міста». Вона характеризується високою надійністю та суворими вимогами до низької затримки передачі даних. Прикладами застосувань URLLC є інтелектуальні мережі, домашня автоматизація, промисловий інтернет речей, дистанційна хірургія та інтелектуальна транспортна система (ITS) [51]. У цій роботі досліджується реалізація URLLC як одного з ключових застосувань у системах ITS.

Інтелектуальна транспортна система (ITS) призначена для оптимізованого управління транспортними потоками з урахуванням аспектів безпеки та координації [52]. Впровадження URLLC у ITS забезпечить підвищену надійність та зниження затримок у системі, що сприятиме ефективнішому запобіганню аварійним ситуаціям на дорозі [102].

Децентралізована системна модель повнодуплексного NOMA (FD-NOMA) [48] може бути ефективною для забезпечення якості обслуговування (QoS) та наднадійного зв'язку з низькою затримкою (URLLC) для автомобілів та інших учасників мережі (V2X). Комплексний аналіз пропускної здатності із короткими

пакетами також є ключовим для забезпечення високої надійності та низьких затримок у NOMA URLLC [53]. Впровадження URLLC сприяє покращенню системи ITS за рахунок зниження затримок і підвищення надійності передачі даних.

Як було зазначено раніше, M-NOMA демонструє кращі показники помилки символу (SER), швидкості передачі даних, пропускної здатності, а також забезпечує зменшення затримок і рівня перешкод. Отже, інтеграція M-NOMA з URLLC задовольняє численні системні вимоги ITS. Результати моделювання додатково підтверджують ефективність комбінованої реалізації [102].

Разом із тим, реалізація технології фізичного рівня з URLLC стикається з низкою значних викликів. Впровадження URLLC у ITS залишається однією з ключових задач, проте виконання всіх необхідних вимог є досі проблематичним. Для удосконалення систем ITS дослідники запропонували декілька підходів. У роботі [52] запропоновано ITS, побудовану на основі нечіткої логіки, для управління дорожнім рухом і аналізу аварійних ситуацій, спричинених водіями, із використанням прогнозування стану навколишнього середовища. Інший підхід [54] застосовував нечітку синтетичну оцінку ефективності безпеки транспортної системи. У [55] розроблено цифрову мережу інтерактивної візуалізації та оцінки дорожнього покриття (DRIVE Net) для онлайн-обміну, візуалізації та аналізу даних складних транспортних процесів. Паралельні системи управління та контролю транспорту (PTMS), засновані на штучних суспільствах, паралельних обчисленнях та експериментах, були представлені у [56]. Для реалізації системи застосовувалися хмарні обчислення та платформа соціального транспорту, а PTMS оцінювався на основі евакуаційних планів, реалізованих під час Азійських ігор. У [57] зафіксовано парадигматичний зсув від технологічно орієнтованого ITS до соціально орієнтованої кібервіртуальної соціальної системи (CPSS). Крім того, у [58] запропоновано модель транспортного зв'язку для покращення окремих аспектів ITS.

Існує багато способів розгортання ITS, які сприяють запобіганню дорожньо-транспортних пригод, підвищенню мобільності та ефективності. Окрім основних

переваг, ITS може використовуватись для електронного збору плати за проїзд, координації роботи світлофорів, обліку пандусів, роботи камер, надання дорожньої інформації, мінімізації впливу на навколишнє середовище, підтримки аварійних служб тощо. Система ITS забезпечує зв'язок між транспортними засобами (V2V), між машинами (M2M), між системами, а також між транспортними засобами та мобільними пристроями. Вона застосовується для бездротової, провідної та вбудованої передачі даних у гібридних середовищах [102].

URLLC може суттєво трансформувати сучасну транспортну систему, включаючи підвищення ефективності руху, автоматизоване водіння та безпеку дорожнього руху. У ході трансформації традиційної транспортної системи автомобілі зможуть самостійно керувати критичними дорожніми ситуаціями завдяки мережевій взаємодії, а не лише за рахунок локальної видимої інформації. Система здатна управляти рухом щільних транспортних колон, автоматизувати обгони та запобігати зіткненням через надійну інфраструктуру з низькими затримками. Водночас URLLC висуває суворі вимоги до надійності та мінімальної затримки, що створює виклики для існуючих мереж з урахуванням рухливості користувачів, бюджету затримок пакетів, пріоритетів, затухання каналів, перешкод та рівня помилок [51].

1.5 NOMA для бездротової передачі енергії (WPT) та одночасної бездротової передачі інформації й енергії (SWIPT)

Безпроводна передача енергії (Wireless Power Transfer, WPT) та одночасна бездротова передача інформації і енергії (Simultaneous Wireless Information and Power Transfer, SWIPT) є перспективними технологіями для живлення та комунікації у сучасних бездротових мережах. В умовах зростаючих вимог до енергоефективності та автономності пристроїв, особливо у контексті Інтернету речей (IoT), інтеграція WPT і SWIPT з методами множинного доступу набуває особливого значення.

Немножинний ортогональний доступ (NOMA), завдяки своїй високій спектральній ефективності та здатності одночасно обслуговувати кілька користувачів у одній частотній смузі, розглядається як ефективний підхід для покращення продуктивності систем WPT та SWIPT. Впровадження NOMA у WPT-системи дозволяє ефективно розподіляти потужність передачі серед кількох користувачів, збільшуючи сумарну енергію, що отримується приймачами, та підвищуючи якість обслуговування.

У SWIPT-системах NOMA сприяє одночасному покращенню передачі енергії та інформації, забезпечуючи баланс між двома цими процесами. Завдяки механізму суперпозиційного кодування і послідовному декодуванню (SIC), користувачі з різними умовами каналу можуть отримувати енергію і інформацію більш ефективно, що призводить до підвищення загальної продуктивності системи.

Дослідження показали, що застосування NOMA у поєднанні з WPT і SWIPT дозволяє значно підвищити енергоефективність (EE) і спектральну ефективність (SE) мереж, одночасно знижуючи затримки і покращуючи надійність передачі. Зокрема, розроблені методи оптимального розподілу потужності у NOMA-WPT/SWIPT-системах забезпечують максимальне використання доступних ресурсів для живлення пристроїв із низьким енергоспоживанням, а також підтримку високих вимог до якості обслуговування (QoS).

Таким чином, інтеграція NOMA з технологіями WPT і SWIPT є перспективним напрямом розвитку бездротових систем, що відповідає викликам майбутніх мереж 6G, де автономність пристроїв, енергоефективність і висока пропускна здатність будуть ключовими факторами.

У бездротових мережах поєднання технології одночасної бездротової передачі інформації та енергії (SWIPT) з NOMA сприяє економії енергії та повторному використанню спектральних ресурсів. Різні дослідники розробляють технічні підходи до інтеграції SWIPT з NOMA [32]. У роботі [8] було представлено дослідження, що поєднує бездротову передачу енергії (WPT), SWIPT та NOMA.

Конструкція бездротових систем обмежена як енергетичними, так і спектральними ресурсами. Сучасні інноваційні технології прагнуть ефективніше використовувати спектр і енергію для задоволення зростаючих вимог нової епохи мереж. NOMA є одним із ключових напрямів розвитку технології 6G, що спрямована на підвищення ефективності використання радіочастотного спектра.

Попередні покоління мобільних мереж (2G, 3G, 4G, 5G) застосовували схеми ортогонального множинного доступу (OMA), які поділяють доступний спектр на кілька користувачів за частотною ознакою. При цьому користувачі з поганими каналами, наприклад, у сусідній кімнаті, могли використовувати виділений спектр, що призводить до низького рівня повторного використання спектра і швидкого його вичерпання.

На відміну від цього, NOMA дозволяє одночасний доступ кількох користувачів до спектру без частотного розподілу або з мінімальним розподілом. Це усуває обмеження використання спектра та забезпечує високу спектральну ефективність. В результаті NOMA надає швидкі, надійні та енергоефективні комунікаційні послуги.

Інтеграція SWIPT з NOMA у бездротові мережі дозволяє ефективно використовувати як енергію, так і радіочастотний спектр. Результати численних досліджень демонструють значні переваги таких комбінованих схем.

Когнітивні радіомережі (CR) є прикладом інноваційних систем, які використовують ці технології для підвищення продуктивності. Для користувачів із обмеженим зарядом акумуляторів автор [59] запропонував систему MISO NOMA CR з підтримкою SWIPT, що підвищує безпеку за рахунок кооперативного пригнічення за допомогою штучного шуму.

В роботі [60] розглядаються когнітивні MIMO NOMA мережі з SWIPT, орієнтовані на максимізацію енергії, зібраної вторинними користувачами, і мінімізацію потужності передавачів. Дослідження [61] сфокусоване на фізичній безпеці (PLS) SWIPT NOMA шляхом оптимізації передавачів штучного шуму.

Для забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у системах DL NOMA з підтримкою SWIPT було сформульовано задачі оптимізації

спектральної ефективності, розподілу потужності та секретності [62, 63]. Автори [64] запропонували схеми MIMO та SISO SWIPT NOMA з оптимізацією поділу потужності та формуванням променя для максимізації швидкості передачі даних сильного користувача та QoS слабкого користувача.

У роботі [65] розглядається SWIPT-сумісна схема NOMA з формуванням променя, де сильний користувач в режимі повного дуплексу збирає енергію та передає потужність слабкому користувачу. Автори [66, 67] фокусуються на безпеці MISO NOMA SWIPT із застосуванням штучного формування шумового променя.

1.6 NOMA для повнодуплексного бездротового зв'язку

Повнодуплексна (Full-Duplex, FD) технологія бездротового зв'язку дозволяє одночасну передачу і прийом сигналів на одній частоті, що потенційно подвоює спектральну ефективність системи. Однак повнодуплексні системи стикаються з проблемою самоперешкод (self-interference), яка суттєво ускладнює реалізацію.

Інтеграція NOMA у повнодуплексні бездротові системи (FD-NOMA) відкриває нові можливості для підвищення спектральної ефективності та продуктивності мереж. Поєднання FD і NOMA дозволяє одночасно обслуговувати кілька користувачів, підвищуючи загальну пропускну здатність, зберігаючи при цьому вимоги до якості обслуговування (QoS).

FD-NOMA системи характеризуються складним балансом між самоінтерференцією, інтерференцією між користувачами та вимогами до низьких затримок, особливо у сценаріях із високою рухомістю користувачів. Розробка ефективних алгоритмів пригнічення самоінтерференції та оптимального розподілу потужності є ключовими завданнями для реалізації FD-NOMA.

У контексті систем з низькою затримкою і високою надійністю (URLLC), FD-NOMA може забезпечити більш швидкий обмін даними та кращу якість зв'язку, що є критично важливим для застосувань у інтелектуальних

транспортних системах, індустріальному інтернеті речей та інших сценаріях реального часу.

Завдяки поєднанню повнодуплексної передачі та NOMA, можна значно підвищити ефективність використання спектра, що є одним із основних викликів сучасних бездротових мереж, сприяючи реалізації вимог майбутніх поколінь мобільного зв'язку, зокрема 6G.

Сучасний технологічний розвиток вимагає раціонального використання доступних природних ресурсів. Останнім часом низка країн впровадила технології 5G із використанням високочастотних діапазонів радіочастотного спектра. Проте складність управління залишками спектра може бути компенсована підвищенням спектральної ефективності (SE) [7]. Для досягнення високої пропускної здатності розробляють різні підходи, серед яких одним із перспективних є технологія In-Band Full Duplex (IBFD). IBFD спрямована на ефективне повторне використання спектра в межах одного каналу, що забезпечує значне покращення SE [68].

Сучасні системи 5G переважно базуються на ортогональному частотному розподілі з множинним доступом (OFDMA) з використанням напівдуплексного режиму (HD) через складні перешкоди між каналами. Аналогічно, 4G системи також використовують OFDMA з HD. Перехід від 4G до 5G є відносно простим та економічно вигідним, оскільки зберігається подібна архітектура.

Враховуючи обмеження спектральних ресурсів, подальше розширення систем бажано здійснювати із застосуванням IBFD у технологіях, що виходять за межі 5G [104]. Дослідження показують, що впровадження FD здатне приблизно подвоїти SE системи. Перемикання між режимами HD і FD у зв'язках типу «пристрій-пристрій» (D2D) є одним із способів підтримки балансу між ефективністю та стабільністю системи [69], [70].

Формування променя (beamforming) є ключовим методом у FD-системах, який у поєднанні з оптимальним розподілом потужності дозволяє підтримувати високу швидкість передачі даних, особливо у когнітивних радіомережах [71]. Комбінування FD, D2D та NOMA забезпечує вищу ергодичну сумарну швидкість

(ESR), ніж HD [72]. Водночас HD випереджає FD при високому рівні сигнал/шум (SNR) за показниками ймовірності розриву зв'язку та стійкості до затримок [69], [72].

Безпека залишається критичною на всіх рівнях системи зв'язку, оскільки різні рівні мають унікальні вимоги, зумовлені впливом багатьох взаємопов'язаних факторів поза межами 5G [19, 73, 74]. Фізичний рівень безпеки (PLS) є особливо уразливим через широкомовний характер систем, велику кількість даних та складність управління частотним ресурсом.

На сьогодні 5G системи в основному використовують OFDMA через високу вартість впровадження нових рішень на базі NOMA. Однак для подолання спектральних обмежень перспективним є впровадження NOMA у технології 5G та наступних поколінь.

Інтеграція NOMA з повнодуплексною технологією є складним, але перспективним напрямом для систем за межами 5G. Така комбінація покращує спектральну ефективність і допомагає компенсувати недоліки кожної технології окремо.

Режим динамічного перемикання між HD і FD є одним із поширених методів для підтримки балансу між ефективністю і стабільністю передачі даних [75]. Формування променя також є дієвим засобом для підвищення швидкості передачі у системах FD-NOMA за рахунок оптимального розподілу потужності [76]. При цьому HD має перевагу над FD при високих SNR з огляду на ймовірність розриву з'єднання та стійкість до затримок [75, 72].

Система зв'язку складається з кількох рівнів, кожен із яких має специфічні вимоги до безпеки через наявність великої кількості підключених пристроїв у мережах 5G і поза їх межами [19]. Фізичний рівень безпеки (PLS) є однією з основних проблем у сучасних інтелектуальних системах. Значна частина наукової літератури присвячена питанням безпеки на фізичному рівні. Існують два основні типи пристроїв-перехоплювачів (Eve), що створюють загрозу безпеці: активні та пасивні. Вони можуть бути як серед імовірних «надійних» користувачів, так і сторонніми об'єктами.

Існуючі алгоритми захисту здатні вирішувати певні проблеми безпеки, однак з розвитком технологій загрози також стають більш складними та досконалішими. У гібридному сценарії перехоплення в FD-NOMA системах вплив глушення та прослуховування можна зменшити за допомогою методу «вичерпного прослуховування», який ускладнює декодування сигналу та підвищує енергоспоживання, тим самим знижуючи ефективність атак [82].

Існують різні форми прослуховування, які можуть бути як пасивними, так і активними, та ініціюватися як сторонніми, так і «надійними» користувачами. Технологічний прогрес призводить до постійної еволюції загроз, що вимагає постійного вдосконалення алгоритмів захисту. Масове впровадження мереж у різні сфери — банківську, промислову, транспортну, освітню та побутову — робить інформаційну інфраструктуру надзвичайно вразливою.

Гібридне прослуховування, що поєднує пасивне прослуховування в точці передачі та активне глушення серед «надійних» користувачів, у FD-NOMA системах можна мінімізувати шляхом застосування вичерпного прослуховування, що підвищує складність декодування і збільшує енергоспоживання [82].

FD та D2D зв'язок мають спільні риси, такі як покращена продуктивність на коротких відстанях і зниження рівня перешкод при передачі сигналів із низьким енергоспоживанням [81, 83]. В режимі FD вузли не можуть просто декодувати сигнали через значну різницю потужностей між передавачами — власним передавачем та дистанційними антенами. Переданий сигнал зазвичай приблизно на 100 дБ сильніший за прийнятий, що спричиняє значні самоперешкоди (SI) у прийнятому сигналі FD, знижуючи тим самим його пропускну здатність порівняно з HD. Вирішення проблеми придушення SI є складним як з теоретичної, так і з практичної точки зору, але критично важливим для впровадження FD технологій.

Накопичені перешкоди негативно впливають на швидкість передачі даних, пропускну здатність системи, рівень секретності каналу та викликають збільшення затримок. Для боротьби з перешкодами у повнодуплексних системах

пропонуються різні методи, серед яких: цифрове придушення радіочастотних завад [81], попереднє придушення за допомогою антен та цифрової обробки сигналів на базовому рівні, оцінка каналу і розподіл потужності [83].

