

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ,
ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТА РАДІОЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ**

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

_____ Роман ОДАРЧЕНКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА
РОБОТА
(ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР

Тема: «Просторово-часова обробка сигналів в системах мобільного зв'язку»

Виконавець: _____ Денис РЯБЧЕНКО
(підпис)

Керівник: _____ Марина МАЛОЄД
(підпис)

Нормоконтролер: _____ Денис БАХТІЯРОВ
(підпис)

Київ 2023

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аеронавігації, електроніки та телекомунікацій

Кафедра телекомунікаційних та радіоелектронних систем

Спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Роман ОДАРЧЕНКО

“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання кваліфікаційної роботи

Рябченко Дениса Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові випускника в родовому відмінку)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Просторово-часова обробка сигналів в системах мобільного зв'язку» затверджена наказом ректора від «29» березня 2023 р. № 421/ст
2. Термін виконання роботи: з 22.05.2023 р. по 25.06.2023 р.
3. Вихідні дані до роботи: методи та алгоритми просторово-часової обробки сигналів в системах мобільного зв'язку з використанням РАКЕ-приймачів.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ, аналіз сучасних систем мобільного зв'язку, просторово-часова обробка сигналів у радіотехнічних системах, МІМО-технологія обробки сигналів у стільникових системах.
5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: модель системи із ПЧРК, структурна схема Rake-приймача, блок-схема пропонованого алгоритму адаптації.

6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	22.05.2023- 24.05.2023	Виконано
2	Вступ	25.05.2023	Виконано
3	Аналіз сучасних систем мобільного зв'язку	26.05.2023- 29.05.2023	Виконано
4	Просторово-часова обробка сигналів у радіотехнічних системах	30.05.2023- 07.06.2023	Виконано
5	МІМО-технологія обробки сигналів у стільникових системах	08.06.2023- 14.06.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	15.06.2023- 25.06.2023	Виконано

7. Дата видачі завдання: “19” травня 2023 р.

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис керівника)

Марина МАЛОЄД
(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника)

Денис РЯБЧЕНКО
(П.І.Б.)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Просторово-часова обробка сигналів в системах мобільного зв'язку» містить 64 сторінки, 24 рисунків, 1 таблицю, 25 використаних джерел.

**СИСТЕМА МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ, СИСТЕМА МІМО, РАКЕ-ПРИЙМАЧ,
ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ**

Об'єкт дослідження – просторово-часова обробка сигналів в системах мобільного зв'язку.

Предмет дослідження – алгоритми просторово-часової обробки сигналів в системах мобільного зв'язку

Мета кваліфікаційної роботи – аналіз просторово-часової обробки сигналів в системах мобільного зв'язку з використанням РАКЕ-приймачів.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел, порівняльна систематизація алгоритмів та засобів обробки сигналів.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати – у навчальному процесі.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1	10
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	10
1.1. Принципи побудови та застосування систем мобільного зв'язку.....	10
1.2. Особливості побудови та застосування стільникових систем радіозв'язку.....	14
1.3. Пріоритетні напрямки розвитку стільникових систем у стандартах G5, G6.....	22
1.4. Висновки до розділу 1	25
РОЗДІЛ 2	28
ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ В МІМО-СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	28
2.1. Загальні відомості.....	28
2.2. Моделі сигналу та часового просторово-часового каналу	33
2.3. Просторово-часове формування променю	38
2.4. Придушення міжсимвольних та міжканальних завад	39
2.5. Висновки до розділу 2.....	43
РОЗДІЛ 3	45
ЕФЕКТИВНІ МЕТОДИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ОБРОБКИ В СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	45
3.1. Методи просторово-часового кодування.....	45
3.2. Rake-приймач.....	50
3.3. Адаптивний алгоритм обробки просторово-часових сигналів.....	56
3.4. Висновки до розділу 3.....	58
ВИСНОВКИ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АР – Антенна решітка.

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач.

БС – Базова станція.

ДС – Діаграма спрямованості.

МС – Мобільна станція.

МТ – Мобільний термінал.

НЧ – Низькочастотний.

ПЧРК – Просторово-часове решітчасте кодування.

ХС – Характеристика спрямованості.

ШСС – Широкопasmовий сигнал.

CCI (Co-Channel) – Внутрішньо-каналні перешкоди.

CDMA (Code Division Multiple Access) – Множинний доступ з кодовим розділенням.

ISI (InterSymbol) – Міжсимвольні перешкоди.

DC-HSPA+ – Самий швидкий стандарт мереж 3G.

DSM-мережа – Цифрова мобільна система зв'язку.

GSM (Global System for Mobile Communications) – Глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку.

GPRS (General Packet Radio Service) – Глобальний стандарт цифрового мобільного стільникового зв'язку

HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) – Високошвидкісний пакетний доступ.

IP-адреса (Internet Protocol address) – Ідентифікатор мережевого рівня.

LAN (local area network) – Об'єднання певного числа комп'ютерів на відносно невеликій території.

LTE (Long-Term Evolution) – Стандарт бездротової високошвидкісної передачі даних.

MEA (Multi-Element Antenna) – Багатоелементна антена.

MIMO (Multiple Input Multiple Output) – Метод просторового кодування сигналу.

MUAI (Multiuser access interference).

OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) – Мультиплексування, поєднання кількох потоків даних в один спільний простір.

QPSK (quadrature phase-shift keying) – Квадратурна фазова маніпуляція.

QAM (Quadrature Amplitude Modulation) – Квадратурна амплітудна модуляція.

RAKE-приймач – Радіоприймач, призначений для протидії ефектам багатопроменевого завмирання.

STBC (Space-time block code) – Просторово-часове блочне кодування.

STP (Space-time processing) – Просторово-часова обробка.

TDMA (Time Division Multiple Access) – Множинний доступ із розділом за часом.

UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) – Універсальна мобільна телекомунікаційна система.

WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) – Стандарт бездротового зв'язку.

WLAN (wireless local area network) – Бездротова локальна мережа.

ВСТУП

Системи мобільного зв'язку у наш час стали атрибутом життя сучасної людини, підприємств та фірм, військових технологій [1, 2].

Актуальність теми. В наші дні у комплексах зв'язку бездротового доступу та мобільних, для значного збільшення пропускної спроможності та надійності систем передачі даних, з'явилась необхідність застосування крім часового, ще й просторового кодування. Це допоможе збільшити зазначені характеристики без істотних змін наявної смуги пропускання таких систем передачі.

Основні завдання в частині просторово-часового оптимального оброблення сигналів представляють значний інтерес через інтенсивну розробку та впровадження багатоканальних (MIMO) систем передачі інформації. Такі систем застосовують декілька просторових незалежних або ж залежних каналів.

Раніше в процесі синтезу оптимальних алгоритмів оброблення сигналів вважали відомими просторові характеристики каналів (зокрема, методи огляду простору чи діаграми спрямованості наявних антенних систем), а оптимізація відбувалася лише у часовій області.

У даний час набувають широкого розвитку метод та апаратно-програмне забезпечення РЕКЕ-технології, що забезпечує сумісне одночасне застосування поряд із часовими також просторових алгоритмів обробки багатовекторних сигналів.

Таким чином тема кваліфікаційної роботи на сьогодні є актуальною для систем мобільного зв'язку.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є аналіз просторово-часової обробки сигналів в системах мобільного зв'язку з використанням РАКЕ-приймачів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання:

1. Аналіз сучасних систем мобільного зв'язку.

2. Дослідження методи просторово-часової обробки в системах мобільного зв'язку.

Об'єктом досліджень у роботі є просторово-часова обробка сигналів в системах мобільного зв'язку.

Предметом досліджень у роботі є алгоритми та засоби просторово-часової обробки сигналів в системах мобільного зв'язку.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи пропонується використовувати у навчальному процесі.

Методи дослідження – аналіз літературних джерел, порівняльна систематизація алгоритмів та засобів обробки сигналів.

Апробація отриманих результатів. Основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- Науково-практична конференція «Проблеми експлуатації та захисту інформаційно-комунікаційних систем», м. Київ, 2023 р.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1. Принципи побудови та застосування систем мобільного зв'язку

Розглянемо особливості роботи транкінгових та конвенціональної систем мобільного зв'язку.

