

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій**

До захисту допущено:

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Інженерія та програмування
інфокомунікацій»**

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Дослідження методів множинного доступу в мережах п'ятого
покоління (5G)»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ТЗ-22

Каленюк Анна Сергіївна

Керівник:

Старший викладач кафедри ТК НН ІТС,

Гетьман О.В.

Консультант:

Доцент кафедри ТК НН ІТС, к.т.н., доцент,

Явіся В.С.

Рецензент:

Доцент кафедри ІТТ НН ІТС, к.т.н., доцент

Правило В.В.

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студентка _____

Київ – 2026 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий інститут телекомунікаційних систем
Кафедра телекомунікацій

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інженерія та програмування інфокомунікацій»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о.завідувача кафедри

_____ Сергій КРАВЧУК

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на дипломну роботу студенту
Каленюк Анні Сергіївні

1. Тема роботи «Дослідження методів множинного доступу в мережах п'ятого покоління (5G)», керівник роботи Гетьман Олена Володимирівна, затверджені наказом по університету від «26» травня 2026 р. № 1912-с.
2. Термін подання студентом роботи 10 червня 2026 р.
3. Вихідні дані до роботи: ключові методи множинного доступу, що застосовуються або пропонуються для використання в мережах п'ятого покоління (5G), зокрема традиційні ортогональні (OMA) та перспективні неортогональні (NOMA) підходи; як вихідні дані використано технічні специфікації консорціуму 3GPP для релізів 5G (New Radio), актуальні наукові публікації та стандарти у сфері бездротового зв'язку, математичні моделі каналів передавання даних, а також результати комп'ютерного моделювання ефективності розподілу частотно-енергетичних ресурсів між користувачами.
4. Зміст роботи: Еволюція та базові принципи побудови систем множинного доступу в мобільних мережах; аналіз ортогональних (на основі OFDMA) та перспективних неортогональних (NOMA) методів доступу для 5G;

дослідження математичних моделей та алгоритмів розділення сигналів користувачів у часовій, частотній та енергетичній областях; оцінка ефективності досліджуваних методів за критичними показниками (спектральна ефективність, пропускна здатність, затримка, рівень інтерференції та максимальна кількість одночасних підключень); сформулювати висновки та рекомендації щодо доцільності впровадження конкретних методів множинного доступу для різних сценаріїв використання 5G (eMBB, URLLC, mMTC).

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):

1. Вступ.
2. Мета.
3. Актуальність та новизна роботи.
4. Об'єкт та предмет дослідження.
5. Задачі дослідження.
6. Архітектурні особливості 5G та принципи роботи технології NOMA.
7. Демонстрація результатів практичної роботи.
8. Висновки до роботи.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 2,3	Явісія В.С.	20.03.2026	25.05.2026

7. Дата видачі завдання 04.02.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Отримання завдання, узгодження календарного плану та загальної структури роботи	04.02.2026 – 23.02.2026	Виконано

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

2.	Підбір та аналіз наукової літератури, технічних специфікацій 3GPP та статей щодо технологій OMA/NOMA	26.02.2026 – 18.03.2026	Виконано
3.	Написання Вступу та Розділу 1 (Еволюція стандартів мобільного зв'язку та архітектура 5G)	20.03.2026 – 19.04.2026	Виконано
4.	Робота над Розділом 2 (Теоретичні основи NOMA, математичні моделі та алгоритм SIC)	21.04.2026 – 17.05.2026	Виконано
5.	Розробка імітаційної моделі на мові Python, проведення симуляцій та написання Розділу 3	17.05.2026 – 24.05.2026	Виконано
6.	Формування загальних висновків, оформлення списку використаних джерел	24.05.2026 – 25.05.2026	Виконано

Студент

Анна КАЛЕНЮК

Керівник

Олена ГЕТЬМАН

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 70 сторінки, 13 рисунків, 5 таблиць та 20 джерел. Основною метою роботи є дослідження та порівняльний аналіз методів розподілу радіоресурсів у мережах 5G, зокрема оцінка ефективності технології неортогонального множинного доступу (NOMA) порівняно з традиційним ортогональним доступом (OMA) для максимізації пропускну здатності та спектральної ефективності. Для виконання основної мети було досліджено теоретичні засади обох технологій, розроблено алгоритми розподілу потужності та математичного декодування сигналів, виконано програмну реалізацію імітаційної моделі мовою Python, а також проведено моделювання й оцінку ефективності системи за різних умов радіоефіру.

У роботі детально розглядаються еволюція та архітектура мереж 5G, принципи функціонування технології PD-NOMA (накладання сигналів у потужнісній області, алгоритм SIC), їхні переваги та фундаментальні вразливості, детально описані математичні моделі та програмні засоби, що використовувалися для імітації, а також результати впливу недосконалої оцінки каналу (Imperfect CSI) та зміни коефіцієнтів потужності на продуктивність мережі. Представлені результати можуть бути використані при проектуванні телекомунікаційних мереж нового покоління, оптимізації алгоритмів управління радіоресурсами (RRM) базових станцій 5G, а також як навчально-демонстраційний матеріал у профільних технічних закладах освіти.

Ключові слова: 5G, OMA, NOMA, PD-NOMA, SIC, спектральна ефективність, пропускну здатність, імітаційне моделювання, Python, розподіл потужності.

ABSTRACT

Text part of the thesis: 70 pages, 13 figures, 5 tables, and 20 sources. The main goal of the thesis is to research and comparatively analyze radio resource allocation methods in 5G networks, specifically evaluating the efficiency of Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technology compared to traditional Orthogonal Multiple Access (OMA) to maximize throughput and spectral efficiency. To achieve the main goal, the theoretical foundations of both technologies were investigated, power allocation and mathematical signal decoding algorithms were developed, a software implementation of the simulation model was performed using Python, and the system's efficiency was simulated and evaluated under various radio conditions.

The thesis details the evolution and architecture of 5G networks, the operational principles of PD-NOMA technology (power-domain signal superposition, SIC algorithm), their advantages and fundamental vulnerabilities; it provides a detailed description of the mathematical models and software tools used for simulation, as well as the results of the impact of imperfect channel state information (Imperfect CSI) and power allocation changes on network performance. The presented results can be used in the design of next-generation telecommunication networks, optimization of Radio Resource Management (RRM) algorithms for 5G base stations, as well as educational and demonstration material in specialized technical educational institutions.

Keywords: 5G, OMA, NOMA, PD-NOMA, SIC, spectral efficiency, throughput, simulation modeling, Python, power allocatio

ЗМІСТ

ВСТУП	12
РОЗДІЛ 1	14
ЕВОЛЮЦІЯ ТА АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕРЕЖ 5G	14
1.1. Еволюція стандартів мобільного зв'язку та передумови створення архітектури 5G.....	14
1.2. Технічні вимоги та ключові сценарії використання мережі (eMBB, URLLC, mMTC).....	17
1.3. Особливості радіоінтерфейсу 5G New Radio (NR) та базові мережеві топології	20
1.4. Частотний спектр та концепція фізичного розподілу радіоресурсів	24
1.5. Традиційні ортогональні методи множинного доступу (OMA): принципи функціонування	27
1.6. Обмеження спектральної ефективності OMA та виклики масового підключення пристроїв (IoT).....	29
Висновки	32
РОЗДІЛ 2	33
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ (NOMA).....	33
2.1. Концептуальні засади NOMA: розподіл ресурсів у потужнісній (Power-Domain) та кодовій областях	33
2.2. Математичні моделі передавання сигналів для висхідного (Uplink) та низхідного (Downlink) каналів зв'язку.....	36
2.3. Алгоритми послідовного придушення інтерференції (SIC) на приймальній стороні: принципи та апаратна складність	39
2.4. Проблеми кластеризації користувачів, оптимізації розподілу потужності та вплив недосконалої оцінки каналу (CSI)	41
2.5. Вплив мобільності користувачів на ефективність послідовного придушення інтерференції	43
Висновки	45
РОЗДІЛ 3	47

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ	47
3.1. Обґрунтування вибору мови Python та бібліотек для імітаційного моделювання, опис архітектури скрипта.....	47
3.2. Програмна реалізація базової моделі та порівняльний аналіз пропускної здатності.....	49
3.3. Дослідження впливу недосконалої оцінки каналу (Imperfect CSI) на продуктивність системи NOMA.....	52
3.4. Оптимізація розподілу потужності: компроміс між сумарною ємністю системи та справедливістю обслуговування	55
Висновок	58
Загальні висновки по роботі.....	60
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	62
Додаток А.....	64
Додаток Б	66
Додаток В	69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

1G	First Generation (мережа мобільного зв'язку першого покоління)
2G	Second Generation (мережа мобільного зв'язку другого покоління)
3G	Third Generation (мережа мобільного зв'язку третього покоління)
3GPP	3rd Generation Partnership Project (консорціум з розробки специфікацій мобільного зв'язку)
4G	Fourth Generation (мережа мобільного зв'язку четвертого покоління)
5G	Fifth Generation (мережа мобільного зв'язку п'ятого покоління)
AWGN	Additive White Gaussian Noise (адитивний білий гаусівський шум)
CDMA	Code Division Multiple Access (множинний доступ з кодовим розділенням)
CD-NOMA	Code-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (неортогональний множинний доступ у кодовій області)
CSI	Channel State Information (інформація про стан каналу)
eMBB	Enhanced Mobile Broadband (вдосконалений мобільний широкосмуговий зв'язок)
eNB	Evolved Node B (базова станція стандарту 4G LTE)
EPC	Evolved Packet Core (ядро мережі стандарту 4G)
FDMA	Frequency Division Multiple Access (множинний доступ з частотним розділенням)
FR1 / FR2	Frequency Range 1 / 2 (частотні діапазони 1 та 2 стандарту 5G)
FTPA	Fractional Transmit Power Allocation (дробовий розподіл потужності передавання)
gNB	next Generation Node B (базова станція стандарту 5G NR)
IMT-	International Mobile Telecommunications-2020 (міжнародні вимоги

2020	до мереж 5G від ITU)
IoT	Internet of Things (Інтернет речей)
ITU	International Telecommunication Union (Міжнародний союз електрозв'язку)
LTE	Long Term Evolution (стандарт мобільного зв'язку 4G);
MIMO	Multiple Input Multiple Output (багатоантенна система з множинним входом та виходом)
mMTC	Massive Machine Type Communications (масовий міжмашинний зв'язок)
MPA	Message Passing Algorithm (алгоритм передавання повідомлень)
MUI	Multi-User Interference (міжабонентська інтерференція)
NOMA	Non-Orthogonal Multiple Access (неортогональний множинний доступ)
NR	New Radio (радіоінтерфейс стандарту 5G)
NSA	Non-Standalone (неавтономна архітектура мережі)
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів)
OFDMA	Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (ортогональний множинний доступ з частотним розділенням)
OMA	Orthogonal Multiple Access (ортогональний множинний доступ)
PDMA	Pattern Division Multiple Access (множинний доступ з поділом за шаблоном)
PD-NOMA	Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (неортогональний множинний доступ у потужнісній області)
PRB	Physical Resource Block (фізичний ресурсний блок);
RE	Resource Element (ресурсний елемент);
SA	Standalone (автономна архітектура мережі)
SC	Superposition Coding (суперпозиційне кодування)

SC-FDMA	Single-Carrier FDMA (множинний доступ з частотним розділенням на одній несучій)
SCMA	Sparse Code Multiple Access (множинний доступ із розрідженим кодом)
SCS	Subcarrier Spacing (рознесення піднесучих частот)
SIC	Successive Interference Cancellation (послідовне придушення інтерференції)
SINR	Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (відношення сигнал/інтерференція плюс шум)
SNR	Signal-to-Noise Ratio (відношення сигнал/шум)
SUD	Single-User Detection (однокористувацьке виявлення/декодування)
TDMA	Time Division Multiple Access (множинний доступ з часовим розділенням)
UE	User Equipment (обладнання користувача, мобільний термінал)
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communications (ультранадійний зв'язок з низькою затримкою)

ВСТУП

Стрімке зростання кількості мобільних пристроїв, інтелектуальних датчиків та автономних систем у сучасному цифровому просторі створює безпрецедентне навантаження на телекомунікаційну інфраструктуру. Мобільні мережі п'ятого покоління розроблялися як універсальна платформа, здатна одночасно задовольняти кардинально різні потреби: від надшвидкісного мобільного інтернету до масового Інтернету речей та ультранадійних комунікацій з мінімальними затримками для критично важливих сервісів. Проте, впровадження цих сценаріїв на практиці стикається з фундаментальним обмеженням - дефіцитом доступного радіочастотного спектра.

У традиційних бездротових мережах, включаючи ранні етапи розгортання 5G, розподіл ресурсів між користувачами базується на ортогональних методах множинного доступу (OMA), переважно на базі технології OFDMA. Цей підхід передбачає виділення кожному окремому пристрою ізольованого частотного або часового ресурсу. Така модель ефективно запобігає виникненню міжабонентської інтерференції, проте вона має суттєвий недолік - обмежену спектральну ефективність. Коли до однієї базової станції намагаються одночасно підключитися тисячі пристроїв, ортогональні ресурси швидко вичерпуються, що призводить до відмов в обслуговуванні, зростання затримок та зниження загальної пропускну здатності мережі.

З огляду на це, критично важливим напрямом розвитку сучасних телекомунікацій є дослідження та впровадження нових, ефективніших методів керування радіодоступом. Найбільш перспективною альтернативою виступає концепція неортогонального множинного доступу (NOMA). Основна ідея NOMA полягає в тому, що кілька користувачів можуть одночасно використовувати один і той самий частотно-часовий ресурс.

Розділення їхніх сигналів відбувається в інших областях, наприклад, в енергетичній (за рахунок різного рівня потужності передавачів) або кодовій. На приймальній стороні для відновлення даних застосовуються складні алгоритми цифрової обробки, зокрема послідовне придушення інтерференції (SIC). Застосування неортогональних методів дозволяє значно ущільнити канали зв'язку, підвищити спектральну ефективність та забезпечити стабільну роботу мережі в умовах високої щільності абонентів. Водночас перехід до неортогональних моделей створює нові технічні виклики, пов'язані з ростом складності обробки сигналів, оптимізацією розподілу потужності та чутливістю системи до похибок оцінювання каналу.

Таким чином, комплексне дослідження методів множинного доступу, аналіз їхніх переваг і обмежень, а також оцінка ефективності їхнього функціонування у різних сценаріях трафіку 5G є необхідним кроком для оптимізації архітектури сучасних мобільних мереж та забезпечення їхньої масштабованості у майбутньому.

Об'єкт дослідження: процеси розподілу та керування радіоресурсами (частотно-часовими та енергетичними) в мережах п'ятого покоління при різних сценаріях трафіку.