Розроблені гібридні ресурси, які динамічно перемикають режими між FD та HD, дозволяють одночасно підвищувати спектральну ефективність і зменшувати перешкоди. Для реалізації FD потрібні спеціальні ресурси, такі як додаткові антени, що забезпечують мінімальні перешкоди під час передачі. Однак, якщо пристрої розташовані надто близько, ефективність використання спектра може знизитись, особливо при передачі великих обсягів даних.

Використання додаткових передавачів підвищує складність системи. Дослідження показують, що D2D зв'язок є найбільш надійним при близькому розташуванні пристроїв, а базова станція надає дозволи на зв'язок лише в межах однієї комірки. Зі збільшенням відстані між D2D пристроями пропускна здатність значно знижується.

FD технологія може значно покращити традиційні бездротові системи у таких аспектах, як зниження втрат даних через перевантаження, зменшення проблем прихованих терміналів, скорочення затримок та підвищення спектральної ефективності. Ключова ідея застосування FD полягає у формуванні гетерогенної густонаселеної мережі з високою пропускну здатністю та гнучкими режимами ретрансляції.

Теоретичний та практичний аналіз показує, що, незважаючи на зростання складності, FD забезпечує підвищене різноманіття сигналів, збільшену пропускну здатність, зменшену частоту помилок і менше використання HD режимів. Ефективність D2D FD зв'язку зростає зі збільшенням рівня внутрішньокімрового зв'язку, що підвищує ефективність використання смуги пропускання.

1.7 Інтеграція повного дуплексу в 5G та системи Beyond 5G

Сучасні телекомунікаційні мережі прагнуть максимально ефективно використовувати наявні радіочастотні ресурси для задоволення зростаючих вимог до пропускної здатності та мінімальних затримок. Технологія повного дуплексу (Full Duplex, FD), яка дозволяє одночасно передавати та приймати інформацію на одній і тій же частоті й у тому ж часовому інтервалі, розглядається як перспективний напрямок розвитку бездротових систем п'ятого покоління (5G) та мереж наступного покоління (Beyond 5G, 6G і далі).

Основні переваги FD у 5G та Beyond 5G:

Подвоєння спектральної ефективності (SE): FD теоретично здатен подвоїти використання смуги частот, усуваючи потребу в часовому або частотному розділенні між передачею та прийомом, що властиво системам з напівдуплексним режимом (Half Duplex, HD).

Зменшення затримок: Одночасна передача і прийом скорочують час очікування перемикання режимів, що є критично важливим для застосувань із низькою затримкою.

Підвищення продуктивності D2D та сіток з малою коміркою: FD дозволяє більш ефективно використовувати локальні ресурси, підвищуючи швидкість і надійність передачі на коротких дистанціях. Технічні виклики впровадження FD:

Самоперешкода (Self-Interference, SI): Основною технічною проблемою FD є усунення власних переданих сигналів, які зазвичай мають потужність, що значно перевищує прийнятий сигнал, та можуть повністю заглушити корисний сигнал прийому. Основні методи придушення SI включають: Аналогове та цифрове пригнічення, Використання антен з високим ступенем ізоляції, Адаптивні фільтри, Схеми просторового формування променя.

Управління перешкодами: FD посилює проблему міжкоміркових та внутрішньокіміркових перешкод, що вимагає розробки ефективних алгоритмів управління ресурсами та потужністю.

Складність апаратної реалізації: Впровадження FD потребує складного радіоапаратного забезпечення та значних витрат енергії на обробку сигналів і придушення перешкод. Сумісне застосування FD з NOMA та іншими технологіями:

FD-NOMA: Поєднання FD з нелінійним множинним доступом без ортогонального поділу спектра (NOMA) дозволяє додатково підвищити спектральну ефективність і забезпечити якісне обслуговування багатьох користувачів із різними вимогами.

FD і SWIPT: Комбінування FD з технологіями одночасної бездротової передачі інформації та енергії (SWIPT) сприяє розвитку енергоефективних та автономних мереж.

FD і MIMO: Багатоантенні системи (MIMO) забезпечують просторове розділення сигналів, що сприяє ефективнішому придушенню SI та підвищенню пропускної здатності FD-систем. Перспективи Beyond 5G (6G і надалі):

Інтеграція FD у гетерогенні мережі: FD відіграватиме ключову роль у формуванні щільних мереж із малою коміркою, забезпечуючи високу пропускну здатність і мінімальну затримку.

Покращення безпеки фізичного рівня: Технології FD дозволяють впроваджувати методи фізичного захисту даних, використовуючи можливості формування шуму та активного прослуховування.

Підтримка штучного інтелекту та edge computing: FD-системи будуть тісно інтегровані з алгоритмами штучного інтелекту для динамічного управління радіоресурсами і адаптації до змінних умов мережі.

У системах з напівдуплексним режимом (Half Duplex, HD) канал розподіляється між двома операціями за допомогою ортогональних часових інтервалів або ортогональних частотних смуг (режим поза смугою FD). Перевагою повного дуплексу (Full Duplex, FD) є можливість одночасної передачі та прийому сигналів у тому ж частотному діапазоні та часовому інтервалі. Існують два типи FD: позасмуговий FD (Out-of-Band FD, OBFd), який є різновидом HD, та внутрішньосмуговий FD (In-Band FD, IBFD), при якому

передача і прийом відбуваються одночасно в одному часовому проміжку і на одній частоті.

З точки зору пропускної здатності мережі, надійності системи, сумарної швидкості передачі та інших теоретичних характеристик, IBFD переважає традиційний HD режим [81]. На рисунку 1.3 наведено три варіанти реалізації IBFD. Особливу увагу варто звернути на спільні риси FD та передачі безпосередньо між пристроями (Device-to-Device, D2D), серед яких — підвищена ефективність на коротких відстанях і зниження рівня перешкод при передачі сигналів з низьким енергоспоживанням [81].

Внутрішньосмугова технологія FD є перспективним і ефективним рішенням для підвищення продуктивності сучасних бездротових мереж. Саме тому у цій роботі основний акцент робиться на актуальних проблемах, методах їх подолання, перевагах, викликах та сучасних дослідженнях, що стосуються впровадження IBFD у запропонованих системах [104].

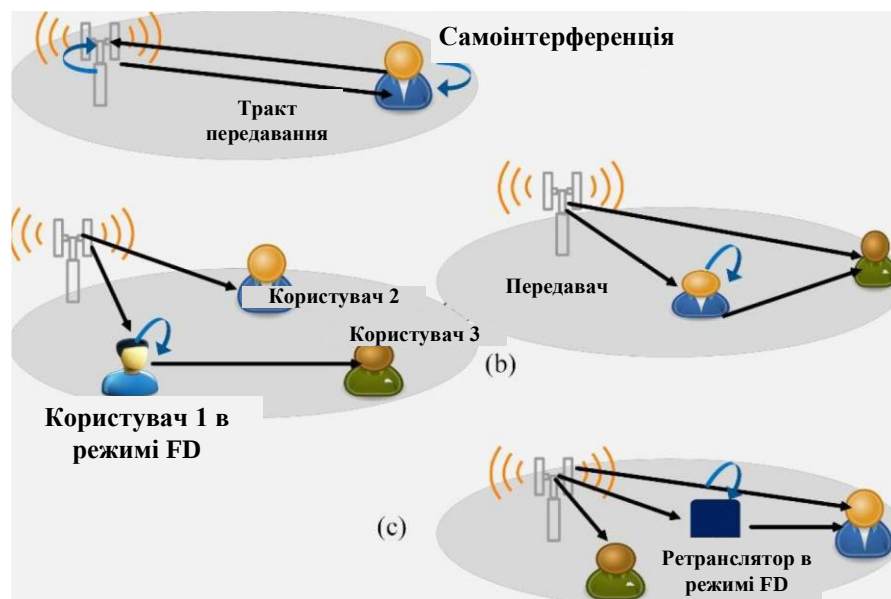


Рисунок 1.3 – Схема інтеграції повного дуплекса (FD) з технологією NOMA

Існують три основні варіанти інтеграції повного дуплекса (Full Duplex, FD) з технологією NOMA:

- a) одночасна передача даних як у нисхідному, так і у висхідному каналі;
- b) зв'язок типу Device-to-Device (D2D) з прямим та непрямим (через посередника) зв'язком між передавачем і віддаленим користувачем;
- c) застосування передавача в режимі FD для підтримки та допомоги віддаленому користувачу.

Повний дуплекс (FD) може бути використаний для розвитку гетерогенної густої мережі з високою пропускну здатністю та гнучкими вузлами ретрансляції. Кількісний аналіз демонструє, що завдяки підвищеній складності FD забезпечує високу пропускну здатність, різноманітність, низький рівень помилок у символах та зменшення використання традиційного напівдуплексного режиму (HD). Продуктивність D2D-зв'язку з FD зростає із збільшенням коефіцієнта зв'язку всередині комірки, що призводить до підвищення ефективності використання смуги пропускання. Впровадження технології In-Band Full Duplex (IBFD) вимагає розробки нових алгоритмів для систем п'ятого покоління та наступних (B5G). Цей напрямок орієнтований на використання високочастотних діапазонів, таких як міліметрові хвилі (mmWave), оскільки спектр низьких частот уже повністю зайнятий існуючими системами нижче 5G. З метою уникнення застосування потенційно шкідливих для організму високих частот, доцільніше повторно використовувати спектр низьких частот, поєднуючи FD і NOMA для підвищення спектральної ефективності та оптимального використання доступних частотних ресурсів.

1.8 Впровадження NOMA у технології за межами 5G

Інтеграція технології некортогонального множинного доступу (NOMA) у системи зв'язку наступного покоління (Beyond 5G, B5G) відкриває нові перспективи для підвищення спектральної ефективності та покращення продуктивності мережі. NOMA дозволяє одночасний доступ кількох користувачів до одного частотного ресурсу шляхом розділення сигналів у домені потужності або кодів, що значно підвищує пропускну здатність системи у

порівнянні з традиційними методами ортогонального множинного доступу (OMA).

У зв'язку із зростаючими вимогами до швидкості передачі даних, масштабованості та енергоефективності у B5G, впровадження NOMA розглядається як ключова технологія, яка може ефективно використати обмежений радіочастотний спектр. Поєднання NOMA з іншими передовими технологіями, такими як повнодуплексна передача (Full Duplex), когнітивний радіозв'язок, формування променя (beamforming) та штучний інтелект, дозволяє суттєво підвищити продуктивність мереж та забезпечити якість обслуговування для різнорідних користувачів.

Застосування NOMA у B5G системах сприяє оптимальному використанню ресурсів, зменшенню затримок та підвищенню надійності зв'язку, що є критично важливим для інтернету речей (IoT), автономних транспортних засобів, а також для інших сценаріїв з великими обсягами даних і суворими вимогами до безпеки.

Впровадження NOMA у технології Beyond 5G вимагає розробки нових алгоритмів управління потужністю, оптимізації розподілу ресурсів, а також удосконалення методів придушення взаємних завад, що дозволить максимально використовувати потенціал цієї технології у реальних умовах.

Серед основних типів неортогонального множинного доступу (NOMA) розрізняють два домени: степеневий (power-domain NOMA) та кодовий (code-domain NOMA). У цьому дослідженні основну увагу приділено степеневій реалізації NOMA в поєднанні з технологією внутрішньосмугового повного дуплексу (IBFD). Розглядаються актуальні виклики, потенційні переваги, технічні рішення та особливості реалізації такої комбінації в контексті систем зв'язку покоління Beyond 5G (B5G).

У степеневій NOMA розподіл потужності здійснюється з урахуванням відстані до користувача та стану радіоканалу. Користувачі з поганими умовами прийому потребують більшої потужності сигналу. Перед передачею передавач формує суперпозиційний сигнал, який містить компоненти для всіх користувачів, а сумарна частка потужності, що розподіляється між

користувачами, завжди дорівнює одиниці ($\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_n = 1$). На приймальному боці кожен "сильний" користувач повинен виконати процедуру послідовного скасування завад (SIC) для декодування сигналів користувачів, що мають вищу потужність. Найдаальший "слабкий" користувач сприймає сигнали з кращих каналів як завади і декодує лише свій сигнал, ігноруючи решту.

До основних недоліків ступеневої NOMA належать високий рівень міжкористувацьких завад, складність реалізації SIC та потреба в гнучкому і точному розподілі потужності в режимі реального часу. Інтеграція новітніх технологій, таких як Інтернет речей (IoT), багатокористувацький вхід/вихід (MIMO), потокове відео та мультимедійна обробка, суттєво підвищує енергоспоживання системи, що ускладнює досягнення тривалого автономного режиму роботи — критично важливого для 5G середовища.

Для подолання означених проблем запропоновано низку рішень. Наприклад, кооперативна FD-NOMA (FD-CNOMA) демонструє вищу справедливість розподілу ресурсів порівняно з напівдуплексною схемою (HD-CNOMA). Гібридний підхід, що передбачає адаптивне перемикання між режимами FD і HD, також є ефективним механізмом контролю завад. Для зниження обчислювальної складності SIC застосовується просторово-часове блокове кодування у NOMA (STBC-NOMA) з використанням розподіленої схеми Алмауті. Метод M-NOMA додатково забезпечує зменшення завад, енергетичну ефективність та знижену складність декодування.

У той час як ОМА неефективно використовує канал у присутності слабких користувачів, NOMA забезпечує одночасний доступ усіх абонентів, сприяючи масовому підключенню, низьким затримкам та високій якості обслуговування (QoS). Водночас проблеми завад, високих обчислювальних витрат та енергоспоживання вимагають подальшого комплексного дослідження.

Інфраструктура IoT передбачає масштабне підключення об'єктів у єдиний інформаційний простір, що відкриває значний потенціал для цифрової трансформації, однак водночас створює високі вимоги до архітектури мережі. Технології штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML), інтегровані з

NOMA та FD, формують багатообіцяючі напрямки розвитку, однак є складними для реалізації. Найбільш критичною проблемою при цьому залишається забезпечення безпеки — із зростанням кількості підключень зростає і кількість потенційних вразливостей, які можуть бути використані для порушення конфіденційності та цілісності переданих даних.

1.9 Висновки до розділу 1

У даному розділі було представлено узагальнений огляд технології некортогонального множинного доступу (NOMA), що охоплює такі ключові аспекти:

1. Розглянуто базові принципи побудови моделі передавання та приймання сигналів у контексті NOMA, що закладають фундамент для її подальшої еволюції.

2. Проаналізовано механізми розподілу потужності між користувачами в умовах одночасного використання одного частотного ресурсу, а також особливості реалізації цього підходу в системах зв'язку нового покоління.

3. Проведено критичний аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій, присвячених розвитку, удосконаленню та застосуванню NOMA в бездротових мережах.

4. Наведено ключові математичні співвідношення, що описують процеси передачі сигналів, обчислення пропускної здатності, енергоефективності та інші важливі характеристики систем NOMA.

5. Розглянуто методи підвищення енергоефективності в NOMA-системах з урахуванням специфіки використання частотного спектру та потужності передавачів.

6. Проаналізовано переваги та обмеження обох режимів, зокрема з точки зору пропускної здатності, завадостійкості та реалізації механізмів скасування завад.

Таким чином, проведені дослідження формують комплексне уявлення про принципи функціонування NOMA, її потенціал в умовах систем зв'язку 5G та окреслюють напрями подальших наукових пошуків у цій галузі.

2 НЕОРТОГОНАЛЬНИЙ МНОЖИННИЙ ДОСТУП НА БАЗІ МОДУЛЯЦІЙНИХ МЕТОДІВ

2.1 Алгоритм неортогонального множинного доступу на основі модуляційних методів (M-NOMA)

У роботі розглядається метод неортогонального множинного доступу на основі модуляції (M-NOMA) як один із потенційних підходів для застосування в мережах шостого покоління (6G). Аналогічно до традиційного NOMA, в M-NOMA базова станція (BS) передає сигнал усім користувачам. Проте принцип модуляції сигналів у M-NOMA реалізується інакше.

У межах дослідження застосовуються методи модуляції 4-QPSK та 16-QPSK, хоча M-NOMA є універсальною концепцією і може бути адаптована до будь-якої складної модуляційної схеми. У запропонованій архітектурі M-NOMA базова станція модулює сигнал для ближніх користувачів по дійсній складовій модуляційного сузір'я QPSK, тоді як сигнали для віддалених користувачів — по уявній складовій. Це дозволяє досягти умовної ортогональності між користувачами, що сприяє зниженню обчислювальної складності при застосуванні процедури послідовного інтерференційного скасування (SIC), зменшенню рівня міжкористувацьких завад, покращенню ймовірності правильної демодуляції (SER) та підвищенню пропускної здатності системи.

У класичних схемах NOMA кожен користувач зазнає впливу завад від інших користувачів через відсутність ортогонального розділення між ними. Запропонований підхід M-NOMA дозволяє зменшити ці завади удвічі завдяки поділу загальної кількості користувачів у процесі модуляції: одна частина користувачів модулюється по квадратурній (уявній) складовій, інша — по дійсній. Такий підхід забезпечує ефективне уникнення взаємних завад.