Транкінговий радіозв'язок, зазвичай, використовується для забезпечення голосового зв'язку між досить великою кількістю рухомих абонентів при наявності обмеженої кількості радіоканалів [3, 4].

Основний принцип транкінгового радіозв'язку ґрунтується на вільному доступі абонентів до деякої кількості радіоканалів. Отже, це є динамічний розподіл відносно обмеженого числа каналів зв'язку між великою кількістю абонентів. Зазначимо, що тому під поняття транкінгу буде практично потрапляти будь-яка існуюча зараз система зв'язку з наявною комутацією каналів. Але, відмітимо, що зазначений термін застосовують, у більшій мірі, для визначення багатоканальних професійних систем радіозв'язку.



Рис. 1.1. Принцип транкінгу на прикладі 4-канальної системи

Типова архітектура сучасних транкінгових систем, зазвичай, ґрунтується на мережі з'єднаних одна з одною базових станцій і, відповідно, кожна станція буде обслуговувати виключно певну зону. Типова запропонована архітектура дає

спроможність побудувати різні мережі радіозв'язку від величезних регіональних мереж й до маленьких локальних мереж з лише однією зоною.

Взагалі, ядром транкінгової системи є база даних, що окреслює склад існуючих розмовних груп, а також основні правила до окремих абонентів чи їх груп. Зазвичай, як мінімум, одна частота буде відводитися для каналу контролю, за допомогою останнього здійснюється управління радіостанціями, і відповідно, даючи їм частоти для відстежування вхідних та вихідних викликів. Саме в момент початку виклику абонентом система, використовуючи канал контролю, автоматично шукає й потім виділяє незайнятий канал й далі переказує повідомлення до радіостанції абонентів. Ці радіостанції входять до групи, що викликаються, відповідно, їх термінали перемикаються відповідно лише на цей вільний канал. Треба відмітити позитивні якості застосування транкінгу дозволяє:

- по-перше, це значно економить наявний частотний ресурс;
- по-друге, забезпечити більш високий рівень сервісу для абонентів;
- по-третє, більш ефективно управляти розвитком системи та її експлуатацією.

Сьогодні найпопулярніші технології цифрового транкінгового зв'язку прийнято розділяти на повнофункціональні та базові. Останні є відносно новим підкласом систем зв'язку, який в процесі розвитку замінив аналогові транкінгові системи (зокрема відомі LTR, SmarTrunk2 й MPT1327).

Зараз він представлений стандартами DMR (Digital Mobile Radio, який є цифровим радіостандартом для організацій, і розроблений ETSI) та dPMR (Digital Private Mobile Radio, також розроблений ETSI), і якщо його порівнювати з аналоговими системами, то помітний технологічний ривок вперед у сфері зв'язку.

Метою використання цифрових транкінгових систем радіозв'язку повнофункціональних є, зазвичай, гарантоване забезпечення оперативним мовним зв'язком із визначеними параметрами якості, для подальшої передачі даних й організації доступу до типових телефонних мереж. Повністю цим вимогам відповідають рішення, зокрема, на базі стандартних відкритих протоколів TETRA чи APCO25. Використання цих повнофункціональних систем для потреб,

наприклад, середнього аеропорту чи корпорації буде невиправданим і досить витратним, бо тоді система буде експлуатуватися у ненавантаженому режимі

Взагалі ж доцільність використання транкінгових систем при проектуванні корпоративних або ж відомчих мереж ПМР ґрунтується на 2-х важливих чинника – по-перше, це досить висока щільністю абонентів і централізоване управління системою, по-друге, вплив різноманітних технічних та економічних факторів.

Треба відмітити, що за однакової кількості наявних каналів зв'язку транкінгова система зазвичай обслуговує помітно більшу чисельність абонентів, якщо порівняти її з системою конвенціональною (якості обслуговування мають бути рівними). Тобто, за однакової чисельності абонентів для втілення проєкту транкінгової системи потрібна значно менша кількість каналів зв'язку. Зокрема, одна система транкінгового зв'язку з 4-ма каналами, яка зображена на рис. 1.1, більш ефективна у 7,5 разів якщо її порівняти з системою конвенціональною при однаковій кількості каналів. Тому саме ефективністю використання частотного ресурсу і визначається економічна ефективність експлуатації транкінгових систем. Літературний аналіз показує, що транкінгові системи демонструють свою економічну ефективність, при кількості обслугованих абонентів 50-100. Зазначимо, збереження можливості централізованого управління мережею, яка практично неможлива при роботі у конвенціональних мережах.

Подальше вдосконалення сучасних транкінгових систем дозволяє розглядати їх розширення в плані функціональних можливостей у порівнянні із зазначеними системами радіозв'язку конвенціонального типу. Першочергово, це звісно, що стосується різних існуючих типів виклику (від індивідуальних до групових), існує також можливість взаємодії із загальними телефонними мережами, використання визначення пріоритетів чи передачі аварійних викликів, як і можливість динамічної модифікації, створення чи видалення різних груп абонентів.

Якщо порівнювати зі стільниковими системами мобільного зв'язку транкінгові системи забезпечують додаткові можливостей, які ще не реалізовані в тих системах. Зокрема це можливість групового зв'язку - головного типу взаємодії в мережах певної зони.

Також відмітимо наявність у транкінгових мережах аварійних й пріоритетних викликів, а також і динамічне перегрупування абонентів, що наразі недоступно для абонентів стільникових мереж. Також треба відмітити високу швидкість встановлення з'єднання, що, на нашу думку, є найважливішою перевагою таких систем (час встановлення зв'язку, зазвичай, не перевищує 0,5 с, порівняно із стільниковим системи, де встановлення з'єднання, може бути не менша за 5 с.

Зазначимо, що типова цифрова транкінгова система радіозв'язку в базовому варіанті включає такі елементи (рис. 1.2):

- цифровий радіоретранслятор (до 30-ти транкінгових сайтів);
- антенна система для забезпечення необхідного радіопокриття;
- комп'ютер чи менеджер системи для управління й налаштування програмного забезпечення, як і роботи мережі;
- Ethernet-комутатор для підключенню до БС чи ретранслятора;
- Певна кількість портативних рації чи радіостанцій абонентів.



Рис. 1.2. Склад обладнання транкінгової системи радіозв'язку

Розвиток сучасного обладнання, такого як конвенціональні радіостанції або ж комунікаційні контролери, очевидно дає змогу приблизити сервісні можливості зазначеного устаткування до можливостей транкінгового, й дозволяє проектувати досить невеликі системи, але із розширеними можливостями.

Таким чином, попри досить стрімкий розвиток транкінгових систем повсюдно, конвенціональний зв'язок, ще досі залишається бюджетним рішенням для лише

малих підприємств, також й середніх, а самі мережі зазначеного зв'язку ще продовжують активно розвиватися.

1.2. Особливості побудови та застосування стільникових систем радіозв'язку

1.2.1. Історія розвитку стільникових систем зв'язку

Як відомо, перші реальні спроби щодо організації радіотелефонного зв'язку з рухомими об'єктами були зроблені майже одночасно з відкриттям радіозв'язку, хоча стрімкого розвитку мобільний зв'язок набув вже у 2-й половині минулого століття.

Подальший стрімкий розвиток, як і впровадження новітніх засобів радіозв'язку, тісно пов'язані з розв'язанням цілого ряду проблем. Очевидно, що фундаментальною з них є проблема природної обмеженості частотного ресурсу. Для її розв'язання інженери й вчені запропонували ідею розбиття всієї території, де проводиться обслуговування, на відносно невеликі ділянки або ж стільники, для реалізації відомого зараз принципу використання повторно тих же самих частот.

Один із видів сучасного й розповсюдженого мобільного зв'язку є стільниковий радіозв'язок, який ґрунтується на стільниковій мережі [5]. Відомою особливістю стільникового зв'язку є те, що вся зона покриття ділиться на так звані «стільники», і, зрозуміло, визначається зонами покриття кожної окремої базової станції. Стільники, зазвичай, частково перекриваються, і усі разом утворюють стільникову мережу. Зазначимо, що ідеальна (без забудови й повністю рівна) поверхня зони покриття однієї такої базової станції є звичайним колом, і тому побудована з них мережа представляє собою певні шестикутні зони.