Предмет дослідження: порівняльний аналіз методів ортогонального та неортогонального множинного доступу в мережах 5G та оцінка їхньої ефективності за різних умов стану радіоканалу.

РОЗДІЛ 1

ЕВОЛЮЦІЯ ТА АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ МЕРЕЖ 5G

1.1. Еволюція стандартів мобільного зв'язку та передумови створення архітектури 5G

Розвиток систем мобільного зв'язку є безперервним еволюційним процесом, у якому кожне нове покоління розроблялося для задоволення стрімко зростаючих потреб суспільства, бізнесу та промисловості. Якщо перше (1G) та друге (2G) покоління були орієнтовані переважно на передавання голосового трафіку та простих текстових повідомлень, то поява 3G стала фундаментальним перехідним етапом до мобільного інтернету. Справжній технологічний прорив відбувся з масовим впровадженням стандарту 4G (зокрема, релізів LTE та LTE-Advanced), який забезпечив повноцінний широкосмуговий доступ, високу швидкість передавання даних та стабільну підтримку мультимедійних сервісів на базі повністю IP-орієнтованої архітектури [2].

Для кращого розуміння технологічного стрибка, основні характеристики різних поколінь мобільного зв'язку наведено у Таблиці 1.1.

Незважаючи на значні можливості 4G, зміна характеру сучасного трафіку та стрімке зростання кількості підключених розумних пристроїв виявили фундаментальні обмеження існуючої інфраструктури. Передумовами для розробки та стандартизації архітектури 5G стали не лише базові вимоги до збільшення пікової швидкості завантаження даних, але й гостра необхідність підтримки принципово нових класів сервісів, реалізація яких в рамках мереж LTE була технічно неможливою.

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика поколінь мобільного зв'язку

Покоління	Основна послуга	Базовий метод множинного доступу	Максимальна пропускна здатність
1G	Аналоговий голосовий зв'язок	FDMA	До 2.4 Кбіт/с
2G	Цифровий голос, SMS	TDMA, CDMA	До 64 Кбіт/с
3G	Базовий мобільний інтернет	WCDMA, HSPA	До 2 Мбіт/с (ранні версії)
4G	Мобільний широкополосний доступ	OFDMA, SC-FDMA	До 1 Гбіт/с
5G	eMBB, URLLC, mMTC	OFDMA, NOMA (перспективний)	До 20 Гбіт/с

До таких перспективних напрямів належать управління автономними транспортними засобами, промислова робототехніка, телемедицина в реальному часі та розгортання екосистем розумних міст. Усі ці концепції вимагають ультранизких затримок передавання пакетів (на рівні 1 мс), надзвичайно високої надійності з'єднання та можливості одночасного обслуговування до мільйона пристроїв на один квадратний кілометр [2]. Еволюцію мобільних технологій та логіку переходу до концепції 5G наведено на рис. 1.1.

Відповідно до специфікацій консорціуму 3GPP (3rd Generation Partnership Project), архітектура 5G New Radio (NR) розроблялася з урахуванням необхідності максимально гнучкого використання радіочастотного спектра. Попередні покоління працювали у відносно вузьких

діапазонах частот (переважно до 3 ГГц), що суттєво обмежувало загальну мережеву ємність. Для потреб 5G було виділено нові, значно ширші частотні діапазони, включаючи міліметрові хвилі (mmWave). Проте перехід у високочастотний спектр супроводжується фізичними проблемами, зокрема високим рівнем згасання радіосигналу та чутливістю до завад [1].

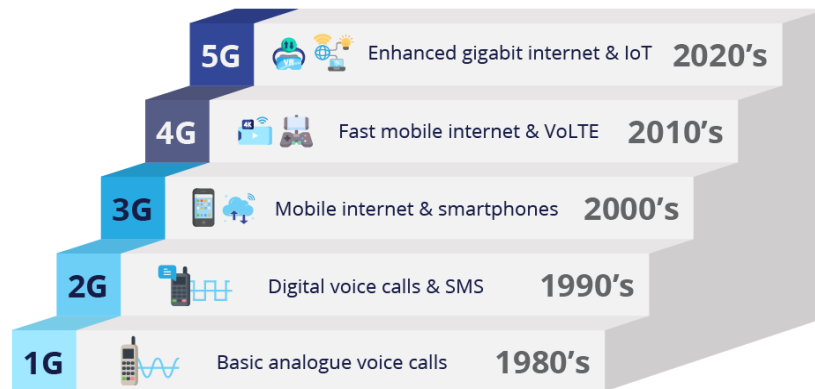


Рис. 1.1 Еволюція мобільних технологій та перехід до концепції 5G

Ще однією критичною передумовою для переосмислення архітектури радіодоступу стала криза методів розподілу ресурсів. У мережах четвертого покоління ключовою технологією на фізичному рівні є ортогональне частотне розділення каналів з множинним доступом (OFDMA). Цей підхід довів свою високу ефективність у боротьбі з міжабонентською інтерференцією, однак він має жорстке математичне обмеження: кількість одночасно підключених і активних пристроїв не може перевищувати кількість виділених ортогональних піднесучих частот або часових слотів [4].

В умовах масового розгортання мереж Інтернету речей (IoT), де датчики постійно генерують короткі спорадичні пакети даних, ортогональний ліміт привидів би до катастрофічного дефіциту радіоресурсів та відмов в обслуговуванні. Саме ця нездатність технології ОМА масштабуватися під кількість підключень, а не лише під швидкість, стимулювала наукову спільноту до активного дослідження неортогональних

рішень (NOMA) ще на етапі раннього концептуального проектування мереж п'ятого покоління [11].

1.2. Технічні вимоги та ключові сценарії використання мережі (eMBB, URLLC, mMTC)

Фундаментальна відмінність мереж п'ятого покоління від усіх попередніх стандартів полягає у відході від концепції єдиного монолітного каналу зв'язку. Міжнародним союзом електрозв'язку (ITU) у рамках бачення IMT-2020 було сформульовано вимогу щодо створення гнучкої архітектури, здатної адаптуватися під кардинально різні типи трафіку. Для реалізації цієї вимоги консорціум 3GPP стандартизував три головні сценарії використання 5G: eMBB, URLLC та mMTC. Кожен із них висуває власні, часто взаємовиключні технічні вимоги до радіоінтерфейсу [1]. Базові сценарії використання мереж 5G показано на рис. 1.2.

Перший і найбільш масовий сценарій — eMBB (Enhanced Mobile Broadband), або вдосконалений мобільний широкосмуговий зв'язок. Він є логічним продовженням розвитку мереж 4G і спрямований на забезпечення максимальної пропускної здатності для кінцевих користувачів. Сценарій eMBB критично важливий для підтримки ресурсоємних мультимедійних додатків, таких як потокове відео у форматі 4K/8K, системи віртуальної та доповненої реальності (VR/AR), а також для забезпечення стабільного зв'язку в місцях масового скупчення людей (наприклад, на стадіонах). Головною технічною вимогою eMBB є досягнення пікових швидкостей передавання даних на рівні 10–20 Гбіт/с та забезпечення високої спектральної ефективності [4].

Другий сценарій - URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communications), тобто ультранадійний зв'язок із низькими затримками. Цей клас послуг розроблено спеціально для критично важливих застосувань, де навіть найменша затримка або втрата пакета даних може призвести до катастрофічних наслідків. До типових сервісів URLLC належать безпілотні

транспортні засоби, промислова автоматизація (Індустрія 4.0), телехірургія та системи управління інтелектуальними енергомережами (Smart Grid) [17]. Вимоги до цього сценарію є надзвичайно суворими: наскрізна затримка (end-to-end latency) не повинна перевищувати 1 мілісекунди, а надійність доставки пакетів має становити 99,999% [20].

Третій напрям - mMTC (Massive Machine Type Communications), або масовий міжмашинний зв'язок. Цей сценарій орієнтований на обслуговування гігантської кількості пристроїв Інтернету речей (IoT), таких як різноманітні сенсори, лічильники, датчики паркування та екологічного моніторингу в рамках інфраструктури розумних міст. На відміну від eMBB, пристрої mMTC генерують невеликі обсяги даних, що передаються нерегулярно. Головні виклики тут - це необхідність підтримки щільності підключень до 1 мільйона пристроїв на квадратний кілометр, а також забезпечення наднизького енергоспоживання, що дозволяє сенсорам працювати від однієї батареї до 10 років [9].

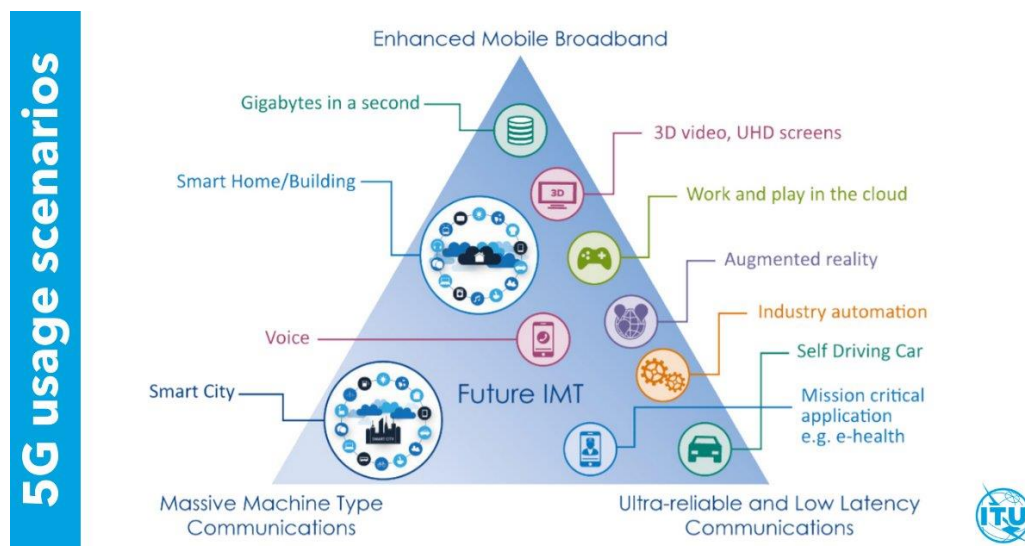


Рис. 1.2 Трикутник базових сценаріїв використання мереж 5G (IMT-2020)

Одночасна підтримка цих трьох сценаріїв у межах єдиної фізичної інфраструктури здійснюється за допомогою технології мережевого нарізання

(Network Slicing), яка логічно розділяє ресурси базової станції [1]. Однак на фізичному рівні забезпечення вимог URLLC та mMTC створює значне навантаження на радіоресурс. Класичні ортогональні методи доступу (OMA) виявляються вкрай неефективними під час спроб виділити окремий частотний ресурс для сотень тисяч IoT-датчиків (mMTC) або миттєво надати канал для пріоритетного трафіку безпілотного авто (URLLC) [19]. Саме ця проблема зумовлює доцільність впровадження неортогональних методів доступу (NOMA), які дозволяють мультиплексувати пристрої mMTC та URLLC в одному ресурсному блоці, забезпечуючи масовість підключень без втрати критичної надійності [2].

Таблиця 1.2.

Порівняння ключових параметрів сценаріїв 5G

Параметр / Сценарій	eMBB	URLLC	mMTC
Основний фокус	Максимальна швидкість	Мінімальна затримка	Масовість підключень
Пікова швидкість	10 - 20 Гбіт/с	Від 1 до 10 Мбіт/с	До 100 Кбіт/с
Затримка (Latency)	~ 4 - 10 мс	< 1 мс	Не є критичною
Надійність	Висока (99%)	Ультрависока (99.999%)	Базова
Щільність підключень	~ 10 тис. пристр./км ²	Не регламентується	До 1 млн пристр./км ²

Продовження таблиці 1.2

Енергоефективність	Середня	Низька	Надвисока (до 10 років)
--------------------	---------	--------	-------------------------

1.3. Особливості радіоінтерфейсу 5G New Radio (NR) та базові мережеві топології

Для забезпечення безпрецедентної гнучкості, необхідної для одночасної підтримки сценаріїв eMBB, URLLC та mMTC, консорціум 3GPP розробив принципово новий радіоінтерфейс, який отримав назву 5G New Radio (NR). На відміну від стандарту LTE, який спирався на жорстко фіксовану структуру кадру з рознесенням піднесучих (Subcarrier Spacing, SCS) у 15 кГц, ключовою інновацією радіоінтерфейсу NR стала концепція масштабованої нумерології. Відповідно до специфікацій 3GPP [1], рознесення піднесучих у 5G може динамічно змінюватися за формулою $15 * 2^{\mu}$ кГц, де параметр μ набуває цілих значень від 0 до 4.

Такий підхід дозволяє масштабувати тривалість тайм-слота (часового інтервалу). Зі збільшенням рознесення піднесучих тривалість слота пропорційно зменшується. Наприклад, при $\mu = 0$ (15 кГц) тривалість слота становить 1 мс, що підходить для базового мобільного інтернету або IoT-пристроїв. Натомість при $\mu = 3$ (120 кГц) слот скорочується до 0,125 мс, що є критично важливим для забезпечення наднизьких затримок у сценаріях URLLC [2].

Таблиця 1.3 показує, що зміна рознесення піднесучих безпосередньо впливає на тривалість слота та дозволяє адаптувати радіоінтерфейс 5G до різних сервісних сценаріїв.

Перехід у діапазон міліметрових хвиль (mmWave, вище 24 ГГц) для досягнення швидкостей понад 10 Гбіт/с супроводжується значним загасанням сигналу в просторі та високою чутливістю до завад. Для

подолання цього фізичного бар'єру радіоінтерфейс NR тісно інтегрований з технологією Massive MIMO (масивні антени з множинним входом та виходом) та тривимірним формуванням променів (3D Beamforming). Замість широкого мовлення на весь сектор (як у 4G), базова станція 5G (gNB) формує вузьконаправлені промені енергії безпосередньо до кожного активного абонента. Це не лише покращує енергетичний бюджет каналу, але й суттєво знижує рівень інтерференції між сусідніми пристроями [2].

Таблиця 1.3.

Параметри масштабованої нумерології 5G NR (на основі специфікацій 3GPP)

Параметр μ	Рознесення піднесучих (SCS)	Тривалість слота	Типовий діапазон частот	Основне застосування
0	15 кГц	1 мс	Sub-3 GHz	Базове покриття, mMTC
1	30 кГц	0.5 мс	Sub-6 GHz	eMBB, баланс ємності та покриття
2	60 кГц	0.25 мс	Sub-6 GHz / mmWave	eMBB, URLLC у міських умовах
3	120 кГц	0.125 мс	mmWave	URLLC, надшвидкий eMBB (Hotspot)
4	240 кГц	0.0625 мс	mmWave	Синхронізація, специфічні задачі

З точки зору мережевої топології та етапів розгортання, архітектура 5G поділяється на два фундаментальні типи: неавтономну (Non-Standalone, NSA) та автономну (Standalone, SA).