У традиційному NOMA після суперпозиційного кодування (SC) джерело транслює об'єднані сигнали всіх передбачених користувачів або пристроїв. Кожен приймач отримує сигнал, що є сумою його власного повідомлення та

повідомлень інших користувачів, що обслуговуються тією ж базовою станцією. Близькі користувачі отримують сигнали з високою потужністю як від близьких, так і від далеких користувачів. Якщо загальна кількість користувачів становить $N/2$, то кожен ближній користувач виконує процедуру SIC для користувачів із гіршим каналом, щоб декодувати власний сигнал.

Натомість віддалені користувачі отримують сигнали низької потужності від близьких, які розглядаються як завади. Водночас вони приймають сигнали високої потужності від інших віддалених користувачів (через більш високий коефіцієнт розподілу потужності), що вимагає застосування SIC для виключення сигналів усіх віддалених користувачів із гіршими характеристиками каналу.

У попередніх розділах було висвітлено базові принципи бездротового зв'язку та технології NOMA, що створює підґрунтя для аналізу пропонованої архітектури M-NOMA. У цьому розділі розглядаються декілька варіантів системних моделей, реалізованих із використанням M-NOMA, а також відповідні математичні описи.

Серед іншого, описується реалізація алгоритму для напівдуплексної системи зв'язку. Для забезпечення більш реалістичної моделі запропоновано нову схему спільного функціонування компонентів, у якій M-NOMA працює в режимі повного дуплексу (FD) із метою зниження внутрішніх завад. Для кожної схеми проаналізовано сучасні варіанти реалізації системних моделей.

У наступному розділі подається аналіз результатів моделювання, що дозволяє дослідити ефективність і новизну застосування M-NOMA. Для повноти аналізу також використано низку базових алгоритмів для порівняння продуктивності. Підсумкові висновки зроблено на основі порівняльного аналізу запропонованих та традиційних підходів.

2.2 Напівдуплексна схема M-NOMA

Напівдуплексна (HD, Half-Duplex) реалізація технології неортогонального множинного доступу на основі модуляції (M-NOMA) є ефективним підходом до зменшення апаратної складності й енергоспоживання в системах бездротового зв'язку. У такій конфігурації передача та прийом сигналів відбуваються не одночасно, а по чергово, що дозволяє уникнути внутрішніх завад, характерних для повнодуплексних (FD) систем. При цьому використовується принцип розділення користувачів на основі модуляційного сузір'я, як і в базовій схемі M-NOMA.

Основні характеристики:

- Режим обміну даними: передача й прийом здійснюються в різні часові інтервали (TDD – Time Division Duplex).
- Тип доступу: неортогональний, з розділенням користувачів по компонентам модуляційного сузір'я (реальна/уявна частина).
- Модуляційні схеми: QPSK, 16-QAM або інші складні схеми, що підтримують представлення сигналу у комплексній площині.
- Користувачі: поділяються на ближніх та далеких залежно від стану каналу (SNR, відстань, коефіцієнт підсилення тощо).

У цьому підпункті розглянуто базовий сценарій функціонування системи M-NOMA для випадку двох користувачів, підключених до однієї базової станції (BS). Аналіз проводиться в межах двох типів каналів:

1. M-NOMA з адитивним білим гаусівським шумом (канал AWGN);
2. M-NOMA з каналом плоского (частотно-незалежного) загасання.

Розглянута методика M-NOMA реалізується як для висхідного (UL), так і для низхідного (DL) каналів зв'язку. У цьому підрозділі представлено моделювання в режимі висхідної лінії зв'язку для модуляції QPSK. Вибрано базовий сценарій із двома користувачами, що взаємодіють з однією базовою станцією [32].

Принцип дії системи показано на рисунку 2.1, де два користувачі – умовно позначені як Q1 (ближній) та Q2 (віддалений) – одночасно передають свої сигнали на базову станцію (BS). У відповідності до концепції M-NOMA, кожному з користувачів призначається окрема компонента модуляційного сузір'я QPSK:

- Q1 (ближній користувач): використовує фазову (реальну) компоненту сигналу;
- Q2 (віддалений користувач): використовує квадратурну (уявну) компоненту сигналу.

У модуляції QPSK інформація кодується в обох складових комплексної площині – реальній (cos-фаза) та уявній (sin-фаза). Призначення окремих складових різним користувачам дозволяє забезпечити часткову ортогональність переданих сигналів навіть за відсутності традиційного частотного чи часово-кодowego розділення. Умови моделювання:

- Ідеальна синхронізація між користувачами та базовою станцією.
- Сигнали не заважають один одному, оскільки модуляція відбувається по взаємно ортогональних складових.
- Не виконується повна процедура SIC завдяки попередньому розділенню за модуляційними компонентами.

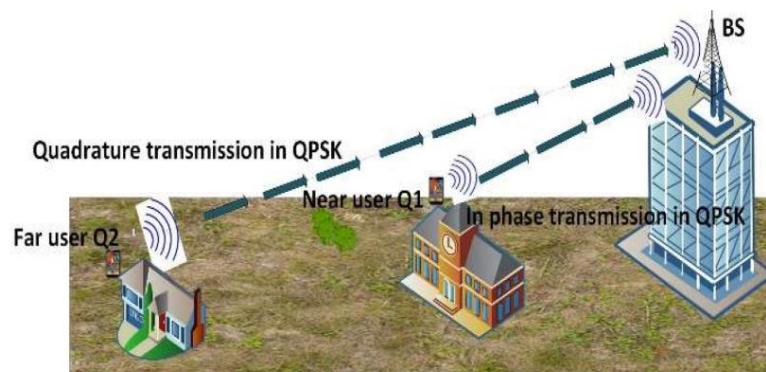


Рисунок 2.1 – Схема зменшення взаємних завад шляхом розділення сигналів у комплексній площині QPSK

Мета такого підходу:

- Забезпечити одночасну передачу від кількох користувачів в одному часовому та частотному ресурсі без значного зростання обчислювальної складності.

- Уникнути внутрішніх завад між користувачами, що характерні для класичного NOMA, особливо в UL.

У висхідній лінії зв'язку (UL) в системі NOMA обидва користувачі передають свої сигнали на базову станцію (BS), використовуючи один і той самий частотний спектр, але з різними рівнями потужності. Сигнал, що передається від користувача Q1, може бути записаний у вигляді:

$$x_{Q1}(t) = \sqrt{\alpha_1 P_T} x_1(t) = P_{Q1} x_1(t). \quad (2.1)$$

Аналогічно, сигнал, що передається від користувача Q2, може бути записаний у вигляді:

$$x_{Q2}(t) = \sqrt{\alpha_2 P_T} x_2(t) = P_{Q2} x_2(t). \quad (2.2)$$

Накладений сигнал із додаванням шуму, що приймається базовою станцією від обох користувачів, може бути записаний у вигляді:

$$y_m(t) = \sum_{m=Q1}^{Q2} x_m(t) g_m + w(t), \quad (2.3)$$

де $w(t)$ — адитивний білий гаусівський шум (AWGN).

Базова станція (BS) приймає потужніший сигнал від користувача Q1 завдяки кращим умовам його радіоканалу. Отже, BS може безпосередньо декодувати сигнал Q1 без необхідності застосування SIC (послідовного скасування завад). Натомість, користувачеві Q2 необхідно виконати процедуру SIC, видаливши

декодований сигнал Q1 із загального прийнятого сигналу, щоб отримати власне повідомлення.

Оскільки віддалений передавач (Q2) має гірші умови каналу, йому виділяється більша передавальна потужність, у той час як ближній користувач (Q1) передає з мінімальною потужністю. Рівні потужності були підібрані відповідно до стану каналу кожного з користувачів. В даному випадку користувач Q1 має кращі параметри каналу, ніж Q2.

У запропонованій методиці M-NOMA, необхідність у використанні SIC усувається завдяки вбудованій ортогональності, реалізованій за рахунок просторового розділення сигналів у компонентах модуляції QPSK (реальній і уявній). Тим не менш, для повноти аналізу було змодельовано процес передавання та декодування як з використанням SIC, так і без нього.

Результати моделювання показали, що у випадку відсутності SIC не спостерігалось суттєвих відмінностей у прийомі та декодуванні сигналів. Це пояснюється тим, що в рамках запропонованого підходу передані сигнали були заздалегідь розділені між користувачами Q1 і Q2 по різних складових QPSK-сузір'я, відповідно до їхніх умов каналу.

На рисунку 2.2 ілюструється сценарій роботи системи в режимі низхідного каналу зв'язку (DL). У цьому випадку базова станція одночасно транслює сигнали для обох користувачів, використовуючи кодове суперпозиційне кодування із призначенням різних рівнів потужності згідно з відомими станами каналів.

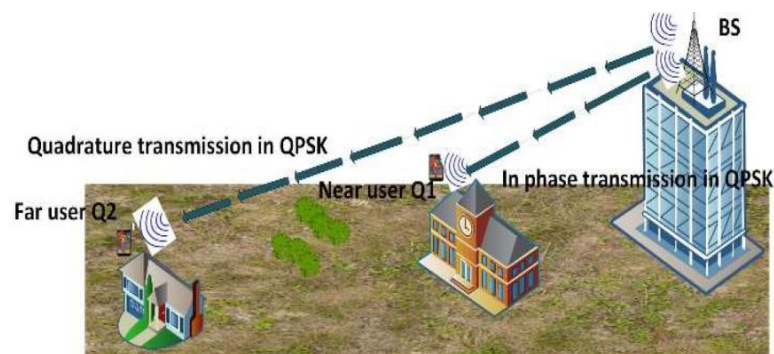


Рисунок 2.2 – Схема зниження міжкористувацьких завад та усунення потреби у використанні SIC

Як видно зі схеми, базова станція застосовує різні компоненти модуляції QPSK для Q1 та Q2 — наприклад, реальну компоненту для ближнього користувача та уявну для віддаленого, що зменшує взаємні завади [32].

У режимі низхідного зв'язку (DL) системи NOMA, оскільки базова станція (BS) виконує трансляцію сигналів до всіх користувачів, вона також призначає більшу потужність віддаленому користувачу Q2 та меншу потужність ближньому користувачу Q1 під час суперпозиційного кодування переданих сигналів. Водночас, загальна потужність передавання залишається сталою.

Аналогічно до висхідного каналу, у запропонованій методиці BS встановлює різні компоненти модуляції QPSK для кожного з користувачів — фазову (реальну) та квадратурну (уявну) — і транслює комбінований сигнал без будь-якого частотного поділу спектра. Широкомовний сигнал, переданий базовою станцією після суперпозиційного кодування, може бути записаний у вигляді:

$$x_M(t) = \sum_{m=Q_1}^{Q_2} \sqrt{\alpha_m P_T} x_m(t) \quad (2.4)$$

Кожен користувач приймає закодований широкомовний сигнал, що містить інформацію для обох користувачів. Сумарний сигнал, прийнятий кожним користувачем, може бути представлений у вигляді:

$$y_m(t) = x_M(t)g_m + w(t). \quad (2.5)$$

У звичайному нисхідному зв'язку (DL) NOMA близький користувач повинен застосувати SIC (Successive Interference Cancellation) для віднімання сигналу з більшою потужністю, який належить іншому користувачу, після чого він може декодувати власний сигнал без перешкод. Для запропонованої схеми ми виконали моделювання як з використанням SIC, так і без нього. Було виявлено, що SIC не є необхідним у нашій DL-схемі, що обговорюється в розділі

моделювання. Користувач Q2 безпосередньо декодує свій сигнал, розглядаючи повідомлення Q1 як перешкоду у всіх конкуруючих схемах.

2.3 Обчислення швидкості передачі даних

У цьому розділі ми викладаємо та пояснюємо вирази для SNR і SINR для звичайних схем NOMA та запропонованої техніки як для висхідного (UL), так і нисхідного (DL) зв'язку NOMA. Для звичайного NOMA SINR користувача, який є ближчим у UL, може бути представлено у такому вигляді:

$$\zeta_{N1-UL} = \frac{P_T |g_{B1}|^2}{\sigma^2 + P_T |g_{B2}|^2}. \quad (2.6)$$

Після декодування сигналу Q1 він віднімається із загального прийнятого сигналу для декодування повідомлення Q2. Інформація віддаленого користувача витягується без перешкод після віднімання сигналу Q1, тоді SNR для Q2 можна записати як:

$$\lambda_{N2-UL} = \frac{P_T |g_{B2}|^2}{\sigma^2}. \quad (2.7)$$

SNR_Q1_DL — це відношення потужності корисного сигналу до потужності шуму для користувача Q1 у нисхідному зв'язку. DL SNR для користувача Q1 записується як:

$$\lambda_{N1-DL} = \frac{P_{Q1} |g_{B1}|^2}{\sigma^2}. \quad (2.8)$$

Беручи до уваги, що віддалений користувач Q2 може безпосередньо декодувати свій сигнал, розглядаючи інформацію від іншого користувача як

перешкоду через високу потужність власного сигналу, SINR користувача Q2 можна представити у вигляді:

$$\zeta_{N2-DL} = \frac{P_{Q2}|g_{B2}|^2}{\sigma^2 + P_{Q1}|g_{B2}|^2}. \quad (2.9)$$

Швидкість передачі даних для користувача Q1 у висхідному зв'язку (UL) NOMA задається як:

$$R_{N1-UL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_T|g_{B1}|^2}{\sigma^2 + P_T|g_{B2}|^2} \right). \quad (2.10)$$

А для користувача Q2 вона може бути записана як:

$$R_{N2-UL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_T|g_{B2}|^2}{\sigma^2} \right). \quad (2.11)$$

Аналогічним чином, відповідно до SNR, розрахованого вище, швидкість передачі даних для користувача Q1 у нисхідному зв'язку (DL NOMA) задається як:

$$R_{N1-DL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{Q1}|g_{B1}|^2}{\sigma^2} \right). \quad (2.12)$$

А швидкість передачі даних для користувача Q2 задається як:

$$R_{N2-DL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{Q2}|g_{B2}|^2}{\sigma^2 + P_{Q1}|g_{B2}|^2} \right). \quad (2.13)$$

У запропонованому методі M-NOMA ортогональність була введена під час суперпозиційного кодування. Цей метод усуває перешкоди між користувачами, що підтверджується результатами моделювання у наступному розділі.

SINR користувача Q1 у висхідному каналі (UL) після усунення коефіцієнта інтерференції з (2.6) зводиться до наступного рівняння SNR.

$$\lambda_{MN1-UL} = \frac{P_T |g_{B1}|^2}{\sigma^2}. \quad (2.14)$$

Отже, маємо

$$R_{MN1-UL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_T |g_{B1}|^2}{\sigma^2} \right). \quad (2.15)$$

Аналогічно, SNR користувача Q2 у DL NOMA в запропонованій методиці може бути записаний як:

$$\lambda_{N2-UL} = \frac{P_{Q2} |g_{B2}|^2}{\sigma^2}. \quad (2.16)$$

Таким чином, швидкість передачі даних задається як

$$R_{MN2-DL} = \log_2 \left(1 + \frac{P_{Q2} |g_{B2}|^2}{\sigma^2} \right). \quad (2.17)$$

Вирази для швидкості передачі даних набувають вигляду (2.15) та (2.17) через усунення перешкод між користувачами як у висхідному (UL), так і в низхідному (DL) каналах. Вирази (2.7), (2.8), (2.11) та (2.12) залишаються без змін для запропонованого методу M-NOMA.

2.4 Висновки до розділу 2

У цьому розділі було розглянуто кілька системних моделей для запропонованих схем зв'язку HD M-NOMA, що є основою для подальшого дослідження. Для HD M-NOMA було побудовано системні моделі, які враховують як умови із затуханням, так і без нього. Це дозволило глибше зрозуміти характеристики URLLC (ультранадійної та низьколатентної зв'язку).

Базова модель M-NOMA реалізована і адаптована для специфічних сценаріїв, таких як системи ITS (інтелектуальні транспортні системи), що підкреслює гнучкість та застосовність запропонованого підходу. Отримані результати створюють міцну основу для подальшої розробки і вдосконалення систем зв'язку з високою ефективністю і надійністю.

З ОЦІНЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ НА ОСНОВІ МОДУЛЯЦІЇ

У попередньому розділі було розглянуто кілька системних моделей запропонованого алгоритму. Для подальшого дослідження в цьому розділі оцінюється продуктивність усіх системних моделей на основі моделювання з використанням інструментів Matlab та Python.

3.1 Дослідження продуктивності HD M-NOMA

У розділі обговоримо результати моделювання запропонованої методики M-NOMA, яка була порівняна зі звичайною схемою NOMA з каналом AWGN. Для справедливого порівняння для звичайної NOMA та запропонованої схеми M-NOMA використовувалися однакові параметри.