В таку мережу входять рознесені в просторі приймально-передаючі пристрої, які працюють у тому ж самому частотному діапазоні, а також і устаткування комутації, яке дає змогу визначити поточне місце розташування рухомих абонентів, як і забезпечити неперервність зв'язку при переміщеннях абонентів із зони дії одного приймально-передаючі пристрою у зону дії іншого пристрою.

Типова принципова схема побудови зазначеної стільникової мережі [6] при використанні базовими станціями 4-ох частотних діапазонів (відповідно F1-F4) представлена на рис. 1.3.

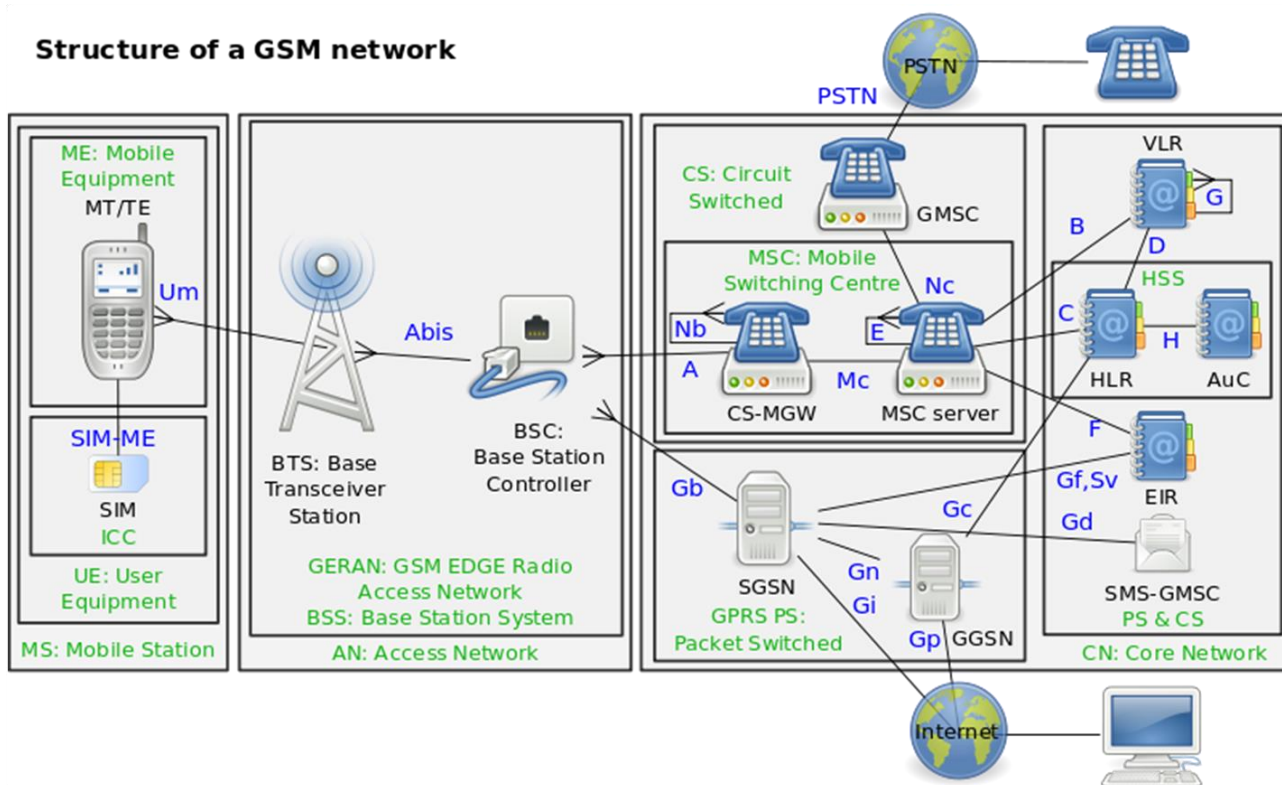


Рис. 1.3. Принципова схема GSM мережі

Зазвичай, у подібних мережах зони обслуговування окремих базових станцій (БС) утворюють стільники, а їх розмір визначається переважно територіальною щільністю наявних абонентів мережі. Зазначимо, що частотні канали, що використовують для роботи однією з БС мережі, а далі можуть повторно розподілятися за визначеними законами для роботи інших БС, які формують конкретну мережу. Зазначені процедури забезпечують досить високу ефективність використання такої системи. В сучасних стільникових мережах, при переміщенні абонентів із зони дії однієї з БС в наступну, постійний зв'язок підтримується з рухомим абонентом на належному рівні. Ці мережі охоплюють великі території, і абонент, при знаходженні в зоні дії лише однієї з наявних БС, які формують загальну мережу, може здійснювати зв'язок незалежно від свого положення.

Поступове впровадження таких мереж починається ще у 70-х роках, спочатку в США, а пізніше вже іде в країнах Європи та Японії, а далі вже охоплює всі регіони світу. Завдяки їх створенню сотні мільйонів людей у багатьох країнах світу зараз мають нові доступні послуги рухомого зв'язку і кардинально змінили наше життя.

Коротко розглянемо розвиток стільникових мереж в нашій країні. 16.06.1993 р. вважають датою запровадження мобільного зв'язку саме в Україні було – це дата здійснення першого дзвінка зі стільникового телефону.

Відома компанія UMC ввела в експлуатацію свою першу мобільну мережу стандарту NMT, який відноситься до мереж першого покоління (1G). Відмітимо, що це аналоговий стільниковий зв'язок, і включає стандарти з аналоговою передачею виключно голосу, а передача даних в ньому не передбачена. Такі мережі ще можуть використовуватися в деяких країнах.

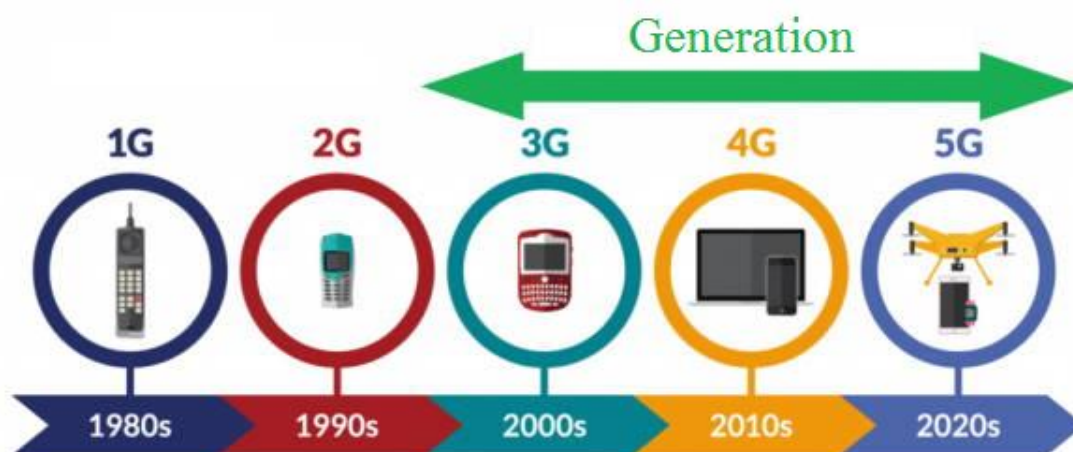


Рис. 1.4. Покоління розвитку стільникового зв'язку

Подальшим кроком у розвитку розвитку мобільних мереж стає запуск у 1996 р. компанією «Голден Телеком» мережі другого покоління (2G) стандарту GSM (Global System for Mobile Communications), і це була перша мережа цього стандарту у східній Європі. 2G на відміну від 1G став засобом передачі цифрового зв'язку, значною перевагою його стала безпека.