На початковому етапі впровадження стандарту більшість світових операторів використовують архітектуру NSA (зокрема, так звану опцію 3x). У цій топології новітні базові станції 5G (gNB) підключаються до існуючого ядра мережі 4G (Evolved Packet Core, EPC). При цьому обмін контрольними

сигналами (Control Plane) здійснюється через перевірені базові станції LTE (eNB), тоді як радіоінтерфейс 5G використовується виключно для високошвидкісного передавання даних користувача (User Plane). Цей підхід забезпечує швидкий вихід на ринок (Time-to-Market) та дозволяє реалізувати багатоканальне підключення (Multi-Connectivity), коли абонент одночасно приймає дані від 4G та 5G станцій [12].

Однак архітектура NSA не здатна повноцінно підтримувати інноваційні сценарії URLLC та mMTC, оскільки її можливості обмежені старим ядром мережі. Цільовою моделлю є автономна архітектура (Standalone, SA), яка передбачає повну відмову від інфраструктури 4G. У режимі SA базові станції gNB підключаються до абсолютно нового хмарно-орієнтованого ядра 5G Core (5GC) [1]. Саме топологія SA відкриває доступ до технології Network Slicing (мережевого нарізання) та створює повноцінне середовище для впровадження як передових ортогональних, так і перспективних неортогональних методів доступу до середовища [4].

Порівняння архітектур розгортання мережі 5G наведено на рис. 1.3. Рис. 1.3 демонструє відмінності між NSA та SA-архітектурами: NSA спирається на інфраструктуру 4G, тоді як SA відкриває повний функціонал ядра 5G та мережевого нарізання.

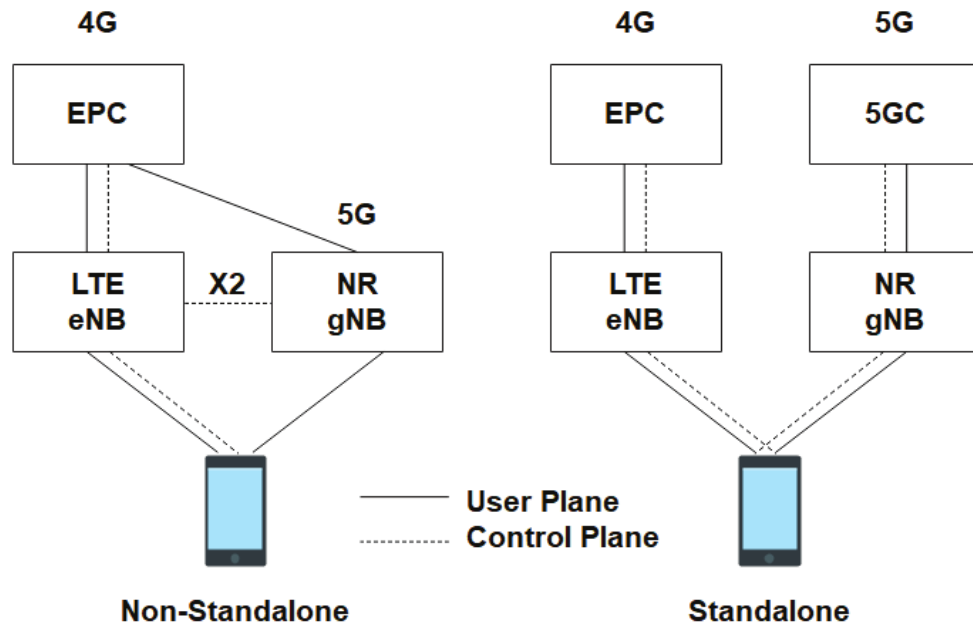


Рис. 1.3 Порівняння архітектур розгортання мережі 5G (NSA та SA)

1.4. Частотний спектр та концепція фізичного розподілу радіоресурсів

Фундаментальною основою для досягнення цільових показників продуктивності мереж 5G є максимально ефективне використання доступного радіочастотного спектра. Однією з ключових інновацій стандарту стала концепція універсальності та підтримки надзвичайно широкого частотного діапазону. Згідно зі специфікаціями 3GPP [1], частотний спектр для мереж 5G NR поділяється на два основні частотні діапазони: FR1 (Frequency Range 1) та FR2 (Frequency Range 2), кожен з яких має свої фізичні особливості та сфери застосування.

До діапазону FR1 відносяться частоти, що знаходяться нижче 6 ГГц (часто їх називають Sub-6 GHz). Цей діапазон охоплює спектр від 410 МГц до 7125 МГц [1]. Частоти Sub-6 GHz є критично важливими на початкових етапах розгортання мереж, оскільки вони забезпечують оптимальний баланс між радіусом покриття, проникаючою здатністю та загальною ємністю мережі. Більшість існуючих комерційних мереж 5G NSA працюють саме в діапазоні FR1, використовуючи ширину каналу до 100 МГц для забезпечення сценарію eMBB у міських умовах [2]. (FR1 та FR2)

Другий діапазон, FR2, охоплює надвисокі частоти в межах від 24,25 ГГц до 52,6 ГГц. Цей спектр зазвичай називають міліметровими хвилями (mmWave, виходячи з довжини хвилі близько кількох міліметрів) [1]. mmWave забезпечують безпрецедентну ширину каналу (до 400 МГц на одну несучу), що дозволяє досягати швидкостей понад 20 Гбіт/с, необхідних для сценарію Hotspot eMBB або специфічних URLLC-додатків. Однак радіосигнали мм-діапазону мають дуже низьку проникаючу здатність, надзвичайно швидко загасають і блокуються навіть незначними фізичними завадами, що вимагає розгортання щільної мережі малих сот (Small Cells) [2, 11].

На фізичному рівні розподіл радіоресурсів здійснюється на основі технології мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM) [1]. Щоб зрозуміти, як саме gNB керує доступом користувачів до середовища, необхідно розглянути структуру часово-частотної решітки ресурсів (Resource Grid). Решітка складається з певної кількості OFDM-символів у часовій області та піднесучих частот (Subcarriers) у частотній області [1].

З таблиці 1.4 видно, що FR1 забезпечує краще покриття, тоді як FR2 забезпечує надвисокі швидкості, але вимагає щільнішого розгортання базових станцій.

Найменшою неподільною одиницею радіоресурсу в 5G NR є Ресурсний елемент (Resource Element, RE). Один RE займає рівно одну піднесучу частоту протягом одного OFDM-символу. На приймальній стороні для відновлення даних з RE використовуються складні алгоритми цифрової обробки сигналів. Для зручності планування та розподілу ресурсів gNB оперує більшими блоками, які називаються Фізичними ресурсними блоками (Physical Resource Block, PRB). Згідно зі специфікаціями 3GPP [1], один PRB у частотній області завжди складається з 12 суміжних піднесучих частот.

Кількість PRB у слоті залежить від нумерології μ та загальної ширини частотного каналу [4].

Таблиця 1.4.

Порівняльна характеристика частотних діапазонів 5G NR (FR1 та FR2)

Характеристика / Діапазон	FR1 (Sub-6 GHz)	FR2 (mmWave / Millimeter Wave)
Частотний спектр	410 МГц - 7125 МГц	24250 МГц - 52600 МГц
Ширина каналу (макс.)	До 100 МГц	До 400 МГц
Максимальна швидкість	Висока (до 2-5 Гбіт/с)	Ультрависока (понад 10-20 Гбіт/с)
Проникаюча здатність	Середня	Дуже низька
Радіус покриття	Від 500 м до кількох км	Від 50 м до 200 м
Чутливість до завад	Базова	Дуже висока (блокується стінами, деревами)
Типова нумерологія μ	0 (15 кГц), 1 (30 кГц)	2 (60 кГц), 3 (120 кГц)

Структуру часово-частотної решітки 5G NR показано на рис. 1.4.

Рис. 1.4 ілюструє, що базовою одиницею планування ресурсу є PRB, а гнучкість розподілу ресурсів у 5G досягається за рахунок часово-частотної решітки.

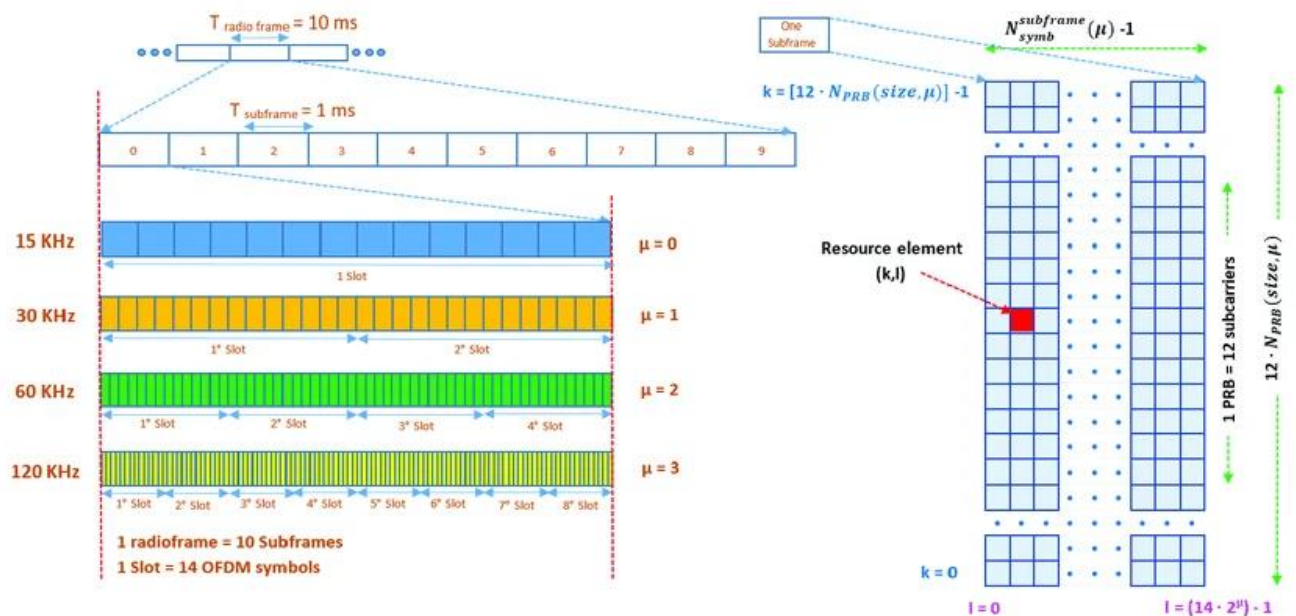


Рис. 1.4. Концептуальна часово-частотна решітка фізичних ресурсів 5G NR

Концепція фізичного розподілу ресурсів у 5G NR є надзвичайно гнучкою, оскільки gNB може динамічно виділяти PRB окремим користувачам залежно від поточної якості каналу та вимог трафіку. Однак у класичному ортогональному доступі (OMA) діє жорстке правило: один RE не може бути одночасно використаний для передавання даних більше ніж одного пристрою, щоб уникнути виникнення руйнівної міжабонентської інтерференції. Саме це обмеження намагаються подолати неортогональні методи (NOMA), пропонуючи мультиплексувати кількох абонентів в одному RE за рахунок розділення сигналів в енергетичній області [3].

1.5. Традиційні ортогональні методи множинного доступу (OMA): принципи функціонування

Історично склалося так, що розвиток систем мобільного зв'язку завжди спирався на парадигму ортогонального множинного доступу (Orthogonal Multiple Access, OMA). Основна філософія цього підходу полягає у виділенні кожному активному користувачеві повністю ізольованого каналного ресурсу. Головною метою такої ізоляції є запобігання виникненню

міжабонентської інтерференції (Multi-User Interference, MUI) на приймальній стороні, що значно спрощує архітектуру приймачів [11].

В еволюції телекомунікацій використовувалися різні виміри для забезпечення ортогональності. У мережах 1G застосовувалося частотне розділення (FDMA), де кожен користувач отримував окрему смугу частот. У 2G додався часовий поділ (TDMA), що дозволило "нарізати" частоту на часові слоти. Починаючи з 4G LTE і продовжуючи в поточних релізах 5G NR, домінуючою технологією множинного доступу стало мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (Orthogonal Frequency-Division Multiple Access, OFDMA) для низхідного каналу (Downlink) та його варіація з однією несучою (SC-FDMA) для висхідного каналу (Uplink) [4].

Принцип роботи OFDMA базується на розподілі широкої смуги пропускання на велику кількість вузькосмугових піднесучих частот. Ключовою математичною властивістю цих піднесучих є їхня взаємна ортогональність. Це означає, що пік кожної піднесучої спектрально збігається з нульовими значеннями сусідніх піднесучих. Завдяки цьому спектри сигналів можуть частково перекриватися без створення взаємних завад, що забезпечує значно вищу спектральну ефективність порівняно з класичним FDMA [12].

У системі OFDMA базова станція (gNB) динамічно розподіляє групи піднесучих - тобто фізичні ресурсні блоки (PRB), які ми розглядали в попередньому підрозділі, - між різними користувачами залежно від їхніх потреб у трафіку та стану радіоканалу. Математично сигнал $x(t)$, що передається базовою станцією для K користувачів у системі ОМА, можна записати як суперпозицію сигналів, рознесених по непересічних наборах піднесучих. Якщо позначити набір піднесучих, виділених k -му користувачу, як S_k , то сигнал формується наступним чином:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n \in S_k} d_{k,n} e^{j2\pi f_n t}$$

де $d_{k,n}$ - символ даних для k -го користувача на n -й піднесучій, а f_n - частота n -ї піднесучої [13]. Головною умовою ортогональності є те, що множини виділених піднесучих не перетинаються:

$$S_i \cap S_j = \emptyset \text{ для будь-яких } i \neq j$$

На приймальній стороні кожен пристрій (User Equipment, UE) виконує операцію Швидкого перетворення Фур'є (FFT) для переходу з часової області в частотну і "витягує" дані лише зі своїх піднесучих. Оскільки ресурси строго розділені, приймачу не потрібно враховувати сигнали, призначені для інших користувачів у тій самій соті. Це робить процес демодуляції та декодування (відомий як Single-User Detection, SUD) відносно простим і малоресурсоємним, що є однією з головних переваг технології ОМА [4].

Однак, незважаючи на математичну елегантність і простоту реалізації приймачів, парадигма ОМА має фундаментальне обмеження: максимальна кількість одночасно обслуговуваних користувачів жорстко обмежена загальною кількістю доступних ортогональних ресурсів (наприклад, кількістю ресурсних блоків). Якщо кількість активних пристроїв перевищує кількість доступних ресурсів, базова станція змушена ставити запити в чергу або відмовляти в обслуговуванні [11].

