ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: «ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ У МЕРЕЖАХ 6G»

на здобуття освітнього ступеня магістра
зі спеціальності 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)

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

_____ Ілля КАНЄВСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

Виконав: здобувач вищої освіти гр. _ТСДМ-62_
Ілля КАНЄВСЬКИЙ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник: Вікторія КОРЕЦЬКА
к.п.н., доцент *Ім'я, ПРІЗВИЩЕ*

Рецензент: _____
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Київ 2025

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут Телекомунікацій

Кафедра ___Телекомунікаційних систем та мереж_____
Ступінь вищої освіти __магістр_____
Спеціальність ___172 Електронні комунікації та радіотехніка _____
Освітньо-професійна програма _____Телекомунікаційні системи та мережі_____

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри __ТСМ_____
_____ Віктор ЗАЇКА
«____» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Канєвському Іллі Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Застосування технологій множинного доступу у мережах 6G
керівник кваліфікаційної роботи Вікторія КОРЕЦЬКА, к.п.н., доцент
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій від «30» 10. 2025 р. № 467

2. Строк подання кваліфікаційної роботи «___» _____ 2025 р.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи:
1. 6G.
2. Множинний доступ.
3. DELTA-OMA.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Розділення спектру. Частотно-часовий поділ.
2. Поділ за потужністю.
3. Розподілення з використанням кодів.
4. DELTA-OMA як новий метод множинного масового доступу в 6G.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: ___презентація на ____слайдах_____

6. Дата видачі завдання «___» _____ 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір та аналіз науково-технічної літератури	20.10.2025	Викон.
2	Розробка першого розділу	27.10.2025	Викон.
3	Розробка другого розділу	07.11.2025	Викон.
4	Розробка третього розділу	17.11.2025	Викон.
5	Розробка четвертого розділу	27.11.2025	Викон.
6	Висновки, вступ, реферат	07.12.2025	Викон.
7	Розробка презентації	17.12.2025	Викон.

Здобувач вищої освіти _____ Ілля КАНЄВСЬКИЙ
(підпис) *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

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

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Навчально-науковий інститут телекомунікацій
ПОДАННЯ
ГОЛОВІ ЕКЗАМЕНАЦІЙНОЇ КОМІСІЇ
ЩОДО ЗАХИСТУ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
на здобуття освітнього ступеня магістра

Направляється здобувач Канєвський І.С. до захисту кваліфікаційної роботи
(прізвище та ініціали)
за спеціальністю 172 Електронні комунікації та радіотехніка
(код, найменування спеціальності)
освітньо-професійної програми Телекомунікаційні системи та мережі
(назва)
на тему: «Застосування технологій множинного доступу у мережах 6G»

Кваліфікаційна робота і рецензія додаються.

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

Висновок керівника кваліфікаційної роботи

Здобувач Канєвський Ілля Сергійович показав гарну теоретичну та інженерну підготовку, уміння володіти новими комп'ютерними технологіями, користуватися навчальною, довідковою і науково-технічною літературою. Працюючи над завданнями, які були поставлені керівником, проявив ініціативність, сумлінність та хист до наукової роботи.

Все це дозволяє оцінити виконану кваліфікаційну роботу здобувача Канєвського Іллі Сергійовича на оцінку «відмінно» та присвоїти йому кваліфікацію магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.

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

«____» _____ 20___ року

Висновок кафедри про кваліфікаційну роботу

Кваліфікаційна робота розглянута. Здобувач Канєвський І.С. допускається до захисту даної роботи в Екзаменаційній комісії.

Завідувач кафедри телекомунікаційних систем та мереж _____ Віктор ЗАЇКА
(назва) *(підпис)* *(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)*

«____» _____ 20___ року

ВІДГУК РЕЦЕНЗЕНТА
на кваліфікаційну роботу
на здобуття освітнього ступеня магістра

здобувача вищої освіти Канєвського Іллі Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)
на тему «Застосування технологій множинного доступу у мережах 6G»

Актуальність.
Сучасний етап розвитку телекомунікаційних систем характеризується вибуховим зростанням кількості користувачів та пристроїв, що потребують постійного підключення до мережі. Із переходом до ери Інтернету речей (IoT), автономного транспорту та інтелектуальних міст виникає потреба у створенні мобільних мереж шостого покоління (6G), здатних забезпечити надвисоку швидкість передавання даних, мінімальні затримки та масштабованість. Одним із ключових напрямів досягнення цих цілей є вдосконалення методів множинного доступу. Робота присвячена системному аналізу та узагальненню технологій OMA та NOMA, що формують основу архітектури сучасних і майбутніх систем зв'язку. Таким чином, дослідження є актуальним і відповідає сучасним тенденціям розвитку телекомунікацій та вимогам 6G.
Позитивні сторони.
1. Особливу увагу приділено аналізу PD-NOMA та її похідних (Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA), які дозволяють гнучко розподіляти потужність і ефективніше використовувати радіоресурс.
2. В роботі враховано актуальні напрями досліджень у сфері 5G/6G, включаючи інтеграцію з MIMO та штучним інтелектом.
Недоліки.
1. У роботі відсутні графіки залежностей, розрахунки пропускної здатності, енергоспоживання чи затримок у різних схемах множинного доступу..
2. У тексті подано опис технологій, але не проведено порівняльну оцінку їх ефективності, складності чи придатності для 6G.

Відзначені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку магістерської кваліфікаційної роботи

Висновок: *кваліфікаційна робота на здобуття ступеня магістра заслуговує оцінку "відмінно", а здобувач Канєвський Ілля Сергійович заслуговує присвоєння кваліфікації: магістр з електронних комунікацій та радіотехніки.*

Рецензент
науковий ступінь, вчене звання _____ (підпис) _____ *(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)*

РЕФЕРАТ

Текстова частина кваліфікаційної роботи на здобуття освітнього ступеня магістра: 79 стор., 25 рис., 25 джерел.

Мета роботи – аналіз, систематизація та узагальнення сучасних і перспективних технологій множинного доступу (OMA та NOMA), визначення напрямів їх удосконалення для підвищення спектральної ефективності, енергетичної стійкості та пропускної здатності мереж 6G.

Об’єкт дослідження – процеси організації множинного доступу в безпроводових телекомунікаційних системах, що забезпечують одночасний доступ великої кількості користувачів до спільного радіоресурсу.

Предмет дослідження – методи, алгоритми та технології ортогонального (OMA) і неортогонального (NOMA) множинного доступу, їх модифікації (OFDMA, SC-FDMA, PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, SEFDM, OTFS тощо) та їх вплив на ефективність функціонування телекомунікаційних систем нового покоління.

Короткий зміст роботи: у роботі досліджено сучасні та перспективні технології множинного доступу, які формують основу мобільних мереж шостого покоління (6G). Основну увагу приділено неортогональним технологіям NOMA, зокрема PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA та MN-NOMA, які забезпечують ефективніше використання спектра й гнучкий розподіл потужності. Розглянуто також модифікації OFDM — FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM, SEFDM, OTFS — що підвищують стійкість до завад і спектральну ефективність. Підкреслено, що поєднання ортогональних і неортогональних методів із масивними MIMO та інтелектуальним управлінням є ключем до реалізації архітектури 6G.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: МНОЖИННИЙ ДОСТУП, 6G, OFDMA, NOMA, PD-NOMA, CO-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA, SCMA, LDS-CDMA, СПЕКТРАЛЬНА ЕФЕКТИВНІСТЬ, РОЗПОДІЛ ПОТУЖНОСТІ

ABSTRACT

Text part of the master's qualification work: 79 pages, 25 figures, 25 sources.

The purpose of the work is to analyze, systematize and generalize modern and promising multiple access technologies (OMA and NOMA), to identify areas for their improvement to increase spectral efficiency, energy stability and bandwidth of 6G networks.

Object of the study is the processes of organizing multiple access in wireless telecommunication systems, which provide simultaneous access of a large number of users to a common radio resource.

Subject of the study is methods, algorithms and technologies of orthogonal (OMA) and non-orthogonal (NOMA) multiple access, their modifications (OFDMA, SC-FDMA, PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, SEFDM, OTFS, etc.) and their impact on the efficiency of the functioning of new generation telecommunication systems.

Summary of the work: the work investigates modern and promising multiple access technologies that form the basis of sixth generation mobile networks (6G). The main attention is paid to the non-orthogonal NOMA technologies, in particular PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA and MN-NOMA, which provide more efficient use of the spectrum and flexible power allocation. The modifications of OFDM — FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM, SEFDM, OTFS — that increase immunity to interference and spectral efficiency are also considered. It is emphasized that the combination of orthogonal and non-orthogonal methods with massive MIMO and intelligent control is the key to implementing the 6G architecture.

KEYWORDS: MULTIPLE ACCESS, 6G, OFDMA, NOMA, PD-NOMA, CO-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA, SCMA, LDS-CDMA, SPECTRAL EFFICIENCY, POWER ALLOCATION

ЗМІСТ

ВСТУП 9
РОЗДІЛ 1 РОЗДІЛЕННЯ СПЕКТРУ. ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ ПОДІЛ 11
1.1 Види множинного доступу 11
1.2 Технології OFDM та OFDMA 17
1.3 Модифікації OFDMA 23
РОЗДІЛ 2 ПОДІЛ ЗА ПОТУЖНІСТЮ 30
2.1 Доступ із поділом по потужності (PD-NOMA) 30
2.2 Кооперативний NOMA (Co-NOMA) 32
2.3 Об'єднання PD-NOMA з іншими методами множинного доступу 36
РОЗДІЛ 3 РОЗПОДІЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОДІВ 45
3.1 Множинний доступ з ортогональним кодовим поділом (CDMA) 45
3.2 Множинний доступ із використанням LAS-кодів (LAS-CDMA) 48
3.3 Множинний доступ з кодовим поділом з кодами низької щільності (LDS-CDMA) 52
3.4 Множинний доступ із бітовим розділенням 58
РОЗДІЛ 4 DELTA-OMA ЯК НОВИЙ МЕТОД МНОЖИННОГО МАСОВОГО ДОСТУПУ В 6G 63
4.1 Основні поняття 63
4.2 Безсотова архітектура для майбутніх безпроводових мереж 71
4.3 Множинний доступ 74
ВИСНОВКИ 78
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 80
ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ 83

ВСТУП

Сучасний етап розвитку телекомунікацій характеризується стрімким зростанням вимог до швидкості передачі даних, стабільності з'єднання, надійності та ефективності використання спектра. Поява мереж п'ятого покоління (5G) вже забезпечила суттєвий прорив у продуктивності та масштабованості, однак із прогнозованим поширенням мільярдів пристроїв інтернету речей (IoT), розвитком інтелектуальних міст, систем автономного транспорту, промислової автоматизації та інтеграцією з неназемними сегментами (NTN) потреби користувачів і бізнесу зростають ще швидше. У таких умовах стає очевидним, що для реалізації концепції гіперпідключеного світу необхідним є перехід до мереж шостого покоління (6G), де ключову роль відіграватимуть новітні технології множинного доступу.

Традиційні методи доступу, такі як FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA, забезпечили розвиток поколінь від 1G до 4G, однак із зростанням навантаження вони вичерпали свій потенціал. У 5G відбулося поєднання OFDMA з новими підходами, зокрема із NOMA, що дозволило підвищити спектральну ефективність і збільшити кількість одночасно обслуговуваних абонентів. Проте завдання, які ставляться перед 6G, значно ширші: необхідно обслуговувати надзвичайно велику кількість користувачів та пристроїв, мінімізувати затримки, забезпечити роботу у складних сценаріях високої мобільності й інтегрувати наземні та супутникові сегменти в єдину систему.

У цьому контексті особливе значення мають неортогональні методи доступу (NOMA) та їхні модифікації, серед яких PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA. Вони дозволяють ефективніше розподіляти ресурси спектра та потужності, забезпечуючи гнучке управління якістю обслуговування. Не менш важливими є технології бітового розділення (BDM, CEMA, REMA, EDC-NOMA) та новітні підходи, такі як BOMA, що базуються на використанні розширених та розріджених сигнальних сузір'їв. Поряд із цим активно розвиваються методи кодового домену (SCMA, LDS-CDMA/OFDM), які

забезпечують можливість обслуговувати більшу кількість користувачів, ніж кількість доступних піднесучих.

Окрему увагу слід приділити модифікаціям класичних технологій — FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM, W-OFDM, SEFDM, OTFS. Вони спрямовані на подолання недоліків OFDM, забезпечуючи більшу стійкість до багатопроменевих спотворень, ефекту Доплера та міжсимвольної інтерференції. Особливо перспективною вважається OTFS, здатна підтримувати стабільність роботи в умовах швидкісного руху об’єктів, та SEFDM, яка підвищує спектральну ефективність за рахунок ущільнення піднесучих.

Таким чином, дослідження технологій множинного доступу для мереж 6G є надзвичайно актуальним завданням, оскільки саме вони формують основу архітектури майбутніх систем мобільного зв’язку. Впровадження інноваційних рішень у цій сфері забезпечить можливість реалізації концепції повсюдного підключення, обслуговування критично важливих застосувань та підтримки цифрової трансформації суспільства.

1 РОЗДІЛЕННЯ СПЕКТРУ. ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ ПОДІЛ

1.1 Види множинного доступу

Сучасний етап розвитку інформаційно-комунікаційних технологій характеризується надзвичайно швидким прогресом у сфері беспроводового зв’язку. Стрімке поширення стільникових систем п’ятого та шостого поколінь (5G та 6G), інтеграція концепції Інтернету речей (IoT), удосконалення супутникових мереж та поява гібридних архітектур визначають нові підходи до організації глобальної інфраструктури комунікацій. Одним із ключових завдань, що постає перед науковцями та інженерами, є забезпечення можливості однією радіосистемою обслуговувати максимально велику кількість користувачів і пристроїв. Це завдання безпосередньо пов’язане з ефективною організацією множинного доступу до радіоресурсів, адже саме від цього залежить ємність мережі, якість сервісів і стійкість системи до зростаючих навантажень.

Традиційні технології множинного доступу, такі як TDMA (time division multiple access), FDMA (frequency division multiple access) та CDMA (code division multiple access), забезпечили надійне функціонування мереж попередніх поколінь (від 1G до 4G). Вони дозволяли розділяти користувачів у часі, частоті чи кодовому просторі, що було ефективним на початкових етапах розвитку мобільного зв’язку. Однак у сучасних умовах, коли кількість підключень обчислюється мільярдами, а вимоги до швидкості передавання даних, затримок і надійності значно зросли, можливостей класичних методів уже не вистачає. Обмежена спектральна ефективність, неможливість масштабування до рівня масових машинних комунікацій та недостатня гнучкість у підтримці різнорідних сервісів змушують розробників шукати нові рішення.

Сьогодні перед галуззю постає необхідність створення нових, більш продуктивних і ємних методів множинного доступу, які б враховували як технічні обмеження, так і потреби майбутніх мереж. Такі підходи повинні не лише збільшувати ефективність використання спектра, а й забезпечувати гнучкий

розподіл ресурсів, стійкість до інтерференції, підтримку різних категорій сервісів — від високошвидкісного відео до сенсорних систем із мінімальним трафіком.

У цьому контексті важливим є аналіз і порівняння як уже впроваджених, так і перспективних технологій множинного доступу. Саме тому дана стаття відкриває серію матеріалів, у яких буде здійснено детальний огляд еволюції підходів до організації доступу. Розглядатимуться як класичні рішення, що стали основою перших поколінь мобільного зв'язку, так і сучасні та майбутні технології, що перебувають на стадії теоретичного або практичного впровадження.

У першій частині дипломної роботи увагу буде зосереджено на технологіях, що реалізують принципи поділу користувачів у часі й частоті, а також на комбінованих схемах. Буде розглянуто розвиток TDMA та FDMA, які започаткували еру мобільного зв'язку, а також їхні сучасні модифікації, серед яких особливе місце посідає OFDMA (orthogonal frequency-division multiple access), що використовується у 4G та 5G. Крім того, увагу буде приділено перспективним варіаціям, таким як SEFDM (spectrally efficient frequency division multiplexing) та OTFS (orthogonal time frequency space), які сьогодні розглядаються як потенційні технологічні основи для наступних поколінь беспроводових систем.

Таким чином, завдання ефективної організації множинного доступу в умовах стрімкого зростання вимог до беспроводових мереж стає одним із центральних у розвитку телекомунікацій. Його розв'язання визначить, наскільки успішними будуть 6G і наступні покоління зв'язку у забезпеченні потреб цифрового суспільства, промисловості, транспорту й «розумних» екосистем майбутнього.

Методи множинного доступу та їх еволюція

У телекомунікаційних системах ключовим завданням завжди було забезпечення можливості одночасного доступу до радіоефіру багатьох користувачів. Саме це завдання розв'язують методи множинного доступу, які визначають принципи розподілу обмежених ресурсів серед абонентів. У науковій та технічній літературі для позначення цього явища часто використовується й термін «методи мультиплексування», що підкреслює їхню роль у спільному використанні каналів передачі даних.

Сучасна класифікація методів множинного доступу ґрунтується на двох основних підходах: ортогональному (OMA — orthogonal multiple access) та неортогональному (NOMA — non-orthogonal multiple access).

Ортогональний множинний доступ (OMA) передбачає чітке розділення користувачів у межах доступного спектра за допомогою ортогональних сигналів. З математичної точки зору два сигнали є ортогональними, якщо інтеграл від їх добутку дорівнює нулю. Це означає, що такі сигнали не створюють взаємних завад і можуть передаватися одночасно без інтерференції. Основною перевагою OMA є відсутність міжканальних перешкод, що забезпечує простоту приймання та високу надійність демодуляції. Саме завдяки цим властивостям OMA довгий час був основою мобільних систем — від перших аналогових мереж 1G до цифрових 4G, у яких використовувався OFDMA.

Проте з розвитком мобільного зв’язку, зростанням кількості пристроїв і появою нових сервісів (від потокового відео до масових сенсорних мереж і технологій «розумного» міста) можливості OMA почали обмежувати потенціал систем. Головна проблема полягає у тому, що жорстка ортогональність сигналів хоча й запобігає інтерференції, але водночас знижує спектральну ефективність, оскільки кожен підканал може обслуговувати лише одного користувача. В умовах дефіциту частотних ресурсів та необхідності підключення мільйонів пристроїв це стає суттєвим недоліком.

Саме тому в останні роки на перший план виходять технології неортогонального множинного доступу (NOMA). На відміну від OMA, вони допускають використання неортогональних сигналів і навіть цілеспрямовано вводять контрольовану міжканальну інтерференцію. Це дозволяє значно підвищити спектральну ефективність, адже один і той самий ресурсний блок може бути використаний одночасно кількома користувачами. На приймальній стороні для поділу таких сигналів застосовуються спеціальні алгоритми компенсації завад, серед яких найбільш поширеним є послідовне скасування інтерференції (SIC — successive interference cancellation). Завдяки цьому сигнали користувачів

відновлюються по черзі, починаючи з тих, що мають вищий рівень потужності, і закінчуючи слабшими.

Важливо зазначити, що NOMA була розроблена як відповідь на потреби новітніх поколінь мобільного зв’язку — насамперед 5G та 6G. Вона дозволяє одночасно обслуговувати значно більшу кількість користувачів, забезпечуючи високі швидкості передачі даних, гнучке керування ресурсами й можливість підтримки різних типів сервісів — від eMBB (enhanced mobile broadband) до URLLC (ultra-reliable low-latency communication) і mMTC (massive machine type communications).

Щоб краще зрозуміти логіку роботи цих методів, доцільно ввести поняття ресурсного простору. Під ним розуміють будь-яку фізичну характеристику електромагнітної хвилі, яку можна використати для передачі інформації. У радіозв’язку доступними є лише сім незалежних ресурсних просторів: час, частота, код, потужність, просторове положення, поляризація та орбітальний кутовий момент. Саме комбінації цих просторів і визначають, які методи множинного доступу можуть бути реалізовані на практиці.

Сьогодні у науковій літературі описано понад сотню різних методів множинного доступу та їх модифікацій. Багато з них є комбінованими, тобто використовують два або більше ресурсних простори одночасно. Наприклад, у перспективних технологіях SEFDM і OTFS, які вже розглядаються як кандидати для впровадження у 6G, комбінується часово-частотний та просторовий розподіл, що дозволяє досягати ще більшої ефективності у використанні спектра.

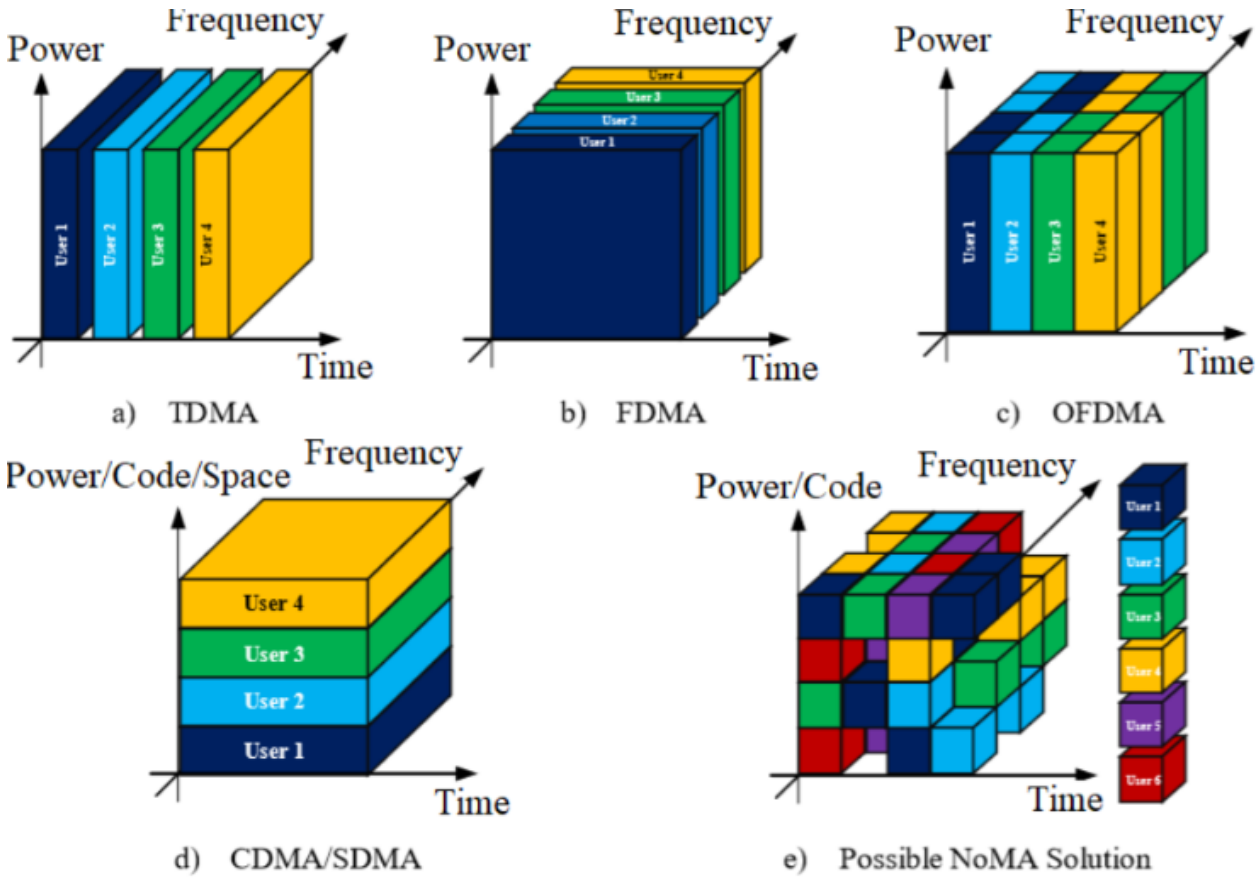


Рис. 1.1 Різні варіанти поділу ресурсних просторів у методах ортогонального і неортогонального множинного доступу: a) з поділом за часом (TDMA); b) з поділом за частотою (FDMA); c) з ортогональним поділом за частотою (OFDMA); неортогонального множинного доступу з поділом абонентів у кількох ресурсних просторах (потужність/код, частота, час)

Узагальнюючи, можна сказати, що OMA — це методи, які зробили можливим розвиток мобільних мереж від 1G до 4G, забезпечивши простоту й надійність роботи систем. Водночас NOMA та інші неортогональні підходи є відповіддю на виклики цифрової епохи, адже вони дозволяють створювати масштабовані, гнучкі та високоефективні мережі, що відповідають потребам 5G, 6G і навіть майбутніх поколінь. Саме вони формують основу для підтримки мільярдів пристроїв, інтеграції IoT, розвитку голографічних комунікацій, тактильного Інтернету та автономних систем у найближчі десятиліття.

Методи TDMA та FDMA у системах множинного доступу

Одними з найперших і водночас найпростіших методів організації множинного доступу в беспроводових системах стали технології з часовим та частотним

розділенням каналів. Вони відіграли ключову роль у розвитку стільникового зв’язку перших поколінь і заклали основу для подальших досліджень у сфері підвищення ефективності використання радіоресурсів.

Множинний доступ із часовим розділенням (TDMA)

TDMA (time division multiple access) вважається одним із найбільш інтуїтивно зрозумілих способів організувати роботу кількох користувачів у межах однієї радіосистеми. Його принцип полягає в тому, що один і той самий частотний канал надається кільком абонентам по черзі, у визначені часові інтервали — тайм-слоти. Кожен користувач у межах свого слота може передавати або приймати інформацію, після чого ресурс переходить до іншого абонента.

Така схема забезпечує відсутність конфліктів у доступі до каналу, оскільки передавання здійснюється строго за графіком. Проте у разі, коли користувач не використовує свій слот повністю, частина ресурсу простоює, що негативно впливає на загальну ефективність системи.

Метод TDMA ліг в основу перших цифрових мобільних стандартів. Найбільш відомими прикладами його застосування є GSM та D-AMPS, які започаткували масове використання стільникового зв’язку другого покоління (2G). Завдяки TDMA стало можливим обслуговувати одночасно значну кількість абонентів у межах обмеженого спектра, проте вже тоді почали проявлятися його обмеження у плані масштабованості та продуктивності.

Множинний доступ із частотним розділенням (FDMA)

Ще одним базовим методом є FDMA (frequency division multiple access). Його суть полягає у виділенні кожному абоненту окремої смуги частот Δf, яка залишається зарезервованою за ним на весь час з’єднання. Це робить технологію дуже простою у реалізації, оскільки вона не потребує складних механізмів синхронізації. Канали різних користувачів не накладаються один на одного, що мінімізує ймовірність взаємних завад.

Головним недоліком FDMA є його низька спектральна ефективність. Якщо користувач у певний момент не активний, його частотний канал залишається незайнятим, і система не може використати цей ресурс для інших абонентів.

Незважаючи на це, FDMA довгий час залишався основою для аналогових систем мобільного зв’язку першого покоління (1G), де ширина одного каналу зазвичай становила від 10 до 30 кГц. Також принципи FDMA широко використовуються і сьогодні у системах радіо- та телевізійного мовлення: наприклад, при амплітудній модуляції (AM) ширина каналу становить близько 9 кГц, при частотній модуляції (FM) — від 25 до 50 кГц, а у випадку телебачення — близько 8 МГц.

Комбіновані рішення: MF-TDMA

На практиці для підвищення ефективності обидва методи — TDMA і FDMA — часто використовуються спільно. Одним із прикладів такої інтеграції є технологія MF-TDMA (multi-frequency time-division multiple access), яка широко застосовується у супутниковому зв’язку. У цьому випадку кожному користувачу надається не лише набір часових слотів, але й певна кількість частотних каналів. Це дозволяє гнучко адаптувати систему під різні категорії абонентів: одним можна виділити ширші частотні канали на довші часові інтервали, іншим — вужчі смуги на коротші слоти.

Комбіноване використання часових і частотних ресурсів суттєво підвищує ефективність системи та робить її більш універсальною. Саме тому підхід MF-TDMA став основою для побудови сучасних супутникових мереж, у яких обслуговуються як канали передачі даних, так і канали мовлення.