У 2006 оператор-компанія «Телесистеми України» під брендом «PEOPLEnet» вже презентувала наступне покоління - мережу 3G вже з новим стандартом - CDMA

(Code Division Multiple Access). А у 2007 р. компанія «Укртелеком» під брендом «Utel» вводить у експлуатацію мобільну мережу цього ж покоління, але стандарту UMTS (Universal Mobile Telecommunications System). Ця технологія зв'язку спеціально розроблена інститутом ETSI для впровадження мереж 3G у Європі.

1.2.2. Порівняльний аналіз стандартів 2G, 3G, 4G

В Україні на даний час використовують 2G, 3G й 4G (LTE). Розглянемо коротко стандарти стільникового зв'язку.

У 2G запровадили вперше послуги SMS і цифровий код кодував усі розмови абонентів. Передача даних тут відбувалася на базі GPRS з максимальною можливою швидкістю 53,6 Кбит/с або ж на базі Edge (E) із швидкістю до 220 Кбит/с.

3G це вже широкосмуговий цифровий стільниковий зв'язок, де комутація відбувається за допомогою багатоцільових комп'ютерних мереж, зокрема Інтернету. Призначення такої мережі полягає у передаванні цифрових даних із більшою швидкістю (до 384 Кбіт/с). UMTS був початково основним стандартом із основною частотою в 2100 МГц (точніше це діапазон 2110-2200 МГц). Для UMTS характерним є ширина каналу в 5 МГц. Тоді швидкість доступу до мережі Інтернету у режимі UMTS не перевищувала 2 Мбіт/с. Трохи пізніше вийшли нові стандарти пакетної високошвидкісної передачі, а саме HSDPA (High-Speed Downlink Packet Access) й HSDPA+, які забезпечують ще вищу швидкість, а саме до 7,2 Мбіт/с й 42 Мбіт/с відповідно.

Зазначимо, що HSDPA забезпечила вже досить непогані швидкості, але слід розуміти, що це тільки теоретична спроможність пропускнуго каналу, а його реальні швидкості, як правило, будуть значно меншими. Апогеєм розвитку HSDPA є його двоканальний варіант, відомий як DC-HSDPA, де швидкість передачі досягла 28,8 Мбіт/с. Наявні мережі 3G HSDPA/DC-HSDPA ще досі використовуються в деяких регіонах світу, проте при модернізації, звичайно ж, поступаються своїм місцем HSPA+ чи вже відразу новому поколінню 4G LTE. Деякі джерела пропонують відносити мережі HSPA+ до так званого «перехідного покоління» 3.5G, хоча це є не зовсім коректним.

Якщо говорити про DC-HSPA, то фактично, він є двоканальним HSPA+ із шириною каналу 10 МГц. Відповідно і, як вже було зазначено, максимальна швидкість у 2 рази вища – до 42 Мбіт/с. Такі мережі теж часто за аналогією з HSPA+ називають 3.75G, тобто це вже майже 4G. І дійсно, у таких мережах реальна швидкість доступу до Інтернету досить часто наближена до показників 4G.

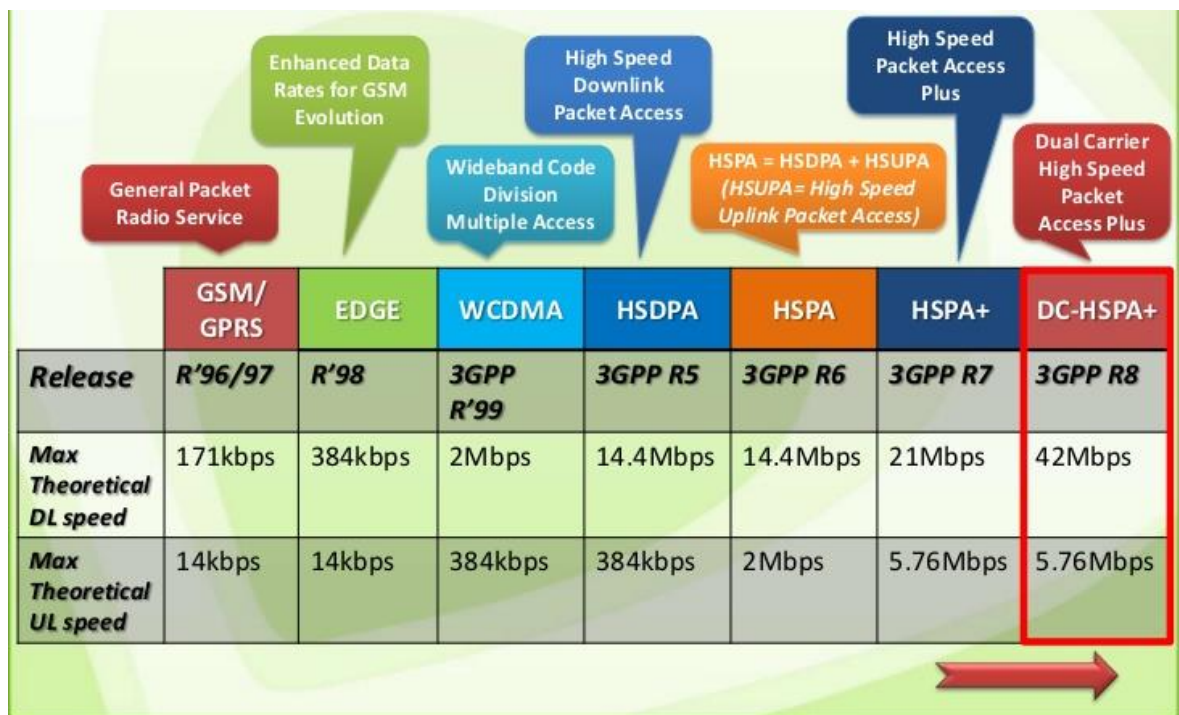


Рис. 1.5. Еволюція технологій стільникового широкосмугового радіодоступу

Постійний розвиток нових технологій, очевидно, призводить поступово до зниження користуванням стандарту HSPA (див. рис. 1.6). І, звичайно, замість покращення якості зв'язку чи охоплення максимальної площі покриття 3G, у більшості ситуаціях компанії відразу переходили на LTE (4G). Це цілком зрозуміло, бо у зонах з достатнім рівнем зв'язку більш сучасні стандарти забезпечать у десятки разів більшу швидкість, що дає змогу проводити відеоконференції з роздільною здатністю FullHD [7], швидко перекидати відеоролики або ж різноманітні проекти розміром у кілька гігабайт, що зараз є особливо актуальним.

Треба окремо відмітити, що разом із введенням стандарту HSPA+ з'явилася концепція MIMO (Multiple Input Multiple Output), тобто метод просторового кодування сигналу, що дає змогу значно збільшити пропускну спроможність

каналів, в яких передача й прийом даних здійснюються з використанням систем з кількох антен.

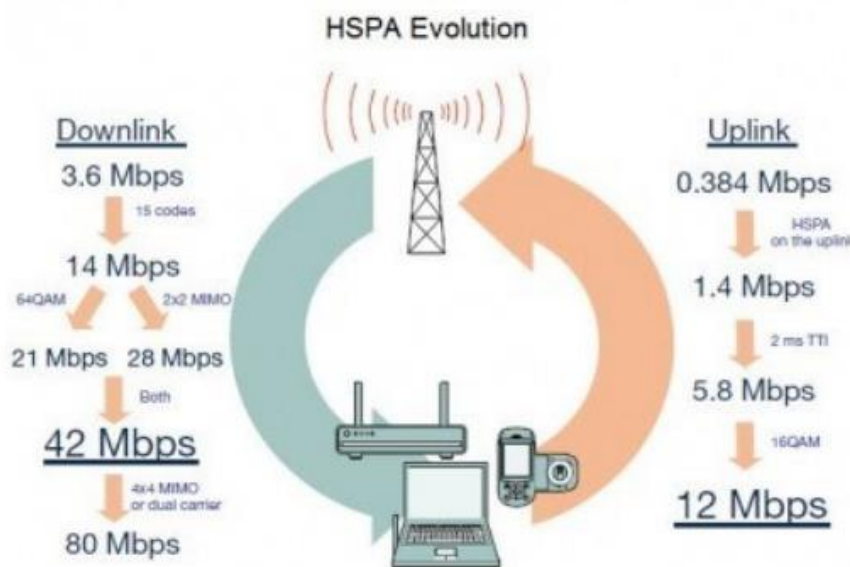


Рис.1.6. Технологій HSPA

Далі на зміну формату 3G прийшло наступне покоління, а саме LTE (4G), зі швидкістю передачі даних майже в 8 разів вищою - до 326,4 Мбіт/с. Треба відмітити, що в реальному житті оператори дуже рідко забезпечують навіть 20-30% зазначеної пропускної здатності.