1.6. Обмеження спектральної ефективності ОМА та виклики масового підключення пристроїв (IoT)

Незважаючи на те, що ортогональні методи доступу (зокрема OFDMA) забезпечують відсутність міжабонентської інтерференції та спрощують архітектуру приймачів, їхня базова парадигма стає головним вузьким місцем у контексті розвитку мереж 5G. Основний недолік ОМА полягає в жорсткій

математичній прив'язці максимальної кількості одночасних підключень до кількості доступних ортогональних ресурсів. Якщо позначити кількість активних користувачів у соті як K , а кількість виділених ортогональних ресурсних блоків як N , то система ОМА здатна функціонувати лише за умови $K \leq N$ [11].

Рис. 1.5 наочно показує, що ОМА розділяє ресурс між користувачами ортогонально, тоді як NOMA допускає мультиплексування кількох користувачів в одному ресурсному блоці.

У сценаріях попередніх поколінь зв'язку, де головною метою було забезпечення стабільного з'єднання для відносно невеликої кількості смартфонів, це обмеження не було критичним. Однак цільові показники 5G, зокрема сценарій масового міжмашинного зв'язку (mMTC), передбачають обслуговування до 1 мільйона автономних пристроїв та датчиків на один квадратний кілометр [9]. Трафік Інтернету речей (IoT) характеризується спорадичністю: датчики передають короткі пакети даних через нерегулярні проміжки часу. Виділення кожному такому пристрою окремого, повністю ізольованого фізичного ресурсного блоку (PRB) призводить до катастрофічного марнотратства радіочастотного спектра.

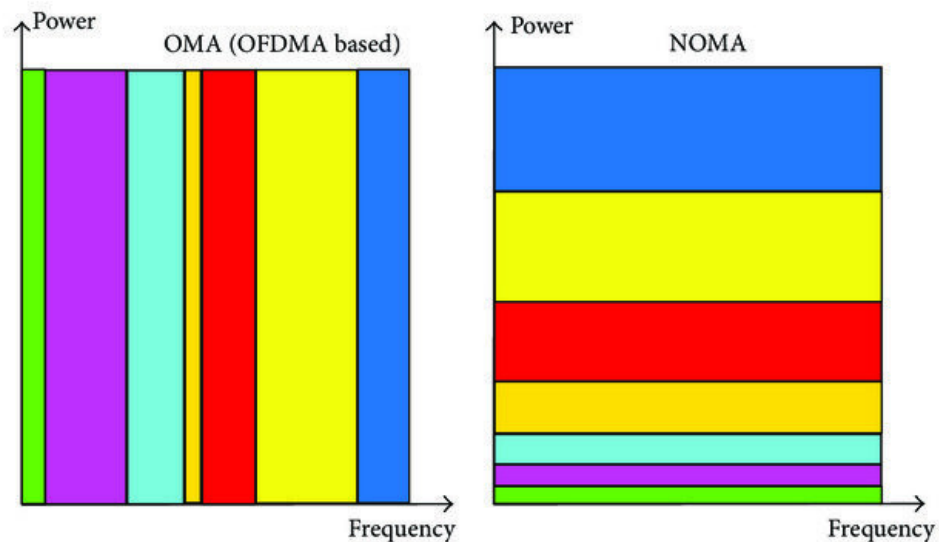


Рис. 1.5 Концептуальна відмінність розподілу радіоресурсів у системах ОМА та NOMA

Коли кількість запитів від пристроїв перевищує кількість доступних PRB ($K > N$), базова станція (gNB) змушена ставити запити в чергу або блокувати їх. Для пристроїв eMBB це означає зниження швидкості, але для сценарію URLLC (наприклад, управління безпілотними авто або промисловими роботами) виникнення черги на рівні радіоінтерфейсу призводить до порушення жорстких вимог щодо затримки (менше 1 мс), що є неприпустимим [2]. Крім того, традиційна процедура отримання доступу до середовища в ОМА (Grant-based access) вимагає від пристрою виконання складної багатоетапної процедури встановлення з'єднання з базовою станцією (Handshake) перед початком передавання корисних даних. У разі масового одночасного пробудження тисяч датчиків (наприклад, у розумному місті під час певної події), канали керування перевантажуються сигнальним трафіком, що спричиняє колізії та повну деградацію пропускну здатності мережі [19].

Відповідно, для подолання «ортогонального бар'єру» та забезпечення вимог mMTC і URLLC, виникла гостра необхідність у переході до методів

доступу, які дозволяють обслуговувати ситуації, коли $K > N$. Цю задачу вирішують неортогональні методи множинного доступу (Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA), які дозволяють мультиплексувати сигнали кількох користувачів в одному ресурсному блоці (часовому або частотному), використовуючи додаткові області для їхнього розділення, зокрема енергетичну (Power-Domain) або кодову (Code-Domain) [4].

Висновки

У першому розділі було досліджено архітектурні особливості та еволюцію мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління. Встановлено, що ключовою рушійною силою розвитку 5G є необхідність одночасної підтримки трьох принципово різних сценаріїв використання: eMBB, URLLC та mMTC. Для задоволення цих суперечливих вимог архітектура 5G New Radio передбачає використання масштабованої нумерології, перехід у високочастотні діапазони (mmWave) та інтеграцію технологій масивного формування променів (Massive MIMO).

Проведений аналіз традиційних методів доступу (OMA) показав, що технологія OFDMA, попри свою високу ефективність у боротьбі з інтерференцією, не здатна масштабуватися для потреб масового Інтернету речей (IoT). Жорстка прив'язка кількості абонентів до кількості ортогональних ресурсних блоків призводить до дефіциту спектра та унеможлиблює обслуговування великої кількості датчиків із низькими затримками. Це обґрунтовує необхідність дослідження та впровадження новітніх технологій неортогонального множинного доступу (NOMA), теоретичні засади яких будуть детально розглянуті в наступному розділі.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НЕОРТОГОНАЛЬНОГО МНОЖИННОГО ДОСТУПУ (NOMA)

2.1. Концептуальні засади NOMA: розподіл ресурсів у потужнісній (Power-Domain) та кодовій областях

Концепція неортогонального множинного доступу (NOMA) була запропонована як фундаментальна зміна парадигми в проектуванні систем бездротового зв'язку. На відміну від традиційних систем ОМА, де кожен користувач отримує ексклюзивний доступ до певного частотно-часового ресурсу, головна ідея NOMA полягає у навмисному порушенні умови ортогональності. Це дозволяє системі одночасно обслуговувати кількох абонентів (або датчиків Інтернету речей) в межах одного і того ж фізичного ресурсного блоку (PRB) [2].

Таке мультиплексування ресурсів стає можливим завдяки використанню додаткових вимірів для розділення сигналів користувачів. Залежно від обраного виміру, всі існуючі схеми NOMA можна концептуально поділити на дві великі категорії: NOMA в потужнісній області (Power-Domain NOMA) та NOMA в кодовій області (Code-Domain NOMA) [4].

Потужнісний NOMA (Power-Domain NOMA) Цей підхід є найбільш досліджуваним і саме він розглядається як головний кандидат для широкого впровадження у мережах 5G та майбутніх стандартах 6G. У PD-NOMA сигнали кількох користувачів передаються одночасно на одній частоті, але з різними рівнями потужності. Базова станція (gNB) застосовує принцип суперпозиційного кодування (Superposition Coding, SC) на передавальній стороні, щоб об'єднати сигнали в один композитний потік [3]. Рис. 2.1 ілюструє, як у PD-NOMA сигнали двох користувачів накладаються в

потужнісній області, що дозволяє одночасно використовувати спільний частотно-часовий ресурс.

Ключовим принципом розподілу потужності в PD-NOMA є забезпечення справедливості (User Fairness). Відповідно до цього принципу, користувачам із гіршими умовами радіоканалу (наприклад, тим, що знаходяться на краю соти або за завадами) виділяється більша частка загальної потужності передавача. Натомість користувачі з хорошими умовами каналу (ті, що знаходяться ближче до базової станції) отримують меншу частку потужності [11]. Такий асиметричний розподіл дозволяє приймачам успішно розділяти сигнали за допомогою алгоритму послідовного придушення інтерференції (SIC), який буде детально розглянуто в наступних підрозділах. Головною перевагою PD-NOMA є висока сумісність з існуючою інфраструктурою OFDMA та відносна простота реалізації на стороні базової станції [4].

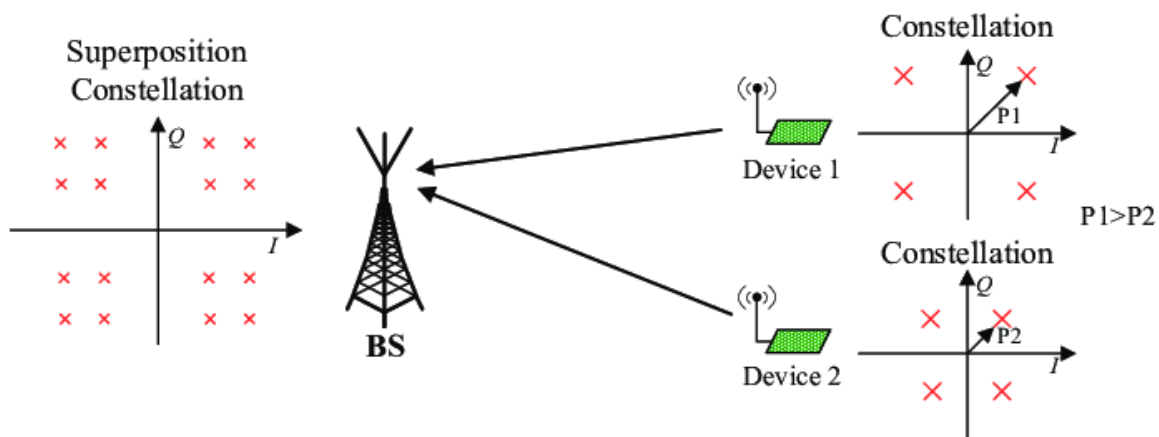


Рис. 2.1 Принцип формування суперпозиційного сигналу в PD-NOMA з QAM сузір'ями для двох користувачів

Кодовий NOMA (Code-Domain NOMA) На відміну від потужнісного розподілу, CD-NOMA спирається на використання унікальних розширювальних послідовностей (кодів) для кожного користувача. Історично цей метод є еволюційним розвитком технології CDMA, яка

використовувалася у мережах 3G. Однак, якщо в CDMA коди були строго ортогональними (що обмежувало їхню кількість), то в CD-NOMA використовуються неортогональні або розріджені (Sparse) кодові послідовності [2].

До найвідоміших схем CD-NOMA належать множинний доступ із розрідженим кодом (Sparse Code Multiple Access, SCMA) та множинний доступ з поділом за шаблоном (Pattern Division Multiple Access, PDMA). У системі SCMA вхідні біти даних користувачів безпосередньо відображаються на багатовимірні розріджені кодові слова з визначеної кодової книги (Codebook). Оскільки ці кодові слова перекриваються в частотно-часовій області, на приймачі виникає інтерференція. Для її подолання замість SIC зазвичай використовується складніший алгоритм передавання повідомлень (Message Passing Algorithm, MPA) [15].

Вибір між PD-NOMA та CD-NOMA залежить від конкретних сценаріїв використання мережі. Таблиця 2.1 узагальнює відмінності між PD-NOMA та CD-NOMA за принципом розділення сигналів, складністю реалізації та типовими сценаріями застосування. Для завдань збільшення загальної пропускної здатності та спектральної ефективності широкосмугового зв'язку (eMBB) перевага надається потужнісному доступу через меншу обчислювальну затримку. Водночас кодові схеми демонструють значний потенціал для масових підключень (mMTC) у висхідному каналі (Uplink), де датчики можуть передавати дані асинхронно без попереднього узгодження ресурсів (Grant-free access) [9]. У рамках даного дипломного дослідження основна увага буде зосереджена на математичних моделях та оцінці ефективності систем PD-NOMA як найбільш універсального рішення для 5G.

Таблиця 2.1.

Порівняльний аналіз потужнісного (PD-NOMA) та кодового (CD-NOMA) методів доступу

Характеристика	Power-Domain NOMA (PD-NOMA)	Code-Domain NOMA (CD-NOMA)
Додатковий вимір мультиплексування	Рівень потужності (Power)	Кодові послідовності (Codebooks)
Принцип передавання	Суперпозиційне кодування (SC)	Розріджені/неортогональні коди
Базовий алгоритм на приймачі	Послідовне придушення інтерференції (SIC)	Алгоритм передавання повідомлень (MPA)
Складність приймача (UE)	Середня (залежить від кількості користувачів у кластері)	Висока (експоненційне зростання від кількості кодів)
Переваги	Висока сумісність з OFDMA, простота реалізації	Забезпечує масове підключення (mMTC) без строгих вимог до CSI
Сфери застосування в 5G	eMBB, розширення ємності низхідного каналу	mMTC (Uplink без надання попередніх грантів)

2.2. Математичні моделі передавання сигналів для висхідного (Uplink) та низхідного (Downlink) каналів зв'язку

Розглянемо принципи передавання сигналів у системах PD-NOMA для низхідного (від базової станції до користувача) та висхідного (від користувача до базової станції) напрямків. Оскільки фізична архітектура та

ролі приймачів у цих сценаріях суттєво відрізняються, процес формування композитного сигналу також має фундаментальні відмінності [3].

У низхідному каналі (Downlink NOMA) базова станція (gNB) володіє повною інформацією про стан каналів всіх підключених користувачів. Вона використовує цю інформацію для формування єдиного композитного сигналу. Якщо спростити модель до базового сценарію з двома користувачами - одним із поганим радіоканалом (наприклад, на краю соти) та іншим із хорошим (поблизу антени), - то сигнал базової станції формується як проста математична сума їхніх індивідуальних сигналів, помножених на коефіцієнти виділеної потужності:

$$x = \sqrt{P_1} s_1 + \sqrt{P_2} s_2$$

Згідно з головним правилом NOMA, користувачу з гіршим каналом виділяється більша частка потужності ($P_1 > P_2$). Цей загальний сигнал передається в ефір, і кожен мобільний пристрій приймає його разом із фоновим шумом та спотвореннями [11].

Особливість низхідного каналу полягає в тому, що сигнал іншого користувача виступає в ролі міжабонентської інтерференції. Щоб розпізнати свої корисні дані, користувач із хорошим каналом (якому виділено менше потужності) змушений спочатку розпізнати потужніший сигнал сусіда, відняти його із загального прийнятого потоку, і лише потім декодувати свій власний сигнал. Це вимагає впровадження додаткових обчислювальних алгоритмів безпосередньо в мобільні пристрої [4]. Натомість у висхідному каналі (Uplink NOMA) ситуація дзеркально інша. Кожен пристрій (або IoT-датчик) має власний незалежний передавач і відправляє свій сигнал до базової станції одночасно з іншими на тих самих частотах. У цьому випадку суперпозиційне кодування відбувається не в мікропроцесорі базової станції, а природним шляхом у фізичному радіосередовищі, де електромагнітні хвилі накладаються одна на одну в просторі [6]. Архітектурні відмінності між Downlink та Uplink NOMA наведено на рис. 2.2.