1.2 Технології OFDM та OFDMA

Серед сучасних методів модуляції та організації передачі даних особливе місце займає ортогональне мультиплексування з частотним розділенням — OFDM (orthogonal frequency division multiplexing). Ця технологія стала основою для стандартів 4G, LTE та WiMAX, а також активно використовується як складова майбутніх систем зв’язку. Її поява була зумовлена необхідністю забезпечити високу швидкість передавання інформації при обмежених ресурсах спектра, зберігаючи водночас стійкість до завад і багатопроменевого поширення сигналів.

Основна ідея OFDM полягає в тому, що загальний діапазон частот розбивається на велику кількість вузькосмугових підканалів (піднесучих), які не перекриваються між собою та є ортогональними. Кожен із цих підканалів передає дані з меншою швидкістю, але всі разом забезпечують високу загальну пропускну здатність. Такий підхід дозволяє організувати паралельну передачу даних, де одночасно модулюється та передається кілька потоків інформації. Для модуляції підканалів можуть застосовуватися різні методи — від простих (BPSK, QPSK, 8-PSK) до більш складних, таких як QAM із різними порядками сузір'їв. Гнучкість OFDM полягає в тому, що параметри модуляції (тип модуляції, швидкість кодування тощо) можна адаптувати окремо для кожної піднесучої залежно від умов поширення сигналу, що суттєво підвищує якість зв'язку.

Структура OFDM-модема передбачає передавальну й приймальну частини. На передаванні інформаційний потік бітів проходить канальне кодування, інтерлівірування (перемежування) і розподіл на N паралельних підпотоків. Кожен підпотік перетворюється на послідовність модульованих символів, які потім об'єднуються у єдиний сигнал за допомогою операції швидкого зворотного перетворення Фур'є (IFFT). Це забезпечує формування ортогональних піднесучих, які не створюють взаємних завад. Для запобігання міжсимвольній інтерференції в сигнал додаються захисні інтервали (guard intervals). Крім того, у складі сигналу використовуються пілот-сигнали, які забезпечують синхронізацію та корекцію фазових і частотних зсувів.

Після цифрової обробки сигнал проходить через цифро-аналогові перетворювачі, формується у вигляді дійсної та уявної компонент, які після фільтрації низьких частот подаються на квадратурний змішувач. Там відбувається перенесення сигналу на несучу частоту, підсилення та остаточне формування OFDM-потоку для передавання в ефір.

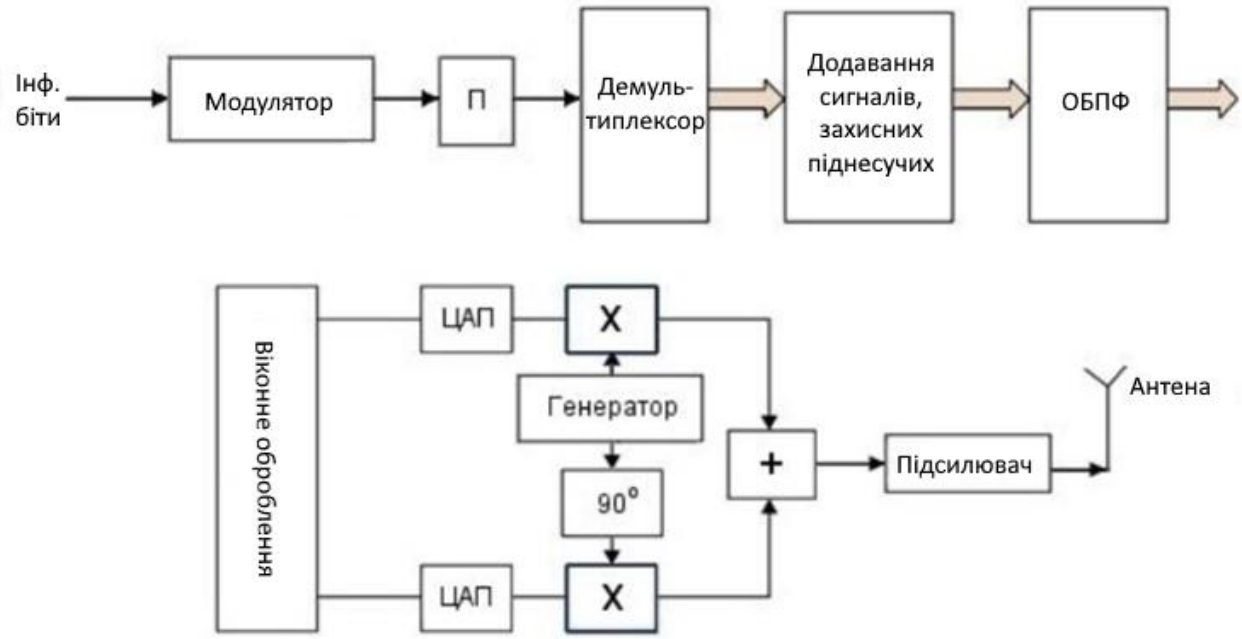


Рис. 1.2 Структурна схема технології OFDM

Особливу цінність OFDM демонструє у складних умовах поширення сигналу, де має місце багатопроменевість. У традиційних системах це призводить до значних спотворень та зростання імовірності помилок. В OFDM ця проблема вирішується завдяки вставці захисних інтервалів, тривалість яких перевищує максимальну затримку поширення в каналі. Таким чином вдається мінімізувати міжсимвольну інтерференцію (ISI) та інтерференцію між піднесучими (ICI). Додатково для зменшення позасмугових випромінювань застосовуються віконні функції, наприклад фільтрація сигналу «припіднятим косинусом».

Переваги OFDM

OFDM здобула популярність завдяки ряду ключових переваг, серед яких:

- висока стійкість до багатопроменевого поширення сигналів;
- надійність роботи в умовах вузькосмугових перешкод;
- ефективна компенсація міжсимвольної інтерференції;
- підвищена спектральна ефективність у порівнянні з класичними методами частотного поділу;
- можливість динамічної адаптації модуляційних схем для кожної піднесучої залежно від умов каналу;

- відносна простота цифрової реалізації завдяки використанню швидкого перетворення Фур’є.

Недоліки OFDM

Попри очевидні переваги, технологія має і певні недоліки:

- висока чутливість до частотних і часових зсувів, що вимагає постійної синхронізації за допомогою пілот-сигналів;
- наявність спектральних «стрибків» між символами, які спричиняють позасмугові випромінювання;
- високий рівень пікової потужності відносно середньої (PAPR), що ускладнює роботу підсилювачів;
- зниження спектральної ефективності через необхідність введення захисних інтервалів;
- чутливість до ефекту Доплера, особливо в умовах високошвидкісного руху;
- уразливість до нелінійних спотворень підсилювачів і до зсувів постійної складової під час цифрової обробки.

Значення OFDM у сучасних і майбутніх мережах

Технологія OFDM стала основою для стандартів 4G LTE, де забезпечила високі швидкості передавання даних та гнучкість управління спектром. Вона також використовується у системах WiMAX, супутникових і фіксованих беспроводових мережах. Водночас розвиток цієї технології не зупинився: на її базі створені такі модифікації, як OFDMA (orthogonal frequency division multiple access), де піднесучі можуть призначатися різним користувачам, а також перспективні рішення SEFDM (spectrally efficient frequency division multiplexing) та OTFS (orthogonal time frequency space). Вони покликані підвищити спектральну ефективність та адаптивність систем ще більше й вже розглядаються як кандидати для впровадження у 6G.

Таким чином, OFDM можна вважати ключовою віхою розвитку сучасних систем зв’язку, яка поєднала у собі гнучкість, високу стійкість до завад і простоту реалізації цифровими засобами. Вона стала відправною точкою для створення

нових методів, що дадуть змогу ще ефективніше використовувати обмежений радіочастотний ресурс та задовольняти зростаючі потреби цифрового суспільства.

Технологія OFDMA

OFDM зарекомендувала себе як надзвичайно ефективний метод модуляції, проте її застосування не обмежується лише формуванням сигналів. На її основі була створена одна з ключових технологій сучасних мобільних систем — OFDMA (orthogonal frequency division multiple access), тобто ортогональний множинний доступ із частотним розділенням.

Сутність OFDMA полягає в тому, що вона поєднує принципи OFDM із механізмами організації множинного доступу. Якщо в OFDM один користувач може використовувати весь набір піднесучих у певний момент часу, то в OFDMA ці ресурси поділяються між кількома абонентами. Це дозволяє значно підвищити ефективність системи й одночасно обслуговувати велику кількість користувачів.

Існують два основні способи розподілу ресурсів в OFDMA:

- Поділ у часі. Кожному користувачу виділяється повний набір піднесучих OFDM, але лише у визначені часові інтервали. Це фактично поєднання OFDM із TDMA, коли кожен абонент отримує доступ до всієї смуги ресурсу у «своєму» слоті (як показано на рис. 3, верхня частина).
- Поділ у частотно-часовій області. У цьому варіанті весь доступний ресурс ділиться на невеликі елементарні блоки — частотно-часові ресурсні блоки, які можуть призначатися різним користувачам. Завдяки цьому в один і той самий момент часу кілька абонентів можуть паралельно використовувати різні підмножини піднесучих (як показано на рис. 3, нижня частина).

Такий підхід дозволяє забезпечити високу спектральну ефективність, а також створює умови для адаптивного розподілу ресурсів відповідно до потреб користувачів. Саме тому OFDMA стала базовою технологією для стандартів LTE та 4G, широко використовується у WiMAX і є одним із ключових елементів інфраструктури 5G.

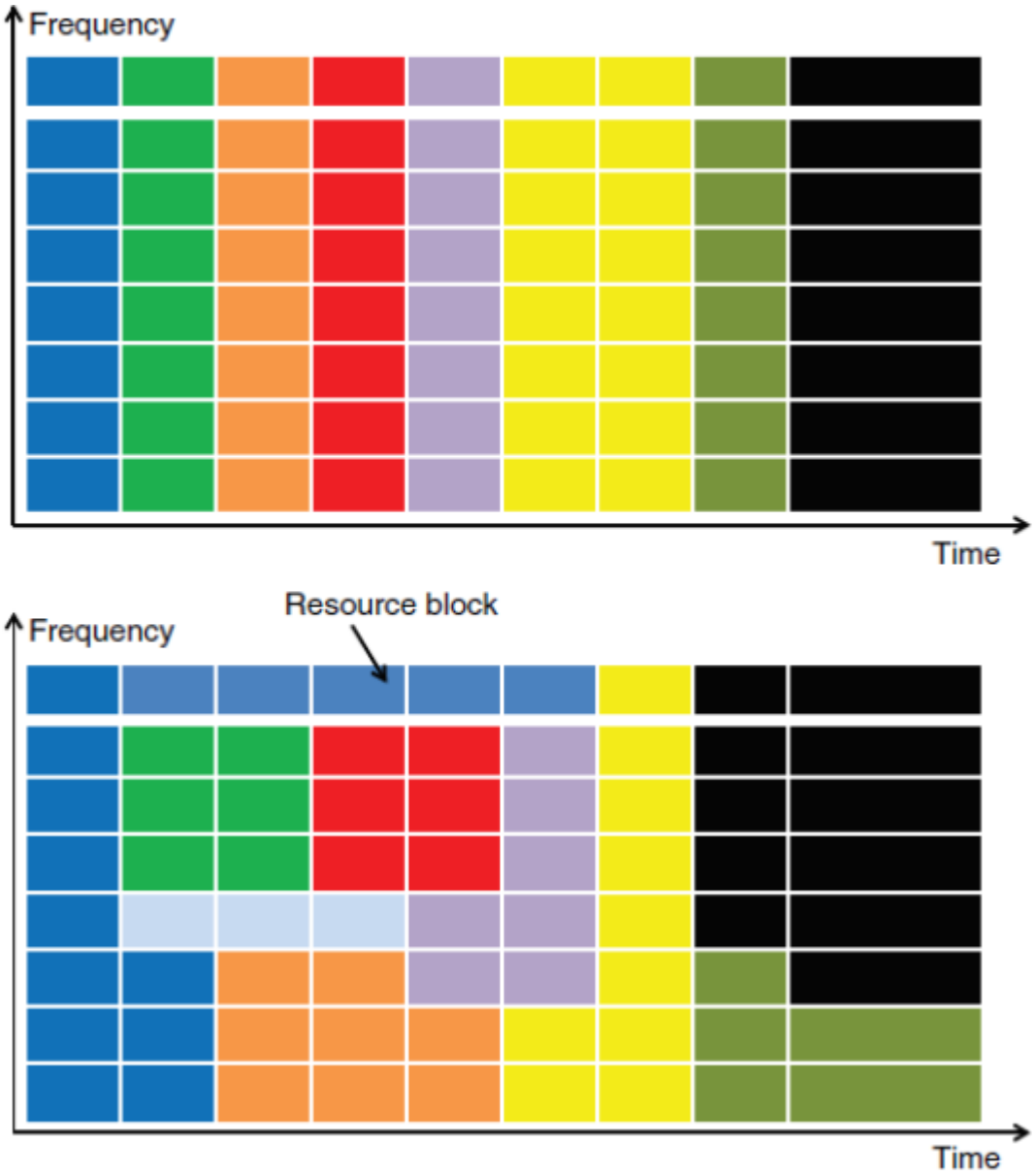


Рис. 1.3 Розподіл частотно-часового ресурсу в OFDMA: зверху – поділ за часом у OFDMA, знизу – ресурсні блоки у OFDMA з локалізованими піднесучими

Абоненти мають можливість передавати дані паралельно у кількох виділених для них ресурсних блоках, які не перекриваються між собою. При цьому розподіл піднесучих між користувачами може здійснюватися як у локалізованій формі, так і у розподіленій, що схематично показано на рисунку. Для наочності ресурсні блоки, закріплені за окремими користувачами, позначені різними кольорами.

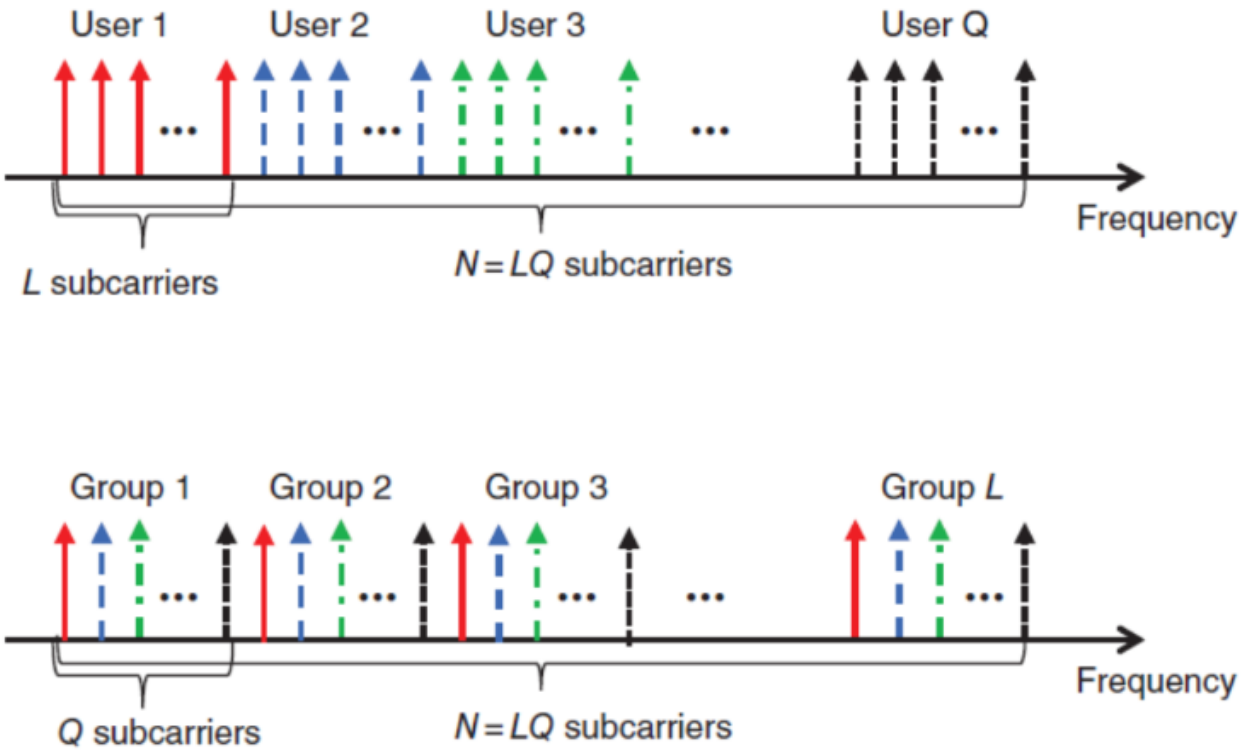


Рис. 1.4 Розподіл піднесених по користувачам в OFDMA у локалізованому (зверху) та розподіленому (знизу) режимах

Припустімо, що кожен користувач передає по L символів у межах блоку. У такому разі система може забезпечувати одночасну роботу Q користувачів. У локалізованому режимі абонент отримує у своє розпорядження L піднесучих, розташованих послідовно, тоді як решта піднесучих надаються іншим користувачам. Натомість у розподіленому режимі L піднесучих, призначених абоненту, розміщуються не підряд, а розсіяно серед Q піднесучих, при цьому вільні піднесучі можуть використовуватися іншими користувачами.

1.3 Модифікації OFDMA

Як ми вже зазначали, технологія OFDM є надзвичайно ефективною у сучасних системах зв'язку, проте вона має низку обмежень, які в окремих випадках можуть стати критичними. Йдеться, зокрема, про високу чутливість до доплерівських зсувів, значний рівень позасмугових випромінювань, високий коефіцієнт пікової потужності сигналу (PAPR), а також залежність від використання захисних інтервалів, що знижує спектральну ефективність. Саме ці

фактори стимулювали науковців і розробників до створення цілого ряду модифікацій OFDM, а також удосконаленої технології множинного доступу OFDMA, що базується на ній. Відповідні рішення розглядаються як перспективні кандидати для широкого застосування у мобільних мережах наступних поколінь, зокрема у 5G та 6G, де вимоги до пропускної здатності, стійкості до завад та енергоефективності значно зросли.

Одним із таких рішень є SC-FDMA (single carrier frequency division multiple access). Цей метод побудований за аналогією з OFDMA, адже він також формує частотно-часову сітку ресурсів. Проте принципова відмінність полягає у тому, що користувачам виділяються часові слоти одразу на всіх піднесучих, тобто передача ізолюється у часовій області. Такий підхід нагадує TDMA, проте у кожному каналі використовується низький рівень модуляції, що суттєво знижує енергоспоживання і підвищує енергетичну ефективність системи. Водночас загальна швидкість передавання даних залишається високою завдяки використанню багатьох піднесучих паралельно. Саме ця властивість зробила SC-FDMA ключовою технологією у висхідній лінії LTE, де необхідно забезпечувати тривалий час роботи користувацьких пристроїв при обмежених енергетичних ресурсах.

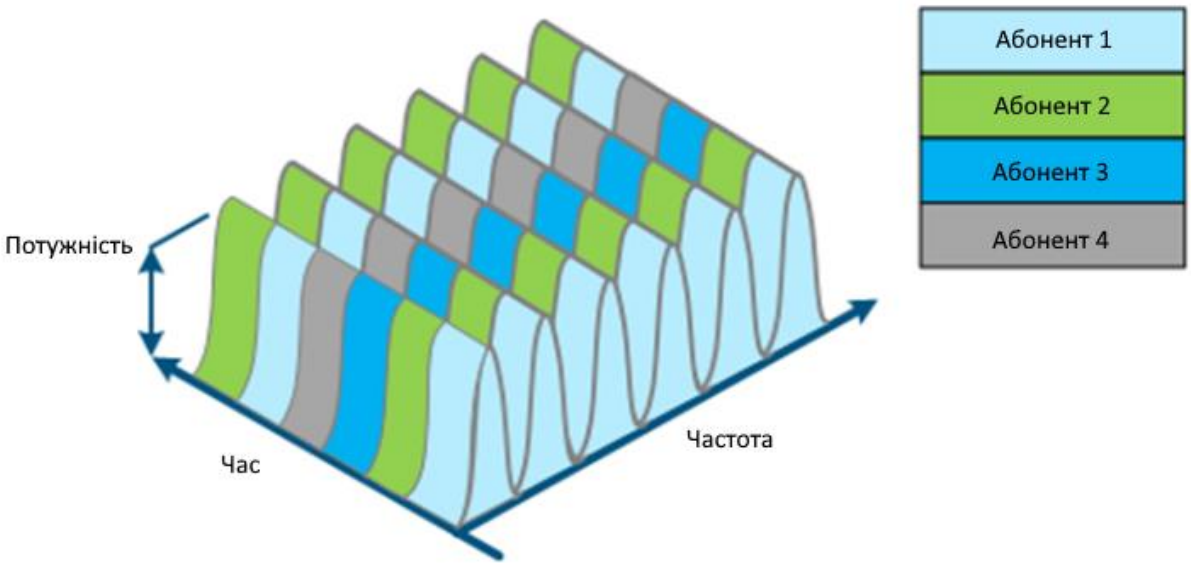


Рис. 1.5 Розподіл ресурсів у SC-FDMA

Ще однією перспективною модифікацією є FBMC (filter bank multicarrier). Вона передбачає застосування вузькосмугової фільтрації для кожної піднесучої за допомогою спеціального банку фільтрів. Це забезпечує високу селективність,

зменшує міжканальні завади та дозволяє більш ефективно використовувати спектральний ресурс. Для формування імпульсів застосовуються різні прототипи, серед яких найбільш поширені — алгоритм IOTA та імпульси, розроблені в проєкті PHYDYAS. Перевагою FBMC є її здатність задовольняти специфічні системні вимоги, такі як низька затримка чи підтримка масового множинного доступу, що робить цю технологію надзвичайно гнучкою. Водночас довжина фільтрів у FBMC є значною, що призводить до збільшення тривалості символів та підвищення обчислювальної складності, тому практичне впровадження цієї схеми поки що обмежене.

Більш гнучким рішенням стала технологія GFDM (generalized frequency division multiplexing), яка є блоковою схемою модуляції з можливістю динамічно змінювати форму сигналу. Її особливістю є використання фільтрів із круговим зсувом (CS-фільтрів), що дозволяє краще контролювати форму спектра. GFDM забезпечує частотне ущільнення каналів та мінімізацію внутрішньосистемних завад завдяки поєднанню з неортогональними фільтрами та квадратурною амплітудною модуляцією. Проте значна обчислювальна складність GFDM є головним викликом на шляху її широкомасштабного впровадження.

Окремо слід відзначити F-OFDM (filtered OFDM), що застосовується переважно у низхідній лінії зв’язку. У цій технології на етапах передачі й приймання передбачено додаткову фільтрацію символів OFDM у часовій області, що дозволяє істотно знизити позасмугові випромінювання. При цьому вплив поширюється лише на піднесучі, близькі до країв спектра, завдяки чому корисний сигнал зберігає свою ефективність. Для боротьби з міжсимвольною інтерференцією застосовуються віконні функції з плавним згладжуванням, що дає змогу суттєво покращити якість сигналу. Генерація F-OFDM здійснюється шляхом формування блоків із кількох сусідніх смуг у межах послідовних символів, що підвищує спектральну ефективність системи.

Для вирішення проблеми асинхронної передачі у системах множинного доступу було розроблено технологію UFMC (universal filtered multicarrier). На відміну від F-OFDM, у цьому випадку фільтрація застосовується не до кожної

піднесучої окремо, а до груп піднесучих, що складаються з певної кількості сусідніх частот. Завдяки цьому вдається одночасно обробляти цілі підсмуги, зменшуючи взаємні завади й забезпечуючи більш якісне передавання даних у багатокористувацькому середовищі. UFMC розглядається як узагальнена версія методів фільтрації спектра і забезпечує ефективність вищу, ніж у класичного OFDM.

Ще одним напрямом розвитку є SP-OFDM (spectrally precoded OFDM). У цій схемі дані, які відображаються на піднесучі, попередньо кодуються матрицею, розмірність якої перевищує її ранг. Це дозволяє спроєктувати сигнал у правильно обране низьковимірне підпростір, унаслідок чого він стає більш «гладким». На відміну від підходів, що базуються на фільтрації, SP-OFDM забезпечує більшу гнучкість при роботі з фрагментованими смугами спектра, адже дозволяє виключати окремі частоти без потреби у використанні вузькосмугових фільтрів. Додаткове поєднання прекодування з фільтрацією ще більше підвищує продуктивність системи.

Нарешті, для боротьби з проблемою високих позасмугових випромінювань було запропоновано технологію W-OFDM (windowed OFDM). Відомо, що спектр сигналів OFDM має велику кількість бокових пелюсток, які повільно згасають і створюють значні позасмугові завади. W-OFDM вирішує цю проблему шляхом обробки сигналу віконними функціями, зокрема «припіднятим косинусом», що забезпечує плавний перехід між символами та зменшує стрибки спектра. У результаті суттєво знижується рівень позасмугових випромінювань, що є важливим для систем, які працюють у багатосмуговому середовищі.

Таким чином, розвиток класичної технології OFDM призвів до появи цілої низки її модифікацій — SC-FDMA, FBMC, GFDM, F-OFDM, UFMC, SP-OFDM та W-OFDM. Кожна з них спрямована на вирішення конкретних проблем: від підвищення енергоефективності та гнучкості управління спектром до зменшення інтерференції та позасмугових випромінювань. Вони формують основу для впровадження у системах п’ятого та шостого покоління, які повинні задовольнити

зростаючі вимоги до продуктивності, надійності та масштабованості сучасних комунікаційних мереж.

Вейвлет-OFDM

Серед сучасних модифікацій класичної технології OFDM особливе місце займає вейвлет-OFDM (wavelet-OFDM, WOFDM), також відома як багаточастотна модуляція на основі вейвлетів (wavelet-based multi-carrier modulation, WMCM). На відміну від традиційного OFDM, де для формування сигналу використовується перетворення Фур'є з базисними функціями у вигляді синусоїд і косинусів, у WOFDM застосовується вейвлет-перетворення. Перевага цього підходу полягає у гнучкості: існує багато різних вейвлет-базисів, які можна адаптувати до конкретних умов передачі чи вимог системи.

Головна відмінність вейвлет-систем полягає у використанні прямих та зворотних дискретних вейвлет-перетворень замість класичних перетворень Фур'є. Це дозволяє ефективно локалізувати сигнал як у часовій, так і в частотній області. Крім того, у WOFDM відсутня потреба у циклічному префіксі, а зменшення бічних пелюсток спектра забезпечує нижчу ймовірність виникнення бітових помилок. Завдяки цьому система стає більш стійкою до частотно-селективних завмирань у каналі й краще справляється з впливом завад. Вейвлет-перетворення також дає можливість працювати не лише з частотними характеристиками, а й з коефіцієнтами масштабу та зсуву, що відкриває нові підходи до розподілу інформації у спектральній області.

Спектрально-ефективне мультиплексування (SEFDM)

Ще одним напрямом удосконалення OFDM є SEFDM (spectrally efficient frequency division multiplexing) — спектрально-ефективне мультиплексування з частотним розділенням. Метою цієї технології є підвищення ефективності використання спектра за рахунок більш щільного розташування піднесучих.

Існує два підходи до підвищення спектральної ефективності:

- **Fast-OFDM.** Частотний інтервал між піднесучими зменшується удвічі, але ортогональність сигналів зберігається. Це дозволяє ущільнити спектр без втрати стійкості системи.

- **SEFDM / N-OFDM.** У більш перспективному підході піднесучі розташовуються ще щільніше, стаючи частково неортогональними. Це веде до перекриття спектрів піднесучих, проте забезпечує істотне зростання спектральної ефективності.

Ключовим параметром SEFDM є коефіцієнт частотного ущільнення $\alpha = T \cdot \Delta f$, де T — тривалість символу, Δf — рознос між піднесучими. Для класичного OFDM $\alpha = 1$, тоді як у SEFDM $\alpha < 1$, що означає більш щільне розташування піднесучих. На практиці це дозволяє передати більший обсяг інформації у межах тієї самої смуги частот.

Важливою перевагою SEFDM є також здатність боротися з вузькосмуговими завадами. Завдяки адаптивному зміщенню піднесучих можна обходити частини спектра, де присутні перешкоди, забезпечуючи безперервну передачу даних на всіх піднесучих. Це робить технологію надзвичайно перспективною для умов перевантаженого спектра в майбутніх мережах 5G і 6G.