Сучасні LTE або ж 4G покоління, зазвичай, працюють зі швидкостями понад 100 Мбіт/с високомобільним чи до 1 Гбіт/с низькомобільним абонентам. Такі мережі засновані на IP, що значно мінімізує час очікування та підтримує агрегацію частот до 100 МГц у широких каналах зв'язку.

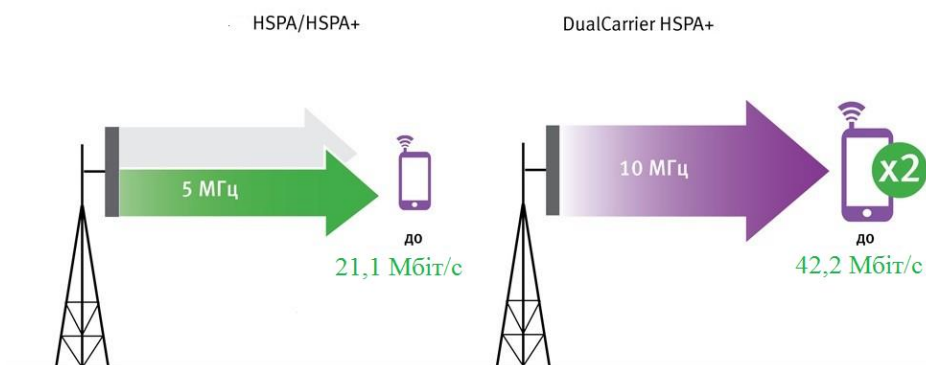


Рис. 1.7. Порівняння технологій HSPA та HSPA+

Розглянемо швидкісні вимоги до мережі 3G для різних умов:

- для абонентів у стані статичності це до 2048 кБіт/с;
- для користувачів, що знаходяться у русі це до 384 кБіт/с;
- а для тих, хто рухається зі швидкістю 3-120 км/год це до 144 кБіт/с.

Відмітимо, що зв'язок на базі стандарту UMTS є характерним для країн Європи, як і для країн СНД.

Якщо подивитися на карти покриття й відповідну кількість операторів, які використовують ці мережі, то помітимо, що найбільшого поширення, в нашій країні, як і у всьому світі, набули 2 стандарти зв'язку, а саме CDMA2000 (IMT-МС) та UMTS (або W-CDMA), які гуртуються на одній технології — CDMA. Також зазначимо використання у деяких країнах світу стандарту CDMA 450.

Технологія CDMA 2000 (Code Division Multiple Access це множинний доступ абонентів з кодовим поділом каналів) забезпечила еволюційний перехід від вузькосмугових систем із кодовим поділом каналів IS-95 до технологічних систем CDMA «третього покоління» й набула найбільшого поширення саме на Північноамериканському континенті, як і країнах Азіатського регіону.



Рис. 1.7. Антена стільникового зв'язку

Технологія UMTS (Universal Mobile Telecommunications System – це універсальна система мобільного електрозв'язку) була розроблена з метою модернізації мереж GSM, який є європейським стандартом стільникового зв'язку 2-

го покоління. В свою чергу, вона набула широкого поширення не лише у країнах Європи, а також і в багатьох інших регіонах світу. Ці стандарти мережі, звичайно ж, широко поширені і на території України, як показано у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Оператори стандарту 3G в Україні

Оператор 3G	Технологія	Частотний діапазон
Інтертелеком	CDMA EvDO Rev. A, Rev. B+	800 МГц
PEOPLE.net	CDMA EvDO Rev. A	800 МГц
Тримоб (колишній Utel)	UMTS/WCDMA, HSDPA	2100 МГц
МТС Україна	CDMA EvDO Rev. A, Rev. B+	450 МГц
Київстар	UMTS/WCDMA, HSDPA	2100 МГц

Головною особливістю 4G покоління є не тільки швидкість передачі, але і цілий пакет функцій для спілкування. Також можна надсилати голосові повідомлення через IP чи дивитися потокове відео високої чіткості, або ж спокійно грати в онлайн-ігри, що потребує достатніх швидкостей передачі даних. Також приємним бонусом є можливість використання інтернетом у поїздках. Зазначимо, що характеристики цих мереж дозволяють безперебійно користуватися зв'язком також і у місцях великого скупчення людей.

Відмітимо ще один момент, що у випадку втрати мережі LTE, то смартфон автоматично переходить на мережу 3G. Також помітною відмінністю 4G(LTE) від попередніх є використання нового формату сім-карт USIM, де використовується захищений алгоритм автентифікації абонента в мережі і також підтримує мережу попередніх стандартів GSM й UMTS.

Зараз 4G ґрунтується з 2-ох широко відомих стандартів – WiMAX й LTE. WiMAX (це Worldwide Interoperability for Microwave Access), яка є еволюцією

технології Wi-Fi з великою площею покриття. LTE (це Long Term Evolution), яка представляє собою черговий виток в розвитку стандарту GSM.

1.3. Пріоритетні напрямки розвитку стільникових систем у стандартах 5G, 6G

Знедавна активно почали замість стандарту 4G просувати нове, 5-е покоління стільникового зв'язку [8, 9, 10, 11]. На думку деяких експертів, не треба очікувати від 5G такої популярності, яка є у LTE, бо незважаючи на те, що стандарт 5G використовує частоти у діапазоні від 3 ГГц й вище, за рахунок чого передача даних відбувається швидше, але зазначимо, що область покриття однієї вежі при цьому є вкрай вузькою.

Є припущення, що 5G буде популярним тільки у великих містах, а в невеличких містах чи селищах актуальним все ще залишиться саме LTE.

Відмітимо, що оператори мобільного зв'язку у таких країнах як Китаї, Південна Корея й Сполучені Штати почали розгортати 5G ще у 2019 році.

Але проникнення серед споживачів все ще залишається низьким. Зокрема, за даними Strategy Analytics, сьогодні лише кожна сьома людина у світі використовує смартфон з технологією 5G.

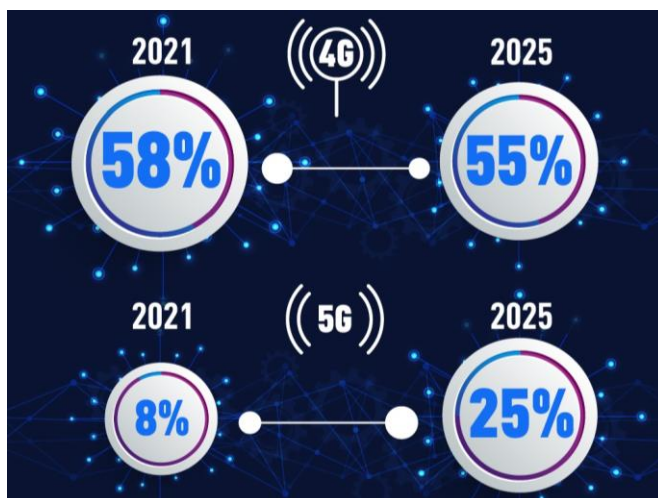


Рис. 1.8. Відсоток підключень у світі (без врахування ліцензованого IoT)

5G це нова технологія, яка дозволить з'єднати багато різних об'єктів, що може забезпечити критично важливий зв'язок із малою затримкою, а також оптимізує використання телекомунікаційних мереж. І вже існує багато експериментів із застосуванням мережі 5G: обладнання громадських місць, таких як вокзали, порти чи аеропорти, обладнання для великих спортивних стадіонів, а також і покращення медичних послуг тощо.