Згідно із запропонованою методикою, передача сигналу відбувається за допомогою QPSK-модуляції. При цьому сигнал віддаленого користувача модулюється на квадратурній складовій, а сигнал ближнього користувача — на фазовій компоненті сузір'я. У запропонованій схемі ми моделювали ситуації як із SIC, так і без нього для цільового користувача як у висхідному (UL), так і у низхідному (DL) каналах. У нашому дослідженні не спостерігалось жодних змін, коли SIC не застосовувався. Це пов'язано з тим, що у запропонованій методиці сигнали користувачів Q1 та Q2 транслювалися у DL і передавалися у UL на різні компоненти під час модуляції.

Порівняння SER для NOMA UL можна побачити на рисунку 3.1. При низьких і високих значеннях SNR запропонована схема для користувача Q1 демонструє мінімальний SER у порівнянні з усіма іншими результатами SER. На Рисунку 3.1 «NOMA Q2» представляє звичайну схему NOMA для віддаленого користувача Q2. «NOMA Q1» показує SER-відповідь користувача Q1 для звичайної NOMA, тоді як «M-NOMA Q1 SIC» і «M-NOMA Q1 wo SIC» відповідають SER-відповіді користувача Q1 для методу M-NOMA з SIC та без

нього відповідно. Користувач Q1 демонструє низький SER для техніки M-NOMA при низьких і високих значеннях SNR, що свідчить про перевагу над звичайною схемою NOMA.

На тому ж рисунку «M-NOMA Q2 SIC» і «M-NOMA Q2 wo SIC» показують SER користувача Q2 для схеми M-NOMA з SIC і без нього. З цих трьох кривих видно, що для віддаленого користувача Q2 схема M-NOMA демонструє кращу SER-відповідь порівняно із звичайною NOMA.

Також варто зазначити, що змодельована M-NOMA для користувача Q1 без SIC точно перевершує моделювання із SIC. Це підтверджує, що в нашому випадку немає потреби в SIC, оскільки ми використали ортогональні положення сузір'їв для обох сигналів, що дозволяє уникнути перешкод між користувачами. Загалом чітко помітно, що як для ближнього, так і для віддаленого користувача запропонована схема UL M-NOMA перевершує звичайну UL NOMA.

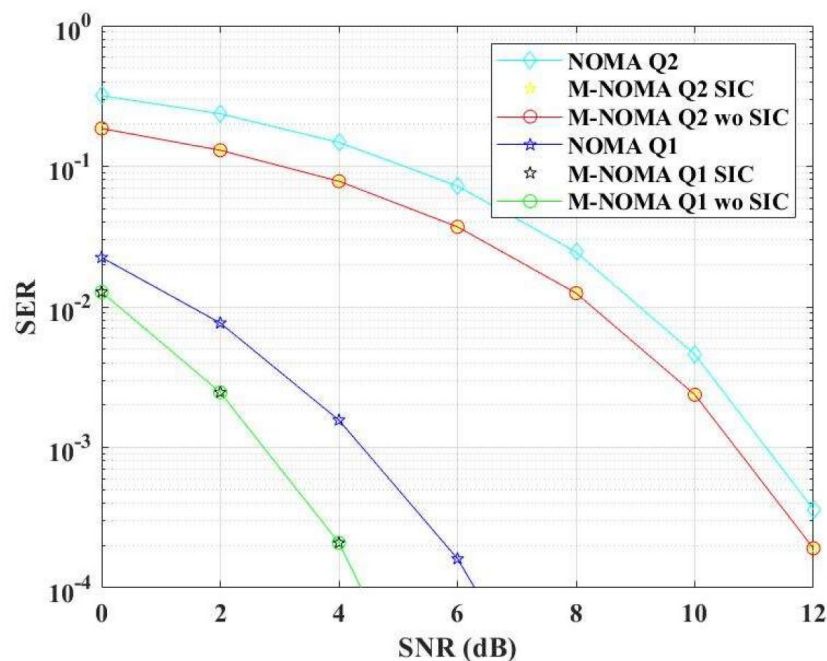


Рисунок 3.1 – Результати моделювання ймовірності символічної помилки (SER) для стандартної UL NOMA, а також для модифікованої M-NOMA

Результати моделювання ймовірності символної помилки (SER) для нисхідної лінії зв'язку (DL) в системах NOMA представлені на рисунку 3.2. У цьому графіку позначення NOMA Q1 та NOMA Q2 відповідають ближньому (Q1) та віддаленому (Q2) користувачам у традиційній схемі DL NOMA. Позначення M-NOMA Q1 SIC та M-NOMA Q2 SIC представляють відповідно користувачів Q1 і Q2 у запропонованій схемі DL M-NOMA із використанням механізму послідовного скасування завад (SIC). Відповідно, M-NOMA Q1 wo SIC та M-NOMA Q2 wo SIC ілюструють результати для тих самих користувачів у випадку застосування DL M-NOMA без SIC.

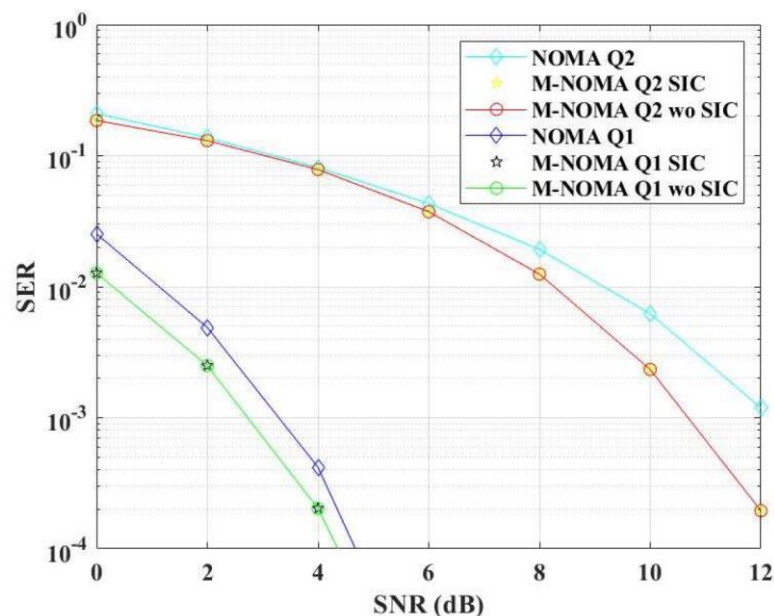


Рисунок 3.2 – Результати моделювання ймовірності символної помилки (SER) для традиційної схеми нисхідної лінії зв'язку (DL) NOMA, а також для модифікованої M-NOMA

Як показують результати симуляції, запропонована схема M-NOMA демонструє кращі характеристики SER порівняно з традиційною NOMA. Однак для користувача Q2 при низькому рівні сигнал/шуму (SNR) спостерігається незначна перевага або майже ідентична продуктивність, тоді як при високих значеннях SNR відзначається покращення характеристик. У діапазоні SNR від 0

до 6 дБ істотної різниці в SER між підсхемами з SIC та без нього не зафіксовано. Як і у випадку з UL M-NOMA, результати з SIC та без SIC демонструють майже однакову ефективність, що свідчить про ефективне усунення внутрішньосистемних завад у межах запропонованої DL M-NOMA. Загалом, запропонована схема перевершує традиційну NOMA з точки зору надійності передачі.

На рисунку 3.3 наведено результати порівняння швидкості передачі даних для UL NOMA. На графіку позначення NOMA Q1 відображає результати моделювання для ближнього користувача Q1 у стандартній UL NOMA, тоді як M-NOMA Q1 SIC та M-NOMA Q1 wo SIC представляють варіанти запропонованої M-NOMA-схеми з та без застосування SIC відповідно. Аналогічно, криві для користувача Q2 у традиційній NOMA позначені як NOMA Q2, а варіанти запропонованої схеми — як M-NOMA Q2 SIC та M-NOMA Q2 wo SIC.

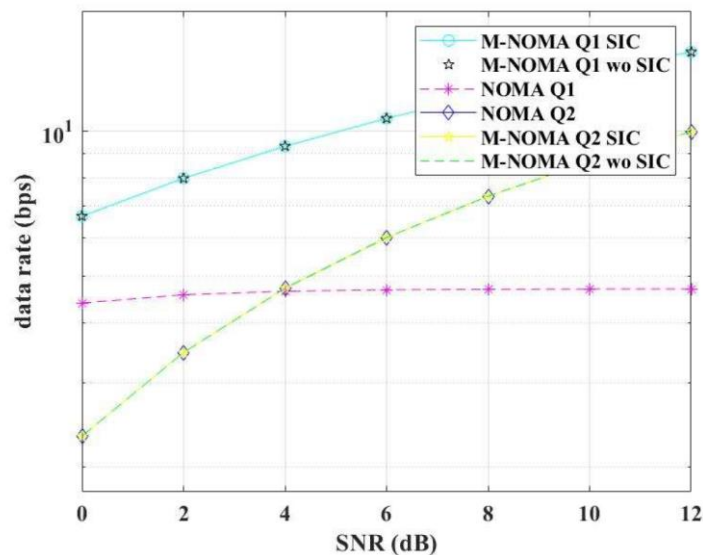


Рисунок 3.3 – Порівняння швидкості передачі даних у традиційній схемі висхідної лінії зв'язку (UL) NOMA та у модифікованій схемі M-NOMA

З аналізу рисунка видно, що для віддаленого користувача Q2 обидві схеми (традиційна та запропонована) демонструють подібні результати з точки зору

пропускної здатності, тобто приросту швидкості передачі даних не спостерігається. Водночас ближній користувач Q1 демонструє суттєве покращення у продуктивності при використанні M-NOMA, що дозволяє зробити висновок про перевагу запропонованої схеми для користувачів із кращими умовами каналу зв'язку.

Аналогічним чином, різницю у швидкості передачі даних для нисхідної лінії зв'язку (DL) можна проаналізувати за рисунком 3.4. З графіка видно, що для ближнього користувача результати традиційної DL NOMA та запропонованої DL M-NOMA повністю збігаються. Водночас для віддаленого користувача Q2 запропонована схема демонструє суттєве покращення швидкості передачі даних у порівнянні з традиційною схемою NOMA.

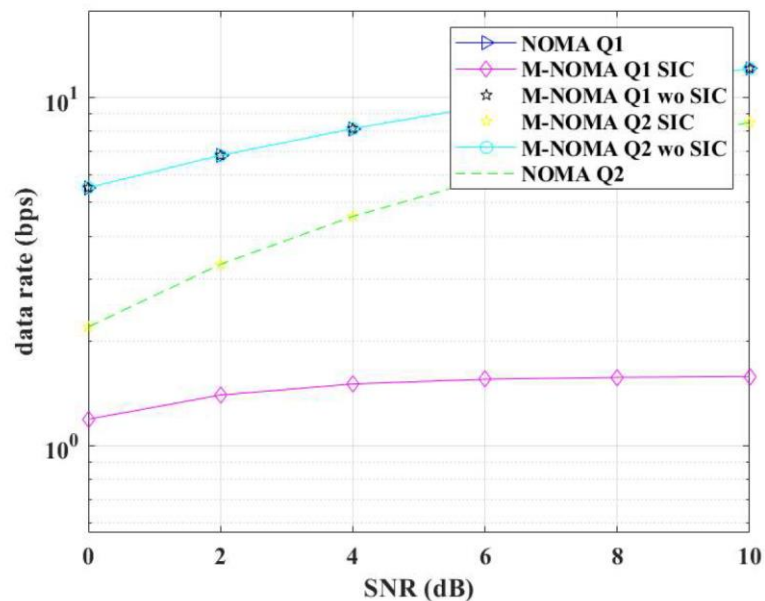


Рисунок 3.4 – Порівняння швидкості передачі даних у традиційній схемі нисхідної лінії зв'язку (DL) NOMA та у модифікованій схемі DL M-NOMA

3.2 Моделювання M-NOMA в умовах плоского загасаючого каналу

У підрозділі представлено оцінку ефективності запропонованої схеми M-NOMA, проведену на основі комп'ютерного моделювання. У рамках моделювання використовувалося програмне забезпечення MATLAB 2018a, з урахуванням плоского каналу загасання Рэлея для всіх каналів зв'язку. Результати були усереднені за 10^5 незалежних ітерацій для забезпечення статистичної достовірності. Параметри моделювання включали ширину каналу (BW) = 1 Гц, експоненту втрат на шляху поширення сигналу $\gamma = 2$, та загальну потужність передавання базової станції (BS) $P = 1$ Вт. Коефіцієнти розподілу потужності були призначені відповідно до відстані кожного користувача до BS і становили: $\alpha_1 = 0.1$, $\alpha_2 = 0.15$, $\alpha_3 = 0.35$ та $\alpha_4 = 0.4$, при цьому виконується умова: $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 = 1$.

На початковому етапі було змодельовано сценарій однієї стільникової зони, що включає одну антену BS, двох ближніх користувачів та двох віддалених користувачів. Кожен із користувачів розташований на різній відстані від BS, як проілюстровано на рисунку 3.5.

У цьому сценарії вважається, що користувачі M_1 і M_2 мають кращі умови радіоканалу (тобто ближчі до BS), ніж користувачі M_3 і M_4 , які знаходяться на більшій відстані та потребують більшої потужності передавання. Цей підхід може бути узагальнений на N-користувачів, де перші $N/2$ користувачів розглядаються як ті, що мають кращі умови каналу, а інші — як користувачі з гіршими умовами каналу та, відповідно, більшими вимогами до потужності.

Для забезпечення об'єктивного та справедливого порівняння, усі параметри системи залишалися незмінними для кожної зі схем, що досліджуються: SM-NOMA, M-NOMA, C-NOMA та традиційна NOMA.

На рисунку 3.5 зображено порівняння ефективності схем NOMA та запропонованої M-NOMA в точці зв'язку типу «точка-точка» (point-to-point) для кожного користувача.

На графіку вісь ординат відповідає ймовірності символної помилки (SER), а вісь абсцис – відношенню сигнал/шум (SNR).

Позначення NOMA M_3 , M_4 та M-NOMA M_3 , M_4 відповідають результатам моделювання для віддалених користувачів у традиційній схемі NOMA та запропонованій M-NOMA відповідно. Аналогічно, NOMA M_1 , M_2 та M-NOMA M_1 , M_2 представляють результати моделювання для ближніх користувачів у зазначених схемах.

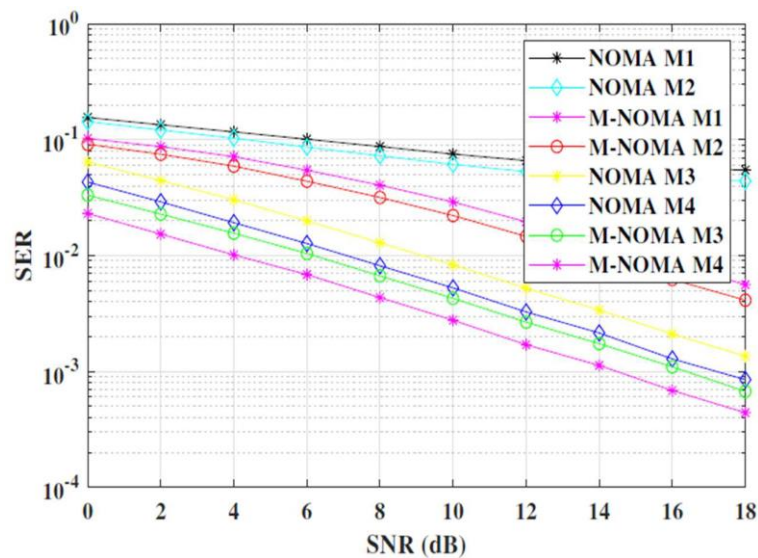


Рисунок 3.5 – Порівняння швидкості передачі даних у традиційній схемі нисхідної лінії зв'язку (DL) NOMA та у модифікованій схемі DL M-NOMA

З аналізу графіка чітко видно, що запропонована схема M-NOMA демонструє кращі показники SER для кожного з користувачів, порівняно з традиційною NOMA. Обидва ближніх користувача у випадку застосування M-NOMA досягають нижчих значень SER, що свідчить про вищу надійність передачі. Водночас обидва віддалених користувача також демонструють помітно кращі характеристики у плані SER у запропонованій M-NOMA-схемі.

На рисунку 3.6 представлено другий сценарій моделювання для кооперативної комунікації. У цьому сценарії зображено графіки залежності ймовірності символної помилки (SER) для таких схем: традиційна NOMA,

кооперативна NOMA (C-NOMA), модифікована NOMA (M-NOMA) та кооперативна модифікована NOMA (CM-NOMA).