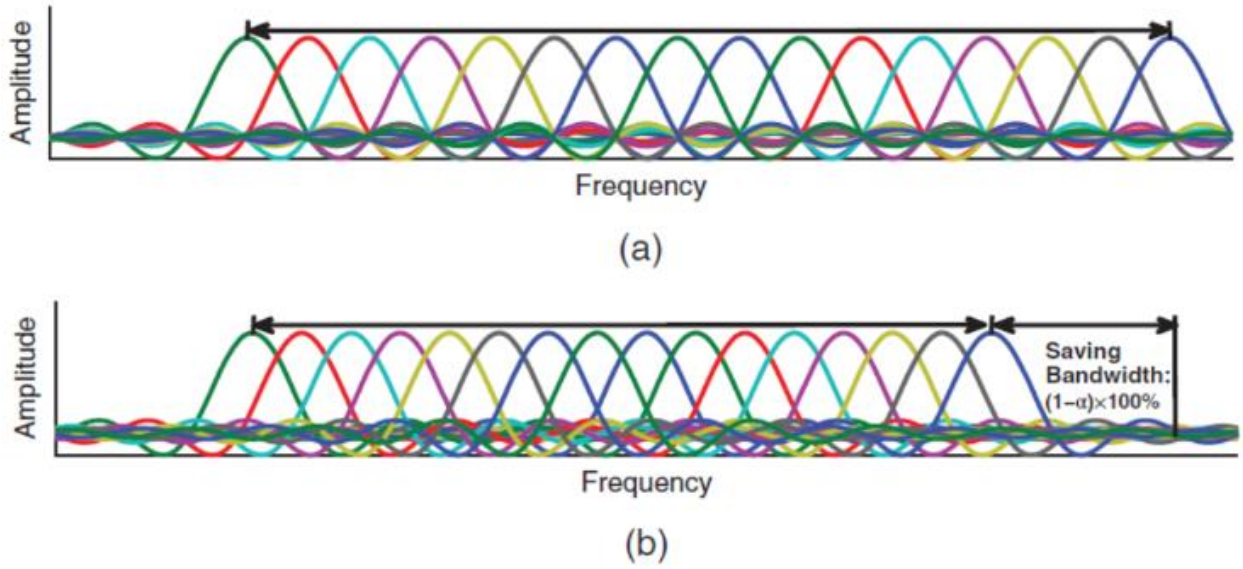


Рис. 1.6 Спектри 16 перекриваються піднесучих для OFDM і SEFDM: a) спектр OFDM; b) спектр SEFDM з коефіцієнтом частотного ущільнення $\alpha = 0{,}8$

Таким чином, WOFDM і SEFDM демонструють різні шляхи розвитку OFDM: перша технологія забезпечує гнучкість і стійкість за рахунок використання вейвлет-базисів, а друга — підвищує ефективність використання спектра за допомогою

ущільнення піднесучих. Обидві вони є важливими кроками до створення більш потужних і адаптивних систем зв’язку наступних поколінь.

2 ПОДІЛ ЗА ПОТУЖНІСТЮ

2.1 Доступ із поділом по потужності (PD-NOMA)

Першим і базовим представником усього класу технологій NOMA є метод неортогонального множинного доступу з поділом за потужністю (power domain non-orthogonal multiple access, PD-NOMA), який часто скорочено позначають як NOMA. Це порівняно нова концепція, адже перші наукові роботи з цього напрямку з'явилися лише у 2012 році. Основою PD-NOMA є принцип суперпозиційного кодування, який дозволяє одночасно передавати інформацію багатьом користувачам у межах однієї й тієї самої смуги частот та в одні й ті самі часові інтервали. Головна ідея цього підходу полягає в тому, що сигнали абонентів, чиї канали характеризуються різними рівнями потужності, накладаються один на одного. У результаті сумарний сигнал на виході передавача є комбінацією сигналів усіх користувачів, але з різними коефіцієнтами потужності.

Принцип роботи

Основна складність PD-NOMA полягає у декодуванні сигналів на приймальній стороні, оскільки кілька користувачів одночасно використовують один і той самий ресурс. Для цього був розроблений метод послідовного скасування перешкод (successive interference cancellation, SIC).

- Спочатку відбувається демодуляція сигналу користувача, якому виділено найбільшу потужність. Сигнали решти користувачів у цей момент розглядаються як фоновий шум.
- Після відновлення інформації цього користувача його символи віднімаються від прийнятого сумарного сигналу.
- Потім аналогічна процедура повторюється для наступного абонента з меншим рівнем потужності, і так доти, доки не будуть виділені дані користувача зі «слабким» каналом.

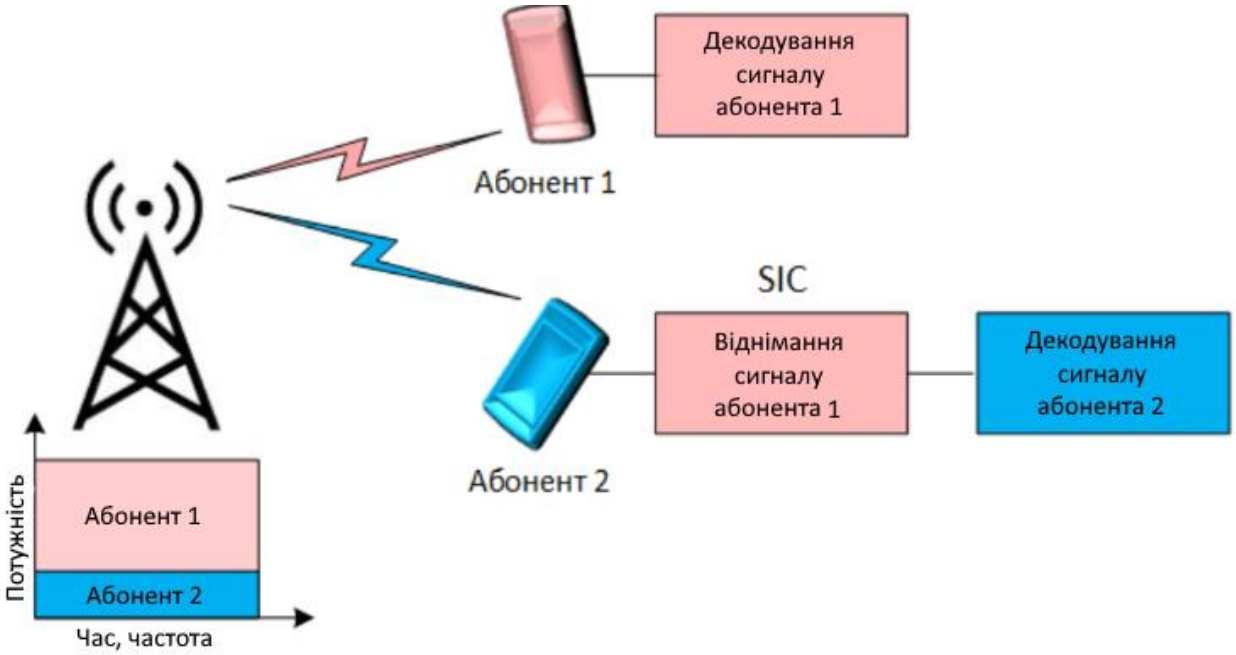


Рис. 2.1 Система зв'язку PD-NOMA з однією базовою станцією та двома користувачами, низхідний канал

Цей процес може виконуватися багаторазово, що дозволяє зменшувати вплив перешкод і підвищувати якість прийому. Однак варто наголосити, що перший користувач, який декодується, найбільш чутливий до міжкористувацьких завад. Крім того, будь-яка помилка, допущена на початкових етапах SIC, поширюється на наступних користувачів і погіршує їхні результати декодування.

Переваги PD-NOMA

Технологія PD-NOMA викликає великий інтерес у науковців та інженерів завдяки ряду вагомих переваг над класичними ортогональними методами множинного доступу:

- Висока спектральна ефективність. Одночасне обслуговування кількох користувачів у межах одного частотного ресурсу забезпечує значно ефективніше використання спектра.
- Масове підключення. Технологія дозволяє збільшити кількість абонентів, що обслуговуються одночасно, що відкриває перспективи її застосування для підтримки великого масиву IoT-пристроїв.
- Зменшення затримки передачі. Абоненту не потрібно чекати на виділення часових слотів, що скорочує час доступу до мережі.

- Гнучкий розподіл потужності. Завдяки налаштуванню співвідношення потужності між «сильними» та «слабкими» користувачами можна досягти необхідної якості обслуговування (QoS) для кожного з них.

Обмеження та виклики

Попри численні переваги, впровадження PD-NOMA супроводжується низкою технічних труднощів, які необхідно подолати:

- Складність приймача. Для того щоб відновити власну інформацію, кожен користувач має декодувати сигнали інших абонентів із гіршими умовами каналу. Це значно збільшує навантаження на обчислювальні ресурси пристрою та підвищує енергоспоживання.
- Помилки у SIC. Будь-яка помилка під час декодування першого користувача може спричинити ланцюгові збої у відновленні інформації для решти абонентів.
- Вимога до різниці каналів. Для досягнення ефективності потрібна суттєва різниця між коефіцієнтами підсилення каналів «сильних» і «слабких» користувачів, що обмежує кількість абонентів, яких можна одночасно обслуговувати.
- Необхідність точної інформації про канал. Кожен користувач повинен повідомляти базовій станції свої параметри каналу. Неточність у цих даних може суттєво знизити продуктивність системи.
- Алгоритми розподілу потужності. Наразі завдання оптимального розподілу потужності між абонентами ще не має простого й ефективного рішення, яке б забезпечувало баланс між продуктивністю та обчислювальною складністю.

2.2 Кооперативний NOMA (Co-NOMA)

Сучасні системи зв’язку, що розвиваються на основі концепції NOMA, спрямовані на те, щоб не лише підвищити спектральну ефективність, а й забезпечити справедливий розподіл ресурсів між користувачами з різними умовами каналу. Якщо базова схема PD-NOMA передбачає накладання сигналів з різною

потужністю та подальше їх послідовне декодування, то кооперативний неортогональний множинний доступ (cooperative NOMA, Co-NOMA) робить наступний крок уперед. Він враховує реальні умови радіоканалів і залучає абонентів до співпраці, створюючи можливість покращити якість зв’язку для «слабких» користувачів за допомогою тих, хто має більш вигідне розташування або кращі характеристики каналу.

Ідея Co-NOMA полягає в організації додаткової ретрансляції сигналу від одного користувача до іншого, якщо між ними існує сприятливий канал зв’язку. Така ретрансляція відбувається у додатковому частотно-часовому ресурсі, найчастіше у вигляді окремого часовго слоту. У результаті користувач із низьким співвідношенням сигнал/шум (SNR) отримує значне покращення якості прийому. Важливою перевагою Co-NOMA є те, що на відміну від традиційних технологій, базованих на OFDMA, тут не потрібно виділяти новий ресурс для передачі ретрансляції, адже сигнал NOMA з самого початку є сумарним і містить інформацію для всіх абонентів.

Принцип роботи Co-NOMA

Функціонування Co-NOMA можна пояснити на прикладі двох користувачів — UE1 і UE2. При цьому базова станція формує єдиний транспортний сигнал, що включає дані для обох абонентів, і передає його у першому часовому слоті T1T_1T1 . Абонент UE1, який має кращий канал зв’язку, виконує послідовне скасування перешкод (SIC), демодулює сигнал UE2, виділяє власну інформацію, а потім у другому часовому слоті T2T_2T2 ретранслює відновлений сигнал для UE2.

Абонент UE2 приймає два сигнали — від базової станції (у T1T_1T1) і від UE1 (у T2T_2T2). Завдяки когерентній комбінації цих сигналів та застосуванню алгоритмів гнучкої демодуляції ефективне відношення сигнал/шум на його вході значно зростає. Це дає можливість забезпечити стабільне з’єднання навіть у тих випадках, коли прямий канал від базової станції до UE2 був би непридатним через високі втрати або сильні перешкоди.

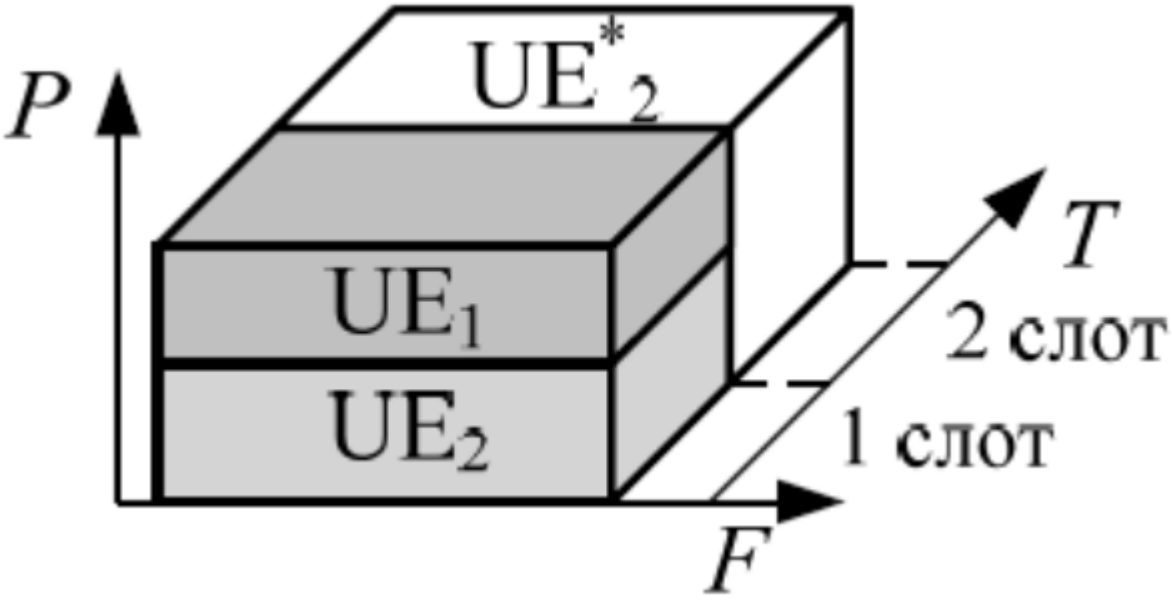


Рис. 2.2 Приклад розподілу ресурсу зв'язку між двома абонентами Co-NOMA

Типові сценарії застосування

Технологія Co-NOMA знаходить своє застосування у низці важливих практичних випадків:

- Підтримка користувачів зі слабким сигналом. Якщо абонент із низьким SNR не може отримати якісний зв’язок від базової станції, але має сприятливий канал із іншим абонентом, ретрансляція дозволяє компенсувати втрати.
- Наявність перешкод у прямому каналі. Якщо на трасі між базовою станцією та абонентом є об’єкти, що створюють значні втрати сигналу (наприклад, товсті стіни у будівлях, рельєф місцевості чи промислові споруди), тоді як канал «користувач–користувач» залишається якісним, Co-NOMA забезпечує ефективну доставку даних.
- Мережі з високими вимогами до надійності. У транспортних системах, промисловій автоматизації чи критичних додатках Co-NOMA здатна гарантувати високу надійність навіть у складних середовищах передачі.

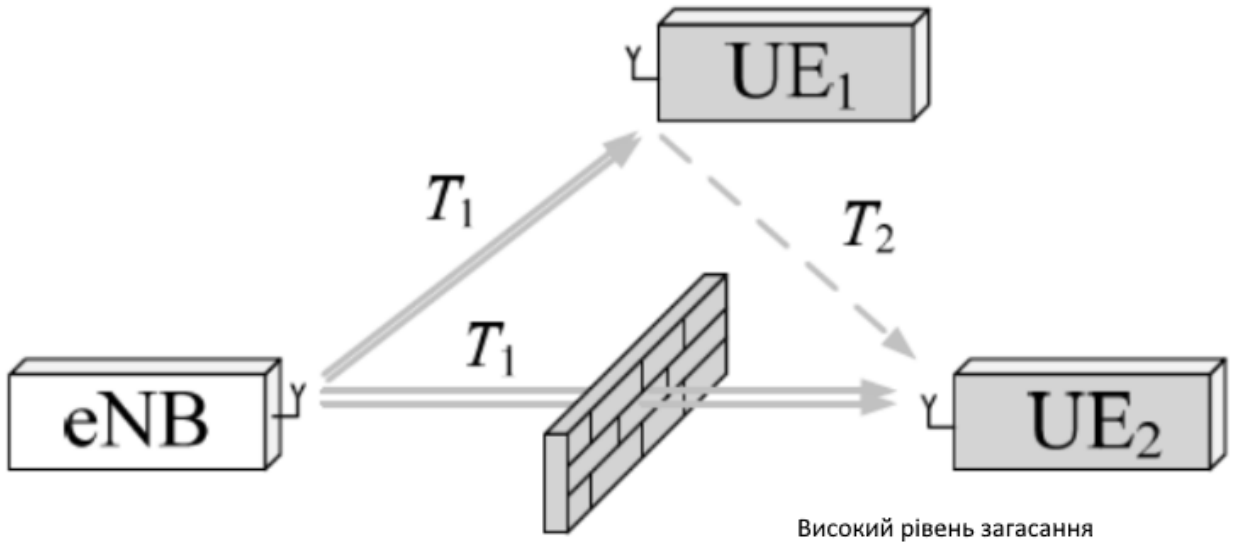


Рис. 2.3 Ретрансляція сигналу Co-NOMA

Таким чином, кооперативний підхід забезпечує не лише покращення якості обслуговування окремих користувачів, а й підвищення загальної ефективності системи.

Алгоритм функціонування Co-NOMA

1. Формування сигналу на базовій станції. У часовому слоті T1T_1T1 створюється загальний транспортний сигнал, що включає інформацію для двох користувачів.
2. Обробка сигналу на стороні UE1. Користувач UE1 виконує демодуляцію, застосовує SIC, відновлює дані для UE2 і паралельно виділяє власний сигнал.
3. Ретрансляція. У часовому слоті T2T_2T2 UE1 передає сигнал для UE2. Цей процес має бути строго синхронізованим із системним часом, щоб уникнути додаткових затримок чи інтерференцій.
4. Прийом на стороні UE2. Другий користувач отримує два сигнали — прямий і ретрансляційний — та за допомогою когерентної обробки поєднує їх. Для цього можуть застосовуватися різні алгоритми прийняття рішень, але ключовим залишається забезпечення точної синхронізації та узгодженої роботи обох джерел сигналу.

Ефективність та перспективи Co-NOMA

Моделювання показало, що системи Co-NOMA можуть бути істотно продуктивнішими за класичні схеми PD-NOMA. Зокрема, інформаційна ефективність Co-NOMA у середньому на 52 % вища, ніж у PD-NOMA. Це підтверджує, що кооперативна схема не лише забезпечує якісніший сервіс для користувачів у складних умовах, але й загалом покращує ефективність використання спектра та ресурсів системи.

Більше того, кооперативний підхід добре узгоджується з концепціями 5G та майбутніх мереж 6G, де особливу увагу приділяють масовому підключенню користувачів, гнучкому розподілу ресурсів та підвищенню надійності у критично важливих сценаріях. У 6G Co-NOMA може поєднуватися з технологіями MIMO, супутниковим доступом, а також із системами на базі штучного інтелекту, які оптимізуватимуть процес ретрансляції та розподілу потужності.

2.3 Об'єднання PD-NOMA з іншими методами множинного доступу

Виклики PD-NOMA та інтеграція з іншими технологіями

Впровадження методу PD-NOMA у мобільних системах зв’язку супроводжується рядом складних технічних проблем, які обмежують його практичне застосування. Одним із ключових викликів є значне збільшення обчислювальних витрат, пов’язаних із багатоступеневою обробкою сигналів та реалізацією алгоритму SIC (послідовного скасування перешкод). Крім того, серйозною проблемою стає похибка у визначенні параметрів каналу, що може призводити до накопичення помилок у процесі декодування. У результаті забезпечення якісного обслуговування великої кількості користувачів стає надзвичайно складним завданням, а використання PD-NOMA у «чистому вигляді» виявляється малоефективним.

З огляду на ці обмеження, дослідники та інженери активно працюють над інтеграцією PD-NOMA з іншими передовими технологіями. Найбільш перспективними напрямами вважаються поєднання з MIMO та OFDMA, що

дозволяє компенсувати недоліки кожної окремої технології та створити більш ефективні системи доступу.

Система MIMO-NOMA

Використання технології MIMO (multiple-input multiple-output) відкриває нові можливості для підвищення ефективності PD-NOMA. Завдяки формуванню вузьконаправлених променів у напрямку кожного абонента забезпечується просторове розділення сигналів, що практично усуває проблему міжканальної інтерференції. У таких умовах кожен користувач може отримувати доступ до повного частотно-часового ресурсу системи, що значно покращує якість обслуговування.

Разом із тим, у сценаріях, коли кілька користувачів мають близькі кутові координати відносно базової станції, виникає можливість їхнього групування в межах одного спрямованого променя. У цьому випадку застосовується метод PD-NOMA, що дозволяє мультиплексувати сигнали кількох абонентів у спільному каналі. Таким чином, відбувається поєднання просторової селекції MIMO та неортогонального доступу PD-NOMA, що забезпечує значне зростання пропускної здатності системи та ефективніше використання доступного спектра.

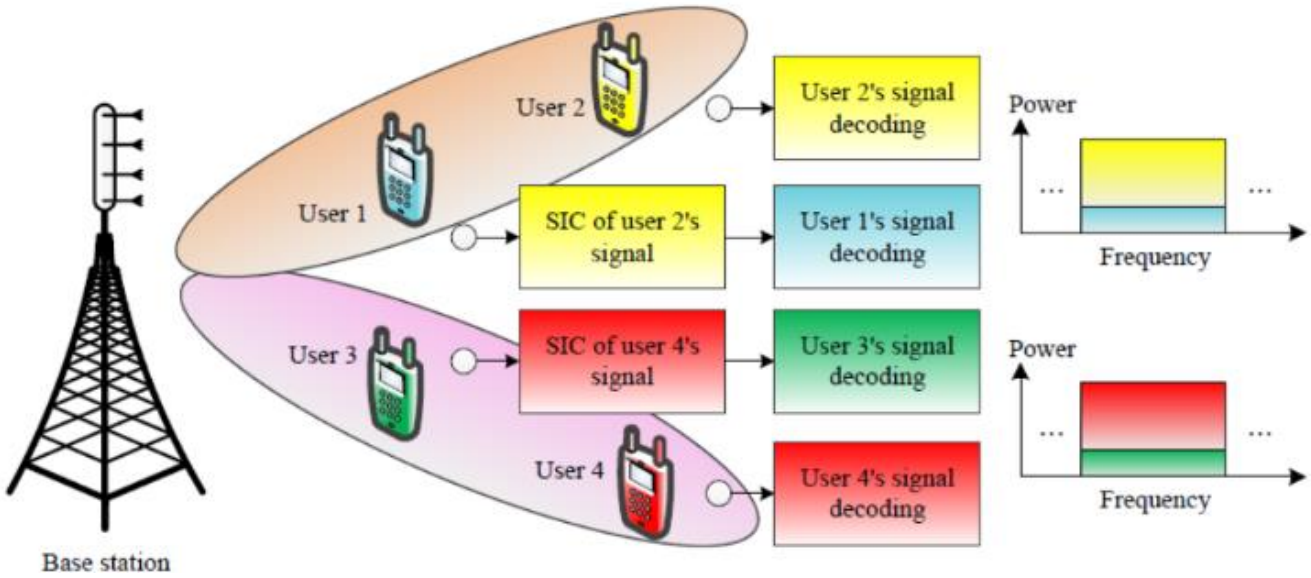


Рис. 2.4 Система зв'язку MIMO-NOMA з однією базовою станцією та 4 користувачами, низхідний канал

Комбінована система PD/OFDMA

Одним із найперспективніших рішень у сфері організації множинного доступу є поєднання методів PD-NOMA та OFDMA, що отримало назву PD/OFDMA. Такий підхід дозволяє максимально використати сильні сторони обох технологій та мінімізувати їхні недоліки. У традиційних системах OFDMA основна увага приділяється поділу частотно-часового ресурсу між абонентами, що забезпечує високу гнучкість у плануванні, зручність у керуванні ресурсами та ефективну боротьбу з міжсимвольною інтерференцією. Завдяки цьому вдається підвищити надійність передачі даних навіть у складних умовах багатопроменевого поширення сигналів. Водночас метод PD-NOMA концентрується на розподілі потужності між користувачами з урахуванням індивідуальних характеристик їхніх каналів зв’язку, що дає змогу підтримувати необхідний рівень якості обслуговування навіть для абонентів зі слабкими каналами.

Комбінація цих двох підходів відкриває нові можливості для значного підвищення спектральної ефективності мобільних систем, оскільки одночасно оптимізуються як просторово-часові, так і енергетичні параметри. Якщо OFDMA гарантує ефективний поділ доступних ресурсів між усіма користувачами, то PD-NOMA забезпечує справедливий розподіл потужності, створюючи умови для масового підключення абонентів без зниження якості обслуговування. У результаті система PD/OFDMA не лише підвищує загальну пропускну здатність, а й зменшує ймовірність виникнення помилок, покращує стійкість до завад і забезпечує рівновагу між продуктивністю та якістю зв’язку.

На практиці це означає, що в мережах наступних поколінь можна буде реалізувати більш збалансовану систему управління ресурсами, яка ефективно поєднує розподіл частотно-часових блоків і розподіл енергетичних можливостей. Приклад такої реалізації наведено на рис. 5, де показано розподіл частотно-часових і енергетичних ресурсів у системі PD/OFDMA для шести користувачів. Як видно з моделі, одночасне використання обох підходів дозволяє забезпечити кращу якість обслуговування для кожного абонента, навіть за умови значних відмінностей у характеристиках каналів. Саме завдяки таким інтегрованим рішенням PD/OFDMA

розглядається як один із ключових кандидатів для широкого застосування у майбутніх мережах 5G та 6G, де важливим є не лише збільшення пропускної здатності, а й підтримка масового доступу та стійкості до змін у середовищі передачі сигналів.

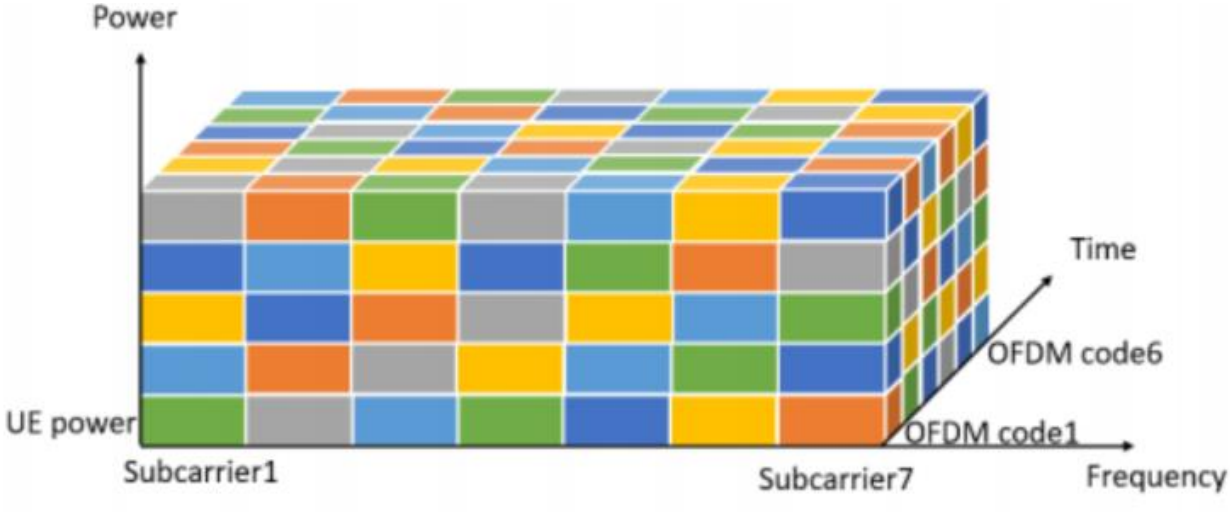


Рис. 2.5 Мультиплексування у комбінованому методі PD/OFDMA

У комбінованій технології PD/OFDMA процес організації доступу базується на інтеграції двох підходів. На етапі формування канальних символів використовується принцип PD-NOMA, коли для кількох користувачів застосовується поділ за потужністю з урахуванням різниці у характеристиках їхніх каналів. Це забезпечує ефективне використання енергетичного ресурсу та дає змогу одночасно обслуговувати більшу кількість абонентів. Водночас розподіл сформованих символів у частотному ресурсі здійснюється за класичною схемою OFDMA, що гарантує структурованість у керуванні спектром та знижує ризики виникнення міжсимвольних завад.