Зазначимо, що телекомунікаційна галузь робить акцент у 5G не тільки як на продукті для значно вищої швидкості завантаження, а в більшій мірі як мережу, що буде підґрунтям нових технологій, зокрема для безпілотних автомобілів або ж для непілотованих аеротаксі. Це пов'язано із значно нижчою затримкою, порівняно з технологією 4G. Це означає, що час, потрібний для обміну даними, значно скорочується, що є особливо важливою функцією у сценаріях, де необхідна швидка доставка даних.

З другого боку, 5G є попередником покоління 6G, який забезпечить більш високу швидкість мобільного зв'язку чи інтернету, а також і високу такої ємність мережі. Якщо в 5G швидкість може досягати 1 Гбіт/с, то у мережі шостого покоління обіцяють швидкості від одиниць Тбіт/с. Очікується запуск покоління 6G у 2030 році.

У мережах 6G будуть використовуватися ще більш високі частоти, порівняно із 5G, завдяки чому, дотягатиметься набагато вища пропускна здатність і нижча затримка. Одним із головних завдань технологій 6G буде зниження затримки встановлення зв'язку до однієї мікросекунди, тобто у 1000 разів порівняно із затримкою 5G.

Потенціал 6G значною мірою залежить, на думку експертів від спектру частот й архітектури мережі. Розглянемо 3 приклади таких інновацій у архітектурі 6G.

Вважають, що мережі 6G будуть переважно зосереджені на границях мережі. Тому що, незважаючи на потужність центральної хмари чи великих Data Center, все ж таки близько 70% всієї інформації від різних датчиків чи сенсорів буде оброблятися на границі мережі (Edge Computing).

6G буде більш відкритою мережею порівняно з попередніми поколіннями. Архітектура мережі буде ставати все більш модульною, бо це забезпечить високу ефективність управління. Відомо, що успіх Інтернету було досягнуто завдяки інтерфейсам між його різними рівнями. Відкрита архітектура 6G забезпечить ефективність зміни на вимогу технології радіодоступу для найбільш ефективного надання тієї чи іншої послуги. Це буде помітно вищих рівнях OSI моделі, зокрема, на транспортному рівні.

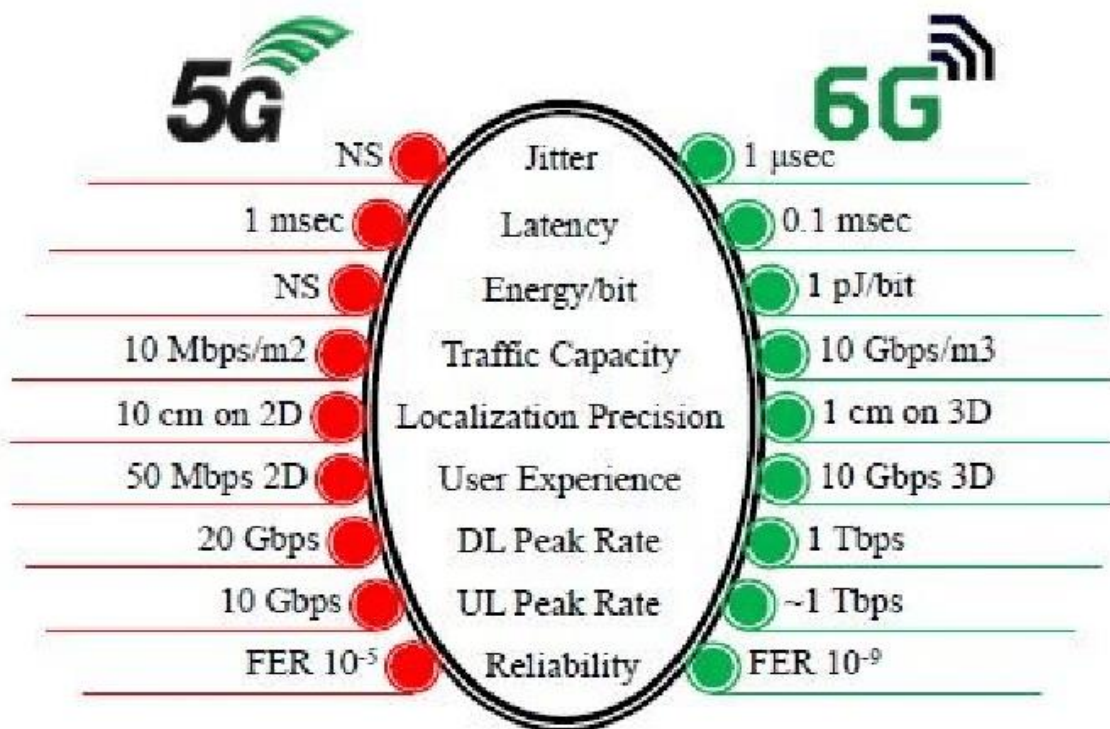


Рис.1.9. Порівняльний аналіз поколінь 5G і 6G

6G мережа у майбутньому забезпечить більш вільний доступ до її сервісів, послуг чи додатків. Сама ж інфраструктура, як і весь спектр бездротових мереж доступу 6G, динамічно буде «нарізатися», для полегшити формування програми з кількох модулів і тим самим допоможе знизити вартість розгортання й обслуговування інфраструктури.

Можна припустити, що між 5G й 6G не буде такого різкого розділу, як, зокрема було, між 2G і 3G, або 4G чи 5G. І все це відбуватиметься вже у поточному десятилітті 2020-2030 років.

Також деякі автори перераховують такі вимоги для досягнення 6G:

- надзвичайно високошвидкісний і високопропускний зв'язок, зокрема, пікова швидкість передачі даних більша 100 Гбіт/с;
- екстремальне розширення покриття, включаючи покриття на великій висоті, під водою та в космосі;
- надзвичайно низьке енергоспоживання та зниження витрат, включаючи альтернативні технології зарядки;
- надзвичайно низька затримка;

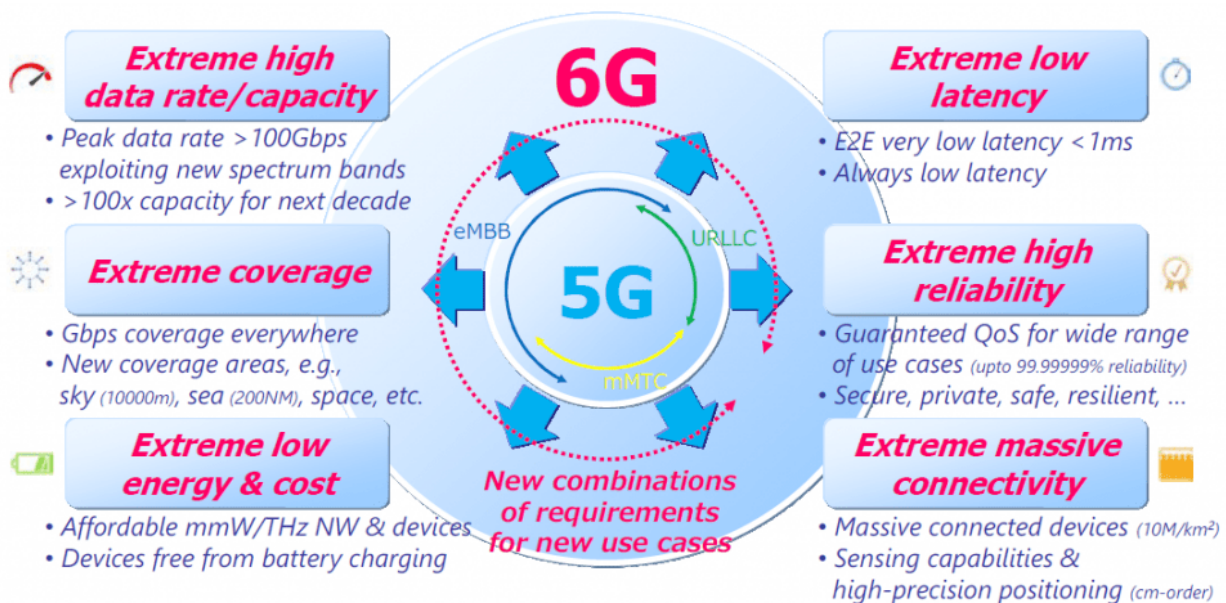


Рис. 1.10. Вимоги до 6G

- надзвичайно висока надійність;
- надзвичайно потужне підключення та зондування, зокрема обслуговує в 10 разів більше підключень, ніж 5G у порівнянному просторі.