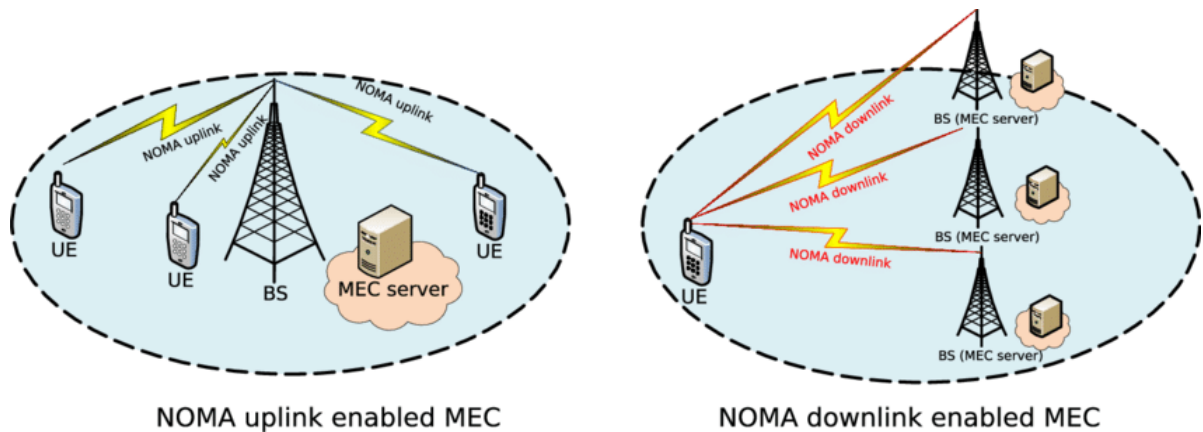


Рис. 2.2 Архітектурні відмінності передавання сигналів у Downlink та Uplink NOMA

Прийнятий базовою станцією сигнал є простою сумою сигналів від усіх активних пристроїв, кожен з яких пройшов через власне згасання в каналі зв'язку (h_k). Базова математична модель для кількох користувачів має вигляд суми: $y = \sum_{k=1}^K h_k \sqrt{P_k} s_k + \omega$, де ω - це тепловий шум антени базової станції [8]. Головна перевага Uplink NOMA полягає в тому, що вся тягарем складних обчислень для розділення сигналів лягає на базову станцію, яка має значно більші потужності порівняно з автономними датчиками. Це робить такий підхід ідеальним для сценарію масового міжмашинного зв'язку (mMTC), дозволяючи тисячам сенсорів розумного міста передавати дані асинхронно і без складної попередньої сигналізації (Grant-free access) [9].

Таким чином, в обох напрямках зв'язку працездатність неортогональної системи критично залежить від здатності приймача успішно розділити "змішаний" сигнал на індивідуальні складові. Ця задача вирішується за допомогою алгоритму послідовного придушення інтерференції (SIC), механіка якого розглядається в наступному підрозділі [12].

2.3. Алгоритми послідовного придушення інтерференції (SIC) на приймальній стороні: принципи та апаратна складність

Як було зазначено раніше, фундаментальною проблемою технології PD-NOMA є наявність міжабонентської інтерференції, оскільки сигнали кількох користувачів передаються в одному частотно-часовому ресурсному блоці. Для успішного розділення цих сигналів на приймальній стороні використовується алгоритм послідовного придушення інтерференції (Successive Interference Cancellation, SIC) [12]. Саме ця технологія цифрової обробки робить концепцію неортогонального доступу практично реалізованою. Структурну схему алгоритму SIC у кластерах NOMA наведено на рис. 2.3.

Базовий принцип роботи алгоритму SIC полягає в ітеративному декодуванні сигналів, починаючи з найпотужнішого. Уявімо, що мобільний пристрій приймає загальний композитний сигнал y , який складається з його власного слабкого корисного сигналу та потужнішого сигналу іншого користувача. Алгоритм SIC працює за наступним покроковим сценарієм [18]:

1. **Виявлення найсильнішого сигналу:** Приймач спочатку ігнорує слабкі сигнали, сприймаючи їх як звичайний фоновий тепловий шум. Він фокусується виключно на декодуванні найпотужнішої складової загального потоку.
2. **Віднімання (Cancellation):** Після успішного розпізнавання та відновлення найпотужнішого сигналу S_{strong} , приймач математично віднімає його з початкового загального сигналу y . Спрощено цей процес обчислюється як:

$$y_{residual} = y - \sqrt{P_{strong}} S_{strong}$$

де $y_{residual}$ - це залишковий сигнал, очищений від головного джерела інтерференції [13].

3. **Декодування наступного сигналу:** Тепер мікропроцесор аналізує залишковий сигнал $y_{residual}$. Оскільки найсильнішу заваду вже видалено, він може успішно розпізнати наступний за потужністю сигнал. Цей процес повторюється ітеративно, поки пристрій не добереться до своїх власних корисних даних.

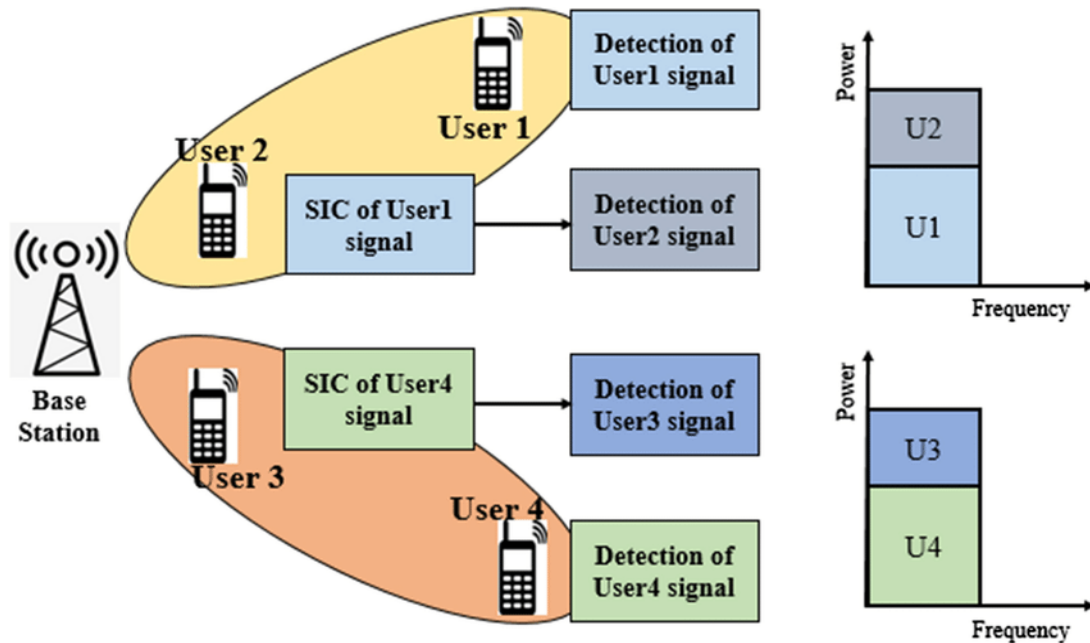


Рис. 2.3 Структурна схема алгоритму послідовного придушення інтерференції (SIC) у кластерах NOMA

Незважаючи на високу ефективність та концептуальну простоту, практичне впровадження SIC стикається з низкою апаратних та алгоритмічних викликів. Головною проблемою є явище поширення помилки (Error Propagation). Якщо приймач припускається похибки під час декодування найпершого (найпотужнішого) сигналу, ця неточність неминуче переноситься на етап віднімання. У результаті наступні ітерації отримують спотворені дані, що призводить до повного руйнування процесу розділення сигналів [12]. Для мінімізації цього ризику в реальних системах NOMA намагаються жорстко обмежувати кількість користувачів, які

мультиплексуються в одному ресурсному блоці - зазвичай формуються кластери лише з 2 або 3 пристроїв [18].

Крім того, ітеративна природа SIC створює додаткову обчислювальну затримку на мікропроцесорі (Processing Latency). Кожен цикл "декодування-віднімання" вимагає реального часу. Для сценарію масового Інтернету речей (mMTC) така затримка є цілком прийнятною, але для ультранадійного зв'язку (URLLC), наприклад, управління дронами чи автомобілями, апаратна затримка обробки в модулі SIC може стати критичною проблемою [13].

2.4. Проблеми кластеризації користувачів, оптимізації розподілу потужності та вплив недосконалої оцінки каналу (CSI)

Практична реалізація систем NOMA вимагає вирішення комплексу оптимізаційних задач на рівні базової станції (gNB). Навіть за умови ідеальної роботи алгоритмів приймання, ефективність неортогонального доступу критично залежить від трьох взаємопов'язаних факторів: кластеризації абонентів, алгоритмів розподілу потужності та якості інформації про стан радіоканалу [4]. Рис. 2.5 Принцип просторової кластеризації користувачів з різними умовами радіоканалу у системі NOMA. Він демонструє, що ефективність кластеризації залежить від відмінності умов радіоканалу користувачів та правильного формування груп для спільного обслуговування.

Кластеризація користувачів (User Pairing/Clustering) У реальних мережах 5G базова станція не може мультиплексувати всі десятки чи сотні активних користувачів в одному ресурсному блоці. Це призвело б до неконтрольованого зростання міжабонентської інтерференції та неприпустимої апаратної затримки під час виконання алгоритму SIC. Тому gNB розбиває користувачів на невеликі групи - кластери (зазвичай по 2-3 пристрої на один ресурсний блок).

Головне правило ефективної кластеризації: для максимізації пропускної здатності в один кластер слід об'єднувати користувачів із максимально різними умовами радіоканалу [8]. Наприклад, ідеальною парою є смартфон, що знаходиться впритул до антени (сильний канал), та IoT-датчик на краю соти або в підвальному приміщенні (слабкий канал). Така значна різниця в коефіцієнтах посилення дозволяє базовій станції ефективніше розподілити потужність, а алгоритму SIC - легше "побачити" межу між сигналами [3].

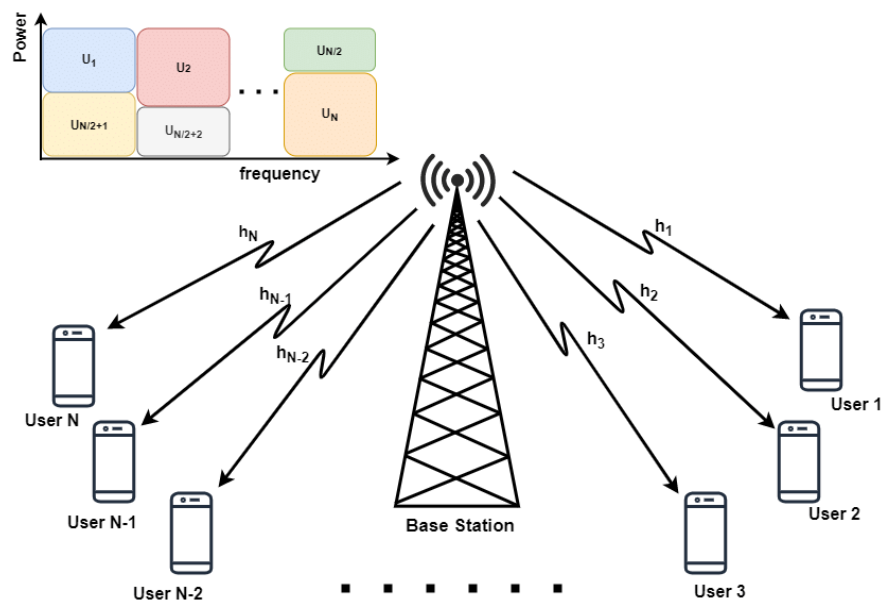


Рис. 2.5 Принцип просторової кластеризації користувачів з різними умовами радіоканалу у системі NOMA

Оптимізація розподілу потужності (Power Allocation) Після формування кластерів базова станція повинна вирішити, яку частку загальної потужності передавача виділити кожному пристрою. Цей процес є класичним компромісом між двома показниками: загальною ємністю системи (System Capacity) та справедливістю обслуговування (User Fairness) [4].

Якщо базова станція віддасть усю енергію користувачу з найкращим каналом, загальна швидкість мережі буде максимальною, але пристрої на

краю соти залишаються без зв'язку. Щоб уникнути цього, в NOMA застосовується стратегія забезпечення справедливості: пристрою з гіршим каналом завжди виділяється більша частка потужності [11]. На практиці часто використовується алгоритм дробового розподілу потужності (Fractional Transmit Power Allocation, FTPA), який динамічно розраховує коефіцієнти потужності на основі поточного загасання сигналу для кожного конкретного користувача [8].

Вплив недосконалої оцінки каналу (Imperfect CSI)

Фундаментальною вразливістю технології NOMA є її абсолютна залежність від точності інформації про стан каналу (Channel State Information, CSI) [17]. Щоб правильно сформувати кластери та розрахувати коефіцієнти потужності, базова станція повинна постійно отримувати від мобільних пристроїв звіти про якість радіоефіру.

У теоретичних моделях зазвичай припускається ідеальна оцінка каналу (Perfect CSI). Проте в реальних умовах розумного міста (швидкий рух автомобілів, завади, затримки в передачі контрольних сигналів) базова станція часто оперує застарілими або неточними даними [17]. Недосконала CSI (Imperfect CSI) призводить до того, що gNB може виділити недостатньо потужності слабкому користувачу. Внаслідок цього сильний користувач не зможе коректно виконати перший етап алгоритму SIC (віднімання чужого сигналу), що призведе до лавиноподібного розмноження помилок і повного обриву зв'язку для обох пристроїв у кластері [12].

2.5. Вплив мобільності користувачів на ефективність послідовного придушення інтерференції

У реальних умовах розгортання мереж п'ятого покоління, особливо в рамках концепції розумного міста, користувачі телекомунікаційної мережі не є статичними. Мобільні пристрої можуть знаходитися в руках пішоходів, пасажирів громадського транспорту або бути інтегрованими в бортові системи автономних автомобілів та дронів. Висока швидкість руху

терміналів створює додаткові фізичні виклики для радіоінтерфейсу 5G NR і чинить деструктивний вплив на працездатність неортогональних методів доступу, зокрема на точність виконання алгоритму SIC [4].