На приймальній стороні кожного абонента обробка сигналу починається з процедури OFDM-демодуляції, яка дає можливість виділити з багаточастотного спектра PD/OFDMA саме ті піднесучі, які відповідають даному користувачу. Отримані символи далі надходять до SIC-демодулятора, що виконує послідовне скасування перешкод і відновлення корисних даних. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив завад між користувачами та підвищити точність декодування навіть у випадках, коли кількість абонентів у системі значна.

Результати чисельного моделювання підтвердили ефективність цього рішення: при використанні технології PD/OFDMA для обслуговування 20 користувачів пропускна здатність багатоканальної системи зростає приблизно у 1,25 раза у порівнянні зі стандартним OFDMA. Причому виграш у продуктивності має тенденцію до зростання зі збільшенням кількості каналів, які мультиплексуються за потужністю. Це означає, що чим більша кількість користувачів залучається до одночасного доступу, тим відчутніший приріст у пропускній здатності демонструє система.

Модифікований NOMA/OFDMA

Технологія PD-NOMA, інтегрована з OFDM, дозволяє одночасно декільком користувачам передавати дані на одній і тій самій піднесучій. Це відкриває значні можливості для підвищення пропускної здатності, проте має і критичний недолік: зі зростанням кількості абонентів на одній піднесучій суттєво зростає рівень внутрішньоканальної інтерференції. У результаті відбувається зниження якості прийому сигналів та погіршення загальної продуктивності системи.

Щоб подолати ці обмеження, була розроблена модифікована схема множинного доступу, що поєднує можливості PD-NOMA та OFDMA. Вона отримала назву multinumerology NOMA (MN-NOMA). Основна ідея цієї технології полягає в тому, що різним користувачам виділяються піднесучі різної ширини смуги пропускання — так звані *широкі* та *вузькі піднесучі*. Це дозволяє не лише гнучкіше розподіляти спектральні ресурси, а й значно зменшувати рівень взаємних завад, оскільки користувачі вже не обмежені необхідністю ділити між собою ідентичні піднесучі.

Для кращого розуміння розглянемо приклад із трьома абонентами в одній радіосистемі. У класичній схемі PD-NOMA усі три користувачі мали б займати однакові піднесучі, що створювало б високий рівень інтерференції й обмежувало б можливості масштабування. У випадку ж із MN-NOMA кожному користувачу виділяється окрема група піднесучих різної ширини. Наприклад, користувачі UE1 і UE3 отримують широкі піднесучі, що дозволяє їм передавати більші обсяги даних, тоді як користувач UE2 працює на вузьких піднесучих, які краще підходять для

передачі меншого потоку інформації або обслуговування пристроїв з нижчими вимогами до пропускної здатності.

Такий підхід забезпечує низку переваг:

- **Зниження інтерференції.** Розподіл піднесучих різної ширини між користувачами мінімізує взаємні завади, що є головним недоліком класичного PD-NOMA.
- **Гнучкість у керуванні ресурсами.** Мережа може динамічно адаптувати виділення широких і вузьких піднесучих залежно від поточних потреб абонентів і характеристик їхніх каналів.
- **Підвищення спектральної ефективності.** Використання різних типів піднесучих дозволяє досягти більш раціонального завантаження спектра та збільшити сумарну пропускну здатність системи.
- **Масштабованість.** Завдяки зниженню рівня завад стає можливим обслуговування більшої кількості користувачів одночасно без критичного зниження якості сервісу.

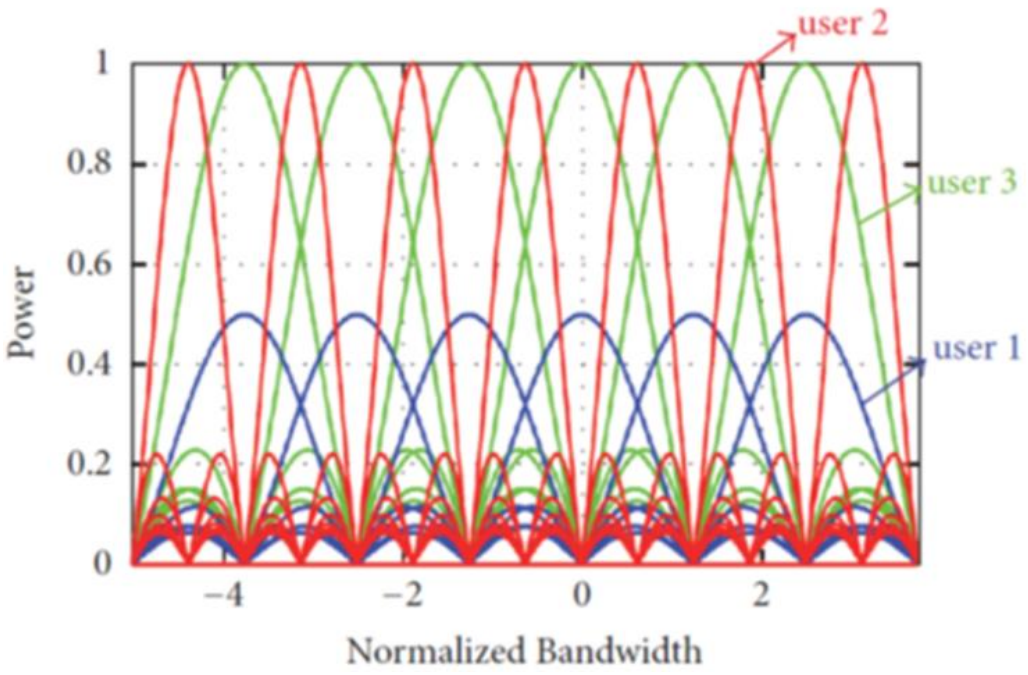


Рис. 2.6 Розподіл піднесених у модифікованому методі NOMA/OFDMA

На основі дослідження, наведеного на рис. 2.6, можна зробити висновок, що вузькі піднесучі практично не впливають на пікові значення широких піднесучих. Це означає, що користувачі, які здійснюють передачу на широких піднесучих,

зазнають значно меншого рівня внутрішньоканальної інтерференції від вузькосмугових каналів. Таким чином, забезпечується відносна «чистота» сигналу для користувачів із високою смугою пропускання. Водночас ситуація є несиметричною: широкі піднесучі, маючи довші спектральні «хвости», створюють інтерференцію у пікових точках вузьких піднесучих. Це призводить до того, що абоненти, які працюють із вузькими піднесучими, виявляються більш вразливими до перешкод, що накладаються широкосмуговими сигналами.

Щоб краще зрозуміти цей ефект, звернемося до рис. 2.7, де проілюстровано розподіл часових ресурсів на передавальній стороні між трьома користувачами. Тут чітко видно, що часові слоти OFDM-символів користувачів 1 та 3, які функціонують на широких піднесучих, розташовані ортогонально, тобто вони не перекриваються один з одним і не створюють взаємних завад. Після цього у структуру сигналу додається розширений символ користувача 2, який працює на вузьких піднесучих. Особливість полягає в тому, що його часовий слот перетинається зі слотами користувачів 1 і 3, тобто розташований неортогонально відносно них.

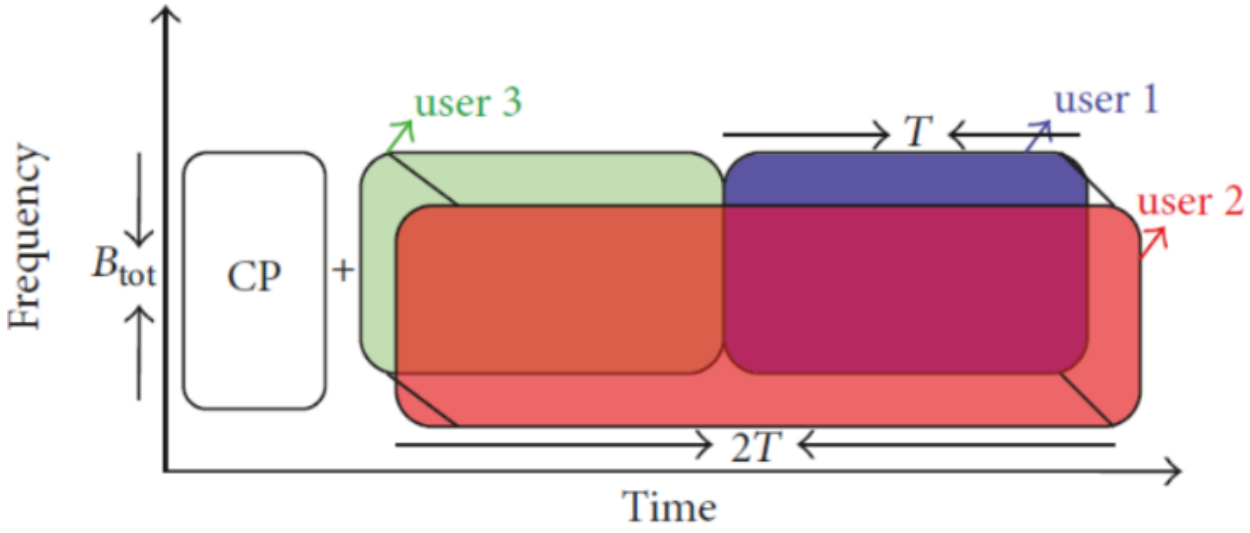


Рис. 2.7 Розподіл тимчасового ресурсу в модифікованому методі NOMA/OFDMA на стороні, що передає

Варто зазначити, що у схемі також наведено позначення CP (циклічний префікс), який використовується для компенсації міжсимвольних інтерференцій, що виникають у багатопроменевих каналах. Саме циклічний префікс дозволяє

частково зменшити негативний вплив від накладання сигналів і стабілізувати процес демодуляції.

Отже, представлений приклад демонструє, що у схемах з багаточастотними піднесучими завжди існує компроміс: хоча вузькі піднесучі не заважають широким на їхніх піках, проте широкі створюють значний вплив на вузькі. Це слід враховувати під час проектування систем MN-NOMA і підбору параметрів ширини піднесучих, аби досягти оптимального балансу між пропускною здатністю та стійкістю системи до інтерференції.

У запропонованій схемі користувачу 2 виділяються вузькі та більш розріджені піднесучі (рис. 2.6), а тривалість його символів подвоюється (рис. 2.7). Такий підхід дозволяє ефективніше розподілити ресурси між користувачами, проте він має і свої наслідки: для абонентів, що працюють на широких піднесучих, спектральна ефективність зменшується удвічі, оскільки частина ресурсу використовується для підтримки користувача 2. При цьому мультиплексування відбувається наступним чином: символ користувача 3 накладається на першу половину символу користувача 2 відповідно до принципу PD-NOMA, тоді як символ користувача 1 передається паралельно з другою половиною того ж символу (рис. 2.7). Такий механізм дозволяє організувати доступ одразу для кількох абонентів у межах одного ресурсу, але із більш збалансованим управлінням перешкодами.

На приймальній стороні система застосовує швидке перетворення Фур’є (БПФ) із розширеним вікном, довжина якого дорівнює тривалості слота двох OFDM-символів. Це рішення дає важливу перевагу: канал можна вирівняти з використанням лише одного циклічного префікса (CP) для всієї групи символів. У результаті зменшуються надлишкові витрати спектра та підвищується спектральна ефективність. Цікаво, що ця властивість може бути застосована навіть у чистій системі OFDMA. Якщо, наприклад, виключити користувача 2 і залишити лише класичний розподіл ресурсів між абонентами, то проведення БПФ із довжиною у два OFDM-символи дозволяє обійтися одним CP замість двох, що підвищує ефективність навіть у базових сценаріях.

Крім того, призначення користувачу 2 вузьких піднесучих позитивно впливає на сигнали інших користувачів. Воно зменшує рівень інтерференції, що накладається на абонентів 1 та 3, і, як наслідок, істотно спрощує процедуру декодування за допомогою SIC. Якщо у класичній схемі PD-NOMA приймачеві необхідно було розрізняти й коректно обробляти одразу три сигнали, то у модифікованій схемі кількість одночасно оброблюваних сигналів знижується до двох. Це полегшує роботу алгоритмів прийому, знижує обчислювальні витрати й потребу у високій точності оцінки каналу.

У цілому дана схема є прикладом компромісного рішення для сучасних систем зв’язку. З одного боку, її спектральна ефективність нижча порівняно з базовою PD-NOMA, де ресурси використовуються більш щільно. З іншого боку, вона перевершує стандартний OFDMA, оскільки дозволяє реалізувати додаткове накладання сигналів і більш повноцінно завантажити канал. Саме баланс між продуктивністю, зниженням завад і спрощенням приймальних алгоритмів робить цю схему цікавою для практичного використання у мережах наступних поколінь, зокрема 5G і 6G, де необхідно одночасно підтримувати велику кількість користувачів і забезпечувати високу якість обслуговування.

3 РОЗПОДІЛЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ КОДІВ

3.1 Множинний доступ з ортогональним кодовим поділом (CDMA)

Одним із найбільш відомих і широко застосовуваних методів множинного доступу, що свого часу справив величезний вплив на розвиток мобільних технологій, є множинний доступ із кодовим розділенням каналів (code division multiple access, CDMA). Цей метод активно використовувався в системах стільникового зв'язку третього покоління (3G) та забезпечив можливість значного зростання кількості одночасно обслуговуваних абонентів.

Особливість CDMA полягає в тому, що всі користувачі працюють у спільних частотно-часових ресурсах, тобто займають одну й ту саму смугу частот та часові інтервали. Проте сигнали різних абонентів відділяються один від одного за рахунок призначення кожному з них унікальної кодової послідовності. Саме ці послідовності, що мають добрі кореляційні властивості, виступають у ролі «цифрових підписів» користувачів, завдяки яким приймач може коректно виокремити потрібний сигнал із суміші переданих даних.

Ще однією ключовою особливістю CDMA є використання широкосмугових сигналів, що утворюються на основі фазової маніпуляції. Завдяки цьому канали користувачів стають більш стійкими до впливу шумів і завад, а система загалом набуває більшої надійності. Водночас застосування кодів із гарними кореляційними властивостями мінімізує рівень взаємних перешкод, що є особливо важливим при великій кількості активних абонентів.

Методи розширення спектра в CDMA

У межах технології CDMA було запропоновано кілька методів розширення спектра сигналів, які відрізняються як принципом реалізації, так і практичними характеристиками.

1. Стрибкоподібна перебудова несучої частоти (frequency hopping, FH-CDMA). У цьому методі для передачі кожного біта використовується набір із N дискретних частот, які комбінуються у вигляді частотно-часової матриці. На

кожній частоті передається власна кодова послідовність. Упродовж визначеного інтервалу часу T несуча залишається сталою, а по завершенні інтервалу стрибкоподібно змінюється на нове значення. Для кожного користувача формується унікальний алгоритм перебудови несучої, завдяки чому у спільній смузі частот може одночасно працювати велика кількість абонентів.

Серед основних переваг FH-CDMA слід відзначити високу захищеність від завад і навмисних перешкод, а також низьку ймовірність перехоплення сигналу, що робить його особливо актуальним для систем із підвищеними вимогами до безпеки.

2. Псевдовипадкова перебудова у часі (time hopping, TH-CDMA).
   У TH-CDMA інформаційний сигнал передається у вигляді коротких пакетів, що надсилаються у випадкові моменти часу. Конкретні часові позиції визначаються за допомогою спеціальних кодових послідовностей. Часова вісь ділиться на кадри тривалістю T, кожен із яких складається з M часових інтервалів тривалістю T/MT. Передача в межах одного кадру здійснюється лише в одному з інтервалів, що забезпечує ефективне розділення користувачів у часовій області.
   Такий підхід дає змогу підвищити захищеність від завад і знизити ймовірність взаємних накладень сигналів, хоча водночас він вимагає точнішої синхронізації та ускладнює реалізацію приймачів.
3. Пряме розширення спектра (direct sequence, DS-CDMA).
   Це найбільш поширений і базовий варіант реалізації CDMA, що використовується у мобільних мережах. Принцип його роботи полягає в тому, що вузькосмуговий інформаційний сигнал перемножується з розширювальною кодовою послідовністю, яка складається з N елементів тривалістю Δ кожен і має період повторення $T=N\Delta$. Зазвичай застосовуються бінарні послідовності, елементи яких умовно позначаються як +1 та –1. Якщо інформаційний біт дорівнює «1», кодова послідовність інвертується, а якщо «0» — залишається незмінною. У результаті інформаційний сигнал займає

значно ширшу смугу частот, що підвищує стійкість до завад та робить можливим розділення користувачів завдяки кореляційним властивостям їхніх кодів.

Система CDMA (code division multiple access) вирізняється здатністю динамічно пристосовуватися до різних швидкостей передавання даних, що робить її універсальною для використання у багатокористувацьких середовищах. Одним із ключових механізмів, що забезпечують таку гнучкість, є застосування ортогональних послідовностей зі змінним коефіцієнтом розширення спектра (orthogonal variable spreading factor, OVSF), які ще називають кодами змінної довжини. Особливість цього підходу полягає в тому, що під час формування сигналу CDMA чипова швидкість залишається сталою, однак інформаційна швидкість може змінюватися, причому кратно двом. Це дозволяє ефективно масштабувати систему залежно від кількості користувачів та їхніх вимог до пропускної здатності. Важливо, що набір OVSF-кодів не є сталим, а безпосередньо залежить від коефіцієнта розширення спектра, тобто фактично від швидкості каналу, що забезпечує адаптивність системи та оптимальне використання ресурсів.

Окрім ортогональних кодів, у CDMA використовуються також псевдовипадкові послідовності (ПСП), які виконують важливу роль у підвищенні стійкості та захищеності системи. Хоча ці послідовності є детермінованими й відомі як передавачу, так і приймачу, для стороннього спостерігача вони виглядають як випадковий шум, що унеможливлює неконтрольований доступ до каналу. Однією з головних переваг ПСП є їхня інваріантність до часових зсувів, завдяки чому система зберігає синхронізацію навіть у складних радіоумовах. На практиці найчастіше застосовуються М-послідовності, а також побудовані на їх основі коди Голда, коди Касамі та інші варіанти. Вони відзначаються відмінними кореляційними властивостями, що дозволяє ефективно відокремлювати сигнали різних абонентів навіть у разі великої кількості активних підключень.

Прийом сигналів у системах CDMA базується на методі кореляційного приймача, який є центральним елементом роботи технології. Суть полягає у тому, що сигнал, промодульований певною кодовою послідовністю на передавальній

стороні, на приймальній стороні повторно модулюється цією ж самою послідовністю. У результаті відновлюється вихідний інформаційний сигнал. Ключовим завданням є точне визначення затримки демодулюючої послідовності, адже лише при правильному узгодженні із переданим сигналом на виході кореляційного фільтра формується максимальний відгук. Це гарантує правильне декодування та забезпечує мінімальний рівень завад.

Такий принцип роботи робить CDMA надзвичайно стійкою технологією. Поєднання гнучкості OVSF-кодів, що дозволяють масштабувати систему та динамічно змінювати швидкість передавання, з захищеністю ПСП, які створюють ілюзію шуму для сторонніх спостерігачів, та ефективністю кореляційного прийому формує цілісну й потужну архітектуру. Саме завдяки цим властивостям CDMA змогла забезпечити якісно новий рівень розвитку мобільного зв’язку у мережах третього покоління, ставши фундаментом для побудови надійних і масштабованих систем, здатних обслуговувати мільйони користувачів у спільному частотному просторі.

3.2 Множинний доступ із використанням LAS-кодів (LAS-CDMA)

Перш ніж розглядати різноманітні модифікації технології CDMA, варто детальніше зупинитися на тому, чому виникла необхідність відходити від класичної схеми. Попри значні переваги, які забезпечила CDMA для систем третього покоління, ця технологія має фундаментальні обмеження, що пов’язані з природою кодових послідовностей. Проблема полягає в тому, що автокореляційні та взаємокореляційні функції кодів, які застосовуються в системах CDMA, не є ідеальними. Внаслідок цього виникає взаємна інтерференція між сигналами різних користувачів, що знижує якість зв’язку та продуктивність системи.

Розглянемо приклад, наведений на рис. 3.1, де зображено автокореляційну та взаємокореляційну функції кодових послідовностей, характерних для традиційних систем CDMA. З аналізу видно, що:

- бічні пелюстки обох функцій не є нульовими, тобто в сигналі залишаються небажані складові, які створюють додаткові перешкоди;
- вимоги до зниження рівня бічних пелюсток автокореляційної функції суперечать вимогам до зменшення рівня бічних пелюсток взаємокореляційної функції.

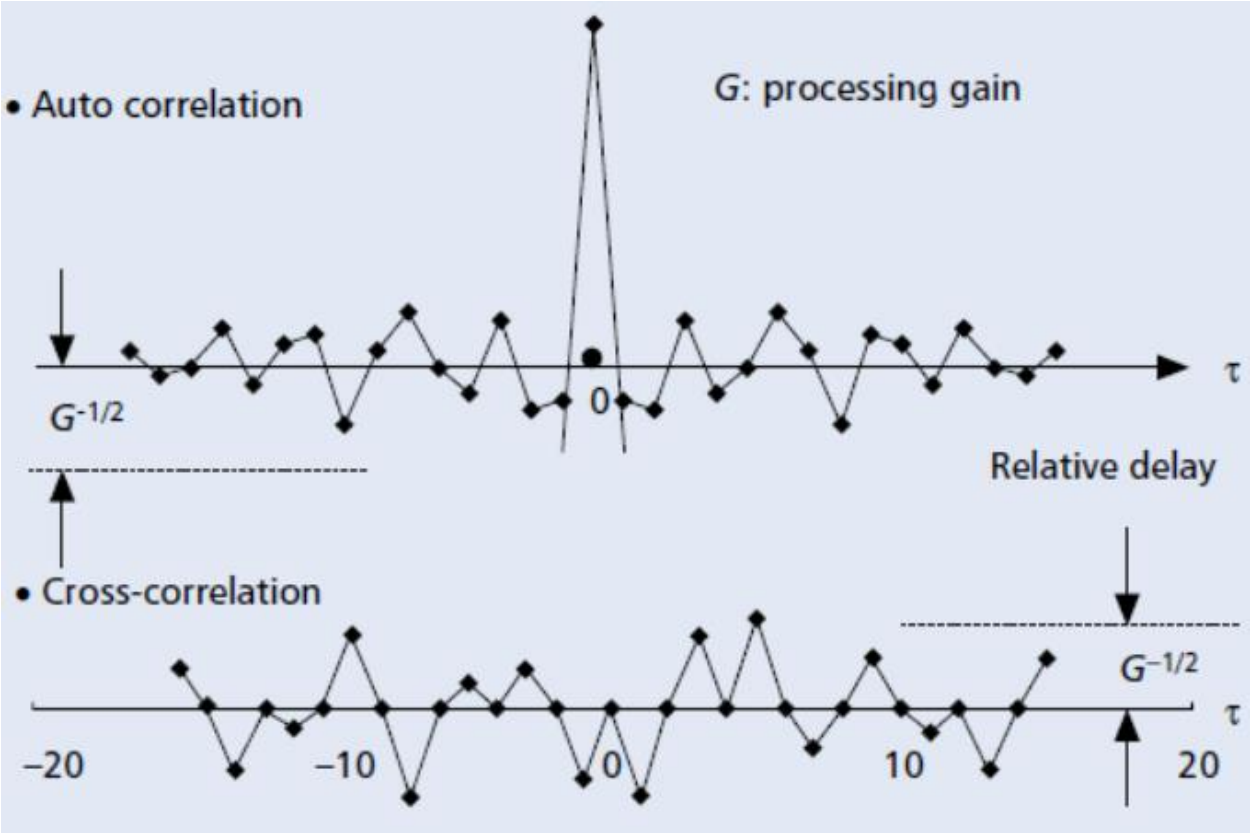


Рис. 3.1 Автокореляційна та взаємна кореляційна функції традиційного CDMA

Таким чином, при проектуванні класичних систем CDMA доводиться йти на компромісне рішення. Як правило, рівень бічних пелюсток обмежується значенням близьким до $1/B$, де B — це база сигналу, тобто добуток його тривалості на ефективну ширину спектра. Це обмеження відоме як межа Уелча. Воно є своєрідною нижньою межею, яка вказує, що повністю позбутися взаємних перешкод у системах CDMA неможливо.

У результаті традиційні системи CDMA завжди залишаються чутливими до впливу міжкористувацьких завад, і саме цей фактор визначає межі їхньої пропускної здатності та стійкості. Інакше кажучи, збільшення кількості абонентів

у мережі неминуче веде до зростання рівня інтерференції, що ускладнює забезпечення необхідної якості обслуговування.

Саме ці обмеження стали головною причиною для розробки модифікованих варіантів CDMA, які мали на меті:

- покращити кореляційні властивості кодів і наблизити їх до ідеальних;
- мінімізувати міжкористувацькі завади навіть у багатокористувацькому середовищі;
- забезпечити більш високу спектральну ефективність;
- підвищити стійкість до впливу шумів, багатопроменевого поширення та ефекту Доплера.

У подальшому розвиток технології призвів до появи модифікацій CDMA — таких як MC-CDMA (multicarrier CDMA), OFDMA-CDMA, VSF-CDMA та інші. Вони стали не просто еволюцією базової ідеї, а фактично підґрунтям для створення більш гнучких і масштабованих систем зв’язку, що використовуються у сучасних мережах 4G, 5G і закладають основи для 6G.

Одним із найперспективніших рішень для подолання обмежень класичної CDMA стала поява технології LAS-CDMA (large area synchronized code division multiple access), яка розроблялася з урахуванням проблеми взаємної інтерференції користувачів. У традиційних системах CDMA автокореляційні та взаємокореляційні функції кодових послідовностей є далекими від ідеальних, що призводить до накладання сигналів і погіршення якості обслуговування. У LAS-CDMA ця проблема вирішується завдяки тому, що автокореляційні функції кодів є ідеальними, а на взаємних кореляційних функціях формується спеціальне інтерференційно-вільне вікно (interference-free window, IFW), симетричне відносно нуля. Це означає, що в межах даного інтервалу відсутні небажані бічні пелюстки, які могли б створювати завади, і саме завдяки цьому система LAS-CDMA отримує набагато вищу спектральну ефективність та ємність каналу, ніж традиційні реалізації CDMA.

Ключовою особливістю LAS-CDMA є використання двох сімейств кодів — LA-кодів та LS-кодів. LA-коди являють собою послідовності імпульсів із точно

розрахованими інтервалами, що забезпечує значне зниження інтерференції між сусідніми сотами мережі. Їх формування здійснюється шляхом проходження LS-коду через узгоджений фільтр у визначених часових позиціях, що дозволяє отримати високу стійкість до зовнішніх завад. LS-коди, у свою чергу, виконують функцію розширення спектра сигналу. Вони відзначаються особливо цікавими кореляційними властивостями: їхні автокореляційні функції є ідеальними, а взаємокореляційні у більшості випадків містять лише кілька пар бічних пелюсток. При цьому навколо нуля утворюються ділянки, де пелюстки повністю відсутні, і саме ці ділянки й отримали назву IFW.

Завдяки такій властивості LAS-CDMA здатна ефективно протидіяти негативним ефектам багатопроменевого поширення сигналу. Якщо тимчасова дисперсія каналу, яка виникає через відбиття та накладання сигналів у складних умовах радіопоширення, вкладається в межі інтерференційно-вільного вікна, то міжсимвольна інтерференція (ISI) та міжкористувацька інтерференція (MUI) фактично зникають. Це забезпечує виняткову якість прийому, знижує ймовірність помилок і створює умови для стабільної роботи системи навіть у перевантажених мережах із великою кількістю абонентів.