1.4. Висновки до розділу 1

1. З погляду вдосконалення, типовими є такі основні види мобільного зв'язку: конвенціональний, транзінговий, мережевий.

2. Конвеціальний забезпечує роботу групи абонентів на одному радіоканалі без базових станцій з можливістю зміни частоти. Його недоліки:

- необхідне постійне прослуховування ефіру, що психічно навантажує;
- відсутні текстовий обмін та інтеграція інформації для обробки.

Він залишається бюджетним рішенням невеликих організацій.

3. Принцип транкінгового радіозв'язку ґрунтується на доступі абонентів за допомогою базових станцій до деяких комутуємих радіоканалів. Це:

- економить частотний ресурс;
- збільшує кількість абонентів зв'язку;
- забезпечує розширений рівень сервісу для абонентів та текстовий обмін.

У порівнянні зі стільниковими системами транкінг має унікальні можливості: групового зв'язку, аварійних й пріоритетних викликів, динамічне перегрупування абонентів, високу швидкість з'єднання до 0,5 с,

Застосовують у багатоканальних професійних систем радіозв'язку.

4. У стільникових системах вся зона обслуговування ділиться на зони покриття базових станцій, які об'єднані у режимі поточного часу. 1993 р. – поява аналогового мобільного зв'язку в Україні, фірма UMC.

5. 2G – послуги SMS, цифрове кодування розмов, GPRS передача даних.

3G – широкосмуговий цифровий зв'язок, де комутація відбувається за допомогою багатоцільових комп'ютерних мереж, зокрема й Інтернету.

4G – застосування просторово-часової обробки (також у 5G та 6G), висока швидкість передачі, розширення функцій спілкування:

надсилати голосові повідомлення по IP, дивитися потокове відео високої чіткості, грати в онлайн-ігри, використання інтернету у поїздках тощо.

5G – деяке вдосконалення 4G, популярне у великих містах, а в невеликих містах чи селищах актуальним залишиться 4G.

6. 6G – основний стандарт розвитку мобільного зв'язку. Особливості:

- ще більш високі частоти, порівняно із 5G;
- набагато вища пропускна здатність, нижча затримка до 1-ї мікросекунди;
- надзвичайно висока швидкість зв'язку до Гбіт/с;

- розширення покриття, у т.ч. на великій висоті, під водою, в космосі;
- низьке енергоспоживання та зниження витрат;
- надзвичайно висока надійність.

РОЗДІЛ 2

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА ОБРОБКА СИГНАЛІВ В МІМО-СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Загальні відомості

Просторово-часова обробка (STP - Space-time processing) на сьогодні є однією із найбільш досліджуваних технологій сучасного бездротового зв'язку, оскільки вона запропонувала розв'язання проблем, пов'язаних із перешкодами і завадами, смугою пропускання чи дальністю дії [12].

Розглянемо загальні принципи STP та її основні переваги.

Відомо, що для використання багатой структурі радіоканалу з STP для систем, які складаються з декількох антенних елементів, як правило, застосовується адаптивна просторово-часова обробка сигналів. Зазначений метод може ефективно застосовувати і для приймальної, і передаючих частин – або ж і для обох одночасно.

На рис. 2.1 запропоновані схеми зв'язку, що значною мірою залежать від числа використаних у приймальних чи передавальних вузлах антен. Відмітимо, що їх застосували для обох сторін - і передавальної, й приймальної. Залежно від наявного числа антен виділяють канали одиночного (SI - single input) та множинного входу (MI - multiple input) - для передачі сигналів або ж одиночного (SO - single output) й множинного виходу MO (multiple output) відповідно [13, 14, 15, 16].

Якщо STP буде застосована лише на одному кінці (стороні), то такий метод зазвичай прийнято називати методом смарт-антен. При використанні просторово-часової обробки на 2-х сторонах (рис. 2.1), то говорять про використання методу багатоканального входу й багатоканального виходу МІМО (multiple input/multiple output). Смарт-антени й МІМО-технології зараз є найперспективнішими напрямками розвитку бездротової зв'язку, що можуть забезпечити подолання існуючих обмежень пропускної спроможності, пов'язаних із перевантаженням мережевого трафіку, що важливо для бездротових високошвидкісних й широкосмугових мереж майбутнього.

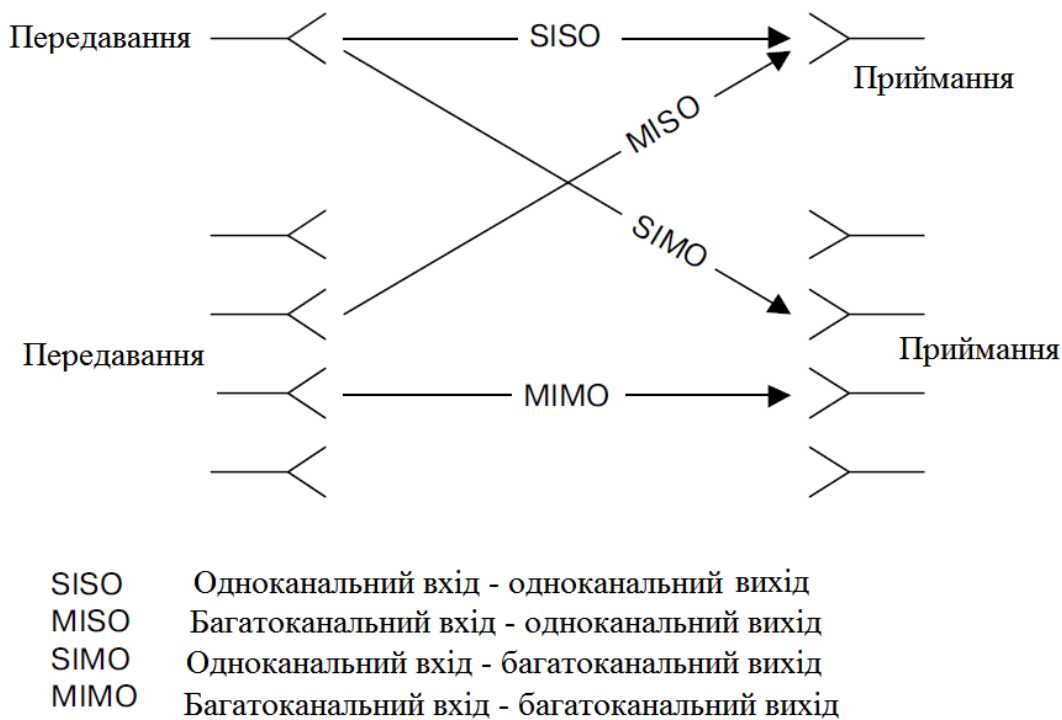


Рис. 2.1. Схема багатоканального зв'язку

На рис. 2.2(а) представлено передавальну систему із кількома антенами, розташованими на базовій станції, і лише однією - на мобільному терміналі. Зазначимо, що тут випромінювання мобільного терміналу є всеспрямованим, а базова станція (БС), відповідно, може забезпечувати адаптивне налаштування діаграми спрямованості (ДС), як і її фокусування на мобільний термінал із одночасною режекцією перешкод завдяки відповідному розміщенню нулів. В дійсності корисний сигнал і сигнал перешкоди можуть прийти з різних напрямів, і тоді вигляд фактичної ДС може значно відрізнитися, а сам процес фокусування здійснюється за допомогою процедури просторової фільтрації. Далі на рис. 2.2(б) наведена система МІМО, де БС, як і мобільний термінал мають декілька антен, що зроблено для одночасної бездротової передачі декількох потоків даних. Кожна з цих антен мобільного терміналу потрібна для передачі лише окремого потоку даних, які випромінюються, як було зазначено, всеспрямовано. Антена БС може формувати декількох променів, які забезпечують вибір чи прийом поточкових даних. Зрозуміло, порівняно із традиційною системою, представлена система має значно збільшену пропускну спроможність, що пояснює підвищений інтерес до систем МІМО.