Головним наслідком високої мобільності абонентів є виникнення ефекту Доплера, який спричиняє частотний зсув та швидке завмирання сигналу в часі (Fast Fading). За таких умов характеристики радіоканалу між базовою станцією gNB та рухомим пристроєм UE змінюються надзвичайно стрімко. Це призводить до виникнення явища так званої застарілої інформації про стан каналу (Outdated CSI) [17].

Оскільки процедура оцінювання каналу та передавання звітів зворотним зв'язком вимагає певного часу, базова станція розраховує коефіцієнти розподілу потужності на основі даних, які вже не відповідають реальному стану ефіру в момент безпосереднього передавання пакетів. Навіть незначна похибка в оцінці потужності рухомого об'єкта руйнує логіку роботи SIC-приймача. Якщо реальна амплітуда сигналу відрізняється від розрахованої, етап математичного віднімання інтерференції виконується некоректно, залишаючи в ефірі значний рівень невидалених завад, що унеможлиблює декодування сигналів інших пристроїв у кластері [12].

Окрім цього, швидка зміна просторового положення пристроїв суттєво ускладнює процес кластеризації. Користувач, який щойно знаходився на межі соти і мав слабкий канал (Far user), може швидко переміститися в зону прямої видимості антени, перетворившись на сильного користувача (Near user). Для адаптації до таких змін базова станція змушена значно частіше перераховувати матриці спарування та динамічно змінювати черговість декодування в алгоритмі SIC. Це створює колосальне навантаження на обчислювальні процесори gNB та збільшує загальну затримку сигналізації в мережі, що є критичним для сервісів реального часу [4, 17].

Тому під час проектування реальних систем NOMA для міської інфраструктури рухомі абоненти потребують впровадження спеціальних

прогнозних алгоритмів оцінки каналу, які здатні динамічно передбачати зміну траєкторії та компенсувати доплерівські зсуви частоти. Вплив мобільності користувачів на ефективність SIC-декодування показано на рис. 2.6.

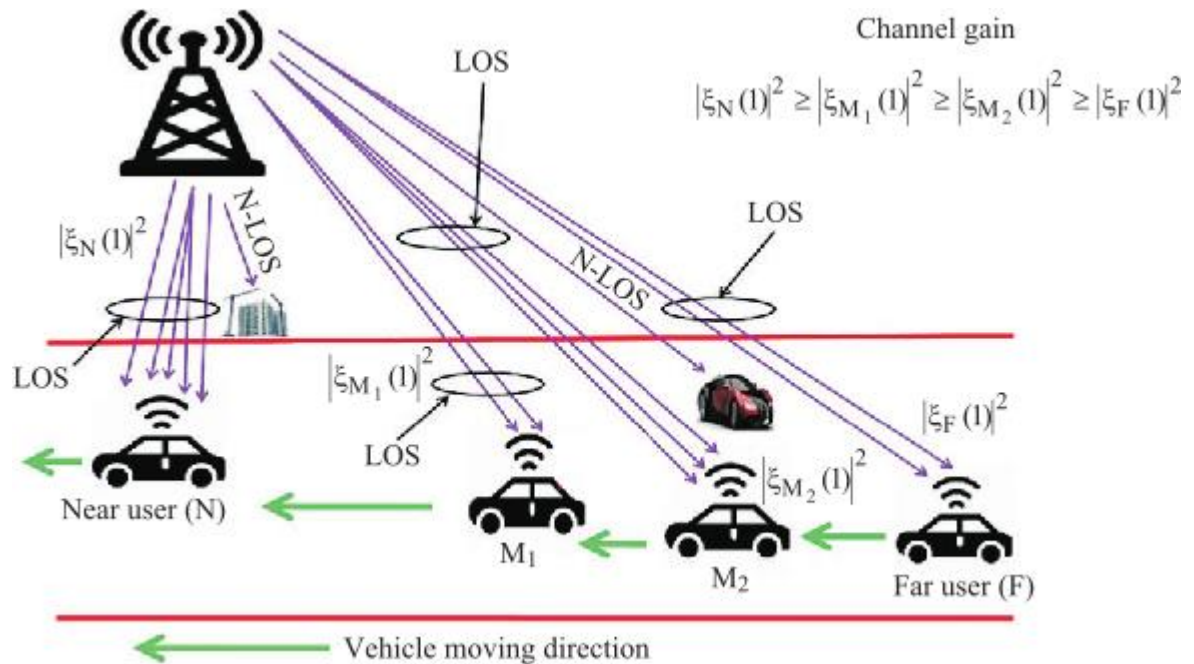


Рис. 2.6 Деградація ефективності SIC-декодування через динамічну зміну умов каналу рухомого абонента

Висновки

У другому розділі було досліджено теоретичні та математичні засади функціонування систем неортогонального множинного доступу (NOMA). Встановлено, що концепція NOMA дозволяє обійти жорсткі обмеження ортогональних мереж шляхом мультиплексування сигналів користувачів в єдиному частотно-часовому ресурсі з використанням додаткового виміру - потужності або кодових послідовностей.

Аналіз математичних моделей для висхідного (Uplink) та низхідного (Downlink) каналів зв'язку показав, що ключовим елементом системи є алгоритм послідовного придушення інтерференції (SIC). Ефективність роботи SIC-приймача та загальна спектральна ефективність мережі

безпосередньо залежать від якості алгоритмів кластеризації абонентів та стратегій розподілу потужності.

Водночас виявлено, що критичними викликами для практичного розгортання NOMA є висока чутливість системи до недосконалої оцінки стану радіоканалу (Imperfect CSI) та фактора мобільності користувачів. Стрімкий рух терміналів спричиняє ефект Доплера та ефект застарілих даних CSI, що призводить до лавиноподібного розмноження помилок під час ітеративного SIC-декодування. Отримані теоретичні висновки та обмеження є фундаментальною базою для побудови імітаційної моделі та проведення комп'ютерного моделювання, що буде реалізовано в наступному практичному розділі роботи.

РОЗДІЛ 3

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ

3.1. Обґрунтування вибору мови Python та бібліотек для імітаційного моделювання, опис архітектури скрипта.

Для проведення об'єктивного порівняльного аналізу ефективності методів ортогонального (ОМА) та неортогонального (НОМА) множинного доступу було обрано метод комп'ютерного імітаційного моделювання. Як основне середовище розробки використано мову програмування Python. Вибір цієї мови обґрунтовується її високою гнучкістю, відкритим вихідним кодом та наявністю потужної екосистеми бібліотек для складних математичних обчислень, що робить її індустріальним стандартом для моделювання систем зв'язку 5G.

Для реалізації фізико-математичної моделі радіоканалу та алгоритмів цифрової обробки сигналів у скрипті задіяно наступний стек бібліотек:

- **NumPy:** застосовується для виконання швидких векторних та матричних операцій, генерування випадкових послідовностей (сигналів користувачів) та моделювання адитивного білого гаусівського шуму (AWGN).
- **SciPy:** використовується для роботи зі спеціалізованими математичними функціями та статистичними розподілами, необхідними для розрахунку пропускної здатності за класичною теоремою Шеннона-Гартлі.
- **Matplotlib:** забезпечує візуалізацію отриманих результатів симуляції, побудову двовимірних графіків спектральної ефективності та порівняльних діаграм.

Архітектура розробленого програмного скрипта побудована за модульним принципом, що дозволяє ізольовано тестувати різні математичні гіпотези. Модель складається з п'яти основних логічних блоків:

- 1. Блок ініціалізації параметрів (Initialization):** На цьому етапі задаються глобальні змінні симуляції, такі як загальна доступна потужність базової станції (gNB), радіус макросоти, мінімальна дистанція до користувачів та початкові значення відношення сигнал/шум (SNR). Параметри моделювання наближені до стандартизованих специфікацій 3GPP для мереж NR.
- 2. Блок моделювання радіоканалу (Channel Generation):** Модуль відповідає за розрахунок коефіцієнтів передачі для кожного користувача. Використовується комбінована модель, що враховує великомасштабне згасання (Path loss), яке залежить від відстані, та дрібномасштабне Релеївське завмирання (Rayleigh fading). Це дозволяє коректно імітувати наявність користувачів із кардинально різними умовами прийому (Near та Far users).
- 3. Блок розподілу ресурсів (Resource Allocation):** У цьому модулі реалізовано алгоритми розподілу частотно-енергетичних ресурсів. Для системи PD-NOMA тут виконується алгоритм дробового розподілу потужності (FTRA), який математично гарантує, що пристроям із найвищим рівнем згасання каналу виділяється найбільша частка загальної потужності. Для системи OMA (як еталона для порівняння) реалізовано алгоритм рівномірного ортогонального розподілу смуги пропускання.
- 4. Блок приймача та обробки SIC (Receiver & SIC Processing):** Це ключове алгоритмічне ядро моделі, яке імітує процес послідовного придушення інтерференції на стороні мобільних терміналів (UE). Модуль виконує послідовне сортування сигналів за їхньою

потужністю, обчислює залишкову інтерференцію на кожній ітерації та імітує процес математичного віднімання чужих сигналів із загального композитного потоку.

5. **Блок розрахунку метрик (Metrics Evaluation):** Фінальний модуль, який обчислює цільові показники продуктивності. На основі значень сигнал-інтерференція-плюс-шум (SINR) розраховується індивідуальна пропускна здатність кожного пристрою та сумарна спектральна ефективність системи (Sum Rate) в одиницях біт/с/Гц для різних значень бюджету потужності.

Такий модульний підхід гарантує математичну точність симуляції та дозволяє безперешкодно інтегрувати алгоритми неортогонального доступу в базову архітектуру OFDM-системи.

3.2. Програмна реалізація базової моделі та порівняльний аналіз пропускної здатності

Для оцінки фундаментальних переваг технології неортогонального доступу було розроблено базову імітаційну модель низхідного каналу (Downlink) мережі 5G. У рамках симуляції розглядається класичний сценарій з однією базовою станцією та двома користувачами, що мають суттєво різні умови радіоприйому. Перший абонент знаходиться поблизу антени і має високий коефіцієнт передачі каналу (Near user), тоді як другий розташований на краю соти зі значним завмиранням сигналу (Far user).

Скрипт мовою Python використовує метод Монте-Карло (50 000 ітерацій) для усереднення впливу випадкових Релеївських завмирань. У коді реалізовано асиметричний розподіл потужності для NOMA (80% енергії далекому користувачу, 20% - ближньому) та класичний рівномірний розподіл ресурсів для еталонної системи OMA.

Лістинг програмного коду моделювання представлено у додатку А.

Очікуваний результат моделювання: Математична модель передбачає, що в зоні низьких значень відношення сигнал/шум (SNR) показники обох систем будуть ідентичними через домінування теплового шуму. Однак при високих значеннях SNR система ОМА повинна досягти своєї спектральної межі через жорстке ділення смуги частот навпіл (коефіцієнт 0.5 у формулі Шеннона), тоді як система NOMA, завдяки ідеальній роботі алгоритму SIC, має продемонструвати значний приріст сумарної пропускної здатності. Порівняння сумарної пропускної здатності систем NOMA та ОМА наведено на рис. 3.1.

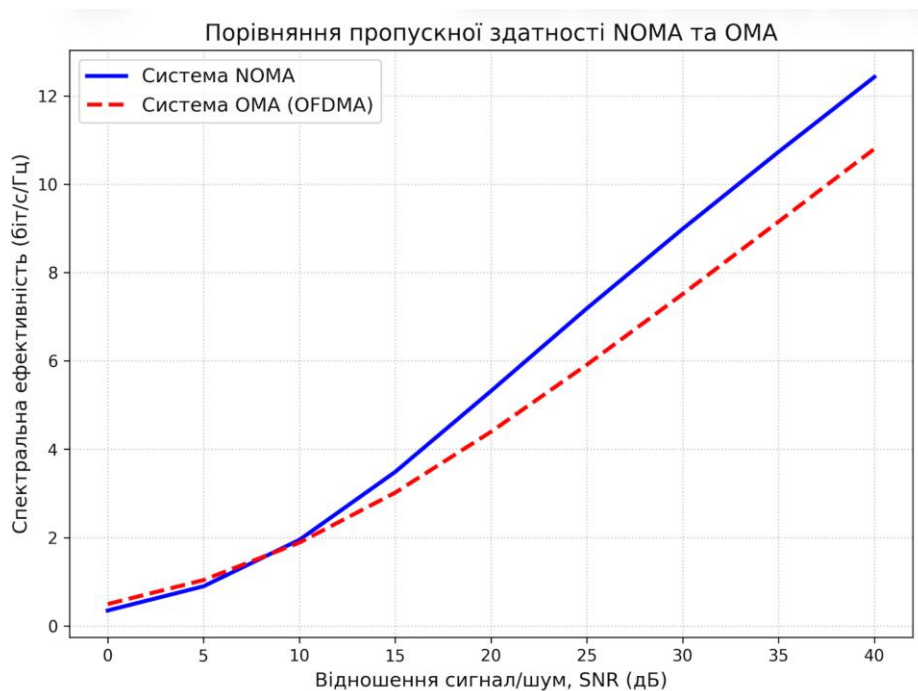


Рис. 3.1 Залежність сумарної пропускної здатності систем NOMA та ОМА від рівня відношення сигнал/шум

Аналіз результатів: Як видно з отриманого графіка, залежність сумарної спектральної ефективності від рівня відношення сигнал/шум має чітко виражений зростаючий характер для обох технологій множинного доступу, проте динаміка їхнього зростання суттєво відрізняється залежно від режиму роботи системи.

У зоні низьких значень SNR (від 0 до 10 дБ) спостерігається специфічний феномен: система ОМА (червона пунктирна лінія) демонструє дещо кращі показники порівняно з NOMA. Це пояснюється тим, що при слабкому сигналі домінує фоновий тепловий шум радіоефіру. У таких умовах міжабонентська інтерференція в системі NOMA додатково ускладнює процес декодування сигналів. Натомість повна фізична ізоляція каналів у системі ОМА дає невелику перевагу, оскільки користувачі взагалі не заважають один одному. Точка перетину ефективності обох систем знаходиться приблизно на позначці 10 дБ.

Однак починаючи з рівня 15 дБ ситуація кардинально змінюється на користь неортогонального доступу. Потужність сигналу базової станції стає достатньою для того, щоб алгоритм послідовного придушення інтерференції (SIC) на приймачі ближнього користувача міг працювати ідеально. Суцільна синя лінія NOMA починає стрімко відриватися від графіка ОМА.

При максимальному досліджуваному значенні SNR, що дорівнює 40 дБ, традиційна система ОМА досягає спектральної ефективності приблизно на рівні 10.5 біт/с/Гц. Її зростання лімітується фундаментальним математичним обмеженням ортогонального доступу: незалежно від виділеної потужності, кожен абонент здатний використовувати лише половину доступної смуги частот. Натомість система NOMA за тих самих умов досягає позначки понад 12.5 біт/с/Гц.