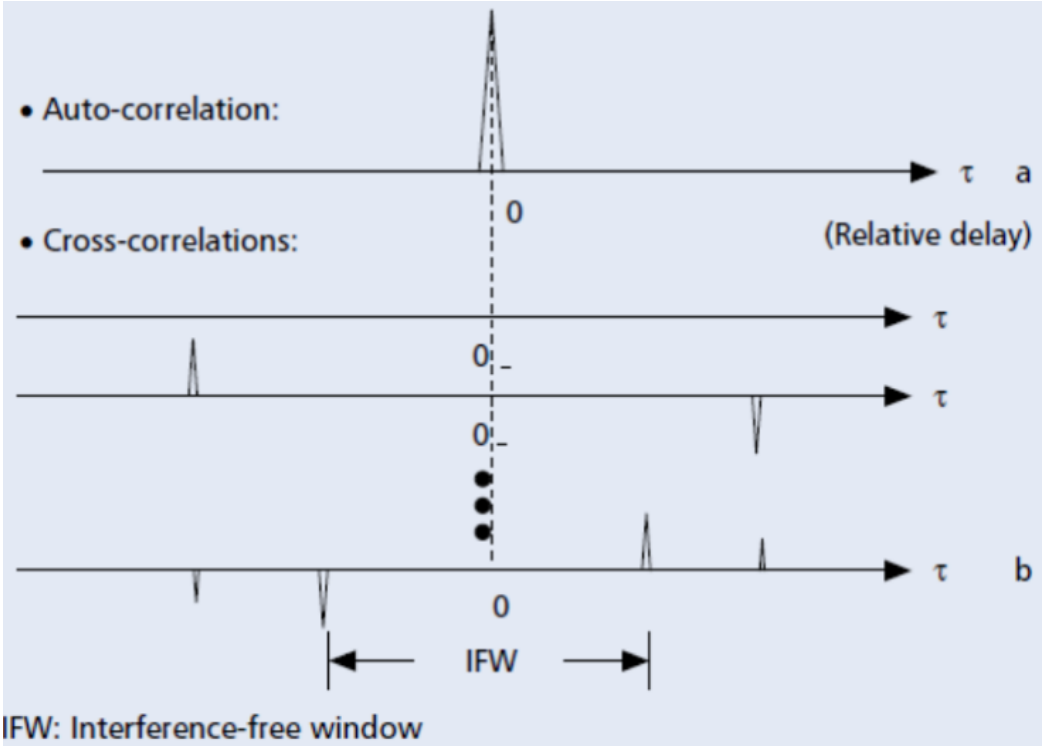


Рис. 3.2 Автокореляційна та взаємна кореляційна функції LAS-CDMA

Таким чином, LAS-CDMA можна розглядати як логічний етап розвитку CDMA, який успадковує її гнучкість та здатність підтримувати багатьох користувачів одночасно, але водночас суттєво підвищує ефективність використання спектра та зменшує рівень інтерференції. Ця технологія відкриває нові перспективи для побудови високопродуктивних систем безпровідного доступу, здатних задовольнити вимоги до високої пропускної здатності, стійкості до завад та масштабованості, що є критично важливим у контексті розвитку мереж п’ятого та шостого поколінь.

3.3 Множинний доступ з кодовим поділом з кодами низької щільності (LDS-CDMA)

На сучасному етапі розвитку мобільних і безпровідних технологій усе більшу увагу приділяють неортогональним методам множинного доступу, які можна розглядати як еволюційне продовження класичної CDMA. У своїй основі вони мають схожий принцип роботи, однак головна відмінність полягає в тому, що сигнали користувачів більше не є строго ортогональними. Це дозволяє значно підвищити ефективність використання спектра, водночас вимагаючи нових підходів до обробки та декодування сигналів.

Одним із найбільш показових представників цієї групи технологій є множинний доступ із кодовим розділенням на основі розріджених кодів розширення (low density spreading code division multiple access, LDS-CDMA). Основою цього методу є застосування так званих сигнатур із низькою щільністю (low-density signature, LDS). Їхня особливість полягає в тому, що лише частина елементів у послідовності бере активну участь у розширенні спектра, тоді як інші елементи дорівнюють нулю. Завдяки такій розрідженій структурі вдається знизити рівень взаємних завад між сигналами абонентів, що особливо важливо в умовах, коли кількість користувачів стрімко зростає.

Формування сигналу в LDS-CDMA відбувається наступним чином: символи квадратурної амплітудної модуляції (QAM) перемножуються з комплексною

розширювальною послідовністю, яка виконує роль сигнатури. Таким чином створюється сигнал, що містить у собі як інформаційну складову, так і кодову структуру, призначену для забезпечення множинного доступу.

На приймальній стороні всі сигнали від користувачів, що працюють одночасно, надходять на вхід багатокористувацького детектора. Його завдання полягає у відновленні переданої інформації шляхом оцінювання, яке базується на мінімізації квадрата евклідової відстані між прийнятим сигналом та сумою сигналів усіх абонентів. Оптимальним способом вважається використання алгоритму максимальної правдоподібності, проте він потребує значних обчислювальних ресурсів і в багатьох випадках є надто складним для практичної реалізації.

Саме тому у реальних системах дедалі ширше застосовуються субоптимальні методи прийому, які забезпечують баланс між точністю та складністю. Одним із найбільш поширених є ітераційний алгоритм обміну повідомленнями (message passing algorithm, MPA). Він відзначається помірними вимогами до обчислювальних потужностей і водночас забезпечує рівень завадостійкості, який практично не поступається алгоритму максимальної правдоподібності.

Таким чином, LDS-CDMA є сучасним підходом, що поєднує у собі переваги CDMA та нові можливості, пов’язані з використанням розріджених сигнатур. Завдяки цьому технологія здатна забезпечити високу спектральну ефективність, підтримати значну кількість одночасних підключень і зберегти стійкість системи до завад навіть за умов інтенсивного багатокористувацького навантаження. На рис. 3.3 наведено приклад архітектури LDS-CDMA для шести користувачів, яка ілюструє принцип спільного використання частотного ресурсу кількома абонентами одночасно.

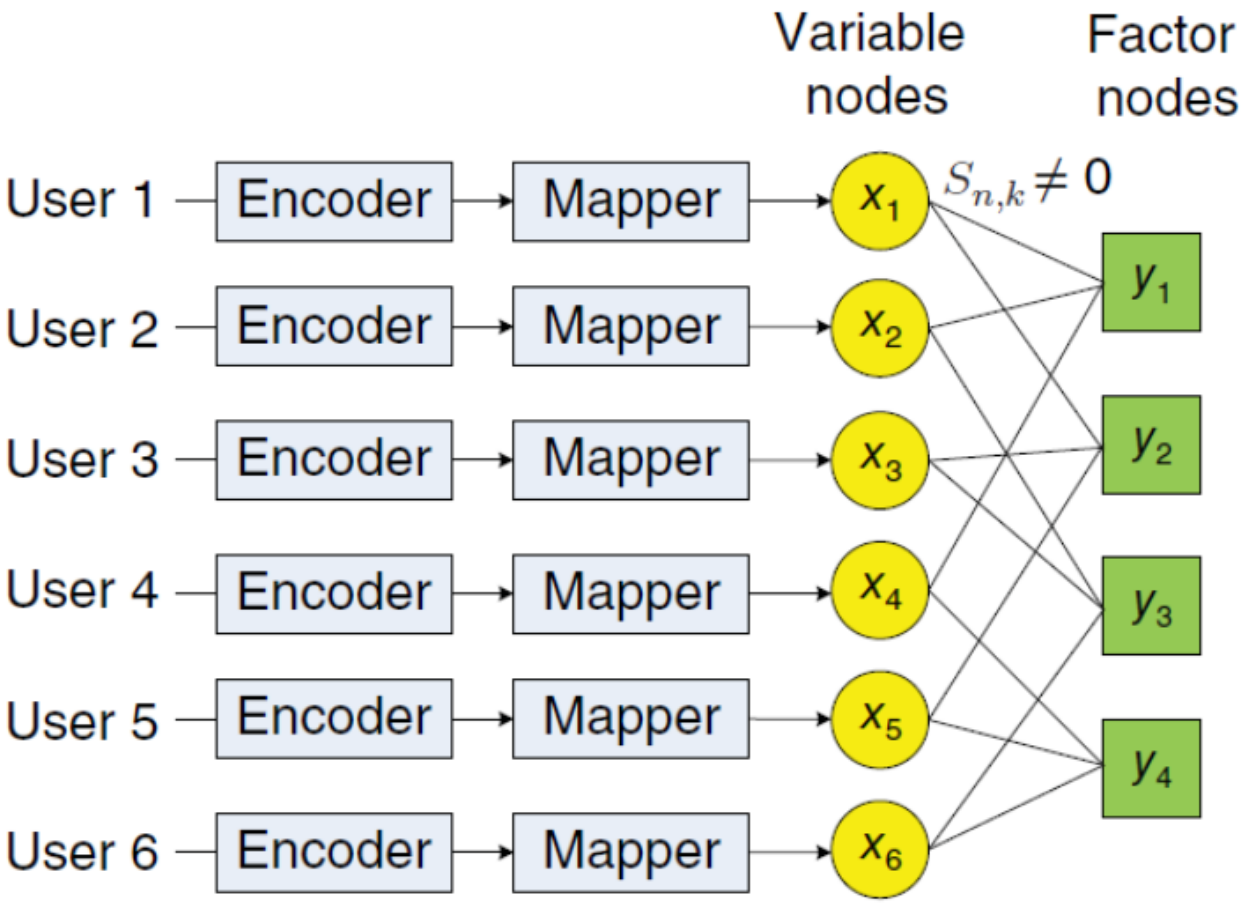


Рис. 3.3 Приклад схеми LDS-CDMA із 6 користувачами

Однією з важливих модифікацій є LDS-OFDM, яка за своїми характеристиками близька до LDS-CDMA, проте має принципову відмінність у способі відображення даних. Якщо в LDS-CDMA інформаційні символи накладаються на часові відліки, то в LDS-OFDM вони відображаються безпосередньо на піднесучі OFDM. Такий підхід дозволяє застосовувати алгоритм обміну повідомленнями (MPA) як детектор із низькою обчислювальною складністю, що суттєво спрощує обробку сигналів і підвищує ефективність системи.

Крім того, LDS-OFDM реалізує багатонесучу передачу, що робить її особливо зручною для роботи у широкосмугових каналах, характерних для сучасних систем зв’язку. Високий рівень сумісності з технологією OFDM забезпечує цій модифікації гнучкість у керуванні частотно-часовими ресурсами, дозволяючи адаптувати мережу до різних сценаріїв використання, кількості користувачів та умов поширення сигналу.

Завдяки такому поєднанню властивостей, LDS-OFDM розглядається як перспективне рішення для широкосмугових систем нового покоління, оскільки поєднує переваги багатонесучої модуляції з ефективністю неортогонального множинного доступу.

Множинний доступ на основі розрідженого кодування (SCMA)

SCMA (sparse code multiple access) можна розглядати як розвиток та узагальнення системи LDS-CDMA. На відміну від традиційних рішень, у SCMA передавання інформації здійснюється на ортогональних піднесучих, що формуються за допомогою оберненого швидкого перетворення Фур'є (IFFT), подібно до технології OFDMA. Цей метод було розроблено на основі LDPC-кодів (low density parity check codes), у яких для закріплення користувачів за піднесучими застосовуються спеціальні розріджені матриці.

Функціональні характеристики системи SCMA визначаються через так звані кодові книги, які формуються на базі цих матриць. Алгоритм роботи виглядає наступним чином: кожен абонент формує послідовність бітів bvb_vbv, які спершу проходять етап завадостійкого кодування. Далі біти надходять до SCMA-кодера, що виконує дві ключові задачі:

1. розподіляє користувачів між піднесучими;
2. перетворює групи бітів на набір комплексних амплітуд, що відображаються на піднесучі за принципом квадратурної амплітудної модуляції (QAM).

Таким чином, один користувач одночасно задіює кілька піднесучих, що означає реалізацію принципу розширення спектра. Після цього отримані комплексні амплітуди подаються на блок формування сигналу у часовій області — типовий OFDM-модуль, який складається з IFFT та додавання циклічного префікса.

Процес розподілу користувачів між піднесучими визначається розрідженою матрицею BBB. На рис. 3.4, а наведено приклад такої матриці, яку також зручно подати у вигляді фактор-графа (рис. 3.4, б). У цьому графі кола (стовпці матриці B) позначають піднесучі, а квадрати (рядки матриці B) відповідають користувачам. Лінії зв'язку між вершинами показують, які саме піднесучі задіює кожен

користувач. Індекс k використовується для позначення піднесучих, а індекс v — для позначення користувачів.

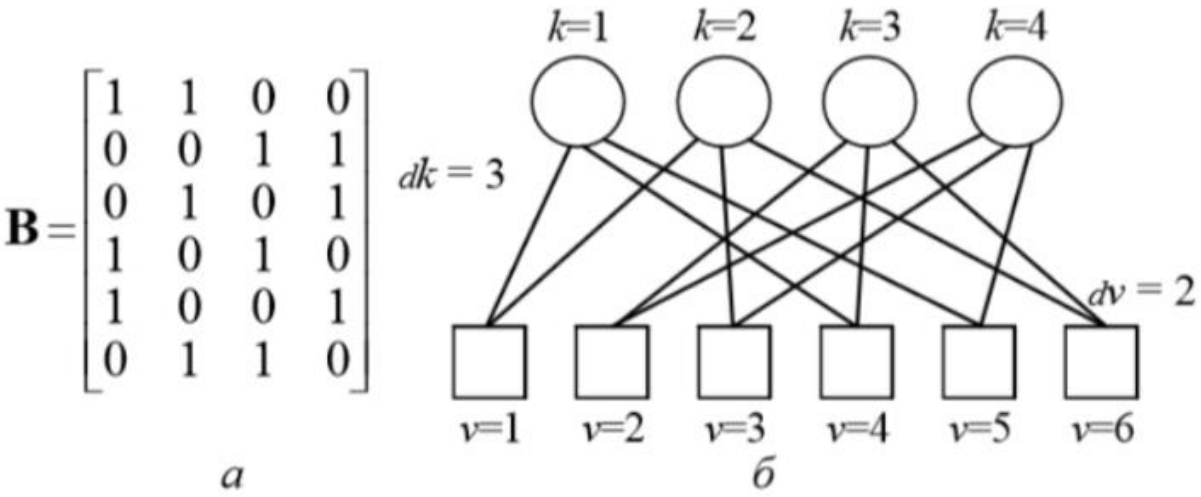


Рис. 3.4 Формуюча матриця SCMA для V = 6, F = 4 (а) та відповідний їй фактор-граф (б)

Використовуючи розріджену матрицю, створюють кодову книгу SCMA, у якій визначаються значення комплексних амплітуд, що накладаються на піднесучі під час модуляції. Приклад такої кодової книги, побудованої для розглянутої вище матриці B, представлено на рис. 3.5.

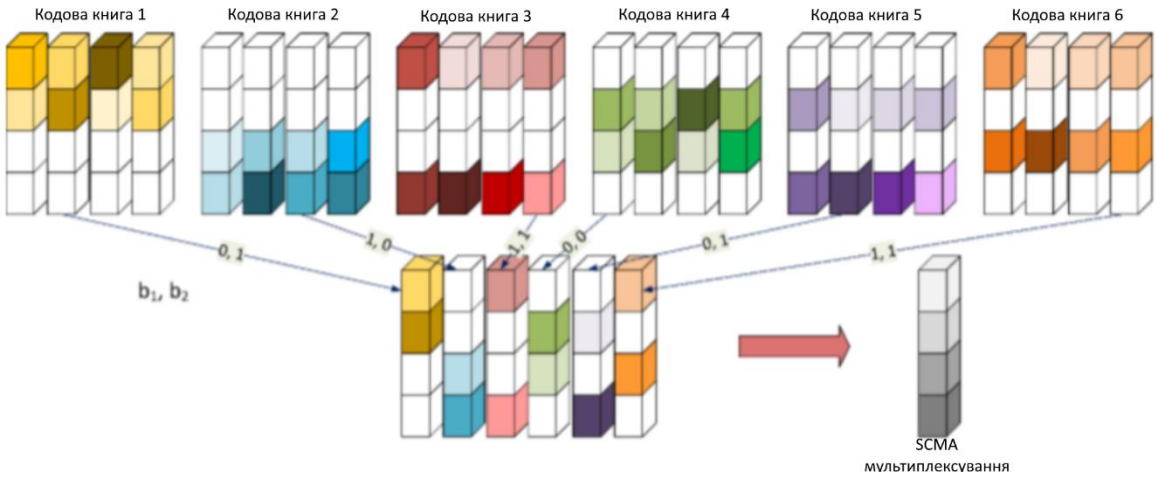


Рис. 3.5 Кодова книга SCMA для V=6, F=4

У методі SCMA кожному користувачу залежно від переданих бітів призначається відповідне кодове слово. Підсумковий SCMA-символ формується як сума VVV кодових слів усіх користувачів, унаслідок чого на кожній піднесучій

виникає результуюче сигнальне сузір’я, що поєднує інформацію від кількох абонентів одночасно.

Декодування символів здійснюється з використанням алгоритму обміну повідомленнями (MPA), який працює за ітеративним принципом. Його суть полягає у багаторазовому оновленні ймовірностей на фактор-графі в обох напрямках, що дає змогу з високою точністю відновлювати дані навіть у складних умовах радіоканалу.

Популярність SCMA у сучасних та перспективних радіоінтерфейсах пояснюється рядом переваг:

- використання кодових книг на основі розріджених матриць дозволяє системі **гнучко реагувати на стан каналу** і зберігати стабільність роботи;
- кодові книги забезпечують **меншу ймовірність бітових помилок** порівняно з багатьма іншими методами множинного доступу;
- під час організації висхідного каналу **не потрібно передавати службову інформацію**, що підвищує **спектральну ефективність**;
- кількість користувачів у SCMA може бути **більшою за кількість піднесучих**, що забезпечує кращу масштабованість у порівнянні з традиційними системами;
- технологія демонструє **вищу стійкість до завад**, ніж класичні схеми OFDM. Водночас SCMA має і певні обмеження:
- для її функціонування потрібні **нелінійні приймачі**, що ускладнює технічну реалізацію;
- створення **кодових книг** є складним завданням. Сьогодні для цього застосовують субоптимальні алгоритми з численними наближеннями, які знижують обчислювальну складність, але водночас не дають повної впевненості, наскільки отримані результати близькі до теоретично найкращих.

3.4 Множинний доступ із бітовим розділенням

У системах сучасного зв’язку символи сигнального сузір’я відіграють ключову роль у передаванні інформації. Кожен такий символ кодується кількома бітами — від двох у простих модуляційних схемах до шістнадцяти і більше у складних, наприклад у QAM-64 або QAM-256. Цей факт дозволяє реалізувати принципово новий підхід до організації множинного доступу, який отримав назву бітове розділення. Його сутність полягає в тому, що різні біти одного й того ж символу не обов’язково належать одному користувачеві: вони можуть бути розподілені між кількома абонентами одночасно. Завдяки цьому один і той самий символ використовується більш ефективно, адже в ньому паралельно кодується інформація від кількох користувачів, що дозволяє суттєво підвищити щільність і ефективність передачі.

Основною технологією, яка реалізує цей підхід, є мультиплексування з бітовим розділенням (bit division multiplexing, BDM). Вона застосовується насамперед у нисхідному каналі зв’язку, тобто від базової станції до абонентських пристроїв. Важливою перевагою BDM є її гнучкість: система може перерозподіляти біти символів між користувачами в реальному часі, враховуючи поточні характеристики каналу зв’язку. Наприклад, користувач, який перебуває на периферії зони покриття та отримує сигнал із низьким відношенням сигнал/шум, може отримати більшу частку бітів у символі. Водночас користувачі, які знаходяться ближче до базової станції та мають стабільний канал, отримають меншу кількість бітів, але при цьому збережуть прийнятну якість обслуговування. Таким чином, BDM реалізує адаптивне керування швидкістю передачі даних, що особливо важливо для майбутніх мереж 5G та 6G, де кількість користувачів і пристроїв зростає експоненційно.

Ще однією значною перевагою BDM є простота реалізації приймальної частини системи. Для декодування даних використовується звичайний демодулятор QAM, добре відпрацьований у сучасних технологіях. Це означає, що навіть за умов зростання кількості користувачів не виникає потреби у складних

багатокористувацьких приймачах, які вимагають значних обчислювальних ресурсів. З огляду на це, BDM можна розглядати як компроміс між високою ефективністю та збереженням відносної простоти апаратної реалізації.

Проте концепція бітового розділення не обмежується лише BDM. Серед подібних рішень виділяється також множинний доступ із розширенням сигнального сузір'я (constellation expansion multiple access, CEMA). Сутність цього методу полягає в одночасній передачі потоків даних кількох користувачів, які мають близькі характеристики каналу, зокрема співвідношення сигнал/шум. Для цього біти кожного користувача відображаються на точки сигнального сузір'я за спеціальною схемою, яка змінюється з часом. Такий підхід забезпечує рівномірний рівень захисту від помилок для всіх абонентів. При цьому багатокористувацькі потоки можуть передаватися паралельно в одних і тих самих частотно-часових ресурсних блоках OFDMA. Це означає, що кількість одночасно обслуговуваних користувачів у CEMA може бути більшою, ніж у класичній системі OFDMA, що безпосередньо підвищує спектральну ефективність і робить систему більш масштабованою.

Розвиток CEMA привів до появи кількох удосконалених варіантів. Найбільш перспективними вважаються:

- RA-CEMA (rate-adaptive constellation expansion multiple access), або REMA, яка забезпечує адаптивне змінення структури сузір'я залежно від цільової швидкості передачі даних. Цей підхід дозволяє системі оптимізувати використання частотно-часових ресурсів у реальному часі.
- EDC-NOMA (NOMA with equal distance constellation) — технологія, що застосовує сузір'я з рівновіддаленими точками. Це дозволяє мінімізувати ймовірність помилок і забезпечити високу надійність прийому навіть у зашумлених каналах.

Особливу увагу дослідників привертає саме REMA, адже вона поєднує в собі властивості PD-NOMA та принципи бітового розділення. У цій схемі кілька користувачів можуть одночасно обмінюватися даними в межах тієї самої смуги частот і того самого часовго інтервалу. Завдяки комбінуванню сигналів на рівні бітів

утворюються комбіновані символи, які займають рівновіддалені позиції у сигнальному сузір’ї. Це робить систему стійкішою до помилок та інтерференцій. Водночас REMA дозволяє ефективніше використовувати наявний спектр і забезпечує кращу якість обслуговування для всіх абонентів незалежно від їхнього розташування відносно базової станції.

На рисунку наведено приклад сигнального сузір’я при модуляції QAM-16 для двох користувачів у системі REMA. Біти, що належать першому (віддаленому) користувачу, позначені чорним кольором, а біти, що відносяться до другого (ближнього) користувача, позначені червоним. Така схема демонструє, як у межах одного ресурсу можна обслуговувати одразу двох абонентів без істотної втрати якості сигналу.

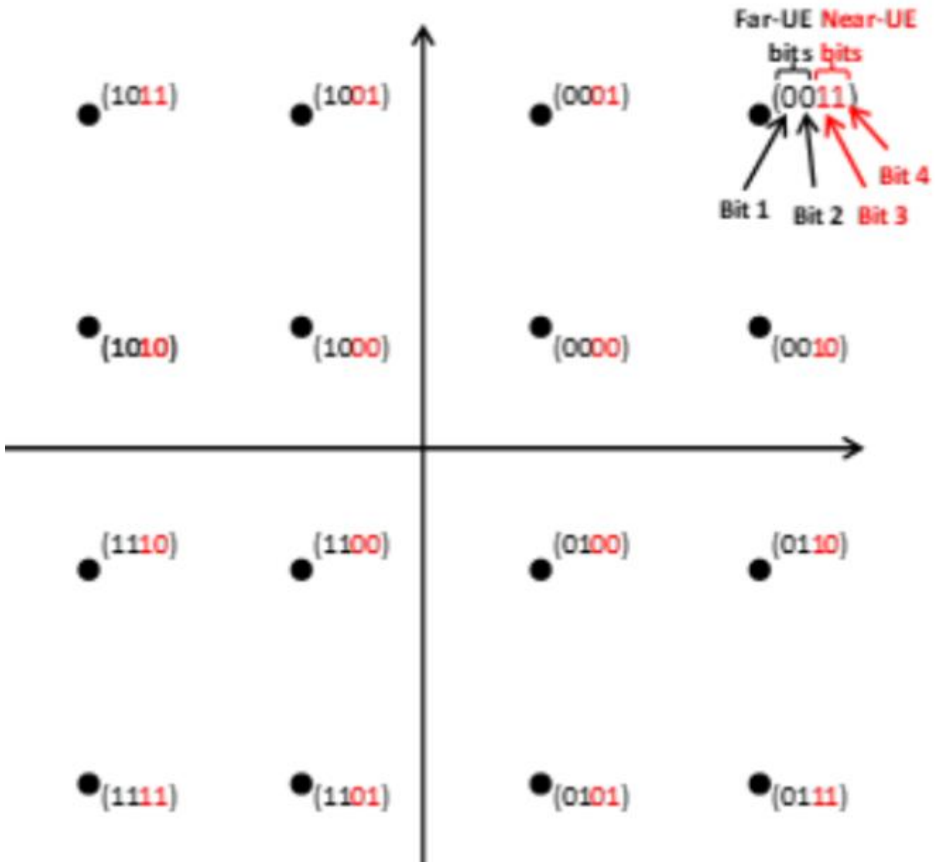


Рис. 3.6 Сигнальне сузір'я QAM-16 для двох користувачів у схемі REMA

Узагальнюючи, можна сказати, що технології на основі бітового розділення — BDM, CEMA та REMA — відкривають новий напрям у розвитку систем множинного доступу. Вони дозволяють забезпечити значно вищу спектральну ефективність, розширити можливості адаптації до різних умов каналу та

обслуговувати більшу кількість користувачів, ніж традиційні методи OFDMA чи навіть класичні реалізації NOMA. Попри певні технічні складності у реалізації, ці технології вже зараз розглядаються як перспективна основа для майбутніх мереж 5G Advanced і 6G, у яких навантаження на радіоінтерфейс буде безпрецедентно високим.

Ще одним представником цього класу є метод ортогонального множинного доступу на основі будівельних блоків розрідженого сузір'я (*building block sparse constellation based orthogonal multiple access, BOMA*). Суть підходу полягає в тому, що інформація від користувача з кращими параметрами каналу (CSI) накладається на символи користувача зі слабким каналом (рис. 10). Завдяки такій комбінації істотно підвищується ємність багатокористувацької системи.