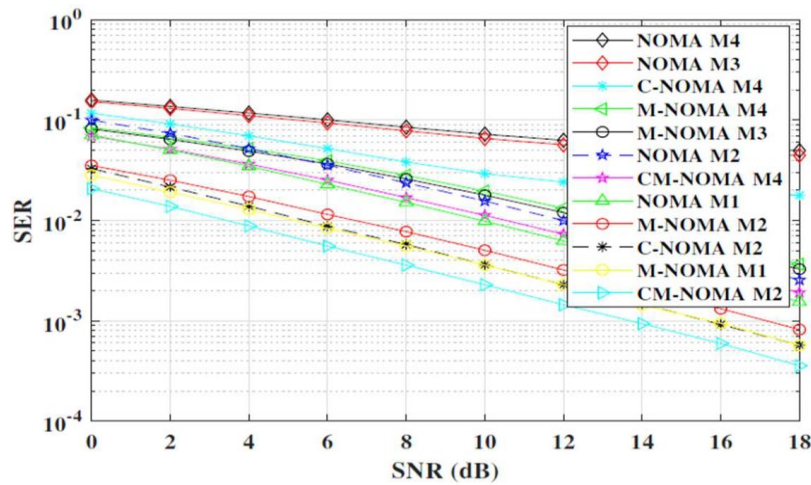


Рисунок 3.6 – Порівняння SER для схем: традиційна NOMA, кооперативна NOMA, запропонована M-NOMA та запропонована кооперативна M-NOMA з DF

Позначення C-NOMA M_4 та CM-NOMA M_4 відображають SER-відгуки для найбільш віддаленого від базової станції користувача M_4 у схемах C-NOMA та CM-NOMA з використанням протоколу повторної передачі з декодуванням (Decode-and-Forward, DF). Аналогічно, C-NOMA M_1 та CM-NOMA M_1 показують криві SER для користувача M_1 , який належить до першого кластеру.

Результати моделювання свідчать про те, що C-NOMA для користувача M_4 забезпечує кращу ефективність у порівнянні зі схемами традиційної NOMA для користувачів M_1 та M_4 , проте все ж не перевершує M-NOMA для відповідних користувачів. У свою чергу, CM-NOMA M_4 демонструє вищу ефективність, ніж M-NOMA M_1 , M-NOMA M_4 , C-NOMA M_4 та NOMA M_4 . Хоча C-NOMA M_1 і перевершує NOMA M_1 , вона поступається за показником SER модифікованій схемі M-NOMA M_1 . У цілому, CM-NOMA M_4 демонструє найнижчі значення ймовірності символної помилки серед усіх розглянутих варіантів, що дозволяє

зробити висновок: запропонована кооперативна модифікована схема CM-NOMA забезпечує найвищу надійність передачі даних серед усіх базових методів.

На рисунку 3.7 наведені результати моделювання швидкості передачі даних для зв'язку типу "точка-точка" для схем NOMA та M-NOMA. З графіка видно, що M-NOMA демонструє вищу швидкість передачі даних порівняно з традиційною NOMA, що свідчить про ефективніше використання радіоресурсів.

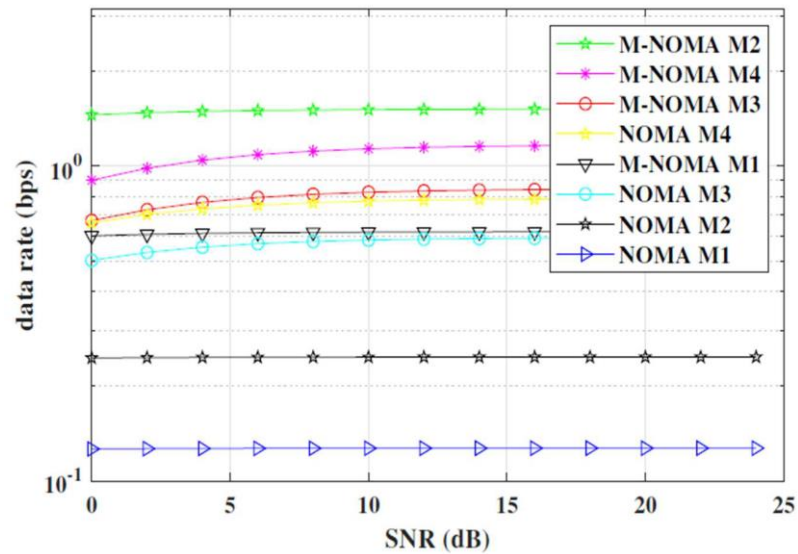


Рисунок 3.7 – Порівняння швидкості передачі даних для всіх користувачів у схемах NOMA та M-NOMA

Основною причиною зміни швидкості передачі є рівень взаємних завад (інтерференції) між сигналами користувачів.

У запропонованій схемі M-NOMA рівень інтерференції було зменшено до однієї шостої від вихідного значення, що значно знижує вплив перешкод.

Зокрема, користувач M_1 у M-NOMA досягає найвищої швидкості передачі, оскільки зазнає найменшого впливу завад. Це зумовлено тим, що сигнал користувача M_1 має найменшу потужність і, відповідно, викликає найменше втручання в роботу інших користувачів. Таким чином, схема M-NOMA забезпечує кращу пропускну здатність, зниження затримки, покращену

спектральну та енергетичну ефективність без необхідності збільшення енергоспоживання.

На рисунку 3.8 представлено порівняння рівня завад, що виникають у кожного користувача в системах NOMA та M-NOMA. З графічних результатів видно, що запропонована схема M-NOMA демонструє кращі показники, ніж традиційна NOMA, з точки зору зниження міжкористувацької інтерференції.

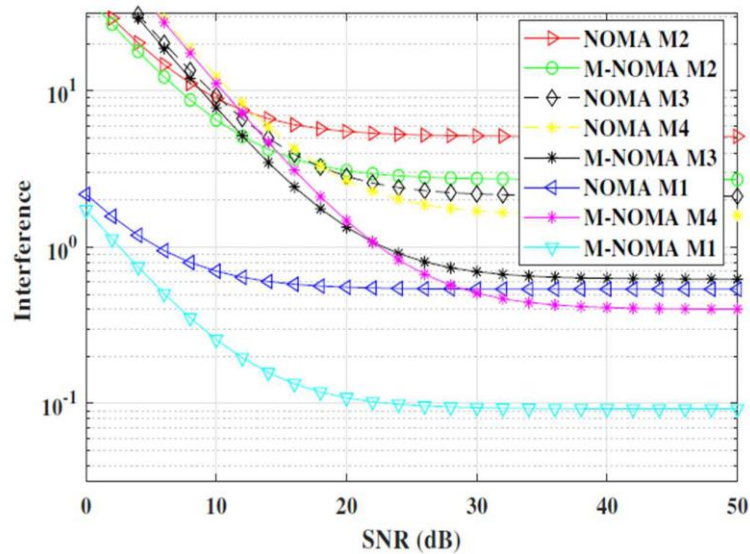


Рисунок 3.8 – Порівняння рівня завад для користувачів у системах NOMA та M-NOMA

Як видно з рисунка, кожен користувач у системі M-NOMA зазнає помітно меншого рівня завад, ніж відповідний користувач у класичній схемі NOMA. Це свідчить про те, що запропонована модифікована схема є набором простих, але ефективних покращень, які дозволяють досягти підвищеної ефективності на рівні всієї системи. Отримані результати підтверджують, що зменшення інтерференції без ускладнення архітектури дозволяє покращити якість обслуговування користувачів, особливо в умовах обмеженого радіоспектра. Результати моделювання показують, що M-NOMA забезпечує суттєве зниження рівня завад для кожного користувача у порівнянні з відповідними користувачами в системі NOMA. Це зниження досягається завдяки: Оптимізованому розподілу

потужності, який враховує положення користувача в мережі; Зменшенню перехресної інтерференції між користувачами за рахунок зміни порядку декодування або кластеризації; Більш гнучкому управлінню ресурсами, що дозволяє мінімізувати взаємний вплив користувацьких сигналів. Загалом, схема M-NOMA демонструє кращі показники завадостійкості, що позитивно впливає на якість зв'язку, швидкість передачі даних та енергоефективність системи.

3.3 Висновки до розділу 3

Системна модель, що аналізується в рамках розділу, охоплює базову архітектуру M-NOMA, а також її розширення із застосуванням підходу до URLLC (зв'язок з наднизькою затримкою та високою надійністю) і інтелектуальних транспортних систем (ITS). Реалізовано моделювання відповідно до системних моделей, описаних у розділі 2. Виконувалося порівняння запропонованої схеми з базовими лінійними методами, такими як OMA (Orthogonal Multiple Access) та традиційна NOMA.

За результатами моделювання, запропонований підхід демонструє суттєве покращення порівняно з існуючими схемами за критеріями ймовірності бітової помилки (SER), швидкості передачі даних, обчислювальної складності та рівня міжкористувацьких завад. У випадку M-NOMA спостерігається зниження SER приблизно на 50% для кожного користувача порівняно з NOMA. Це пояснюється можливістю передавання більшої кількості інформаційних сигналів у межах однієї модуляційної групи, що підвищує ефективність використання спектра.

Щодо обчислювальної складності, результати підтверджують, що у певних випадках (наприклад, при двох користувачах) відсутня потреба у виконанні процедури Successive Interference Cancellation (SIC), оскільки за умовно ідеального планування сигналів взаємні завади між користувачами зникають.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Під час проведення наукових досліджень у сфері телекомунікацій, зокрема при розробці та оптимізації алгоритмів неортогонального множинного доступу (NOMA) для бездротових мереж, обов'язковим є дотримання норм безпеки праці, встановлених українським законодавством. Згідно з Законом України «Про охорону праці», кожен учасник дослідницького процесу має право на безпечні умови виконання своїх обов'язків.

Робота в галузі цифрових технологій зазвичай передбачає тривале перебування за комп'ютером, використання складного програмного середовища, а також можливе залучення електронного обладнання для експериментів чи тестування. У зв'язку з цим важливо забезпечити ергономічне облаштування робочого простору, уникати перевантаження зорової системи та дотримуватись рекомендацій щодо профілактики втоми та стресу. Особливої уваги потребує дотримання електробезпеки під час роботи з технічними пристроями.

З урахуванням нинішніх реалій — зокрема воєнного стану в Україні — окреме значення має й організація дистанційної праці. Безпечне середовище має бути гарантоване як в установах, так і вдома. Психоемоційний комфорт, стабільний доступ до електроенергії та засобів зв'язку також розглядаються як частина сучасного підходу до охорони праці у сфері наукової діяльності.

Отже, дотримання вимог охорони праці є не лише правовим зобов'язанням, але й важливою умовою ефективного й безпечного проведення досліджень у галузі бездротових комунікацій.

Дослідження на тему «Алгоритми підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж» відбувалася в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На дослідника мали вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість

повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

4.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання роботи

4.1.1 Обладнання робочого місця

Ефективне та безпечне виконання дослідницької роботи в галузі бездротових мереж, зокрема під час моделювання алгоритмів неортогонального множинного доступу, значною мірою залежить від раціональної організації робочого простору. Сучасні вимоги до обладнання таких місць базуються як на технічних стандартах, так і на положеннях чинного законодавства України у сфері охорони праці.

Загальні ергономічні вимоги повинні враховувати характер і особливості трудової діяльності. [113].

Площа, виділена для одного робочого місця з ПК, повинна становити не менш 6 м², а об'єм – не менше 20 м³ [114].

Природне освітлення має бути здійснене через світлові прорізи, спрямовані переважно на північ або північний схід, з метою забезпечення коефіцієнта природної освітленості (КПО) не менше, ніж 1,5%.

Виробничі приміщення повинні бути обладнані шафами для зберігання документів, стелажми, тумбми тощо, враховуючи вимоги до площі приміщень.

Приміщення з комп'ютерами потребують щоденного вологого прибирання.

Приміщення з комп'ютерами повинні бути оснащені аптечками першої медичної допомоги.

У приміщеннях з комп'ютерами мають бути розташовані приміщення для відпочинку під час роботи та кімната психологічного розвантаження. В кімнаті

психологічного розвантаження слід передбачити встановлення пристроїв для приготування тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою.

Конструкція робочого місця користувача комп'ютера повинна забезпечити оптимальну робочу позу з такими ергономічними характеристиками: ноги - на підлозі або на підставці для ніг; стегна - у горизонтальній площині; передпліччя - вертикально; лікті - під кутом $70-90^\circ$ до вертикальної площини; зап'ястя зігнуті під кутом не більше 20° щодо горизонтальної площини, нахил голови - $15-20^\circ$ щодо вертикальної площини.

Висота робочої поверхні столу для відеотерміналу повинна знаходитися в межах 680-800 мм, а ширина - забезпечувати можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля.

Робочий стіл для комп'ютера повинен мати простір для ніг з висотою не менше 600 мм, шириною не менше 500 мм, глибиною на рівні колін не менше 450 мм, на рівні витягнутої ноги - не менше 650 мм.

Робоче крісло для користувача комп'ютера повинне мати наступні основні елементи: сидіння, спинку та стаціонарні або знімні підлокітники.

Екран монітора й клавіатура повинні розташовуватися на оптимальній відстані від очей користувача, але не ближче 600 мм, з урахуванням розміру алфавітно-цифрових знаків і символів.

Клавіатуру варто розміщати на поверхні стола або на спеціальній, регульованій по висоті, робочій поверхні окремо від стола на відстані 100-300 мм від краю, найближчого до працівника. Кут нахилу клавіатури повинен бути в межах $5-15^\circ$.

При організації праці, пов'язаної з використанням ПК, для збереження здоров'я працюючих, запобігання професійним захворюванням і підтримки працездатності передбачаються внутрішньо змінні регламентовані перерви для відпочинку.

Внутрішньозмінні режими праці й відпочинку містять додаткові нетривалі перерви в періоди, що передують появі об'єктивних і суб'єктивних ознак стомлення й зниження працездатності.

Працюючі з ПК підлягають обов'язковим медичним оглядам: попереднім – при влаштуванні на роботу і періодичним – протягом трудової діяльності. Основними критеріями оцінки придатності до роботи з ПК мають бути показники стану органів зору: гострота зору, показники рефракції, акомодації, стану бінокулярного апарату ока тощо. При цьому необхідно враховувати також стан організму в цілому.

Лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК й устаткування для обслуговування, ремонту й налагодження ПК в приміщенні виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазових, нульових робочих і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електроприладів.

Металеві труби й гнучкі металеві рукави заземлені. Заземлення відповідає вимогам Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів [115].

Неприпустимим є:

- експлуатація кабелів і проводів з ушкодженими захисними властивостями за час експлуатації ізоляції; залишення під напругою кабелів і проводів з неізованими провідниками;
- застосування саморобних подовжувачів, що не відповідають вимогам ПУЕ до переносних електропроводів;
- застосування для опалення приміщення нестандартного (саморобного) електронагрівального устаткування або ламп накаливання;
- користування ушкодженими розетками, вимикачами й іншими електровиробами, а також лампами, скло яких має сліди затемнення або здуття;
- підвішування світильників безпосередньо на струмоведучих проводах, обгортання електроламп і світильників папером, тканиною й іншими горючими матеріалами, експлуатація їх зі знятими ковпаками (розсіювачами);
- використання електроапаратури й приладів в умовах, що не відповідають вказівкам (рекомендаціям) підприємств-виготовлювачів.

4.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

4.2.1 Мікроклімат

Раціональні параметри мікроклімату — одна з ключових умов забезпечення комфортної та безпечної праці під час проведення досліджень у сфері телекомунікацій. У процесі моделювання, аналізу алгоритмів або розробки програмного забезпечення дослідник зазвичай тривалий час перебуває в приміщенні за комп'ютером. Тому від температури повітря, вологості, швидкості його руху та якості вентиляції залежить як фізичне самопочуття, так і ефективність розумової діяльності.

Параметри мікроклімату нормуються в залежності від: періоду року; категорії робіт; технологічного процесу.

Для нормування параметрів мікроклімату календарний рік поділяється на два періоди:

- холодний період – період року, коли середньодобова температура зовні приміщення нижча за $+10^{\circ}\text{C}$;
- теплий – коли середньодобова температура зовні приміщення становить $+10^{\circ}\text{C}$ і вище.

Робота дослідника алгоритмів підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж за енерговитратами відноситься до категорії 1а [116]. Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл. 4.1 (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99 [117]).

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для забезпечення оптимального мікроклімату в приміщенні передбачено систему опалення та вентиляції повітря. Вимірювання показників мікроклімату

планується здійснювати на початку, середині та в кінці холодного і теплого періодів року, не рідше трьох разів за кожну робочу зміну. У випадку коливань показників мікроклімату, пов'язаних з технологічними процесами або іншими факторами, виміри також плануються проводити при мінімальних та максимальних значеннях теплового навантаження на працюючих протягом робочого дня.