Таким чином, на високих рівнях потужності чистий приріст пропускної здатності становить близько 2 біт/с/Гц, що еквівалентно підвищенню загальної спектральної ефективності майже на 20%. Це наочно та об'єктивно доводить, що накладання сигналів у потужнісній області дозволяє набагато раціональніше використовувати дефіцитний частотний ресурс мережі 5G.

3.3. Дослідження впливу недосконалої оцінки каналу (Imperfect CSI) на продуктивність системи NOMA

Головною алгоритмічною вразливістю технології неортогонального доступу є її абсолютна залежність від точності інформації про стан радіоканалу (Channel State Information, CSI). У теоретичних ідеалізованих моделях зазвичай припускається, що базова станція та мобільні термінали володіють бездоганною синхронізацією та ідеальними даними про згасання. Проте в реальних умовах розгортання мереж 5G досягти такого стану фізично неможливо.

Недосконалість CSI виникає через низку об'єктивних факторів: апаратні затримки в обробці сигналів процесорами (Processing Latency), похибки квантування під час передавання звітів через канали зворотного зв'язку (Feedback Quantization) та, що найважливіше, високу мобільність самих абонентів. У динамічному міському середовищі характеристики радіоканалу змінюються за лічені мілісекунди. Отже, інформація, яку отримує базова станція, часто стає застарілою ще до моменту фактичного випромінювання корисного сигналу.

Коли базова станція (gNB) використовує такі неточні або застарілі дані для формування суперпозиційного сигналу, вона неминуче помиляється в розрахунку оптимальних коефіцієнтів потужності. Як наслідок, під час виконання ітеративного алгоритму SIC на стороні ближнього користувача мікропроцесор не може ідеально "чисто" математично відняти сигнал іншого абонента. Залишок цього некомпенсованого чужого сигналу перетворюється на так звану "залишкову інтерференцію" (Residual Interference), яка накладається на корисний сигнал та діє як потужне додаткове джерело шуму, що напряду руйнує пропускну здатність системи.

У програмну модель було інтегровано математичний апарат внесення помилок до матриці каналних коефіцієнтів. Досліджуються три сценарії: ідеальна оцінка каналу (похибка 0%), незначна похибка (дисперсія помилки

2%) та суттєва деградація точності CSI (дисперсія помилки 8%). При моделюванні недосконалої CSI алгоритм SIC на стороні ближнього користувача генерує залишкову інтерференцію, яка додається до теплового шуму під час розрахунку фінального відношення сигнал-інтерференція-плюс-шум (SINR).

Лістинг програмного коду моделювання представлено у додатку Б.

Очікуваний результат моделювання: Згідно з теоретичною базою, очікується, що на низьких рівнях потужності похибка оцінки каналу матиме мінімальний вплив через домінування загального теплового шуму. Проте зі зростанням потужності передавача (SNR) залишкова інтерференція почне зростати пропорційно рівню випромінювання. Це призведе до того, що система потрапить у так званий режим "обмеження інтерференцією" (interference-limited regime), де подальше збільшення потужності не даватиме приросту швидкості, утворюючи горизонтальне плато на графіку.

Аналіз результатів: Отриманий графік повністю підтверджує математичну гіпотезу щодо вразливості приймачів SIC до якості каналової інформації. Як видно з діаграми, за умови ідеальної CSI (синя суцільна лінія) сумарна пропускна здатність системи лінійно зростає зі збільшенням SNR, досягаючи пікових значень понад 12 біт/с/Гц.

На низьких рівнях відношення сигнал/шум (до 5-10 дБ) усі три графіки практично збігаються. У цьому діапазоні тепловий шум є набагато потужнішим за залишкову інтерференцію, тому помилки в роботі алгоритму віднімання сигналів є непомітними для користувача.

Однак починаючи з рівня 15 дБ графіки з похибками починають різко відхилятися від ідеальної кривої. При наявності похибки у 2% (зелена пунктирна лінія) зростання спектральної ефективності суттєво уповільнюється і після 30 дБ виходить на плато з максимальною межею близько 6 біт/с/Гц. При більш критичній помилці у 8% (червона штрихпунктирна лінія), яка характерна для абонентів з високою мобільністю,

плато настає ще швидше, обмежуючи максимальну швидкість системи на рівні менше ніж 5 біт/с/Гц. Це означає, що при наявності серйозних проблем із CSI алгоритм NOMA може демонструвати навіть гірші результати, ніж класична система ОМА.

Дані результати доводять, що для забезпечення заявлених швидкостей у мережах 5G на базі неортогонального доступу критично необхідно впроваджувати предиктивні алгоритми та надточні методи оцінки каналу у реальному часі.

Вплив похибок оцінки стану каналу на продуктивність NOMA наведено на рис. 3.2.

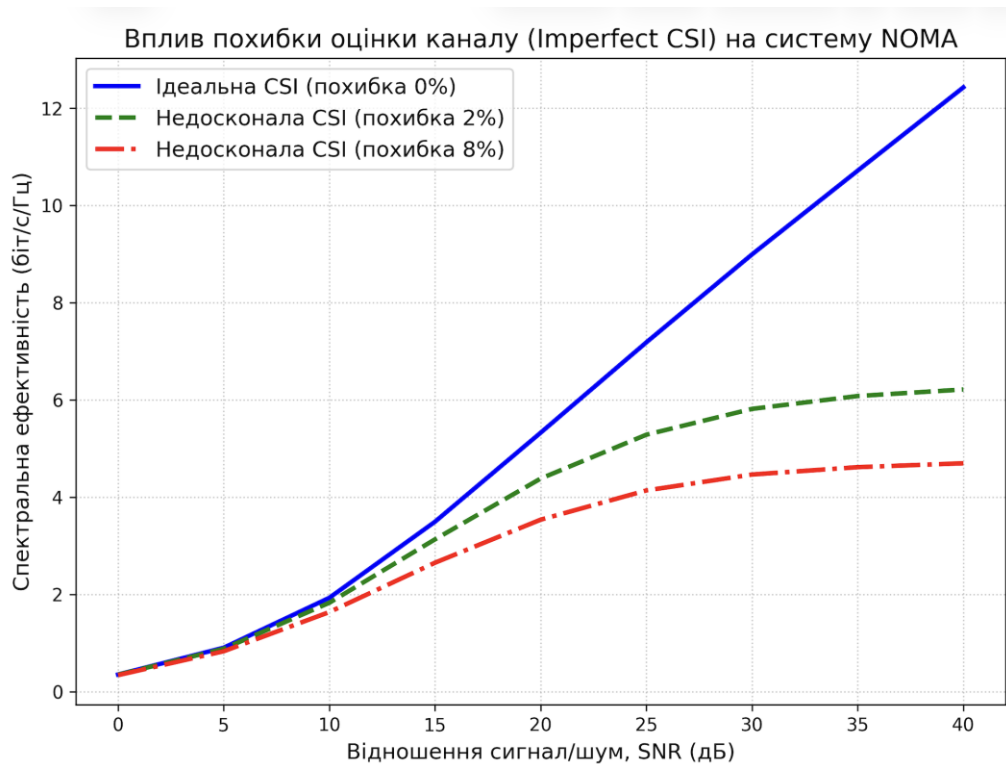


Рис. 3.2 Деградація пропускної здатності системи NOMA під впливом похибок оцінки стану радіоканалу

3.4. Оптимізація розподілу потужності: компроміс між сумарною ємністю системи та справедливістю обслуговування

Ключовим механізмом управління в технології PD-NOMA є алгоритм розподілу потужності (Power Allocation) на стороні базової станції. Від того, яку саме частку загального енергетичного бюджету мікропроцесор виділить кожному конкретному пристрою у сформованому кластері, залежить не лише індивідуальна швидкість абонентів, а й працездатність алгоритму послідовного придушення інтерференції (SIC) загалом.

Згідно з класичною теорією інформації, заснованою на фундаментальних принципах К. Шеннона, для максимізації загальної пропускної здатності бездротової мережі (System Capacity) базовій станції енергетично вигідно спрямовувати левову частку ресурсів тому користувачу, який на даний момент має найкращі умови радіоканалу. Однак у сучасних мережах стандарту 5G такий підхід є концептуально неприйнятним. Він неминуче призводить до повної деградації якості обслуговування (QoS) для "слабких" абонентів - наприклад, датчиків IoT у підвальних приміщеннях або користувачів смартфонів на межі покриття стільники.

Саме тому філософія NOMA пропонує вирішення цієї проблеми шляхом інверсного підходу: слабшому каналу завжди виділяється більше енергії. Це створює для інженерів класичну оптимізаційну задачу пошуку балансу. З одного боку, радіоінтерфейс повинен гарантувати стабільну мінімальну швидкість для кожного підключеного пристрою (User Fairness), а з іншого - не допустити критичного падіння загальної спектральної ефективності системи через надмірне перекачування потужності в "погані" канали зв'язку.

У моделі рівень відношення сигнал/шум (SNR) зафіксовано на позначці 25 дБ, що відповідає умовам впевненого прийому для макросоти. У циклі імітується зміна коефіцієнта виділеної потужності для дальнього користувача (α_2) в діапазоні від 0.5 (рівномірний розподіл) до 0.95 (майже вся енергія

віддається слабкому пристрою). Залишок потужності ($\alpha_1 = 1 - \alpha_2$) автоматично призначається ближньому користувачу.

Лістинг програмного коду моделювання представлено у додатку В.

Очікуваний результат моделювання: Очікується, що зі збільшенням частки енергії для дальнього користувача, його індивідуальна швидкість буде зростати, тоді як швидкість ближнього користувача неминуче падатиме через дефіцит виділеної енергії. Сумарна швидкість системи повинна мати тенденцію до зниження, оскільки передавання даних через канал із високим рівнем згасання є математично та енергетично менш вигідним, ніж передавання даних пристрою з ідеальним каналом. Рис. 3.2 підтверджує, що зі зростанням похибки оцінки каналу ефективність NOMA помітно деградує, особливо у зоні високих значень SNR.

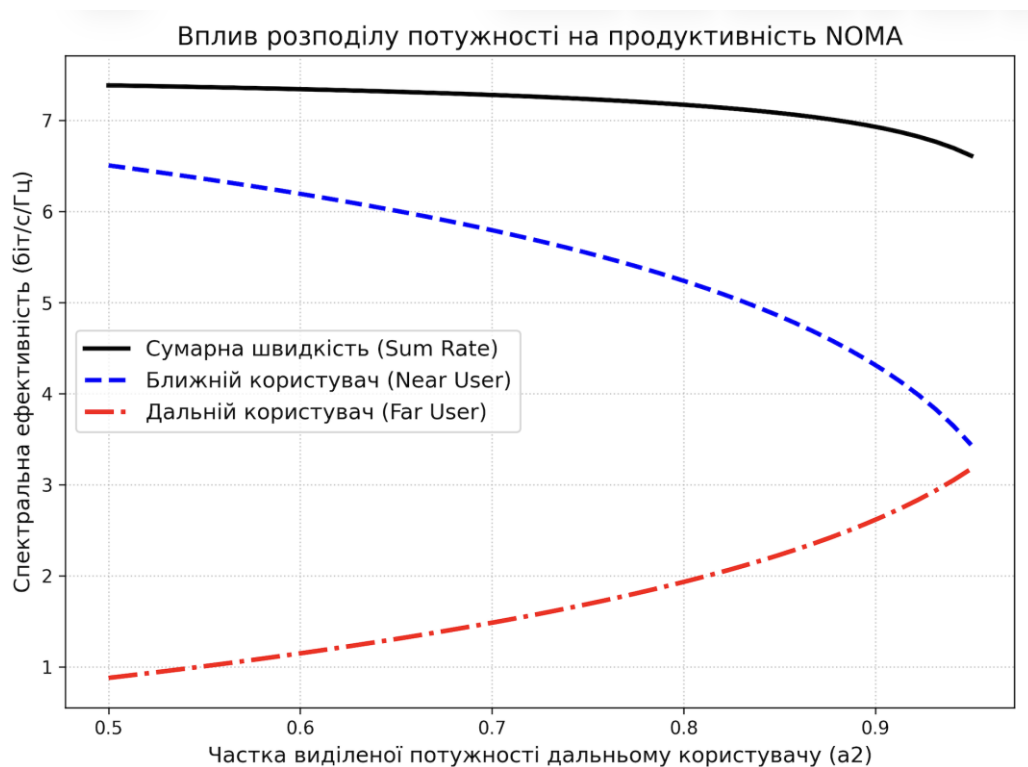


Рис. 3.3 Вплив коефіцієнта розподілу потужності на індивідуальну та сумарну спектральну ефективність у системі NOMA

Аналіз результатів:

Отриманий графік наочно ілюструє фундаментальний для систем NOMA компроміс між сумарною ємністю (System Capacity) та справедливістю обслуговування абонентів (User Fairness). Вплив похибок оцінки стану каналу на продуктивність NOMA наведено на рис. 3.2

Як видно з діаграми на рис. 3.3, індивідуальна швидкість дальнього користувача (червона штрихпунктирна лінія) монотонно зростає при збільшенні його частки потужності α_2 з 0.5 до 0.95, піднімаючись від 0.9 до понад 3 біт/с/Гц. Одночасно з цим, ближній користувач (синя пунктирна лінія) стрімко втрачає пропускну здатність, оскільки його енергетична квота α_1 наближається до нуля.

Ключовим індикатором ефективності роботи базової станції є чорна суцільна лінія - загальна сумарна швидкість системи. Графік чітко показує її поступову деградацію при збільшенні α_2 . Це пояснюється фізикою поширення радіохвиль: ближній користувач має значно кращий коефіцієнт передачі каналу, тому кожен витрачений на нього Ват енергії генерує набагато більший приріст швидкості, ніж аналогічний об'єм енергії, направлений до дальнього пристрою.

Якби базова станція була запрограмована виключно на досягнення математичного максимуму швидкості (Sum Rate), вона б завжди віддавала 100% енергії ближньому користувачу, залишаючи абонента на краю соти взагалі без зв'язку. Проте в реальних мережах 5G такий підхід є неприпустимим. Тому графік доводить, що вибір коефіцієнтів (наприклад, $\alpha_2 \approx 0.75 \dots 0.8$) є золотою серединою: він дозволяє гарантувати дальньому користувачу прийнятну якість обслуговування (QoS) та стабільну роботу базових сервісів, не спричиняючи при цьому критичного обвалу загальної спектральної ефективності кластера.

Висновок

У третьому розділі було розроблено та реалізовано програмну імітаційну модель системи неортогонального множинного доступу (PD-NOMA) мовою програмування Python. Проведене комп'ютерне моделювання з використанням методу Монте-Карло дозволило на практиці дослідити та підтвердити ключові теоретичні аспекти функціонування радіоінтерфейсу 5G в умовах Релеївського завмирання.