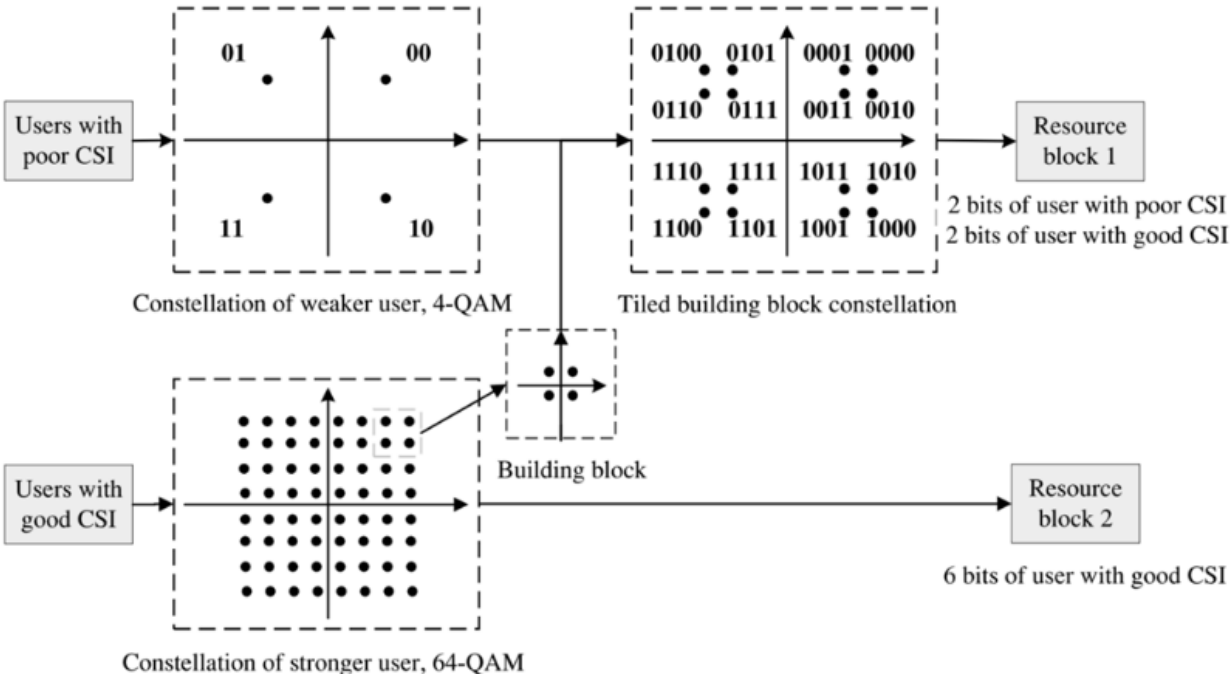


Рис. 3.7 Принцип дії технології BOMA для двох користувачів

У схемі BOMA користувач зі слабким CSI (B-користувач) застосовує сузір'я з більшими мінімальними відстанями між точками, що дає змогу зберігати прийнятну ймовірність бітової помилки. При цьому кожна точка його сузір'я поділяється на кілька точок підсузір'я з меншими відстанями. Інформація для користувача з хорошим CSI (G-користувача) передається саме через ці підсузір'я, оскільки він здатен їх розрізняти. Для B-користувача ж кожне підсузір'я

інтерпретується як одна точка, і його дані кодуються вже положенням підсузір’я в цілому.

Передавальна та приймальна частини у BOMA залишаються відносно простими та близькими за структурою до апаратури, яка використовується в системах 4G. Для впровадження цієї технології достатньо мінімальних змін у програмному забезпеченні, що робить її сумісною з перспективними рішеннями, включаючи масивні MIMO-системи. Важливо й те, що на відміну від інших неортогональних методів, BOMA не потребує складних процедур розподілу потужності та застосування алгоритмів SIC. Однак певним обмеженням залишається необхідність поєднання користувачів у пари, що дещо знижує універсальність і гнучкість цієї схеми.

Варто також зазначити, що бітове розділення користувачів не є окремим ресурсним простором. Механізм розподілу бітів усередині символу між абонентами фактично можна розглядати як специфічний вид кодування. Саме тому методи бітового розділення користувачів зараховують до групи технологій кодового розділення.

4. DELTA-OMA ЯК НОВИЙ МЕТОД МНОЖИННОГО МАСОВОГО ДОСТУПУ В 6G

4.1 Основні поняття

Дельта-ортогональний множинний доступ (D-OMA, *delta orthogonal multiple access*) сьогодні розглядається як один із ключових підходів до організації масового доступу в стільникових мережах шостого покоління (6G). Поява цього методу є закономірною відповіддю на ті виклики, які постають перед сучасними безпроводовими системами: стрімке зростання кількості підключених пристроїв, необхідність обробки надвеликих обсягів трафіку, а також забезпечення гарантованої якості обслуговування для різнорідних користувацьких сервісів. Традиційні ортогональні схеми доступу (OFDMA, TDMA, CDMA) вже вичерпують свій потенціал і не можуть задовольнити вимоги щодо спектральної ефективності та масштабованості. Саме тому актуальним є використання нових концепцій, зокрема D-OMA, яка уможливлює значно вищий рівень оптимізації ресурсів.

D-OMA розвиває ідеї неортогонального множинного доступу (NOMA, *non-orthogonal multiple access*), що став основою у мережах 5G. Якщо NOMA дозволяв багатьом користувачам ділити один і той самий ресурс завдяки суперпозиції сигналів та подальшому застосуванню методів послідовного скасування перешкод (SIC), то D-OMA йде далі: він передбачає створення кластерів користувачів, які функціонують у частково перекриваних піддіапазонах. Це означає, що спектр використовується максимально ефективно, оскільки відбувається накладання ресурсів різних груп, що водночас контролюється алгоритмами координації та оптимізації.

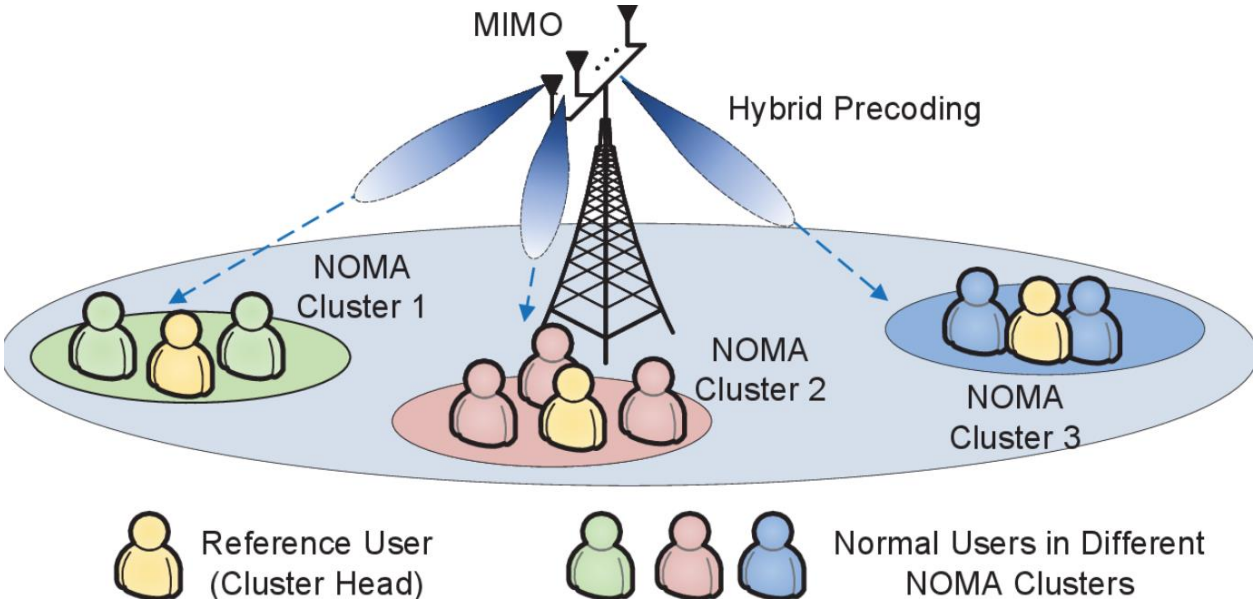


Рис. 4.1 Концепція NOMA

З технічного погляду, ефективність D-OMA оцінюється за показниками сумарної пропускної здатності системи, коефіцієнта спектральної ефективності та ймовірності виникнення перешкод у перекриваних піддіапазонах. Дослідження свідчать, що зі збільшенням ступеня перекриття можливо досягати зростання сумарної пропускної здатності, але водночас виникає потреба в складніших алгоритмах обробки сигналів для запобігання взаємним завадам. Таким чином, D-OMA дозволяє досягати динамічного балансу між продуктивністю та якістю обслуговування.

Ще однією перевагою цього методу є його безпековий потенціал. Часткове перекриття частотних піддіапазонів і суперпозиція сигналів створюють додаткові шари складності для зловмисників, які прагнуть здійснити перехоплення даних. У результаті, навіть за умови атак на фізичному рівні, система D-OMA забезпечує підвищений рівень захисту даних як у висхідній лінії зв’язку (*uplink*), так і в низхідній (*downlink*). Цей аспект особливо важливий для сценаріїв масового підключення пристроїв IoT, автономного транспорту, систем промислової автоматизації та критичних інфраструктур, де безпека даних відіграє вирішальну роль.

Попри значний науковий інтерес і очевидні переваги, впровадження D-OMA супроводжується низкою відкритих питань. Серед них — оптимізація методів

формування NOMA-кластерів, мінімізація рівня інтерференції між перекриваними смугами, а також створення ефективних протоколів керування ресурсами. Важливим завданням є також інтеграція цієї технології з іншими перспективними рішеннями 6G, такими як терагерцові комунікації, масивні MIMO-системи, інтелектуальне керування спектром та мережі зі штучним інтелектом у ядрі.

Таким чином, D-OMA може стати фундаментальним елементом архітектури 6G, що забезпечить одночасно високу пропускну здатність, гнучке використання спектра та вбудовану стійкість до загроз. Його застосування відкриває широкі можливості для впровадження нових сервісів — від ультранадійних систем зв'язку з низькою затримкою (URLLC) до масових підключень mMTC (*massive Machine Type Communication*). Очікується, що з розвитком теоретичної бази та практичних прототипів D-OMA стане однією з тих технологій, які визначатимуть майбутнє глобальної телекомунікаційної інфраструктури.

Кожне покоління стільникових беспроводових систем вирізняється впровадженням нового методу множинного доступу, який відповідає на актуальні виклики часу та визначає рівень ефективності використання частотного ресурсу. Еволюція від 1G до 5G демонструє логіку поступового ускладнення технологій і нарощування можливостей мереж. Системи першого покоління (1G) були побудовані на основі множинного доступу з частотним розділенням (FDMA — *frequency division multiple access*), що передбачало надання кожному користувачу окремого частотного каналу. Це було достатньо для передачі аналогового голосу, але в умовах зростання кількості абонентів та потреби у вищій ємності мереж така технологія швидко вичерпала свій потенціал.

У другому поколінні (2G) було реалізовано множинний доступ із часовим розділенням (TDMA — *time division multiple access*), де користувачі отримували у спільне користування одну частотну смугу, але кожен з них мав свій часовий інтервал. Це дало можливість підвищити ємність мережі та запровадити цифрові сервіси. Третє покоління (3G) зробило наступний крок завдяки множинному доступу з кодовим розділенням (CDMA — *code division multiple access*), який дозволяв багатьом користувачам працювати одночасно в одній і тій самій частотній

смузі, використовуючи унікальні кодові послідовності. Цей підхід значно розширив можливості мобільних мереж, дозволив запровадити послуги мобільного Інтернету та підтримувати більш високі швидкості.

Четверте покоління (4G) впровадило ортогональний метод — множинний доступ з ортогональним частотним розділенням (OFDMA — *orthogonal frequency division multiple access*), що дав змогу ефективніше розподіляти частотні ресурси між користувачами та забезпечити високошвидкісну передачу даних. OFDMA відзначався низьким рівнем взаємних завад, масштабованістю та гнучкістю у використанні спектра, що зробило його оптимальним вибором для широкосмугового мобільного доступу.

П’яте покоління (5G) відзначається тим, що не запроваджує принципово нової технології множинного доступу, як це відбувалося у попередні покоління. Його розвиток базується на вже відомих підходах, однак з’являються нові акценти. По-перше, 5G орієнтоване на використання надширокого спектра, включно з діапазонами до 60 ГГц. Це дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність, проте породжує нові технічні проблеми. Міліметрові хвилі (мм-хвилі) характеризуються значними втратами сигналу на трасі, низькою здатністю до проникнення крізь перешкоди та сильною залежністю від умов навколишнього середовища. Подолання цих обмежень вимагає застосування високонаправлених антенних систем, технологій формування та керування променями, а також надщільного розгортання точок доступу (AP — *access point*). При цьому виникає необхідність у складній координації роботи численних базових станцій і розробці інтелектуальних алгоритмів для мінімізації інтерференції між зонами покриття.

По-друге, у 5G з’являється неортогональний множинний доступ (NOMA — *non-orthogonal multiple access*), який доповнює традиційний OFDMA. Його ідея полягає в тому, що кілька користувачів можуть ділити один і той самий ресурс не тільки за часом і частотою, а й за рівнем потужності сигналу, що дозволяє значно підвищити спектральну ефективність. NOMA забезпечує більшу кількість одночасних з’єднань, що є критично важливим в умовах розвитку Інтернету речей (IoT) та масових комунікацій між пристроями.

Попри складнощі впровадження, очікується, що 5G стане основою для трьох ключових сервісів, які формують унікальність цього покоління. По-перше, це розширений мобільний широкосмуговий доступ (eMBB — *enhanced mobile broadband*), що забезпечить значно вищі швидкості передавання даних і ширше покриття в порівнянні з LTE, дозволяючи реалізувати послуги високоякісного відео, віртуальної та доповненої реальності. По-друге, наднадійний зв'язок із малою затримкою (URLLC — *ultra-reliable low-latency communication*), орієнтований на критично важливі застосування — від автономного керування транспортом до систем охорони здоров'я та промислових процесів, де навіть мінімальні затримки можуть бути неприпустимими. По-третє, масовий зв'язок машинного типу (mMTC — *massive machine-type communication*), спрямований на обслуговування величезної кількості пристроїв IoT із гарантованою якістю роботи. Це дозволяє реалізувати масштабні системи «розумних» міст, автоматизованих виробництв і глобальних мереж сенсорів.

Таким чином, 5G не створює революційного зсуву у сфері множинного доступу, але пропонує комплексне оновлення архітектури, засноване на інтеграції перевірених технологій з новими підходами. Його головна відмінність полягає не у заміні базових принципів, а у поєднанні розширеного спектра, використання вищих частот, впровадження неортогональних методів доступу та гнучкій архітектурі управління ресурсами. Завдяки цьому 5G стало не лише еволюційним кроком уперед, а й своєрідним фундаментом для формування нової парадигми зв'язку майбутнього — мереж шостого покоління (6G), де роль інтелектуальних алгоритмів, штучного інтелекту, терагерцових комунікацій та інтегрованих систем безпеки буде ще вагомішою.

Стільникові мережі п'ятого покоління (5G) стали важливим етапом у розвитку телекомунікаційних технологій, оскільки вони значно перевищили можливості 4G як у швидкості передавання даних, так і в зниженні затримки, підвищенні надійності, енергоефективності та масштабованості. Нові стандарти дозволили створювати компактніші термінальні пристрої та інтегрувати у мережеву інфраструктуру енергоощадні рішення. Проте навіть ці досягнення не можуть

повністю задовольнити зростаючі потреби цифрового суспільства та економіки, які дедалі більше залежать від обчислювальних потужностей, автоматизації, високошвидкісних комунікацій і нових форматів мультимедійного контенту. Саме тому відбувається поступовий перехід від 5G до мереж поза межами 5G (B5G — *beyond 5G*), які у своєму логічному завершенні формуватимуть основу для систем шостого покоління (6G).

Концепція 6G: мережа мереж і новий рівень інтеграції

6G орієнтоване не лише на збільшення швидкості передачі даних до терабітного рівня, а й на створення повністю інтегрованого середовища, де кожен пристрій, транспортний засіб чи навіть сенсор матиме одночасний доступ до кількох незалежних беспроводових мереж. Кожна з них обслуговуватиметься численними точками доступу (AP) та базовими станціями (BS), які у свою чергу будуть підключені до єдиної хмарної інфраструктури з підтримкою периферійних обчислень (edge computing), систем кешування та платформ штучного інтелекту.

У такому середовищі відбудеться повна трансформація принципів взаємодії користувача з мережею. Замість простої передачі даних мережі перетворяться на середовище доставки контенту та застосунків. Наприклад, у майбутніх «розумних містах» елементи міської інфраструктури (світлофори, камери відеоспостереження, датчики моніторингу повітря та трафіку) стануть невід’ємними вузлами 6G. У промисловості 6G забезпечить функціонування кіберфізичних систем для автоматизованого контролю виробництва, а в медицині — розвиток телемедицини, дистанційної діагностики й навіть хірургічних операцій із використанням тактильного Інтернету.

Крім того, беспроводові пристрої у 6G зможуть створювати однорангові P2P-з’єднання з використанням одно- або багатоступеневих каналів, а наземні мережі інтегруватимуться з повітряними, морськими та космічними сегментами. Це означає, що безпілотники, літальні апарати та супутники будуть функціонувати як мобільні базові станції чи точки доступу, створюючи єдине багаторівневе середовище зв’язку. Традиційні моделі стільникових мереж, орієнтовані на статичні

наземні базові станції, у таких умовах стають застарілими, адже 6G формуватиме динамічну, гібридну архітектуру, яка здатна адаптуватися до будь-яких умов.

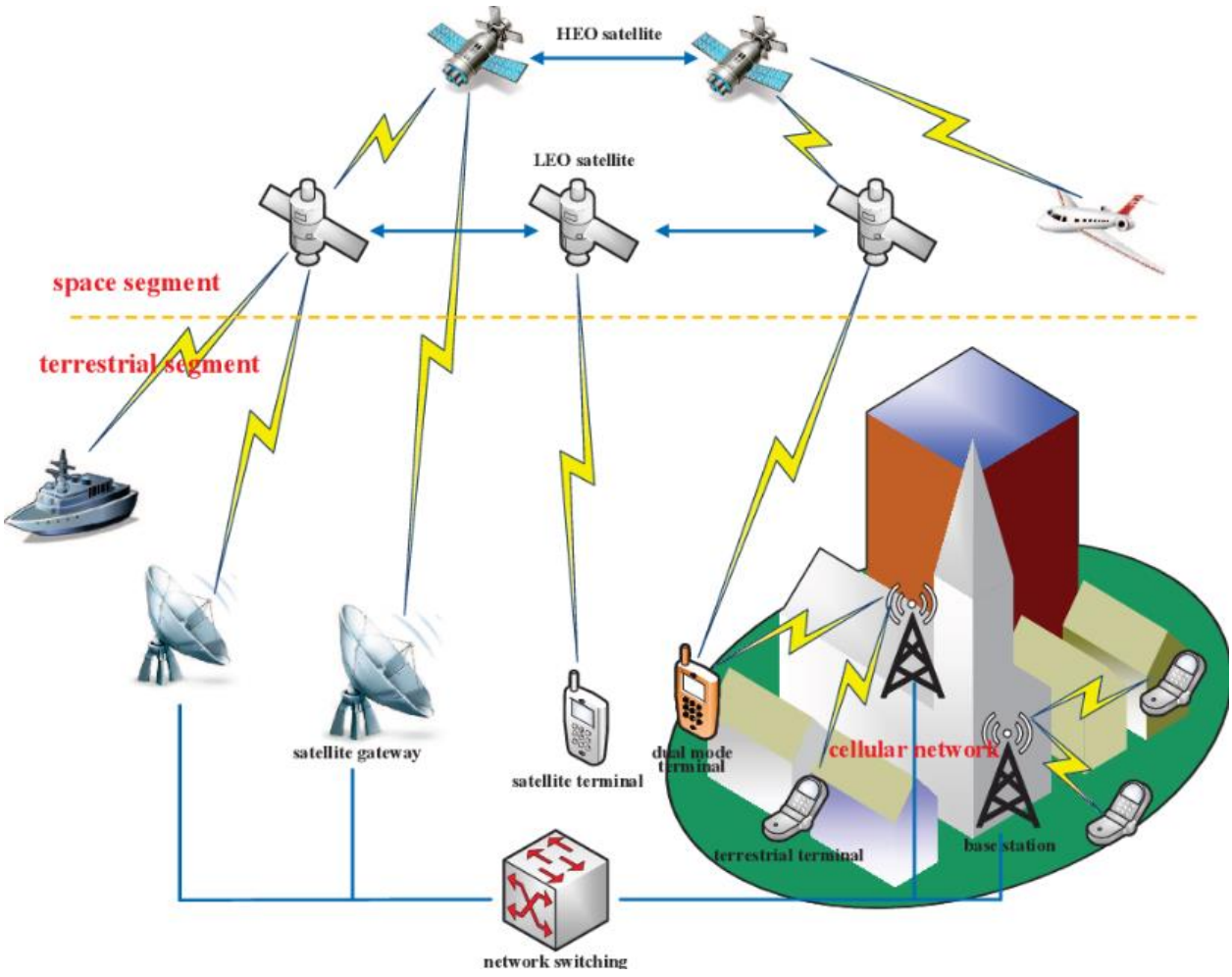


Рис. 4.2 Схема інтеграції наземних і супутникових мереж із використанням NOMA + когнітивного радіо у 6G

Мінімізація енергоспоживання

Нарощування кількості підключених пристроїв і збільшення обсягів оброблюваних даних неминуче підвищують потребу в енергоресурсах. Це стосується як терміналів користувачів, так і самих вузлів мережі. Використання нових методів обробки сигналів, алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту вимагатиме значних обчислювальних потужностей, що призведе до росту енергоспоживання.

Особливі виклики виникатимуть у радіочастотному обладнанні, зокрема в підсилювачах потужності та в аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачах. Робота у міліметровому та нанометровому діапазонах

потребуватиме нових матеріалів і схем для зменшення енергетичних втрат. З огляду на ультращільне розгортання точок доступу та широке впровадження серверів периферійних обчислень і кешування, виникає потреба в інноваційних системах енергозбереження. Серед можливих рішень:

- використання безпроводової підзарядки;
- технології збору енергії з навколишнього середовища (сонячної, теплової, кінетичної);
- динамічний розподіл енергоресурсів між вузлами мережі.

Розширення спектра і нові технології

Ще одним стратегічним напрямом розвитку 6G є розширення доступного спектра. Якщо 5G за рахунок технології нового радіо (NR) розширило частотний діапазон 4G (0,6–6 ГГц), то 6G охоплюватиме ще вищі частоти — міліметровий діапазон (30–300 ГГц) та навіть оптичний діапазон у вільному просторі (FSO, 200–385 ТГц). Це дає змогу досягти безпрецедентних швидкостей передавання даних, аж до терабітного рівня.

Проте робота на таких частотах пов’язана з низкою проблем: високими втратами сигналу на трасі, чутливістю до атмосферних умов і складністю реалізації стабільних каналів зв’язку. Вирішення цих проблем вимагатиме нових методів модуляції та кодування, когнітивного управління спектром, впровадження адаптивного формування променя та розробки інноваційних протоколів магістральних і доступових з’єднань.

Перспективні сценарії використання 6G

У майбутньому 6G стане основою для реалізації таких сценаріїв:

- **голографічні комунікації**, що дозволять у режимі реального часу передавати тривимірні зображення людей та об’єктів;
- **тактильний Інтернет**, який забезпечить передачу не лише аудіо та відео, а й тактильних відчуттів;
- **цифрові двійники**, коли будь-який фізичний об’єкт (машина, будівля, навіть людина) матиме свою віртуальну копію у мережі для прогнозування стану та оптимізації роботи;

- **повністю автономні транспортні системи**, що потребуватимуть наднадійного зв’язку з мінімальними затримками;
- **інтелектуальні системи охорони здоров’я**, які дозволять здійснювати віддалене хірургічне втручання та комплексний моніторинг стану пацієнтів.

Отже, 6G — це не просто наступний крок після 5G, а нова парадигма комунікацій, яка поєднує надшвидкісний зв’язок, інтеграцію наземних, повітряних і космічних сегментів, інтелектуальне керування ресурсами та максимальну енергоефективність. Воно стане фундаментом цифрової інфраструктури майбутнього, здатної забезпечити функціонування «розумних» міст, автономних транспортних систем, індустрії 4.0 та повноцінного інформаційного суспільства.

4.2 Безсотова архітектура для майбутніх безпроводових мереж

У класичній моделі розвитку мобільних мереж основою архітектури завжди була концепція «клітинності», коли кожен користувач обслуговувався в межах певної соти, яка покривалася базовою станцією. Такий підхід був ефективним у перших поколіннях стільникових систем (1G–4G), адже забезпечував передбачувану структуру та дозволяв керувати ресурсами спектра у відносно простих умовах. Проте з появою п’ятого покоління (5G) стало зрозуміло, що традиційна клітинна модель має серйозні обмеження, особливо в умовах сучасних мегаполісів і промислових кластерів, де формується надщільне середовище беспроводового доступу.

У майбутніх мережах, особливо у 6G, сценарії використання стають набагато складнішими: одночасно функціонуватимуть мільйони пристроїв, серед яких — сенсори Інтернету речей (IoT), модулі для промислових систем, автономний транспорт, пристрої доповненої та віртуальної реальності, елементи «розумних» міст і систем безпеки. У такому середовищі користувачі більше не можуть бути «прив’язані» до єдиної базової станції чи точки доступу. Натомість вони повинні мати змогу обслуговуватися одразу кількома вузлами, що забезпечить стабільність сигналу, зниження затримок і гнучке керування навантаженням.

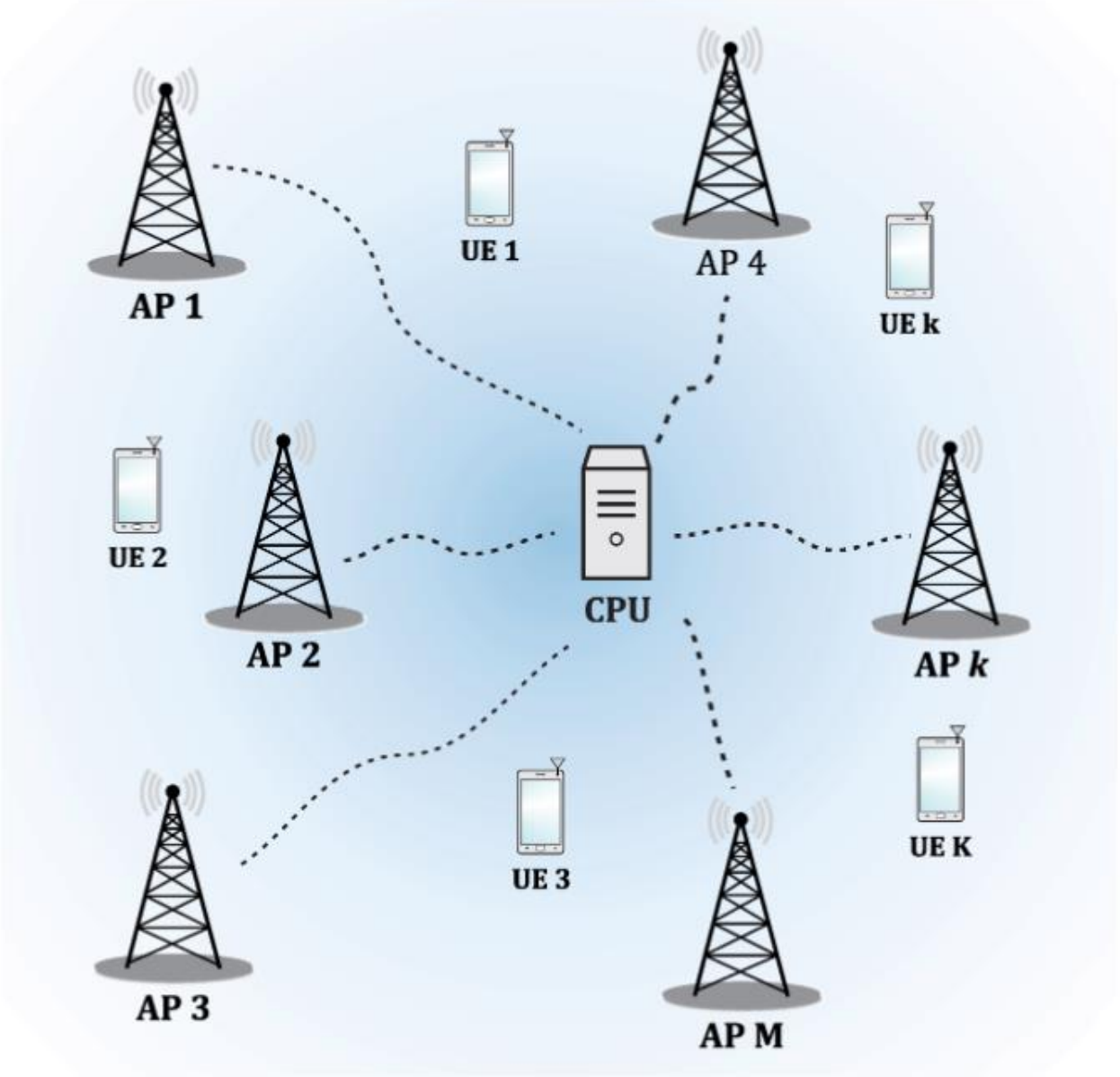


Рис. 4.3 Схема моделі користувачів та точок доступу (AP) із пулами обробки (CPU), ілюстрація безсотової мережі

Саме тут з’являється концепція безклітинної архітектури (cell-free networks), яка розглядається як ключовий елемент майбутніх 6G. Її принциповою відмінністю є відсутність чіткого поділу на зони обслуговування. Усі точки доступу (AP) та базові станції (BS) взаємодіють між собою через надшвидкі канали зворотного зв’язку і працюють як єдина розподілена система. Для кінцевого користувача така мережа виглядає як величезний масив багатовходових-багатовихідних систем (масив MIMO), де сигнал може одночасно надходити від кількох вузлів. Це забезпечує не лише кращу якість покриття, але й стійкість до перешкод, адже кожна точка доступу знає про всі активні пристрої у своєму оточенні.