4.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється дослідження алгоритмів підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж, можливими забруднювачами повітря може бути офісна техніка та пил, який потрапляє ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Фенол	0,01	0,01	3
Формальдегід	0,035	0,003	2
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4

В повітрі зовнішнього природного середовища, як і в повітряному середовищі приміщень завжди є наявною певна кількість заряджених частинок – іонів. Так в 1 см³ чистого зовнішнього повітря міститься близько 1000 негативних іонів і понад 1200 позитивних. Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення необхідного складу повітря в робочій зоні приміщення використовується система припливно-витяжної вентиляції. Постійно проводиться провітрювання за допомогою віконних отворів та регулярного вологого прибирання. Також передбачається встановлення системи кондиціонування.

4.2.3 Виробниче освітлення

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні для виконання роботи зазначені у таблиці 4.4 (відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [118]):

Таблиця 4.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове	Верхнє або верхнє і бокове	Бокове
Дуже високі точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Для забезпечення комфортних умов роботи, рекомендується розташовувати робоче місце таким чином, щоб уникнути попадання прямого світла в очі. Щоб

убезпечити відсутність світлових відблисків, використовують обладнання з матовою поверхнею. Захист очей від прямого сонячного світла або штучного освітлення можна забезпечити за допомогою захисних козирків та жалюзі на вікнах.

При створенні оптимальних умов для зорової роботи важливо враховувати не тільки кількість та якість освітлення, але й кольорове оформлення приміщення. Наприклад, якщо інтер'єр має світлі відтінки, то завдяки збільшенню кількості відбитого світла рівень освітленості підвищується на 20-40% (за тієї ж потужності джерел світла), а різкість тіней зменшується, що сприяє рівномірнішому освітленню.

4.2.4 Виробничий шум

Індивідуальні особливості людини, пов'язані з різними психологічними реакціями на вплив шуму, суттєво впливають на його сприйняття

Допустимі рівні шуму та вібрації на місцях праці осіб, що працюють з ПК, встановлені санітарними нормами ДсанПіН 3.3.2-007-98 [119], витяг з яких подано в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Допустимі еквівалентні рівні шуму

Вид професійної діяльності, місце праці	Еквівалентні рівні шуму, дБА.
Програмісти	50
Оператори в залах опрацювання інформації на ПК та оператори комп'ютерного набору	65
В приміщеннях для розташування шумних агрегатів	75

Головними методами зменшення впливу шуму є усунення або зменшення джерела шуму в процесі роботи, застосування матеріалів, що поглинають звук, і розумне організаційне планування приміщень виробництва.

4.2.5 Виробничі випромінювання

Оскільки дослідження алгоритмів підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж проводилося за допомогою ПК, то на робочому місці працівника можливий підвищений рівень електромагнітного випромінювання.

Основою функціонування організму є дуже слабкі біоелектричні струми, що синхронізують природні біологічні режими. Штучні ЕМП якщо співпадають з частотами біологічних ритмів мозку або біоелектричною активністю серця чи інших органів людини можуть призвести до десинхронізації функціональних процесів в організмі. Механізм біологічної дії на організм людини полягає як у тепловому, так і нетепловому специфічному ефекті, тепла дія ЕМП проявляються у підвищенні температури тіла, а також локальному, вибіркового нагріванні тканин, органів, клітин унаслідок переходу електромагнітної енергії у теплову. Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань від монітору комп'ютера представлені в табл. 4.6.

Таблиця 4.6 – Допустимі значення параметрів неіонізуючих електромагнітних випромінювань

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії (інтенсивність потоку енергії), Вт/м ²
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля, 6 кГц...3 МГц	50	5	
3 МГц...30 МГц	2	-	
30 МГц...5 ГГц	-	-	10
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру: УФ-С (220...280 нм)			0,001
УФ-В (280...320 нм)			0,01
УФ-А (320...400 нм)			10,0
в інфрачервоній частині спектру: 0,76...10,0 мкм			35,0...70,0
Напруженість електричного поля ВДТ			20 ВВ/м

Для зменшення впливу електромагнітних полів від персональних комп'ютерів на дослідника, важливо дотримуватися встановлених нормативів робочого часу та регулярних перерв для відпочинку.

Для захисту від електромагнітних полів від ПК можна також застосовувати екранування, використовувати периферійні пристрої з низьким електромагнітним випромінюванням, а також встановлювати монітори з низьким рівнем випромінювання, які відповідають відповідним стандартам безпеки.

4.3 Пожежна безпека

Забезпечення пожежної безпеки є одним із головних напрямів загальної системи охорони праці у закладах освіти, наукових установах та на підприємствах, де виконуються дослідження у сфері телекомунікацій. Робота з електронним обладнанням, комп'ютерною технікою та лабораторними пристроями супроводжується певними ризиками виникнення пожежонебезпечних ситуацій.

Відповідно до вимог Кодексу цивільного захисту України та Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2004), усі працівники та студенти, які залучаються до дослідницької чи практичної діяльності, зобов'язані проходити первинний та періодичний інструктаж з пожежної безпеки. Особлива увага приділяється ознайомленню з планом евакуації, місцем розташування вогнегасників та засобів оповіщення.

В приміщенні, де здійснювалось дослідження алгоритмів підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж використовуються тільки негорючі речовини та матеріали у холодному стані, за ступенем вибухопожежної та пожежної небезпеки приміщення відноситься до категорії «Д».

За вогнестійкістю будинок відноситься до другої категорії [120]. Робоча зона приміщення віднесена до класу вибухонебезпечності В-IIа та

пожежонебезпечності П-Па, оскільки вибухонебезпечна концентрація пилу і волокон може утворюватися лише внаслідок аварії або несправності.

4.3.1 Технічні рішення системи запобігання пожежі

Технічні засоби запобігання пожежам становлять критично важливу частину протипожежного захисту в установах, де здійснюється дослідницька діяльність із використанням комп'ютерного та електронного обладнання. У контексті наукових робіт, пов'язаних із алгоритмами NOMA (неортогонального множинного доступу), подібне обладнання часто працює впродовж тривалого часу та вимагає безперебійного живлення, що підвищує ризик теплового навантаження та коротких замикань.

Система запобігання пожежі включає такі основні напрями:

- запобігання утворенню горючого середовища. Досягається: застосуванням герметичного виробничого устаткування; максимально можливою заміною в технологічних процесах горючих речовин та матеріалів негорючими; обмеженням кількості пожежо- та вибухонебезпечних речовин при використанні та зберіганні, а також правильним їх розміщенням; ізоляцією горючого та вибухонебезпечного середовища; організацією контролю за складом повітря в приміщенні та контролю за станом середовища в апаратах; застосуванням робочої та аварійної вентиляції; відведенням горючого середовища в спеціальні пристрої та безпечні місця; застосуванням в установках з горючими речовинами пристроїв захисту від пошкоджень та аварій; використанням інгібувальних (хімічно активні компоненти, що сприяють припиненню пожежі) та флегматизаційних (інертні компоненти, що роблять середовище негорючим) добавок та ін.

- запобігання виникненню в горючому середовищі (чи внесенню в нього) джерела запалювання. Досягається: використанням устаткування та пристроїв, при роботі яких не виникає джерел запалювання; використанням електроустаткування, що відповідає за виконанням класу пожежо- та вибухонебезпеки приміщень та зон, груп і категорії вибухонебезпечної суміші;

виконанням вимог щодо сумісного зберігання речовин та матеріалів; використанням устаткування, що задовольняє вимоги електростатичної іскробезпеки; улаштуванням блискавкозахисту; організацією автоматичного контролю параметрів, що визначають джерела запалювання; використанням швидкодіючих засобів захисного вимкнення; заземленням устаткування, видовжених металоконструкцій; використанням під час роботи з ЛЗР інструментів, що не допускають іскроутворення; ліквідацією умов для самоспалахування речовин і матеріалів; усуненням контакту з повітрям пірофорних речовин; підтриманням температури нагрівання поверхні устаткування пристроїв, речовин та матеріалів, які можуть контактувати з горючим середовищем нижче гранично допустимої (80 % температури самозаймання).

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні, де проводилося дослідження системи фазового автопідстроювання частоти такі:

- несправна електропроводка (іскріння, перегрів провідників, пересихання електроізоляційних матеріалів);
- залишення без нагляду увімкнутих комп'ютерів, обчислювальної техніки та інших електроприладів.

Для запобігання виникнення пожежі доцільні такі заходи:

- призначення осіб, що відповідальні за пожежну безпеку приміщення;
- систематичне проведення повторних протипожежних інструктажів та занять за програмою пожежно-технічного мінімуму з особами, що відповідальні за пожежну безпеку;
- утримання в справному стані засобів протипожежного захисту.

4.3.2 Технічні рішення системи протипожежного захисту

Протипожежний захист промислових об'єктів забезпечується:

- правильним вибором необхідного ступеня вогнестійкості будівельних конструкцій; правильним об'ємно-планувальним рішенням будівель і споруд;

розташуванням приміщень та виробництв з урахуванням вимог пожежної безпеки;

- улаштуванням протипожежних перепон у будівлях, системах вентиляції, опалювальних та кабельних комунікаціях;
- спорудженням протидимного захисту;
- забезпеченням евакуації людей;
- використанням засобів пожежної сигналізації, сповіщення та пожежогасіння;
- організацією пожежної охорони об'єкта;
- засобами, що забезпечують успішне розгортання тактичних дій гасіння пожежі.

Досліджуване приміщення має два переносних (порошкових, водопінних або водяних) вогнегасників з масою заряду вогнегасної речовини 5 кг і більше. Крім того, треба передбачати по одному вуглекислотному вогнегаснику з величиною заряду вогнегасної речовини 3 кг і більше:

- на 20 м² площі підлоги в таких приміщеннях: офісні приміщення з ПЕОМ, комори, електрощитові, вентиляційні камери та інші технічні приміщення;
- на 50 м² площі підлоги приміщень архівів, машинних залів, бібліотек, музеїв [121].

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих бездротових технологій п'ятого покоління (5G), а також технологій, що використовуються для задоволення зростаючих вимог сучасних систем зв'язку до ефективної передачі даних при обмеженості електромагнітного спектра, який є вичерпним природним ресурсом. Розглянуто перспективні підходи до повторного використання спектра, зокрема технології мікрохвильової передачі, внутрішньосмугового повнодуплексного зв'язку (IBFD) та нелінійного множинного доступу (NOMA). Технологія NOMA є однією з найбільш перспективних завдяки здатності забезпечувати високу спектральну ефективність без необхідності поділу спектра між користувачами.

2. На відміну від традиційних технологій, таких як OFDMA, які забезпечують розділення сигналів за частотою або часом, NOMA відмовляється від ортогональності, що призводить до зростання інтерференції, яку необхідно компенсувати за допомогою багатоетапної процедури SIC (Successive Interference Cancellation). Це, своєю чергою, підвищує обчислювальну складність приймача.

3. У роботі запропоновано вдосконалену схему M-NOMA, яка впроваджує ортогональність на етапі підготовки сигналу, зменшуючи інтерференцію у висхідній (UL) і низхідній (DL) лініях зв'язку. Запропонований підхід продемонстрував зниження ймовірності помилки в символах (SER), зменшення обчислювальної складності, а також підвищення швидкості передачі даних порівняно з класичною схемою NOMA.

4. Для підвищення спектральної ефективності було реалізовано алгоритм M-NOMA для напівдуплексного режиму, що спрямований на зниження інтерференції та складності приймання сигналів.

5. Ортогональне модуляційне групування користувачів у M-NOMA дає змогу суттєво зменшити інтерференцію. Завдяки мінімальним перешкодам необхідність у SIC знижується, що відповідно зменшує обчислювальне навантаження приймача. У M-NOMA половина користувачів модулюється по I-

компоненту, а інша – по Q-компоненту модуляції QAM, що зменшує інтерференцію на 50%.

6. Впровадження M-NOMA змінює структуру модуляції системи, що призводить до зменшення SER. Отримано аналітичні вирази SER для каналів AWGN та плоского затухання Рэлея, які підтверджують, що в порівнянні зі стандартною 4-QAM, використання M-NOMA знижує SER удвічі.

7. Відповідно до стандарту 3GPP для 5G, задані цільові значення системних параметрів (наприклад, максимальна швидкість до 20 Гбіт/с, затримка до 1 мс тощо) ще не досягнуті в повному обсязі. У роботі показано, що використання M-NOMA дозволяє покращити ці показники порівняно з традиційною NOMA.

8. Результати моделювання свідчать, що M-NOMA суттєво покращує ключові параметри порівняно з NOMA. Наведено приклади для двох і чотирьох користувачів у UL та DL каналах, де фіксується зменшення SER до 25% і збільшення швидкості передачі даних до 95%.

9. Для покращення характеристик M-NOMA використано модуляційні схеми 4-QAM і 16-QAM. Переваги 16-QAM полягають у зниженні інтерференції, підвищенні швидкості та пропускної здатності системи.

10. Запропоновані методи дозволяють здійснювати комплексну оптимізацію бездротових систем за наступними критеріями: Швидкість передачі даних та пропускна здатність, Ймовірність помилок у символах (SER), Енергоефективність, Секретність та безпека передачі, Ймовірність порушення конфіденційності (SoP), Затримка в передачі даних, Ефективність збору радіочастотної енергії (RFEH/RFEF).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Q. V. Khanh, N. V. Hoai, L. D. Manh, A. N. Le, and G. Jeon, "Wireless communication technologies for IoT in 5G: Vision, applications, and challenges," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2022, no. 1, p. 3229294, 2022.
2. W. Montlouis and A. L. Imoize, "Fundamentals of wireless communications: Massive MIMO essentials for 6G and beyond," *Massive MIMO for Future Wireless Communication Systems: Technology and Applications*, pp. 1-21, 2025.
3. V. Manimala and N. Gunavathi, "Next-generation terabit wireless communication: Advancements beyond 6G," *Microwave Journal*, vol. 66, no. 11, 2023.
4. X. Kong, Y. Wu, H. Wang, and F. Xia, "Edge computing for internet of everything: A survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 23, pp. 23472-23485, 2022.
5. F. Arena, M. Collotta, G. Pau, and F. Termine, "An overview of augmented reality," *Computers*, vol. 11, no. 2, p. 28, 2022.
6. M. J. Alam, M. R. Hossain, S. Azad, and R. Chugh, "An overview of LTE/LTE-A heterogeneous networks for 5G and beyond," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 34, no. 8, p. e4806, 2023.
7. P. Liu et al., "Computation rate maximization for SCMA-aided edge computing in IoT networks: A multi-agent reinforcement learning approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024.
8. A. Ahmed et al., "Unveiling the potential of NOMA: A journey to next generation multiple access," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, doi: 10.1109/COMST.2024.3521647.
9. O. Alamu, T. O. Olwal, and K. Djouani, "Cooperative NOMA networks with simultaneous wireless information and power transfer: An overview and outlook," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 71, pp. 413-438, 2023.

10. A. Jehan and M. Zeeshan, "Comparative performance analysis of code-domain NOMA and power-domain NOMA," in *Proc. 16th Int. Conf. Ubiquitous Inf. Manage. Commun. (IMCOM)*, 2022, pp. 1-6.
11. R. Deng, B. Di, H. Zhang, and L. Song, "HDMA: Holographic-pattern division multiple access," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 4, pp. 1317-1332, 2022.
12. A. Mishra, Y. Mao, L. Sanguinetti, and B. Clerckx, "Rate-splitting assisted massive machine-type communications in cell-free massive MIMO," *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 6, pp. 1358-1362, 2022.
13. J. Seong, M. Toka, and W. Shin, "Sum-rate maximization of RSMA-based aerial communications with energy harvesting: A reinforcement learning approach," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 12, no. 10, pp. 1741-1745, 2023.
14. C. Wu, Y. Xiao, S. Fang, and G. Wu, "Design and implementation of nonlinear precoding for MIMO-SDMA toward 6G wireless," *China Communications*, vol. 21, no. 1, pp. 69-87, Jan. 2024, doi: 10.23919/JCC.fa.2023-0461.202401.
15. Z. Wu and L. Dai, "Multiple access for near-field communications: SDMA or LDMA?," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 41, no. 6, pp. 1918-1935, 2023.
16. Z. Liu, J. Zhang, Y. Zhu, E. Shi, and B. Ai, "Mobile Cell-Free Massive MIMO with Multi-Agent Reinforcement Learning: A Scalable Framework," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024.
17. M. H. Adnan, Z. A. Zukarnain, and O. A. Amodu, "Fundamental design aspects of UAV-enabled MEC systems: A review on models, challenges, and future opportunities," *Computer Science Review*, vol. 51, p. 100615, 2024.
18. M. Ahmed et al., "Advancements in RIS-Assisted UAV for Empowering Multi-Access Edge Computing: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, 2025.
19. Y. Feng, L. Xu, Q. Li, S. Yan, H. Wang, and D. W. K. Ng, "Transmit rate enhancement for STAR-RIS-assisted uplink NOMA," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2025.