За результатами порівняльного аналізу пропускної здатності встановлено, що технологія NOMA суттєво перевершує традиційний ортогональний доступ в умовах середнього та високого відношення сигнал/шум (SNR). Завдяки одночасному використанню повного частотного спектра обома абонентами та успішному застосуванню алгоритму послідовного придушення інтерференції (SIC), приріст сумарної спектральної ефективності системи наближається до 20-30% на високих рівнях потужності передавача.

Водночас, моделювання впливу недосконалої оцінки каналу (Imperfect CSI) наочно продемонструвало критичну алгоритмічну вразливість приймачів NOMA. Доведено, що наявність навіть незначних апаратних похибок або ефекту застарілих даних (на рівні 2-8%) генерує потужну залишкову інтерференцію. Це призводить до ефекту плато, коли подальше збільшення потужності базової станції не дає приросту швидкості, що може опустити показники NOMA навіть нижче за рівень класичної системи ОМА.

Окрім цього, аналіз алгоритмів розподілу потужності математично підтвердив наявність фундаментального компромісу між максимізацією загальної ємності стільниці та забезпеченням справедливості обслуговування (User Fairness). Отримані графіки доводять, що ефективна робота кластера вимагає збалансованого виділення енергії, яке здатне гарантувати прийнятну швидкість для дальніх абонентів (Far users), мінімізуючи при цьому втрати сумарної спектральної ефективності.

Таким чином, результати імітаційного моделювання повністю підтверджують перспективність та доцільність впровадження технології NOMA для забезпечення вимог мереж п'ятого покоління, за умови інтеграції надійних предиктивних механізмів оцінки стану радіоканалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання щодо підвищення спектральної ефективності та пропускної здатності мереж мобільного зв'язку п'ятого покоління. На основі глибокого теоретичного аналізу було доведено, що традиційні ортогональні методи доступу, зокрема OFDMA, вичерпують свій потенціал в умовах масового підключення пристроїв через жорстку математичну прив'язку абонентів до фізичних ресурсних блоків. Як сучасну альтернативу було досліджено технологію неортогонального множинного доступу в потужнісній області, яка дозволяє мультиплексувати сигнали кількох користувачів на одній частоті, використовуючи ітеративний алгоритм послідовного придушення інтерференції.

Для перевірки ефективності даного підходу та його порівняння з еталонними мережами було розроблено імітаційну модель фізичного рівня низхідного каналу у програмному середовищі Python. Проведене комп'ютерне моделювання з використанням методу Монте-Карло дозволило отримати наступні практичні результати:

- За ідеальних умов радіообміну (Perfect CSI) система NOMA забезпечує чистий приріст сумарної пропускної здатності на 20–30% порівняно з ОМА, дозволяючи всім абонентам кластера одночасно використовувати 100% доступного спектра.
- Технологія продемонструвала критичну алгоритмічну вразливість до похибок оцінки стану радіоканалу. Навіть незначні неточності на рівні 2–8% генерують лавиноподібну залишкову інтерференцію під час SIC-декодування, що різко обмежує максимальну швидкість мережі та зводить нанівець переваги неортогонального доступу.
- Доведено необхідність жорсткого компромісу при розподілі енергетичних ресурсів: для стабільної роботи мережі та забезпечення справедливості обслуговування (User Fairness) базова станція змушена

виділяти близько 80% потужності пристроям на краю соти, свідомо знижуючи пікові швидкості абонентів із найкращим рівнем сигналу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному підході до аналізу технології NOMA, який об'єднує фундаментальну теорію передачі інформації з прикладним моделюванням деструктивного впливу реальних фізичних факторів. Замість класичної ідеалізованої картини, у роботі наочно візуалізовано фундаментальні обмеження неортогонального доступу та детально розібрано механіку балансування між максимальною ємністю мережі та якістю обслуговування окремих користувачів.

Прикладне значення роботи полягає в тому, що розроблена математична та програмна архітектура може бути безпосередньо використана інженерами для оптимізації алгоритмів управління радіоресурсами при розгортанні комерційних мереж 5G. Крім того, створений програмний скрипт є гнучким аналітичним інструментом, який підходить для подальших досліджень або може слугувати як навчальний макет у профільних технічних закладах освіти.

Таким чином, усі поставлені цілі дослідження були досягнуті.

Отримані результати переконливо доводять доцільність та високу перспективність впровадження технології NOMA для потреб сучасних телекомунікаційних мереж, за обов'язкової умови інтеграції високоточних предиктивних алгоритмів оцінки стану радіоефіру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 3GPP TS 38.300, “NR; Overall description; Stage 2 (Release 16),” 3GPP, 2020. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.300/38300-h30.zip
2. Ding et al., “A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends,” IEEE, 2017. <https://arxiv.org/abs/1706.05347>
3. Islam et al., “Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges,” IEEE, 2016. <https://arxiv.org/abs/1609.06261>
4. Liu et al., “Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond,” Proceedings of the IEEE, 2018. <https://arxiv.org/abs/1808.00277>
5. Ding et al., “Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems,” IEEE Communications Letters, 2015. <https://arxiv.org/abs/1410.5846>
6. Li et al., “Uplink Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Networks,” IEEE, 2017. <https://arxiv.org/abs/1705.04108>
7. Lv et al., “Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing,” IEEE, 2018. <https://arxiv.org/abs/1801.04022>
8. Coelho et al., “Detection for 5G-NOMA: An Online Adaptive Machine Learning Approach,” IEEE, 2017. <https://arxiv.org/abs/1711.00355>
9. Shirvanimoghaddam et al., “Grant-free Non-orthogonal Multiple Access for IoT: A Survey,” IEEE, 2019. <https://arxiv.org/abs/1910.06529>
10. Maraqa et al., “A Survey of Rate-optimal Power Domain NOMA with Enabling Technologies of Future Wireless Networks,” IEEE, 2019. <https://arxiv.org/abs/1909.08011>
11. Makki et al., “Non-Orthogonal Multiple Access: Common Myths and Critical Questions,” IEEE, 2018. <https://arxiv.org/abs/1809.07224>

- 12.Ding et al., “Unveiling the Importance of SIC in NOMA Systems: Part I -- State of the Art and Recent Findings,” IEEE, 2020.
<https://arxiv.org/abs/2005.10215>
- 13.Ding et al., “Unveiling the Importance of SIC in NOMA Systems: Part II: New Results and Future Directions,” IEEE, 2020.
<https://arxiv.org/abs/2005.10217>
- 14.Salem et al., “NOMA Made Practical: Removing the Receive SIC Processing through Interference Exploitation,” IEEE, 2022.
<https://arxiv.org/abs/2210.08335>
- 15.Wang et al., “Towards the Standardization of Non-orthogonal Multiple Access for Next Generation Wireless Networks,” IEEE, 2018.
<https://arxiv.org/abs/1802.03880>
- 16.Wu et al., “Resource Management in Non-orthogonal Multiple Access Networks for 5G and Beyond,” IEEE, 2016.
<https://arxiv.org/abs/1610.09465>
- 17.Bera et al., “A Comprehensive Survey of 5G URLLC and Challenges in the 6G Era,” arXiv, 2025. <https://arxiv.org/abs/2508.20205>
- 18.Hossain et al., “Data-Driven Random Access Optimization in Multi-Cell IoT Networks with NOMA,” IEEE, 2021. <https://arxiv.org/abs/2101.00464>
- 19.Wang et al., “A Survey: Non-Orthogonal Multiple Access with Compressed Sensing Multiuser Detection for mMTC,” IEEE, 2018.
<https://arxiv.org/abs/1810.05422>
- 20.Nguyen et al., “Deep Q-Network for Optimizing NOMA-Aided Resource Allocation in Smart Factories with URLLC Constraints,” IEEE, 2025.
<https://arxiv.org/abs/2511.00765>

ДОДАТОК А

Лістинг програмного коду моделювання базової моделі

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметри симуляції
N = 50000 # Кількість ітерацій Монте-Карло
SNR_dB = np.arange(0, 41, 5) # Діапазон SNR від 0 до 40 дБ
SNR_linear = 10**(SNR_dB / 10)

# Дисперсія каналів (відображає Near та Far користувачів)
var_h1 = 1.0 # Близький користувач (сильний канал)
var_h2 = 0.1 # Дальній користувач (слабкий канал)

# Розподіл потужності NOMA (дальньому виділяємо більше енергії)
a1 = 0.2
a2 = 0.8

R_NOMA_avg = []
R_OMA_avg = []

for snr in SNR_linear:
    # Генерація Релеївських каналів зв'язку
    h1 = np.sqrt(var_h1/2) * (np.random.randn(N) + 1j *
np.random.randn(N))
    h2 = np.sqrt(var_h2/2) * (np.random.randn(N) + 1j *
np.random.randn(N))

    g1 = np.abs(h1)**2
    g2 = np.abs(h2)**2

    # Розрахунок NOMA
    SINR_2_NOMA = (snr * a2 * g2) / (snr * a1 * g2 + 1)
    SINR_1_NOMA = (snr * a1 * g1) / 1

    R_NOMA = np.log2(1 + SINR_1_NOMA) + np.log2(1 + SINR_2_NOMA)

    # Розрахунок OMA
    R_OMA = 0.5 * np.log2(1 + snr * g1) + 0.5 * np.log2(1 + snr * g2)

    R_NOMA_avg.append(np.mean(R_NOMA))
    R_OMA_avg.append(np.mean(R_OMA))

```

```
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(SNR_dB, R_NOMA_avg, 'b-', linewidth=2.5, label='Система NOMA')
plt.plot(SNR_dB, R_OMA_avg, 'r--', linewidth=2.5, label='Система OMA
(OFDMA)')
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
plt.xlabel('Відношення сигнал/шум, SNR (дБ)', fontsize=12)
plt.ylabel('Спектральна ефективність (біт/с/Гц)', fontsize=12)
plt.title('Порівняння пропускної здатності NOMA та OMA', fontsize=14)
plt.legend(fontsize=12)
```

ДОДАТОК Б

Лістинг програмного коду моделювання базової моделі

```

import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

N = 50000 # Кількість ітерацій Монте-Карло

SNR_dB = np.arange(0, 41, 5) # Діапазон SNR

SNR_linear = 10**(SNR_dB / 10)

# Дисперсія каналів

var_h1 = 1.0 # Близький користувач

var_h2 = 0.1 # Дальній користувач

# Коефіцієнти потужності NOMA

a1 = 0.2

a2 = 0.8

# Рівні похибки оцінки каналу (дисперсія помилки)

error_variances = [0, 0.02, 0.08]

labels = ['Ідеальна CSI (похибка 0%)', 'Недосконала CSI (похибка 2%)',
'Недосконала CSI (похибка 8%)']

line_styles = ['b-', 'g--', 'r-.']

results = {var: [] for var in error_variances}

for snr in SNR_linear:

    # Генерація каналів

```

```

    h1 = np.sqrt(var_h1/2) * (np.random.randn(N) + 1j *
np.random.randn(N))

    h2 = np.sqrt(var_h2/2) * (np.random.randn(N) + 1j *
np.random.randn(N))

    g1 = np.abs(h1)**2

    g2 = np.abs(h2)**2

    for var_err in error_variances:

        if var_err == 0:

            # Ідеальна CSI

            SINR_1 = (snr * a1 * g1) / 1

            SINR_2 = (snr * a2 * g2) / (snr * a1 * g2 + 1)

        else:

            # Недосконала CSI: залишкова інтерференція

            error_channel = np.sqrt(var_err/2) * (np.random.randn(N) +
1j * np.random.randn(N))

            residual_interference = snr * a2 *
np.abs(error_channel)**2

            SINR_1 = (snr * a1 * g1) / (residual_interference + 1)

            SINR_2 = (snr * a2 * g2) / (snr * a1 * g2 + 1)

    R_sum = np.log2(1 + SINR_1) + np.log2(1 + SINR_2)

    results[var_err].append(np.mean(R_sum))

# Побудова графіка

plt.figure(figsize=(8, 6))

```

```
for i, var_err in enumerate(error_variances):  
    plt.plot(SNR_dB, results[var_err], line_styles[i], linewidth=2.5,  
label=labels[i])  
  
plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)  
plt.xlabel('Відношення сигнал/шум, SNR (дБ)', fontsize=12)  
plt.ylabel('Спектральна ефективність (біт/с/Гц)', fontsize=12)  
plt.title('Вплив похибки оцінки каналу (Imperfect CSI) на систему  
NOMA', fontsize=14)  
plt.legend(fontsize=12)
```

ДОДАТОК В

Лістинг програмного коду моделювання оптимізації розподілу потужності

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# Параметри симуляції
N = 50000 # Кількість ітерацій Монте-Карло
snr_dB = 25 # Фіксований рівень SNR
snr = 10**(snr_dB / 10)

# Дисперсія каналів
var_h1 = 1.0 # Близній користувач (сильний канал)
var_h2 = 0.1 # Дальній користувач (слабкий канал)

# Діапазон зміни коефіцієнта потужності для дальнього користувача (від 50% до 95%)
a2_range = np.linspace(0.5, 0.95, 50)

R_near_avg = []
R_far_avg = []
R_sum_avg = []

# Попередня генерація каналів для всіх ітерацій
h1 = np.sqrt(var_h1/2) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N))
h2 = np.sqrt(var_h2/2) * (np.random.randn(N) + 1j * np.random.randn(N))
g1 = np.abs(h1)**2
g2 = np.abs(h2)**2

for a2 in a2_range:
    a1 = 1 - a2 # Залишок потужності йде ближньому

    # Розрахунок SINR та пропускної здатності для NOMA
    SINR_2 = (snr * a2 * g2) / (snr * a1 * g2 + 1)
    SINR_1 = (snr * a1 * g1) / 1

    R_near = np.log2(1 + SINR_1)
    R_far = np.log2(1 + SINR_2)
    R_sum = R_near + R_far

    R_near_avg.append(np.mean(R_near))
    R_far_avg.append(np.mean(R_far))
    R_sum_avg.append(np.mean(R_sum))

```

```

# Побудова графіка
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(a2_range, R_sum_avg, 'k-', linewidth=2.5, label='Сумарна
швидкість (Sum Rate)')
plt.plot(a2_range, R_near_avg, 'b--', linewidth=2.5, label='Ближній
користувач (Near User)')
plt.plot(a2_range, R_far_avg, 'r-.', linewidth=2.5, label='Дальній
користувач (Far User)')

plt.grid(True, linestyle=':', alpha=0.7)
plt.xlabel('Частка виділеної потужності дальньому користувачу (a2)',
fontsize=12)
plt.ylabel('Спектральна ефективність (біт/с/Гц)', fontsize=12)
plt.title('Вплив розподілу потужності на продуктивність NOMA',
fontsize=14)
plt.legend(fontsize=12)

```