Точки доступу в такій архітектурі можна інтерпретувати як віддалені радіоголовки (RRH — remote radio heads), що працюють за принципом хмарних мереж радіодоступу (CRAN — *cloud radio access networks*). Кожен термінал може обслуговуватися кількома RRH одночасно, а передача сигналу може реалізовуватися через координацію (coordinated transmission) або за допомогою мультиплексування. Це своєрідна узагальнена версія відомої технології CoMP (coordinated multipoint), у якій кілька точок доступу одночасно підтримують зв'язок із користувачем як у центрі зони, так і на її межах.

Розподіл ресурсів у такій системі потребує надшвидких обчислювальних центрів, які здатні у режимі реального часу призначати ресурси десяткам і сотням тисяч пристроїв. Для цього використовується концепція пулу блоків основної смуги частот (BBU pool), що дає змогу централізовано обробляти дані, подібно до архітектури CRAN. При цьому завдяки повній координації між RRH можна реалізувати оптимальне управління перешкодами, яке у класичних клітинних моделях було практично недосяжним.

Однак побудова безклітинних мереж породжує нові виклики, серед яких — проблема організації множинного доступу. Традиційні ортогональні методи (OMA), що поділяють ресурси у часі, частоті чи коді, в умовах надщільних сценаріїв виявляються недостатніми: вони не здатні ефективно масштабуватися на мільйони пристроїв. Технології NOMA (non-orthogonal multiple access), які стали однією з перспективних інновацій у 5G, пропонують розв'язання частини цих проблем. Суть NOMA полягає у тому, що кілька користувачів можуть поділяти один і той самий ресурсний блок, але при цьому сигнали розрізняються за рівнями потужності. На приймальній стороні використовується алгоритм послідовного скасування перешкод (SIC), який дозволяє поступово відокремлювати сигнали один від одного.

NOMA показала себе ефективною у сценаріях із великою кількістю підключень, але у класичному вигляді вона теж має обмеження — особливо коли йдеться про різнорідні сервіси з різними вимогами до якості обслуговування. Саме тому для 6G постає потреба у створенні гібридних рішень, які поєднують гнучкість NOMA та можливості нових архітектур. Перспективними виглядають підходи на

основі D-OMA (delta orthogonal multiple access), що передбачають використання частково перекриваних піддіапазонів для кластерів NOMA. Це дозволяє ще більше підвищити спектральну ефективність і забезпечити баланс між продуктивністю, стійкістю до перешкод і рівнем безпеки.

Безклітинні мережі, що інтегрують принципи NOMA та її похідних (наприклад, D-OMA), створюють фундамент для масштабного підключення пристроїв у майбутніх 6G. Вони здатні підтримувати mMTC (massive Machine Type Communication) на рівні мільйонів сенсорів і модулів, які функціонують без участі людини, а також URLLC (ultra-reliable low-latency communication) для критичних застосувань — автономного транспорту, промислової автоматизації чи систем охорони здоров’я.

Таким чином, майбутні безклітинні мережі 6G можна розглядати як глобальну інтегровану екосистему, де зникає класичний поділ на клітини, а управління доступом і ресурсами здійснюється на основі нових методів множинного доступу — від NOMA до D-OMA. Це не лише забезпечить надвисоку пропускну здатність та масштабованість, а й дозволить гнучко підлаштовувати мережу під вимоги конкретних сервісів. Такий підхід відкриває шлях до формування нового покоління цифрової інфраструктури, яка стане основою для розвитку «розумних» міст, Інтернету речей, голографічних комунікацій та інших передових технологій майбутнього.

4.3 Множинний доступ

Методи множинного доступу завжди були основою мобільних систем, адже саме вони визначають, як обмежені ресурси спектра розподіляються між користувачами. Історично перші покоління стільникового зв’язку (1G–4G) базувалися на ортогональних схемах доступу, коли кожен абонент отримував унікальний ресурс — частотний канал, часовий інтервал або кодову послідовність. Так, у 1G застосовувався FDMA, де спектр ділився за частотами; у 2G — TDMA, де користувачі розподілялися за часовими слотами; у 3G — CDMA, що дозволило

відрізняти канали завдяки кодам; а у 4G ключовим став OFDMA, який ефективно використовував множину ортогональних піднесучих частот. Ці методи забезпечували стабільність і простоту керування мережею, проте зі зростанням кількості пристроїв та різноманітності сервісів їх можливостей стало недостатньо.

OMA мало кілька суттєвих обмежень: низьку спектральну ефективність, адже невикористані ресурси не можна було перерозподілити; обмежену масштабованість, що ускладнювала підтримку великої кількості абонентів; слабку гнучкість у роботі з різнорідними сервісами; а також високу залежність від широкої смуги для забезпечення стабільної роботи. У результаті стало зрозуміло, що для 5G і тим більше для 6G потрібна нова концепція множинного доступу.

Неортогональний доступ NOMA, закріплений у специфікаціях 3GPP (версія 16), став відповіддю на цей виклик. Його суть полягає у тому, що кілька користувачів одночасно обслуговуються в одному піддіапазоні, а розділення сигналів відбувається не за часом чи частотою, а за рівнем потужності. Користувачі з гіршими умовами каналу отримують більшу частку потужності, а ті, хто має кращі умови, — меншу. На приймальній стороні застосовується послідовне скасування перешкод (SIC), завдяки чому сильніші сигнали декодуються й «віднімаються» першими, а слабші — після цього виділяються без спотворень. Це дозволяє одному піддіапазону обслуговувати кількох абонентів, значно підвищуючи ефективність використання спектра.

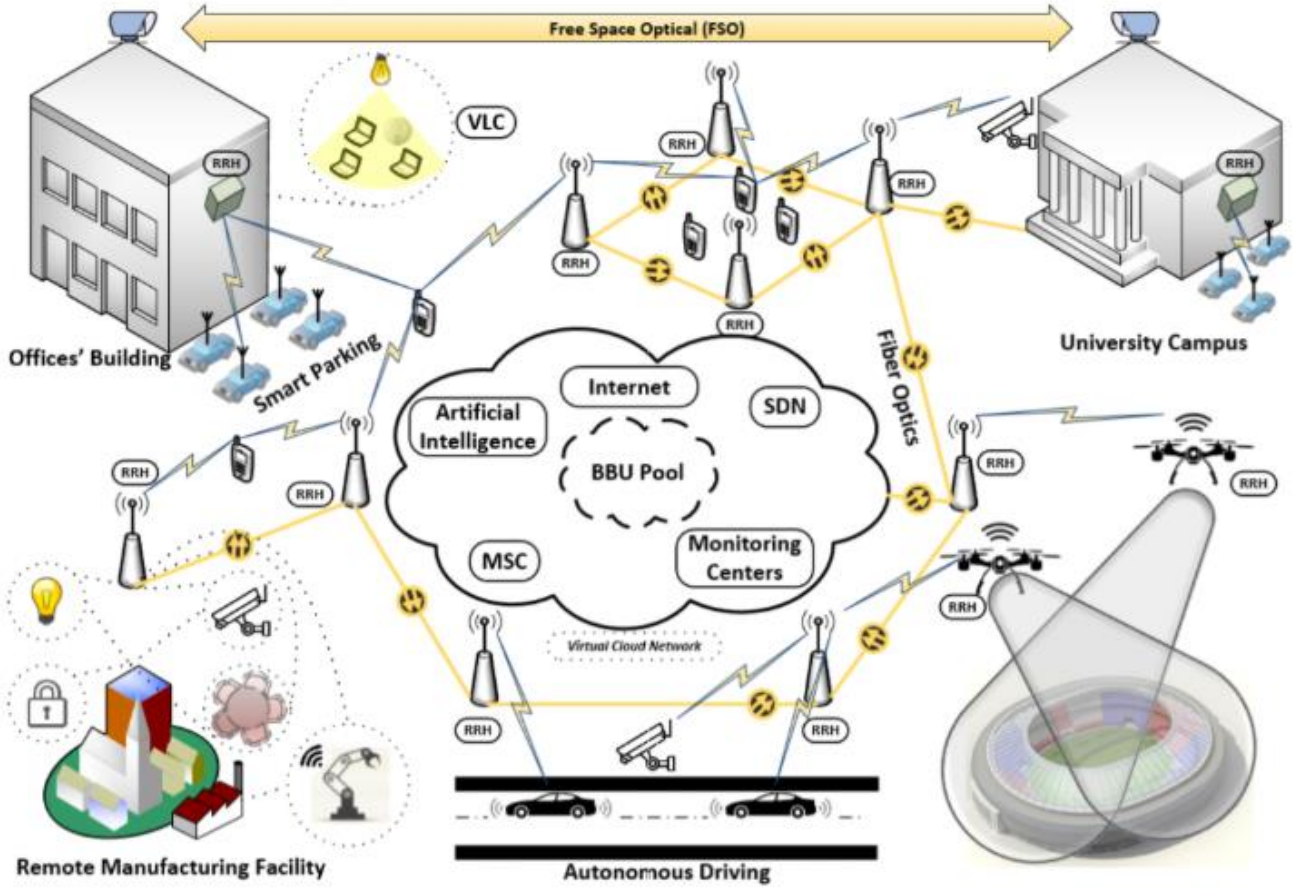


Рис. 4.4 Архітектура мережі 6G без сот

NOMA забезпечує суттєве зростання ємності мережі, дає змогу повніше використовувати ресурси, створює гнучкі умови для різних сценаріїв — від масових машинних комунікацій до критично важливих сервісів із мінімальною затримкою — та сприяє більш справедливому розподілу ресурсів. Водночас ця технологія має низку викликів: залишкові внутрішньокластерні завади, міжкластерні перешкоди через спільне використання піддіапазонів, зростання складності приймачів і необхідність обирати оптимальний розмір кластерів для запобігання накопиченню помилок.

Попри ці труднощі, саме NOMA вважається ключовою технологією для 6G, особливо у поєднанні з безклітинними архітектурами, де користувачі обслуговуються одразу кількома точками доступу. Тут класичні ортогональні схеми доступу вже не можуть забезпечити потрібну масштабованість, тоді як NOMA дає змогу ефективно координувати ресурси між великою кількістю пристроїв. Удосконаленою версією NOMA є D-OMA, яка використовує частково перекривані

піддіапазони. Це дозволяє ще більше підвищити спектральну ефективність, краще контролювати рівень інтерференції й водночас забезпечити вищий рівень захисту даних, адже структура сигналів стає складнішою для перехоплення.

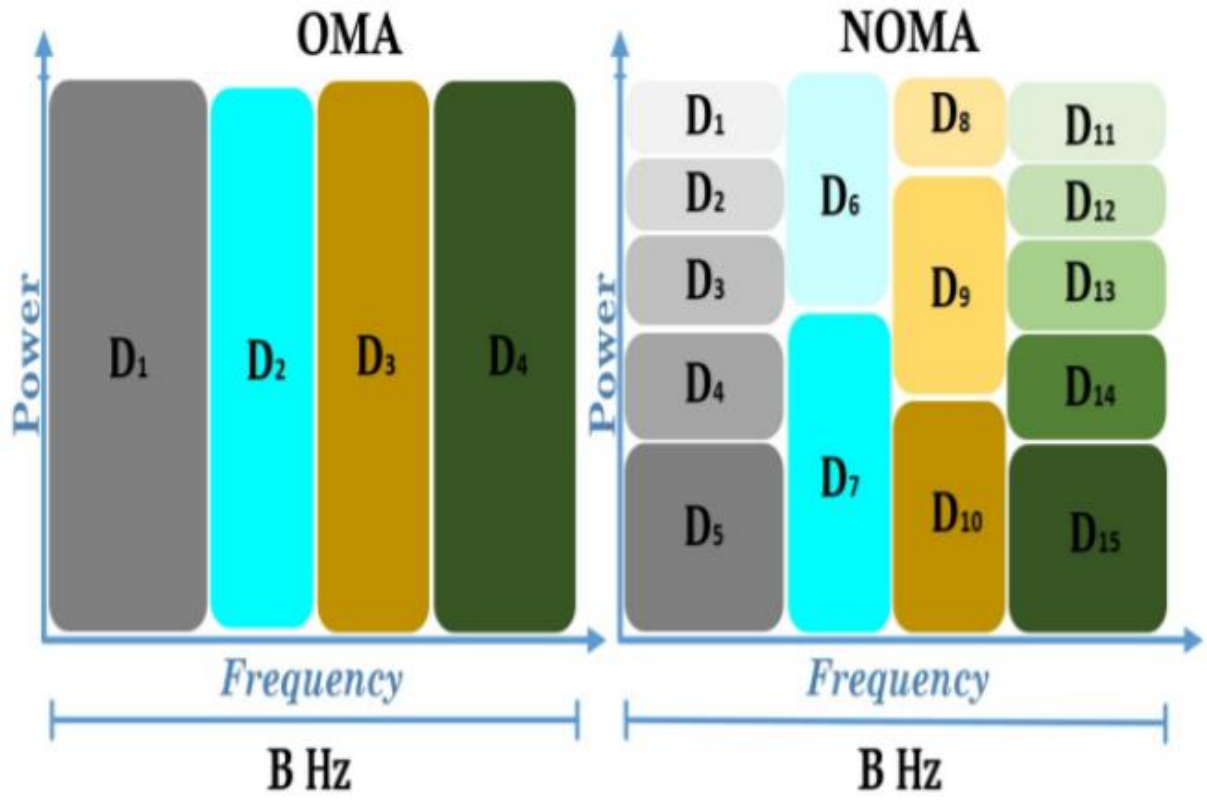


Рис. 4.5 Концепція NOMA для обслуговування декількох безпроводових пристроїв в тому самому піддіапазоні

Отже, перехід від OMA до NOMA та її похідних (зокрема D-OMA) є не просто вдосконаленням технічних рішень, а фундаментальною зміною парадигми. Якщо ортогональні методи забезпечували стабільність і простоту у перших поколіннях мобільних систем, то неортогональні технології створюють основу для масштабних, гнучких і високоефективних мереж майбутнього. Саме вони здатні реалізувати глобальну цифрову інфраструктуру 6G, що підтримуватиме мільйони пристроїв одночасно, гарантуватиме баланс між пропускною здатністю, енергоефективністю та безпекою й відкриватиме можливості для нових сервісів — від голографічних комунікацій і тактильного Інтернету до автономних транспортних систем і розумних міст.

ВИСНОВКИ

У роботі було досліджено можливості та перспективи застосування технологій множинного доступу у майбутніх мережах шостого покоління (6G). Показано, що розвиток мобільного зв’язку супроводжується стрімким зростанням вимог до пропускної здатності, надійності, енергоефективності та здатності одночасно обслуговувати величезну кількість користувачів і пристроїв. Традиційні методи — FDMA, TDMA, CDMA, OFDMA, що забезпечували роботу поколінь від 1G до 4G, більше не відповідають майбутнім потребам. Саме тому у 5G з’явилися перші реалізації NOMA, а в 6G очікується широке впровадження гібридних та неортогональних схем.

Особливу увагу приділено аналізу PD-NOMA та її похідних (Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA), які дозволяють гнучко розподіляти потужність і ефективніше використовувати радіоресурс. Перспективними є також технології бітового розділення (BDM), розширення сузір’я (CEMA, REMA, EDC-NOMA) та BOMA, які підвищують спектральну ефективність завдяки новим підходам до структури символів. У сфері кодового домену досліджено SCMA та LDS-CDMA/OFDM, що дозволяють обслуговувати більше користувачів, ніж кількість піднесучих, зберігаючи прийнятну якість.

Розглянуто також модифікації класичних методів — FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM, W-OFDM, SEFDM, OTFS, які спрямовані на подолання недоліків OFDM/OFDMA. Особливо перспективною є OTFS, що забезпечує стійкість у сценаріях з високою мобільністю, та SEFDM, яка підвищує спектральну ефективність шляхом ущільнення піднесучих.

Важливим напрямом розвитку є відмова від жорсткої клітинної архітектури на користь cell-free систем, де групи точок доступу спільно обслуговують користувачів, поєднуючи це з масивними MIMO, MEC та інтелектуальним розподілом ресурсів. Це дозволяє знизити міжсотні завади та забезпечити рівномірну якість обслуговування.

У підсумку можна стверджувати, що множинний доступ стає ключовим елементом у формуванні архітектури 6G. Комбінація ортогональних, неортогональних та кодових технологій створює підґрунтя для високоефективних мереж, здатних обслуговувати мільярди пристроїв з гарантованим рівнем сервісу. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію множинного доступу з інтелектуальними системами управління, розробку адаптивних алгоритмів декодування та забезпечення кібербезпеки, що стане ключем до реалізації повного потенціалу мереж 6G.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Clerckx, B., Mao, Y., Li, V. Rate-Splitting Multiple Access for 6G Networks. Cambridge University Press, 2023. – систематизований виклад теорії RSMA та її ролі у 6G.
2. Dai, L., Wang, B., Ding, Z., Wang, Z., Chen, S. Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. Springer, 2020. – класична монографія з NOMA, основа для подальших 6G-досліджень.
3. Zhang, N., et al. 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. Springer, 2021. – огляд архітектури та технологій 6G, включно з MA.
4. Li, Y., Sun, Y., Ding, Z. Non-Orthogonal Multiple Access for 6G. Wiley, 2022. – спеціалізована книга про NOMA у майбутніх мережах.
5. Clerckx, B., Mao, Y., Yang, Z., Chen, M., Alkhateeb, A., et al. Multiple Access Techniques for Intelligent and Multi-Functional 6G: Tutorial, Survey, and Outlook. arXiv, 2024. – навчальний огляд із перспективами розвитку MA.
6. Cao, X., Yang, B., Wang, K., Li, X., Yu, Z., Yuen, C., Zhang, Y., Han, Z. AI-Empowered Multiple Access for 6G: A Survey of Spectrum Sensing, Protocol Designs, and Optimizations. arXiv, 2024. – огляд AI-підходів для MA у 6G.
7. Dizdar, O., Mao, Y., Han, W., Clerckx, B. Rate-Splitting Multiple Access: A New Frontier for the PHY Layer of 6G. arXiv, 2020. – концепція RSMA для фізичного рівня 6G.
8. Al-Eryani, Y., Hossain, E. Delta-OMA (D-OMA): A New Method for Massive Multiple Access in 6G. arXiv, 2019. – пропозиція нового методу D-OMA.
9. Aditya, S., Kim, Y. J. D., Vargas, D., Redgate, D., Dizdar, O., et al. Rate-Splitting Multiple Access for 6G: Prototypes, Experimental Results and Simulations. arXiv, 2025. – прототипи та результати випробувань RSMA.
10. Clerckx, B., Mao, Y., Li, J., Chen, M. A Primer on Rate-Splitting Multiple Access: Tutorial, Myths, and Frequently Asked Questions. arXiv, 2022. – довідник із RSMA, розвінчання міфів.

11. Mohsan, S. A. H., Li, Y. A Survey of NOMA: State of the Art, Key Techniques, Open Challenges, Security Issues and Future Trends. arXiv, 2023. – огляд сучасного стану NOMA.
12. Sarkar, D., et al. A Comprehensive Survey on IRS-Assisted NOMA-Based Networks. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2023. – поєднання IRS та NOMA.
13. Li, P., et al. Exploring the Key Technologies and Applications of 6G. iScience, Elsevier, 2025. – дослідження ключових технологій 6G.
14. Akbar, M. S., et al. On Challenges of Sixth-Generation (6G) Wireless Networks. Computer Networks, Elsevier, 2025. – проблеми та виклики 6G-мереж.
15. Shahjalal, M., et al. Enabling Technologies for AI Empowered 6G Massive Radio Access. Digital Communications and Networks, Elsevier, 2023. – AI для масового доступу у 6G.
16. Application of NOMA in 6G Networks. IEEE/CIC ICCC Proceedings, 2021. – приклади застосування NOMA у 6G.
17. Future Directions in Multiple Access for 6G. Internet Technology Letters, Wiley, 2025. – аналітичний огляд напрямів розвитку MA.
18. Ding, Z., et al. A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017. – класичний огляд NOMA.
19. Zeng, M., et al. Energy Efficiency in NOMA: Architectures, Techniques, and Applications. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019. – енергоефективність у NOMA.
20. Huang, Y., et al. Deep Learning for Multiple Access in 6G Networks. IEEE Network, 2022. – DL-методи для MA у 6G.
21. Yang, Z., et al. Intelligent Reflecting Surface Aided NOMA in 6G Networks. IEEE Transactions on Communications, 2021. – IRS-підтримка NOMA.
22. Alkhateeb, A., et al. Deep Learning Coordinated Multiple Access for Massive MIMO in 6G. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2023. – координація MA з DL для massive MIMO.

23. 3GPP TR 38.859 – Study on Multiple Access Techniques for NR and Beyond. 3GPP, 2023. – стандарт 3GPP з аналізу нових методів MA.
24. ITU-R Report M.2516 – Future Technology Trends of Terrestrial IMT Systems Towards 2030 and Beyond. ITU, 2022. – прогнозовані тренди технологій доступу, включно з NOMA, RSMA, SDMA.
25. 6G White Paper on Multiple Access Techniques. 6G Flagship, University of Oulu, 2021. – аналітичний звіт з пропозиціями щодо MA у 6G.

ДЕМОНСТРАЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ У МЕРЕЖАХ 6G

Виконав:
студент групи ТСДМ-62
Ілля КАНЄВСЬКИЙ

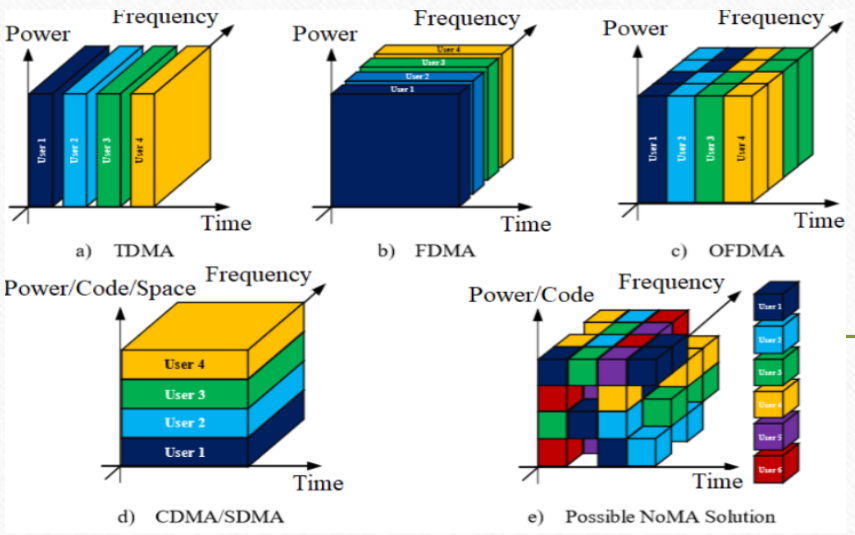
МЕТА РОБОТИ ТА АКТУАЛЬНІСТЬ

- Мета роботи – аналіз, систематизація та узагальнення сучасних і перспективних технологій множинного доступу (OMA та NOMA), визначення напрямів їх удосконалення для підвищення спектральної ефективності, енергетичної стійкості та пропускної здатності мереж 6G.
- Об’єкт дослідження – процеси організації множинного доступу в безпроводових телекомунікаційних системах, що забезпечують одночасний доступ великої кількості користувачів до спільного радіоресурсу.
- Предмет дослідження – методи, алгоритми та технології ортогонального (OMA) і неортогонального (NOMA) множинного доступу, їх модифікації (OFDMA, SC-FDMA, PD-NOMA, Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, SEFDM, OTFS тощо) та їх вплив на ефективність функціонування телекомунікаційних систем нового покоління.

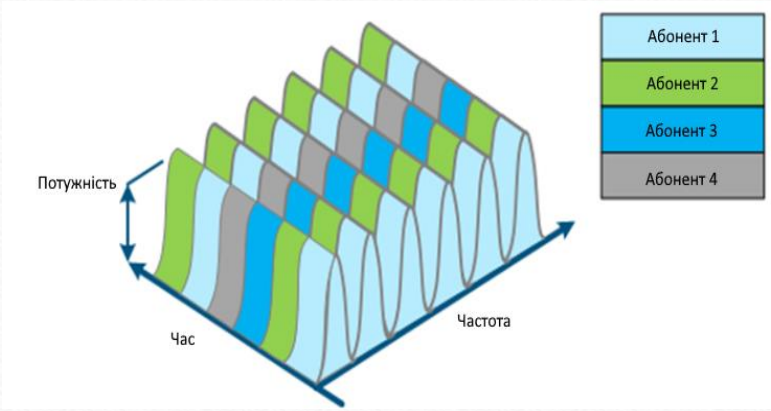
Актуальність.

- Сучасний етап розвитку телекомунікаційних систем характеризується вибуховим зростанням кількості користувачів та пристроїв, що потребують постійного підключення до мережі. Із переходом до ери Інтернету речей (IoT), автономного транспорту та інтелектуальних міст виникає потреба у створенні мобільних мереж шостого покоління (6G), здатних забезпечити надвисоку швидкість передавання даних, мінімальні затримки та масштабованість. Одним із ключових напрямів досягнення цих цілей є вдосконалення методів множинного доступу. Робота присвячена системному аналізу та узагальненню технологій OMA та NOMA, що формують основу архітектури сучасних і майбутніх систем зв’язку. Таким чином, дослідження є актуальним і відповідає сучасним тенденціям розвитку телекомунікацій та вимогам 6G.

РОЗДІЛЕННЯ СПЕКТРУ. ЧАСТОТНО-ЧАСОВИЙ ПОДІЛ



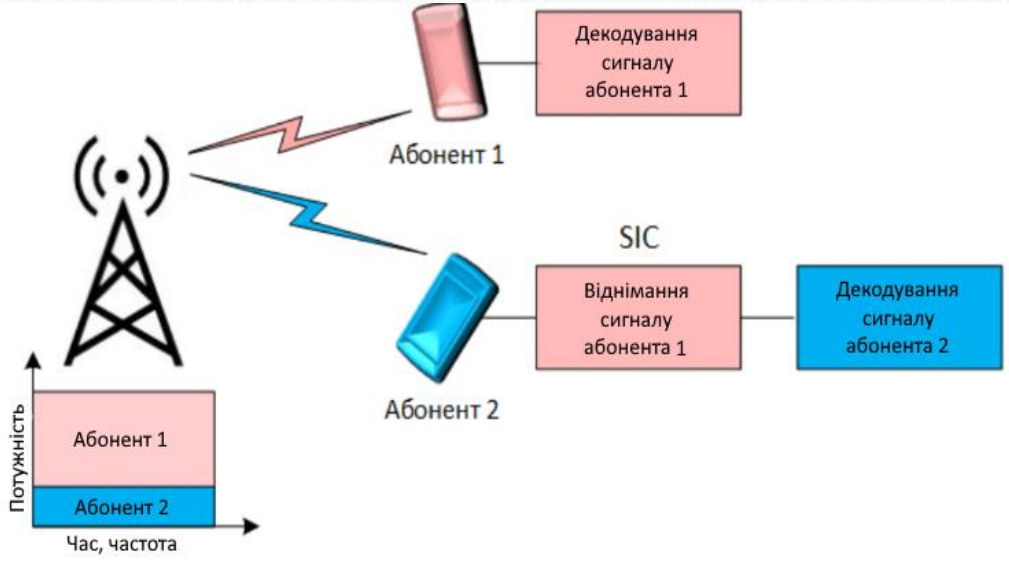
Різні варіанти поділу ресурсних просторів у методах ортогонального і неортогонального множинного доступу: a) з поділом за часом (TDMA); b) з поділом за частотою (FDMA); c) з ортогональним поділом за частотою (OFDMA); неортогонального множинного доступу з поділом абонентів у кількох ресурсних просторах (потужність/код, частота, час)



Розподіл ресурсів у SC-FDMA

- Класичні методи TDMA, FDMA та CDMA ефективні для мереж 1G–4G, але сучасні вимоги до швидкості, масштабованості та різнорідних сервісів потребують нових рішень. Ортогональний доступ (OMA) забезпечує простоту і надійність, тоді як неортогональний (NOMA) підвищує спектральну ефективність і підтримує масові підключення. Основою сучасних систем стали OFDM та її модифікації — OFDMA, SC-FDMA, FBMC, GFDM, F-OFDM, UFMC, SP-OFDM та W-OFDM, а також спектрально-ефективне SEFDM. Вони дозволяють гнучко розподіляти ресурси, зменшувати інтерференцію і підвищувати енергоефективність, що робить їх ключовими для розвитку 5G, 6G та майбутніх телекомунікаційних мереж.