20. R. She, Y. Wu, E. Cui, M. Sun, W. Zhao, and D. Fu, "Energy-efficiency optimization for heterogeneous computing-assisted NOMA-MEC edge AI tasks," *Future Generation Computer Systems*, vol. 162, p. 107458, 2025.
21. J. Zhang et al., "Performance analysis and optimization of NOMA-based cell-free massive MIMO for IoT," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 12, pp. 9625-9639, 15 June 2022, doi: 10.1109/JIOT.2021.3130026.
22. S. A. Mousavi, M. Monemi, and R. Mohseni, "Leveraging common user clustering for improved performance in cell-free NOMA networks," *Wireless Networks*, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11276-025-03897-4>.
23. R. Arshad, S. Baig, S. Aslam, et al., "Wavelet NOMA for cell-free massive MIMO: mitigating intra-cluster and inter-cluster interference in future wireless communication systems," *Telecommunication Systems*, vol. 88, p. 5, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01242-2>.
24. A. Apiyo and J. Izydorczyk, "A survey of NOMA-aided cell-free massive MIMO systems," *Electronics*, vol. 13, no. 1, p. 231, 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics13010231>.
25. Chong, Baolin, Hancheng Lu, Yuang Chen, Langtian Qin, and Fengqian Guo. "Achievable sum rate optimization on NOMA-aided cell-free massive MIMO with finite blocklength coding." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2025).
26. U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, and M. Naeem, "NOMA and future 5G & B5G wireless networks: A paradigm," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 204, p. 103413, 2022.
27. S. Thushan, S. Ali, N. H. Mahmood, N. Rajatheva, and M. Latva-Aho, "Deep learning-based blind multiple user detection for grant-free SCMA and MUSA systems," *IEEE Trans. Mach. Learn. Commun. Netw.*, vol. 1, pp. 61-77, 2023, doi: 10.1109/TMLCN.2023.3283350.
28. H. Jafarkhani, H. Maleki, and M. Vaezi, "Modulation and coding for NOMA and RSMA," *Proc. IEEE*, 2024.

29. O. M. K. Al-Dulaimi, A. M. K. Al-Dulaimi, M. O. Alexandra, and M. K. H. Al-Dulaimi, "Strategy for non-orthogonal multiple access and performance in 5G and 6G networks," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1705, 2023.
30. Y. Lai, H. Liu, T.-T. Chan, H. Pan, and C. Jiang, "Age of collection with network-coded multiple access: An experimental study," in *Proc. IEEE 99th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, 2024, pp. 1-6.
31. N. Ye, X. Li, K. Yang, and J. An, "Multiple access technology towards ubiquitous networks: Overview and efficient designs," 2022.
32. P. Wang et al., "Delay-Doppler domain spectral shaping multiple access (SSMA) for satellite communications: A unified multi-branch framework," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2025.
33. O. Kuznetsov, E. Frontoni, N. Kryvinska, O. Smirnov, and A. L. Imoize, "Computational modeling of enhanced spread spectrum codes for asynchronous wireless communication," in *Computational Modeling and Simulation of Advanced Wireless Communication Systems*, CRC Press, 2024, pp. 403-447.
34. R. Shankar, "Examination of a non-orthogonal multiple access scheme for next-generation wireless networks," *J. Defense Model. Simul.*, vol. 19, no. 3, pp. 453-465, 2022.
35. B. P. Chaudhary, R. Shankar, and R. K. Mishra, "A tutorial on cooperative non-orthogonal multiple access networks," *J. Defense Model. Simul.*, vol. 19, no. 4, pp. 563-573, 2022.
36. M. SubrahmanyeswaraRao, R. Shankar, S. Gupta, A. Baronia, and V. Kumar, "Examination of multiple users MIMO-NOMA over robust fading channel conditions," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 235, pp. 3315-3325, 2024.
37. S. Pandya, P. Krishna, R. Shankar, and A. S. Bist, "Examination of the fifth-generation vehicular simultaneous wireless information and power transfer cooperative non-orthogonal multiple access network in military scenarios considering time-varying and imperfect channel state information conditions," *J. Defense Model. Simul.*, vol. 19, no. 4, pp. 723-737, 2022.

38. M. H. N. Shaikh, V. A. Bohara, A. Srivastava, and G. Ghatak, "A downlink RIS-aided NOMA system with hardware impairments: Performance characterization and analysis," *IEEE Open Journal of Signal Processing*, vol. 3, pp. 288–305, 2022, doi: 10.1109/OJSP.2022.3194416.
39. S. N. Sur et al., "A state-of-the-art survey on IRS-NOMA for integrated sensing and communication," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 186087–186123, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3512998.
40. T.-A. Nguyen, H.-V. Nguyen, D.-T. Do, and S. N. Sur, "Performance analysis of two IRS-NOMA users in downlink," in *Advances in Communication Devices and Networking*, Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 661–674.
41. D. Sarkar et al., "A comprehensive survey on IRS-assisted NOMA-based 6G wireless network: Design perspectives challenges and future directions," *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no. 2, pp. 2539–2562, Apr. 2024.
42. S. Kumar, P. Yadav, M. Kaur, and R. Kumar, "A survey on IRS NOMA integrated communication networks," *Telecommunication Systems*, vol. 80, no. 2, pp. 277–302, Apr. 2022.
43. J. Zuo et al., "Exploiting NOMA and RIS in integrated sensing and communication," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 10, pp. 12941–12955, Oct. 2023.
44. Y. Liu et al., "Reconfigurable intelligent surface-aided multi-user networks: Interplay between NOMA and RIS," *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 2, pp. 169–176, 2022.
45. J. Zuo, Y. Liu, Z. Ding, L. Song, and H. V. Poor, "Joint design for simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS assisted NOMA systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 611–626, 2022.
46. X. Li, Y. Zheng, M. Zeng, Y. Liu, and O. A. Dobre, "Enhancing secrecy performance for STAR-RIS NOMA networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 2, pp. 2684–2688, 2022.

47. X. Yue et al., "Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface assisted NOMA networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 189–204, 2022.
48. M. Wang, W. Duan, G. Zhang, M. Wen, J. Choi, and P.-H. Ho, "On the achievable capacity of cooperative NOMA networks: RIS or relay?," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 8, pp. 1624–1628, 2022.
49. M. R. Mahmood, M. A. Matin, P. Sarigiannidis, S. K. Goudos, and G. K. Karagiannidis, "Residual compensation-based extreme learning machine for MIMO-NOMA receiver," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 13398–13407, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3242917.
50. H. Sadat, M. Abaza, A. Mansour, and A. Alfalou, "A survey of NOMA for VLC systems: Research challenges and future trends," *Sensors*, vol. 22, no. 4, p. 1395, 2022, doi: 10.3390/s22041395.
51. M. A. Arfaoui, A. Ghrayeb, C. Assi, and M. Qaraqe, "CoMP-assisted NOMA and cooperative NOMA in indoor VLC cellular systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 9, pp. 6020–6034, Sept. 2022, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3190887.
52. G. N. Tran and S. Kim, "Performance analysis of short packets in NOMA VLC systems," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 6505–6517, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3141865.
53. S. A. H. Mohsan, M. Sadiq, Y. Li, A. V. Shvetsov, S. V. Shvetsova, and M. Shafiq, "NOMA-based VLC systems: A comprehensive review," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 2960, 2023.
54. C. E. Ngene, P. Thakur, and G. Singh, "Power allocation strategies for 6G communication in VL-NOMA systems: An overview," *Smart Science*, vol. 11, no. 3, pp. 475-518, 2023.
55. V. Andiappan and V. Ponnusamy, "Deep learning enhanced NOMA system: A survey on future scope and challenges," *Wireless Personal Communications*, vol. 123, no. 1, pp. 839-877, 2022.

56. R. K. Senapati and P. J. Tanna, "Deep learning-based NOMA system for enhancement of 5G networks: A review," *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 3380-3394, 2022.
57. C. Tang et al., "Deep reinforcement learning for robotics: A survey of real-world successes," *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, vol. 8, 2024.
58. A. Waraiet et al., "Deep reinforcement learning-based robust design for an IRS-assisted MISO-NOMA system," *IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking*, 2024.
59. R. Arshad, S. Baig, and S. Aslam, "User clustering in cell-free massive MIMO NOMA system: A learning based and user centric approach," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 90, pp. 183-196, 2024.
60. S. S. Rana, G. Verma, and O. P. Sahu, "Machine Learning Based Improved User-Pairing and Power Allocation with Imperfect-Successive Interference Cancellation for Downlink NOMA-UAV System," *International Journal of Wireless Information Networks*, vol. 31, no. 1, pp. 29-36, 2024.
61. Q. Zhai et al., "Resource Management for Active RIS Aided Multi-Cluster SWIPT Cooperative NOMA Networks," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 21, no. 4, pp. 4421-4434, Aug. 2024, doi: 10.1109/TNSM.2024.3395298.
62. Y. Pramitarini et al., "Opportunistic scheduling scheme to improve physical-layer security in cooperative NOMA system: Performance analysis and deep learning design," *IEEE Access*, 2024.
63. M. H. Nadimi-Shahraki et al., "A systematic review of applying grey wolf optimizer, its variants, and its developments in different internet of things applications," *Internet of Things*, vol. 2024, p. 101135.
64. S. Sikkanan et al., "Exploring the potential of 5G uplink communication: Synergistic integration of joint power control, user grouping, and multi-learning Grey Wolf Optimizer," *Scientific Reports*, vol. 14, no. 1, p. 21406, 2024.

65. L. Yu et al., "Performance Analysis of NOMA-Based VLC System in Different IoT Network Environments," *IEEE Internet of Things Journal*, 2024.
66. R. Ramli and B. M. Lee, "An Overview of Deep Learning for Resource Management in mmWave-NOMA," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 167883-167905, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3497137.
67. A. Kumar et al., "Implementation of the deep learning method for signal detection in massive-MIMO-NOMA systems," *Heliyon*, vol. 10, no. 3, 2024.
68. V. D. Tuong and S. Cho, "Deep-Learning-Based Resource Allocation for 6G NOMA-Assisted Backscatter Communications," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 11, no. 19, pp. 32234-32243, Oct. 1, 2024, doi: 10.1109/JIOT.2024.3424728.
69. M. K. Beuria and S. S. Singh, "Performance analysis of cooperative NOMA with optimized power allocation using deep learning approach," *Wireless Networks*, vol. 30, pp. 819-834, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11276-023-03522-2>.
70. J. S. P. Dharshini and P. D. Jordhana, "Optimized NOMA System Using Hybrid Coding and Deep Learning-Based Channel Estimation," *Wireless Personal Communications*, vol. 134, pp. 1801-1826, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11277-024-10960-4>.
71. Q. Wang et al., "Deep Learning-Based Detection Algorithm for the Multi-User MIMO-NOMA System," *Electronics*, vol. 13, no. 2, p. 255, 2024. <https://doi.org/10.3390/electronics13020255>.
72. Y. Banday, "Empowering RIS-assisted NOMA networks with deep learning for user clustering and phase shifter optimization," *Wireless Networks*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11276-025-03936-0>.
73. F. M. Caceres, S. Kandeepan, and S. Sun, "Interference-Based and Deep-Learning-Aided Physical Layer Security Enhancement in Uplink NOMA Under Cooperative Eavesdropping," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 10, pp. 15227-15238, Oct. 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3411627.

74. I. Umakoglu, M. Namdar and A. Basgumus, "Deep Learning-Assisted Signal Detection for OTFS-NOMA Systems," in *IEEE Access*, vol. 12, pp. 119105-119115, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3449812.
75. T. Van Luong, N. Shlezinger, C. Xu, T. M. Hoang, Y. C. Eldar and L. Hanzo, "Deep Learning Based Successive Interference Cancellation for the Non-Orthogonal Downlink," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 11, pp. 11876-11888, Nov. 2022, doi: 10.1109/TVT.2022.3193201.
76. N. T and B. A. V, "Full-Duplex Cooperative NOMA Network with Multiple Eavesdroppers and Non-Ideal System Imperfections: Analysis of Physical Layer Security and Validation Using Deep Learning," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 11, pp. 17192-17208, Nov. 2024, doi: 10.1109/TVT.2024.3427331.
77. Kumar, Arun, Nishant Gaur, and Aziz Nanthaamornphong. "A SIC and ML approach for MIMO non-orthogonal multiple access signal detection." *Results in Optics* (2025): 100792.
78. Ashok, P., R. Suganya, P. Lekha, Poornima Pandian, M. Subashini, and M. Nithya. "Developed a Machine Learning and Deep Learning Model for 5G MIMO Data Based Beam Selection and Intelligent Network Analytics." *SN Computer Science* 6, no. 3 (2025): 1-21.
79. Asemian, Ghazal, Mohammadreza Amini, and Burak Kantarci. "Active RIS-NOMA uplink in URLLC, jamming mitigation via surrogate and deep learning." *IEEE Open Journal of the Communications Society* (2025).
80. Y. Liu, W. Yi, Z. Ding, X. Liu, O. A. Dobre and N. Al-Dhahir, "Developing NOMA to Next Generation Multiple Access: Future Vision and Research Opportunities," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 6, pp. 120-127, December 2022, doi: 10.1109/MWC.007.2100553.
81. Tin, Phu Tran, Minh-Sang Van Nguyen, Dinh-Hieu Tran, Cong T. Nguyen, Symeon Chatzinotas, Zhiguo Ding, and Miroslav Voznak. "Performance Analysis of User Pairing for Active RIS-Enabled Cooperative NOMA in 6G Cognitive Radio Networks." *IEEE Internet of Things Journal* (2024).

82. H. B. Salameh, S. Abdel-Razeq and H. Al-Obiedollah, "Integration of Cognitive Radio Technology in NOMA-Based B5G Networks: State of the Art, Challenges, and Enabling Technologies," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 12949-12962, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3242645.
83. H. Yahya, E. Alsusa, A. Al-Dweik and M. Debbah, "Cognitive NOMA With Blind Transmission-Mode Identification," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 4, pp. 2042-2058, April 2023, doi: 10.1109/TCOMM.2023.3240393.
84. K. Guo, R. Liu, C. Dong, K. An, Y. Huang and S. Zhu, "Ergodic Capacity of NOMA-Based Overlay Cognitive Integrated Satellite-UAV-Terrestrial Networks," in *Chinese Journal of Electronics*, vol. 32, no. 2, pp. 273-282, March 2023, doi: 10.23919/cje.2021.00.316.
85. R. Liu, K. Guo, K. An and S. Zhu, "NOMA-Based Overlay Cognitive Integrated Satellite-Terrestrial Relay Networks With Secondary Network Selection," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 71, no. 2, pp. 2187-2192, Feb. 2022, doi: 10.1109/TVT.2021.3122029.
86. X. Fang et al., "NOMA-Based Hybrid Satellite-UAV-Terrestrial Networks for 6G Maritime Coverage," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 1, pp. 138-152, Jan. 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3191719.
87. F. Zhao, W. Xu and W. Xiang, "Integrated Satellite-Terrestrial Networks With Coordinated C-NOMA and Relay Transmission," in *IEEE Systems Journal*, vol. 16, no. 4, pp. 5270-5280, Dec. 2022, doi: 10.1109/JSYST.2022.3144457.
88. Andronie M, Lăzăroiu G, Karabolevski OL, Ștefănescu R, Hurloiu I, Dijmărescu A, Dijmărescu I. Remote Big Data Management Tools, Sensing and Computing Technologies, and Visual Perception and Environment Mapping Algorithms in the Internet of Robotic Things. *Electronics*. 2023; 12(1):22. <https://doi.org/10.3390/electronics12010022>
89. Liu, Yuanwei, Shuowen Zhang, Xidong Mu, Zhiguo Ding, Robert Schober, Naofal Al-Dhahir, Ekram Hossain, and Xuemin Shen. "Evolution of NOMA

toward next generation multiple access (NGMA) for 6G." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 40, no. 4 (2022): 1037-1071.

90. Mohsan, Syed Agha Hassnain, Yanlong Li, Alexey V. Shvetsov, José Varela-Aldás, Samih M. Mostafa, and Abdelrahman Elfikky. 2023. "A Survey of Deep Learning Based NOMA: State of the Art, Key Aspects, Open Challenges and Future Trends" *Sensors* 23, no. 6: 2946. <https://doi.org/10.3390/s23062946>

91. Raj, Rishu, and Abhishek Dixit. "An energy-efficient power allocation scheme for NOMA-based IoT sensor networks in 6G." *IEEE Sensors Journal* 22, no. 7 (2022): 7371-7384.

92. Guo, Jiani, Shanshan Song, Jun Liu, Hao Chen, Jun-Hong Cui, and Guangjie Han. "A Hybrid NOMA-Based MAC Protocol for Underwater Acoustic Networks." *IEEE/ACM Transactions on Networking* (2023).

93. Wang, Xiaoming, Jinyu Gao, Dapeng Li, Rui Jiang, and Youyun Xu. "Message Passing-Based mmWave MIMO-NOMA With User Grouping and Power Allocation." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 71, no. 11 (2022): 12356-12361.