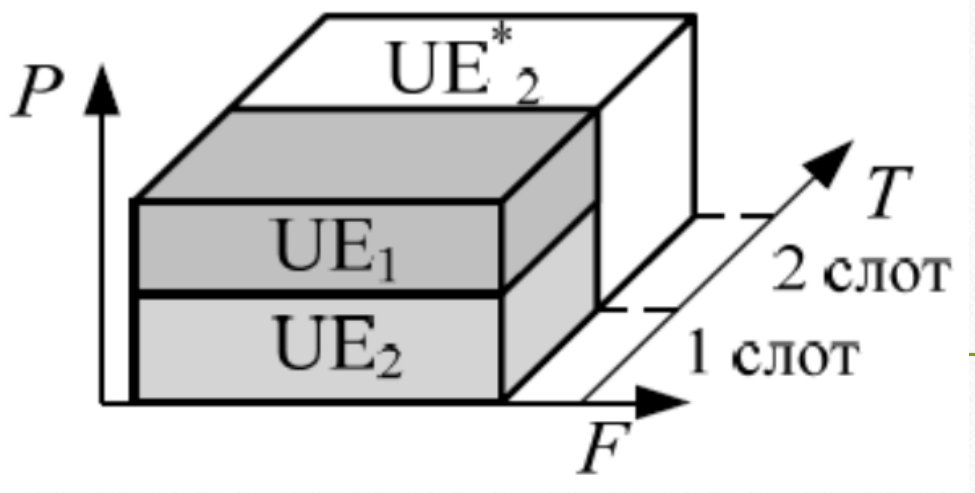
Доступ із поділом по потужності (PD-NOMA)



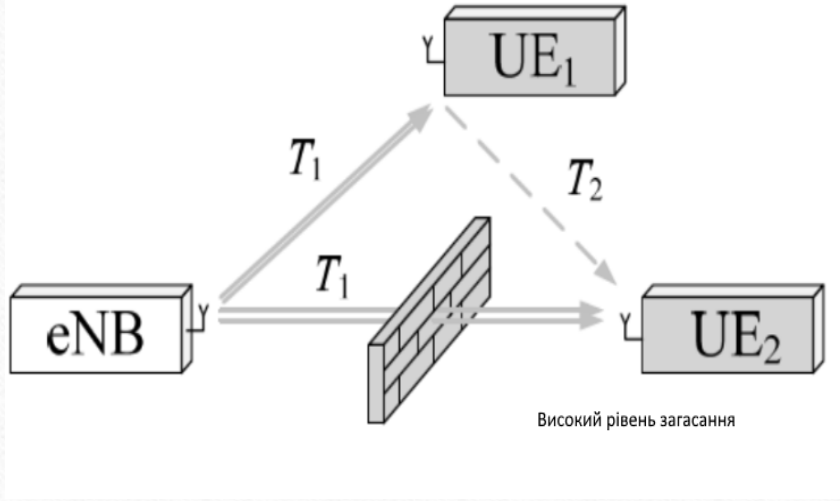
Система зв'язку PD-NOMA з однією базовою станцією та двома користувачами, низхідний канал

- PD-NOMA (power domain non-orthogonal multiple access) — базовий метод неортогонального доступу, який дозволяє одночасно передавати інформацію кільком користувачам у межах однієї смуги частот через суперпозиційне кодування. Для декодування застосовується метод послідовного скасування перешкод (SIC), де сигнали користувачів із вищою потужністю декодуються першими, а потім віднімаються із сумарного сигналу. PD-NOMA забезпечує високу спектральну ефективність, масове підключення та зменшення затримки, але потребує складних приймачів, точних даних про канали та оптимального розподілу потужності. Помилки SIC і обмежена різниця каналів знижують ефективність системи.

Кооперативний NOMA (Co-NOMA)



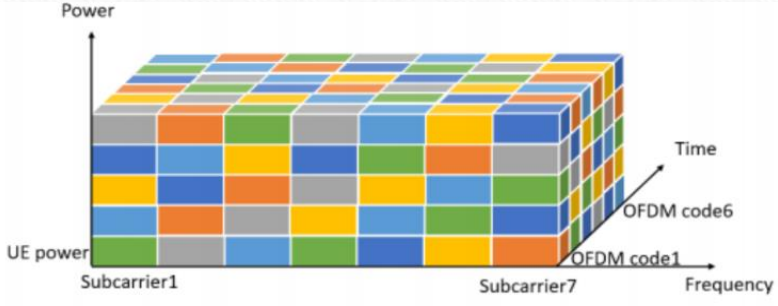
Приклад розподілу ресурсу зв'язку між двома абонентами Co-NOMA



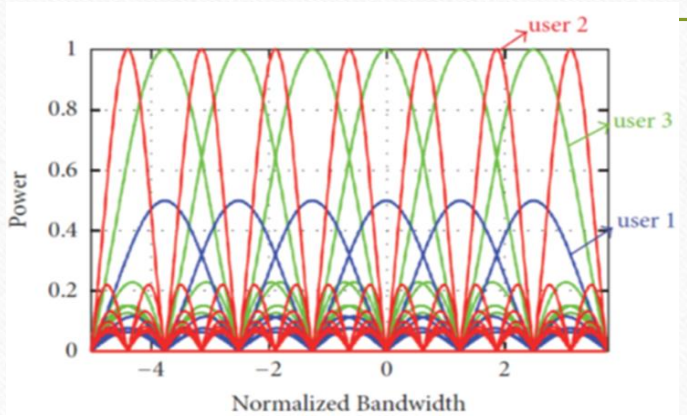
Ретрансляція сигналу Co-NOMA

- Cooperative NOMA (Co-NOMA) розширює PD-NOMA, залучаючи користувачів до взаємної ретрансляції сигналів для покращення якості зв’язку «слабких» абонентів. Базова станція формує сумарний сигнал для всіх користувачів; UE з кращим каналом декодує дані слабшого користувача через SIC і ретранслює їх у додатковому часовому слоті. Це підвищує ефективне SNR, забезпечує стабільне з’єднання навіть за слабких каналів або перешкод. Co-NOMA підвищує ефективність спектра до 52 % порівняно з PD-NOMA і підходить для 5G/6G, підтримуючи масове підключення, надійний сервіс та інтеграцію з MIMO, супутниковими та AI-системами.

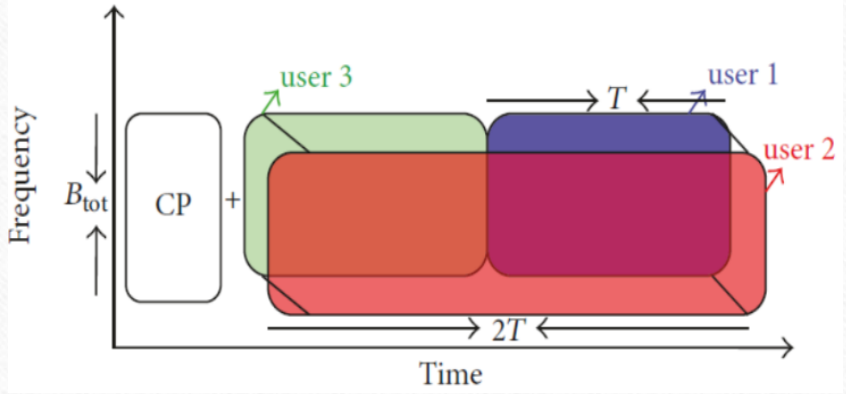
Об'єднання PD-NOMA з іншими методами множинного доступу



Мультиплексування у комбінованому методі PD/OFDMA



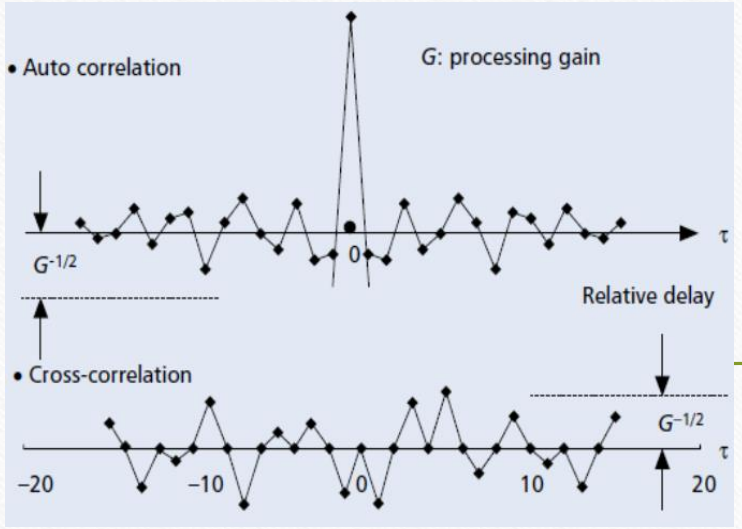
Розподіл піднесених у модифікованому методі NOMA/OFDMA



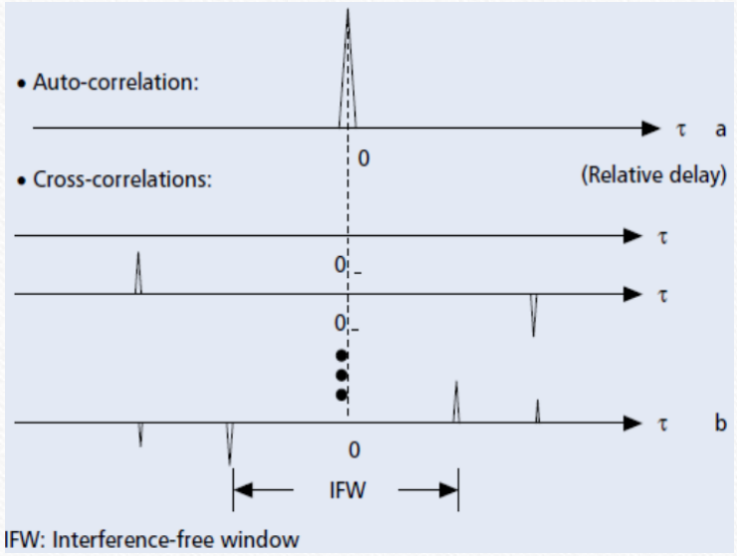
Розподіл тимчасового ресурсу в модифікованому методі NOMA/OFDMA на стороні, що передає

- Впровадження PD-NOMA у мобільних мережах стикається з проблемами високих обчислювальних витрат і похибок оцінки каналу, що ускладнює обслуговування багатьох користувачів. Інтеграція з MIMO дозволяє розділяти сигнали просторово, знижуючи міжканальну інтерференцію, а поєднання з OFDMA (PD/OFDMA) оптимізує частотно-часові та енергетичні ресурси, підвищуючи пропускну здатність і стійкість системи. Модифікована схема MN-NOMA використовує піднесучі різної ширини для зменшення взаємних завад, підвищення спектральної ефективності та масштабованості, забезпечуючи одночасне обслуговування великої кількості абонентів і високу якість зв’язку у мережах 5G/6G.

Множинний доступ із використанням LAS-кодів (LAS-CDMA)



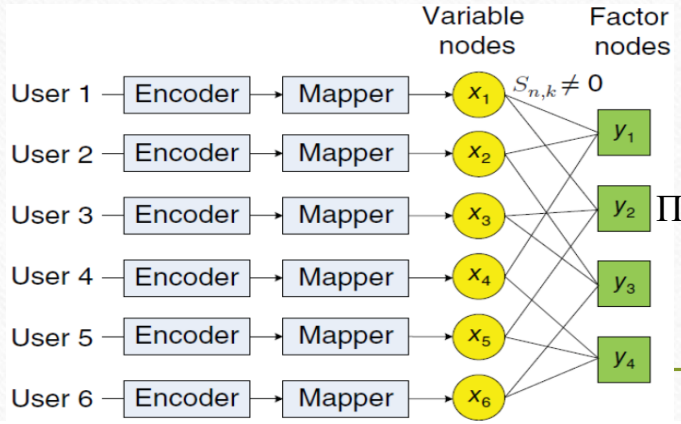
Автокореляційна та взаємна кореляційна функції традиційного CDMA



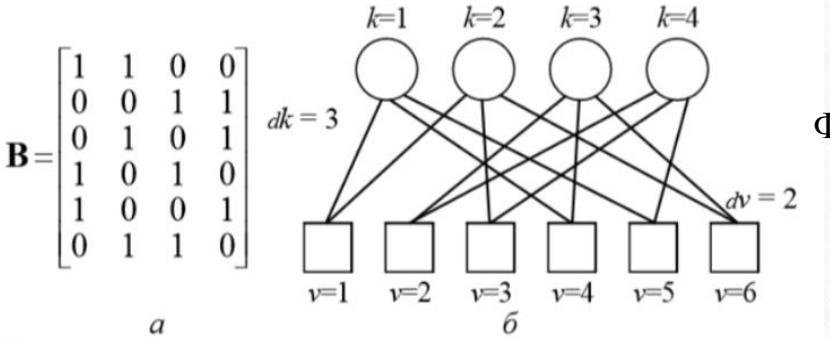
Автокореляційна та взаємна кореляційна функції LAS-CDMA

- Класична CDMA забезпечила значні переваги для 3G, але має фундаментальні обмеження через неідеальні автокореляційні та взаємокореляційні функції кодів, що викликає взаємну інтерференцію та знижує якість зв’язку. Це обмежує пропускну здатність і стійкість мереж при збільшенні числа користувачів. Модифікації CDMA, такі як MC-CDMA, OFDMA-CDMA та VSF-CDMA, покращують кореляційні властивості кодів, зменшують міжкористувацькі завади й підвищують спектральну ефективність. LAS-CDMA вирішує проблему інтерференції завдяки ідеальним автокореляційним кодам і інтерференційно-вільному вікну, що забезпечує високу якість прийому, стійкість до шумів і багатопроменевого поширення, відкриваючи перспективи для 5G та 6G.

Множинний доступ з кодовим поділом з кодами низької щільності (LDS-CDMA)

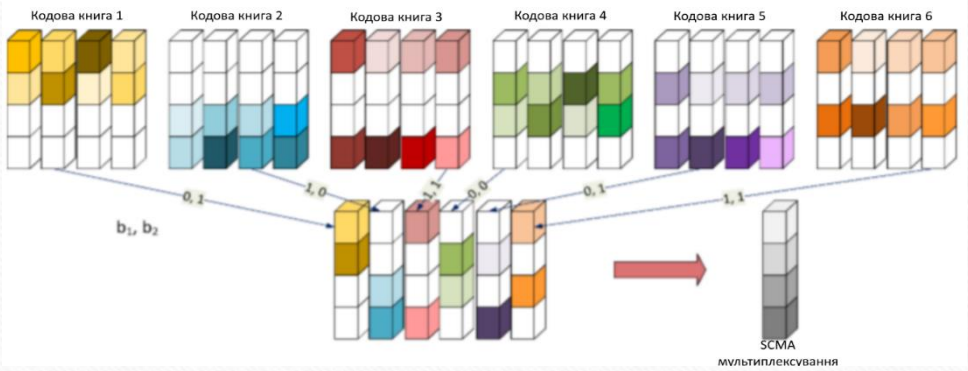


Приклад схеми LDS-CDMA із 6 користувачами



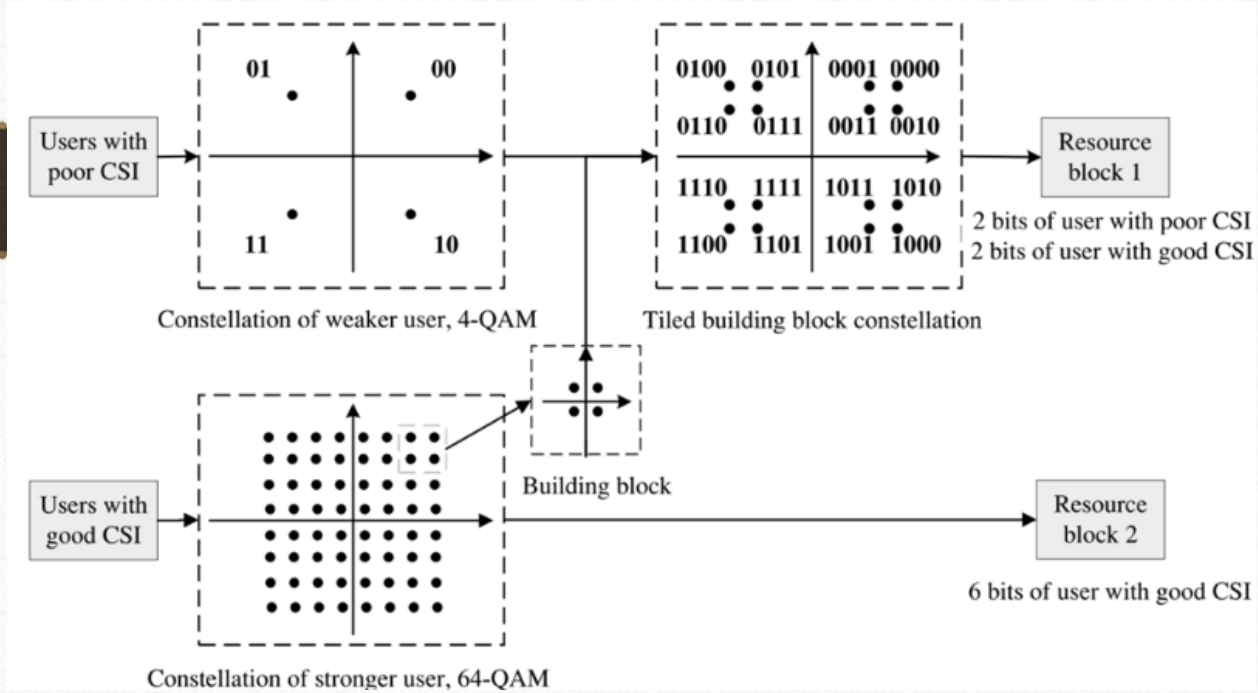
Формуюча матриця SCMA для V = 6, F = 4 (а) та відповідний їй фактор-граф (б)

- Сучасні неортогональні методи множинного доступу, такі як LDS-CDMA, LDS-OFDM та SCMA, підвищують ефективність спектра, дозволяючи одночасно обслуговувати більше користувачів. LDS-CDMA застосовує розріджені сигнатури для зменшення взаємних завад і використовує алгоритм MPA для помірного обчислювального навантаження. LDS-OFDM накладає дані на піднесучі OFDM, спрощуючи детекцію та забезпечуючи багатонесучу передачу. SCMA розширює принцип LDS-CDMA через кодові книги на основі розріджених матриць, дозволяючи одному користувачу використовувати кілька піднесучих. Ці технології підвищують спектральну ефективність, масштабованість і стійкість до завад, але потребують складних приймачів та оптимізації кодових книг.



Кодова книга SCMA для V=6, F=4

Множинний доступ із бітовим розділенням



Принцип дії технології BOMA для двох користувачів

- У сучасних системах зв'язку біти символів сигналу можуть розподілятися між кількома користувачами, що забезпечує підвищену ефективність спектра. Технології бітового розділення, такі як BDM, CEMA та REMA, дозволяють адаптивно перерозподіляти біти символів залежно від якості каналу, одночасно обслуговуючи кілька абонентів. Це підвищує спектральну ефективність, знижує ймовірність помилок та спрощує прийом сигналу. BOMA доповнює ці методи, накладаючи дані користувача з хорошим каналом на символи слабкого, без складних SIC-процедур. Такі підходи вважаються перспективними для 5G Advanced і 6G.

DELTA-OMA ЯК НОВИЙ МЕТОД МНОЖИННОГО МАСОВОГО ДОСТУПУ В 6G

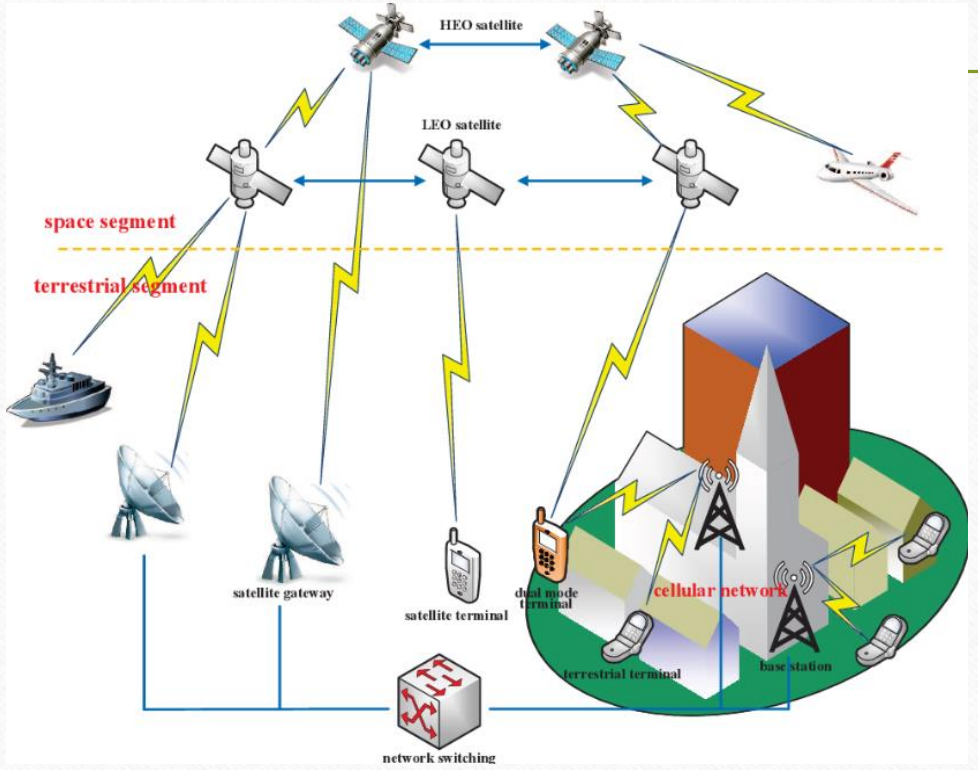
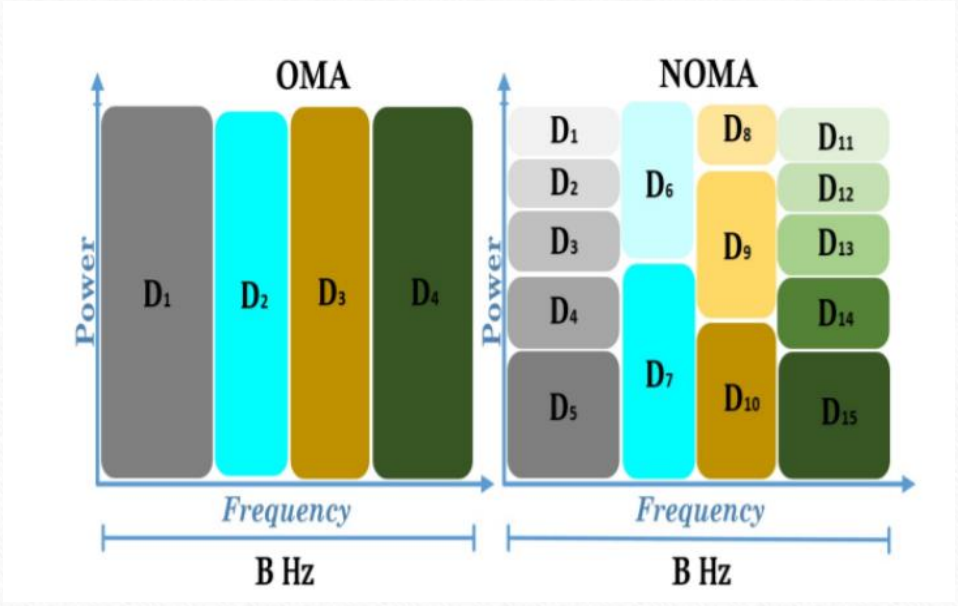


Схема інтеграції наземних і супутникових мереж із використанням NOMA + когнітивного радіо у 6G

- Дельта-ортогональний множинний доступ (D-OMA) є перспективною технологією 6G для масового доступу, що розвиває ідеї NOMA, дозволяючи кластеризувати користувачів у частково перекриваних піддіапазонах для ефективного використання спектра. Це підвищує пропускну здатність, зменшує перешкоди та забезпечує додатковий рівень безпеки даних. Еволюція від FDMA (1G) до OFDMA та NOMA (5G) демонструє поступове ускладнення доступу, підготовлюючи фундамент для 6G, де інтегруються наземні, повітряні та космічні мережі, AI-керування, терагерцові комунікації та енергоефективні рішення для URLLC, mMTC і високошвидкісного eMBB.

Множинний доступ



Концепція NOMA для обслуговування декількох безпроводових пристроїв в тому самому піддіапазоні

- Для 5G/6G потрібна нова концепція — неортогональний доступ NOMA (3GPP Release 16), де кілька користувачів обслуговуються одночасно в одному піддіапазоні за рівнем потужності, а на приймачі застосовується послідовне скасування перешкод (SIC). NOMA підвищує ємність, ефективніше використовує ресурси та підтримує різні сервіси. Розширена D-OMA із частково перекриваними піддіапазонами ще більше підвищує спектральну ефективність, контролює інтерференцію та забезпечує захист даних. Перехід від OMA до NOMA закладає основу для масштабних, гнучких і високоефективних мереж 6G.

ВИСНОВКИ

- У роботі досліджено можливості та перспективи застосування технологій множинного доступу в телекомунікаційних системах майбутніх мереж шостого покоління (6G). Показано, що розвиток мобільного зв’язку супроводжується зростанням вимог до пропускної здатності, енергоефективності, надійності та здатності одночасно обслуговувати мільярди пристроїв. Традиційні методи доступу — FDMA, TDMA, CDMA та OFDMA — вичерпали свій потенціал і потребують заміни більш гнучкими технологіями.
- Особливу увагу приділено аналізу неортогональних методів множинного доступу (NOMA), зокрема PD-NOMA та її модифікацій — Co-NOMA, MIMO-NOMA, PD/OFDMA, MN-NOMA. Розглянуто також технології бітового розділення (BDM, CEMA, REMA, EDC-NOMA) і кодові підходи SCMA та LDS-CDMA/OFDM, які забезпечують підвищення спектральної ефективності та гнучкість у розподілі ресурсів.
- Проаналізовано модифікації класичних методів OFDM/OFDMA — FBMC, GFDM, UFMC, F-OFDM, W-OFDM, SEFDM та OTFS, що усувають недоліки попередніх поколінь. Показано, що комбінація ортогональних, неортогональних та кодових технологій у поєднанні з масивними MIMO та інтелектуальними алгоритмами управління стане основою архітектури 6G і забезпечить реалізацію концепції гіперпідключеного світу.

Дякую за увагу!

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

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

Автор: Ілля КАНЄВСЬКИЙ

Назва: ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МНОЖИННОГО ДОСТУПУ У МЕРЕЖАХ 6G

Координатор: Вікторія КОРЕЦЬКА

Підрозділ: ННІТ

Коефіцієнт подібності 1:1.38

Коефіцієнт подібності 2:0.21

Тривога: 4

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

…… ……

Дата *Підпис Наукового керівника*