94. Yin, Zhiyuan, Jin Chen, Guoxin Li, Haichao Wang, Wenhui He, and Yan Ni. "A deep learning-based user selection scheme for cooperative NOMA system with imperfect CSI." *Wireless Communications and Mobile Computing* 2022 (2022).

95. Liu, Yan, Yansha Deng, Maged ElKashlan, Arumugam Nallanathan, and George K. Karagiannidis. "Optimization of grant-free NOMA with multiple configured-grants for mURLLC." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* 40, no. 4 (2022): 1222-1236.

96. Malta, Silvestre, Pedro Pinto, and Manuel Fernández-Veiga. "Optimizing 5G network slicing with DRL: Balancing eMBB, URLLC, and mMTC with OMA, NOMA, and RSMA." *Journal of Network and Computer Applications* 234 (2025): 104068.

97. Islam, Md Shantanu, Raouf Abozariba, De Mi, Mohammad N. Patwary, Dazhi He, and A. Taufiq Asyhari. "Design and Evaluation of Multi-layer NOMA on NR Physical Layer for 5G and Beyond." *IEEE Transactions on Broadcasting* (2023).

98. Megha. S. Kumar, R. Ramanathan, M. Jayakumar, Key less physical layer security for wireless networks: A survey, *Engineering Science and Technology*, an International Journal, Volume 35, 2022, 101260, ISSN 2215-0986, <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101260>.
99. P. Angueira et al., "A Survey of Physical Layer Techniques for Secure Wireless Communications in Industry," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 810-838, Secondquarter 2022, doi: 10.1109/COMST.2022.3148857.
100. Yunus Dursun, Kaidi Wang, Zhiguo Ding, Secrecy sum rate maximization for a MIMO-NOMA uplink transmission in 6G networks, *Physical Communication*, Volume 53, 2022, 101675, ISSN 1874-4907, <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2022.101675>.
101. Chen, Bingcai, Rui Li, Qian Ning, Kai Lin, Chaoqi Han, and Victor CM Leung. "Security at physical layer in NOMA relaying networks with cooperative jamming." *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 71, no. 4 (2022): 3883-3888.
102. Nguyen, Hung, Tan N. Nguyen, Bui Vu Minh, Thu-Ha Thi Pham, Anh-Tu Le, and Miroslav Voznak. "Security-Reliability Analysis in CR-NOMA IoT Network Under I/Q Imbalance." *IEEE Access* 11 (2023): 119045-119056.
103. Pakravan, Saeid, Jean-Yves Chouinard, Xingwang Li, Ming Zeng, Wanming Hao, Quoc-Viet Pham, and Octavia A. Dobre. "Physical layer security for NOMA systems: Requirements, issues, and recommendations." *IEEE Internet of Things Journal* (2023).
104. Khan, M.J., Ahmad, S., Singh, I. *et al.* Secrecy outage probability and strictly positive secrecy capacity of UAV assisted cooperative NOMA system with two untrusted destinations. *Sci Rep* 15, 8246 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92321-0>
105. Nguyen, TT.T., Kha, H.H. & Nguyen, XX. Secrecy performance analysis of IRS-aided secure NOMA systems over Nakagami- m fading channels. *Wireless Netw* 31, 2975–2991 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11276-025-03927-1>
106. Nguyen A-N, Ngo T-S, Bui N-A, Le P-C, Hoang M-D. Secrecy Offloading Analysis of NOMA-based UAV-aided MEC in IoT Networks with

Imperfect CSI and SIC. EAI Endorsed Scal Inf Syst [Internet]. 2024 Jul. 23 [cited 2025 Mar. 16];12(1). Available from:

<https://publications.eai.eu/index.php/sis/article/view/4664>

107. Thanh Trung Nguyen, Tran Manh Hoang, Phuong T. Tran, Secrecy performance optimization for UAV-based relay NOMA systems with friendly jamming, *Computer Communications*, Volume 235, 2025, 108086, ISSN 0140-3664, <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2025.108086>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014036642500043X>)

108. P. P. Hema and A. V. Babu, "Power Adaptation for Optimizing Secrecy Energy Efficiency in NOMA-Enabled Underlay Cognitive Radio Networks and DNN-Based Evaluation," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 6, pp. 820-839, 2025, doi: 10.1109/OJCOMS.2025.3527510.

109. V.Narasimha Nayak, Kiran Kumar Gurralla, Turimerla Pratap, K.Nageswara Rao, Maximizing secure communication in SWIPT-NOMA with SIC and CSI errors, *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Volume 193, 2025, 155740, ISSN 1434-8411, <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2025.155740>.

110. Liu, Zhitao, Yongkang Peng, Youming Li, and Yongfeng Du. "Secrecy Sum Rate Maximization of RIS Assisted Downlink NOMA System." *Radio Science* 60, no. 2 (2025): e2024RS008011.

111. Doan TB, Nguyen T-H (2025) Enhancing covert communication in NOMA systems with joint security and covert design. *PLoS ONE* 20(1): e0317289. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0317289>

112. ДСТУ ОHSAS 18002:2015. Системи управління гігієною та безпекою праці. Основні принципи виконання вимог ОHSAS 18001:2007 (ОHSAS 18002:2008, IDT). К. : ГП «УкрНИУЦ», 2016. 21 с.

113. ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=71028.

114. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php.

115. ДБНВ.2.5-27-2006. Захисні заходи електробезпеки в електроустановках будинків і споруд. К. : Мінбуд України, 2006. 154

116. Гігієнічна класифікація праці (за показниками шкідливості і небезпеки факторів виробничого середовища від 12.08.1986 № 4137-86. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/v4137400-86>

117. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>

118. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>

119. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. URL: http://sop.zp.ua/norm_праор_0_00-7_15-18_01_ua.php.

120. ДБН В.1.1-7:2016 Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: http://www.poliplast.ua/doc/dbn_v.1.1-7

121. Наказ Міністерства внутрішніх справ України «Про затвердження Правил експлуатації та типових норм належності вогнегасників». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0225-18#Text>.

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО
МНОЖИННОГО ДОСТУПУ ДЛЯ БЕЗПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

назва бакалаврської кваліфікаційної роботи

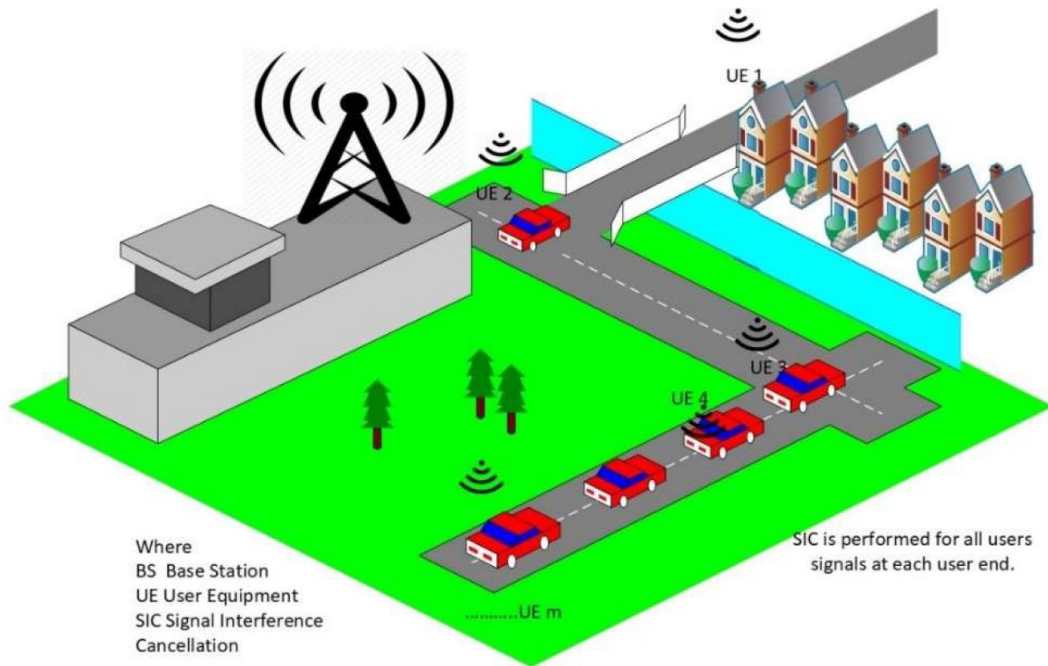


Рисунок 1 – Неортогональний метод множинного доступу в низхідному каналі

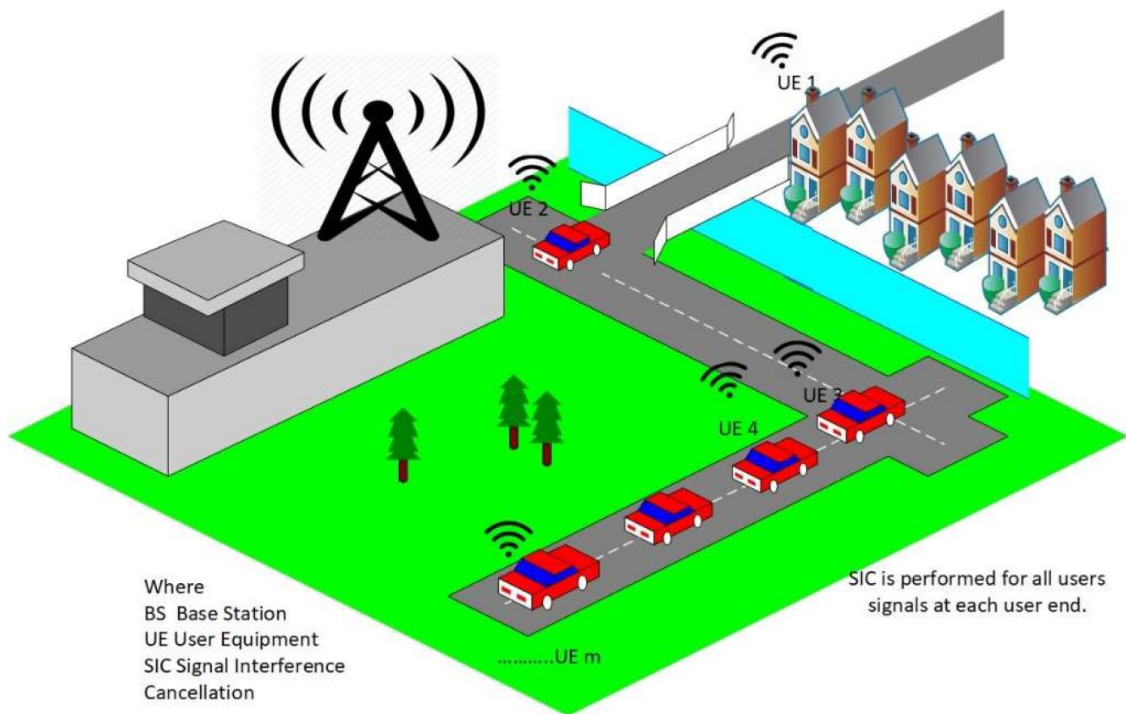


Рисунок 2 – Неортогональний метод множинного доступу у висхідному каналі

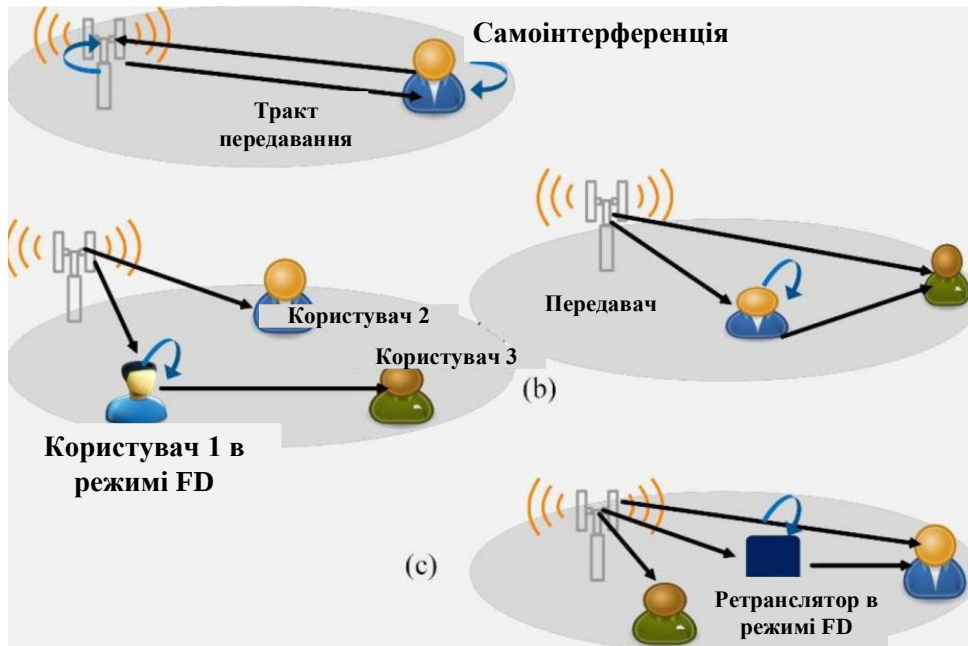


Рисунок 3 – Схема інтеграції повного дуплекса (FD) з технологією NOMA

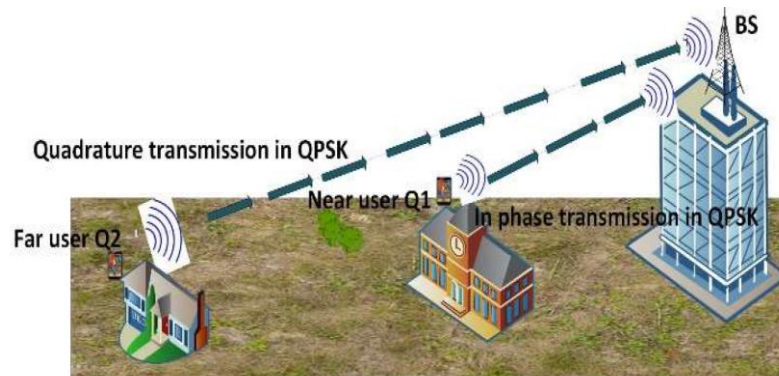


Рисунок 4 – Схема зменшення взаємних завад для QPSK

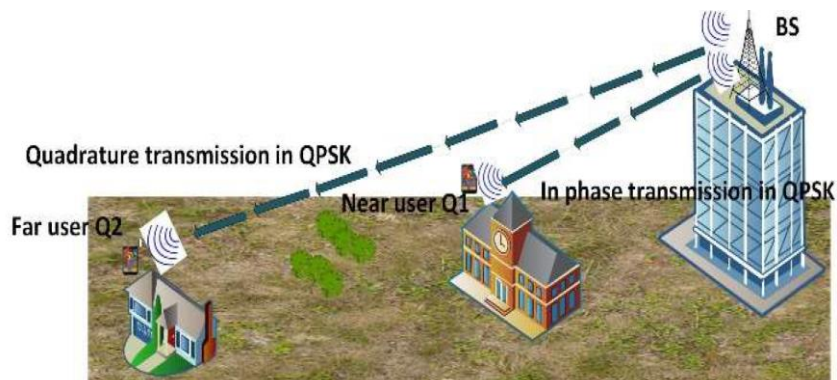


Рисунок 5 – Схема зниження міжкористувачьких завад та усунення SIC

Додаток Б

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Алгоритми підвищення ефективності неортогонального множинного доступу для безпроводних мереж

Тип роботи: бакалаврська кваліфікаційна робота
(бакалаврська кваліфікаційна робота / магістерська кваліфікаційна робота)

Підрозділ кафедра ІКСТ, факультет ІЕС, група ПЗТ-216
(кафедра, факультет, навчальна група)

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі системою StrikePlagiarism 1,37 %

✓ Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)
Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

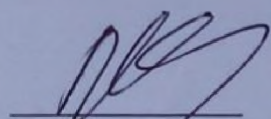
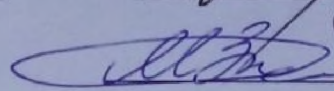
У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

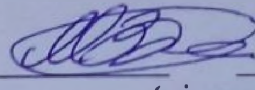
У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

Експертна комісія:

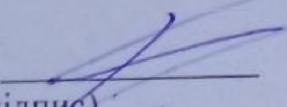
Кичак В.М., завідувач кафедри ІКСТ
(прізвище, ініціали, посада)

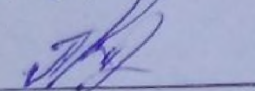
Васильківський М.В., гарант ОПП
(прізвище, ініціали, посада)


(підпис)

(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку  Васильківський М.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник  Михалевський Д.В., професор кафедри ІКСТ
(підпис) (прізвище, ініціали, посада)

Здобувач  Горобчук А.С.
(підпис) (прізвище, ініціали)