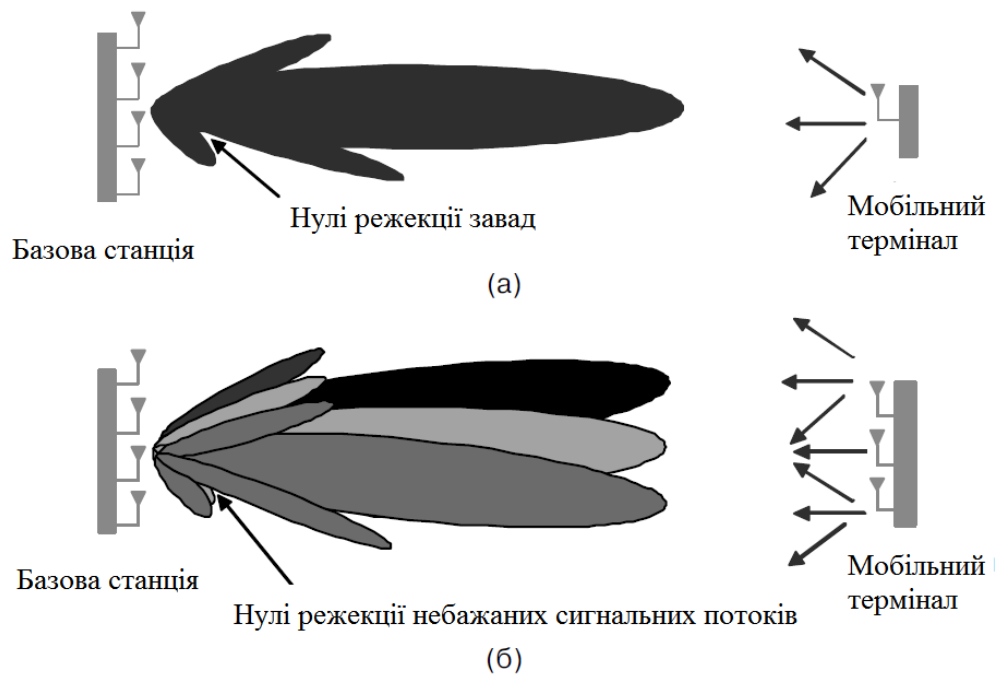


Рис. 2.2. Передавальні антенні системи: (а) БС з кількома антенами й мобільний терміналу з однією антеною; (б) МІМО- система з кількома антенами на базовій станції й мобільному терміналі

Зазначимо, що алгоритми просторової обробки потребують великих обсягів обчислень, а кишенькові пристрої мають обмежену ємністю акумулятора, як і обмежені можливості оброблення, тому майже всі розробки STP-технології були пов'язані до обладнання БС чи точок доступу. Зараз із стрімким розвитком технології пристроїв та зниженням енергоспоживання й появою новітніх методів оброблення ця технологія вже застосовують і для мобільних пристроїв також.

Розглянута технологія смарт-антен, перш за все, приваблива здатністю забезпечити помітне збільшення дальності дії, спектральної ефективності й надійності роботи сучасних бездротових мереж. Як правило, смарт-антенні системи це такі антенні решітки, які розміщують лише на одному кінці зв'язку. Зазвичай, на передавальній стороні маємо так звану MISO-систему (тобто, багатоканальний вхід й одноканальний вихід), а на приймальній стороні навпаки - SIMO-систему (багатоканальний вхід й багатоканальний вихід). Відмітимо, що у переважній більшості антенних систем традиційних формування діаграми направленості

відбувається за допомогою фокусування енергії сигналу, яка передається у напрямку приймача для покращення відношення сигнал/шум прийнятого антеною сигналу.

Також забезпеченню зниження рівня перешкод сприяють і гостронаправлені діаграми направленості, поліпшенню відношення сигналу у суміші перешкода/шум і, завдяки чому, підвищену ефективність наявного спектрального розподілу. Інші існуючі схеми смарт-антен покращують якість передачі завдяки підвищенню коефіцієнта підсилення, що забезпечується рознесенням декількох наявних передаючих антен.

Відмітимо, що використовуючи кілька антенних елементів, маємо зменшення за експонентною ймовірність втрати сигналу, з числом декорельованих сигналів чи ж антен. У сучасних бездротових мережах LAN чи WLAN типів SIMO чи MISO, схеми рознесення працюють за принципом перемикання, що дає вибір з двох антен тієї, що має максимальне відношення сигнал/шум. Системи MIMO можуть також скористатися багатопроблемним розповсюдженням сигналу для забезпечення вищої швидкості передачі, хоча зазвичай це є шкідливим у системах бездротового зв'язку.

Зрозуміло, що рознесені смарт-антенні системи не можуть забезпечити збільшення суттєвого збільшення дальності дії чи максимальної швидкості передачі даних, але можуть просто покращити ефективність використання спектру, як і якість каналу зв'язку. У смарт-антенах MIMO-систем, де антенні решітки (AP) встановлюються в приймальну й передавальні частини, що забезпечує вищу пропускну здатність порівняно із звичайними.

Ще відмітимо забезпечення антенами систем MIMO разом з просторово-часовою обробкою надійної одночасної передачі незалежних потоків даних завдяки всім передаючим антенам, що працюють в одному частотному діапазоні за умови роботи у середовищах з наявною високою неоднорідністю.

Зокрема, для забезпечення одночасного доступу кільком абонентам бездротова MIMO-система стандарту IEEE 802.11, яка має 4 передаючих й 4 приймальні антен, гарантує 4-разове збільшення пропускну здатності аж до 216 Мбіт/с (4×54 Мбіт/с), як зазначено у [4]. Подібну схему MIMO називають просторовим поєднанням або ж SM - spatial multiplexing. Підвищення

продуктивності MIMO систем можна реалізувати 2-ма шляхами, відповідно до умов систем середовища, в якому буде знаходитися МТ.

За сприятливих умов у каналі й відношення сигнал/шум за потреби збільшення швидкості передачі даних використовують метод просторового об'єднання, відомий як *spatial multiplexing*. Тоді частина ступенів свободи приймача (в залежності від обраного алгоритму STP можуть використовуватися усі наявні ступені свободи) застосовується лише для вилучення декількох сигналів, а не для рознесеного прийому, який є одним із способів боротьби із завмираннями.

Зазначимо, що для імплементації рознесеного прийому й збільшення коефіцієнту спрямованої дії AP у випадках роботи на великих відстанях застосовують декілька антен, як передавальних, так й приймальних.

Грунтуючись на умовах середовища перемикання між режимом рознесеної дії й режимами просторового об'єднання відбувається за допомогою спеціального алгоритму адаптації з'єднання, який, найчастіше, застосовується у процесорі контролю доступу до середовища MAC (*media-access controller*). Можливість адаптації до довкілля передбачена при повноцінній роботі.

Грунтуючись на умовах середовища розповсюдження й застосуванні методу STP-обробки, N-кратна система MIMO (де N це кількість антен у приймальній та передавальній частинах) відповідно забезпечує N-кратне збільшення пропускної здатності у порівнянні із системою SISO. У випадку когерентного складання сигналів у приймальній частині з імплементацією новітніх методів, як, зокрема, технології додавання при максимальних відношеннях *maximal ratio combining* (MRC), середнє значення відношення сигнал/шум сигналу на приймачі зростає за формулою $10\log_{10}(N)$, де N – відповідне число приймальних антен. Зробивши розрахунки маємо, що порівняно із схемою, яка має 4 антени характеристика покращується на 6 дБ.

Нижче наведені області застосування й переваги STP (рис.2.3). Відмітимо таку деталь, що MIMO-системи, які придушують сигнали-перешкод, більше виграють при використанні більшої кількості приймальних антен, а не передаючих. Зокрема, якщо N це число передаючих антен в системі MIMO, тоді для обнулення

просторової перешкоди, створюваної одним із абонентів, який використовує всі N незалежних потоків даних, тоді переважна кількість приймальних антен буде $2N$.

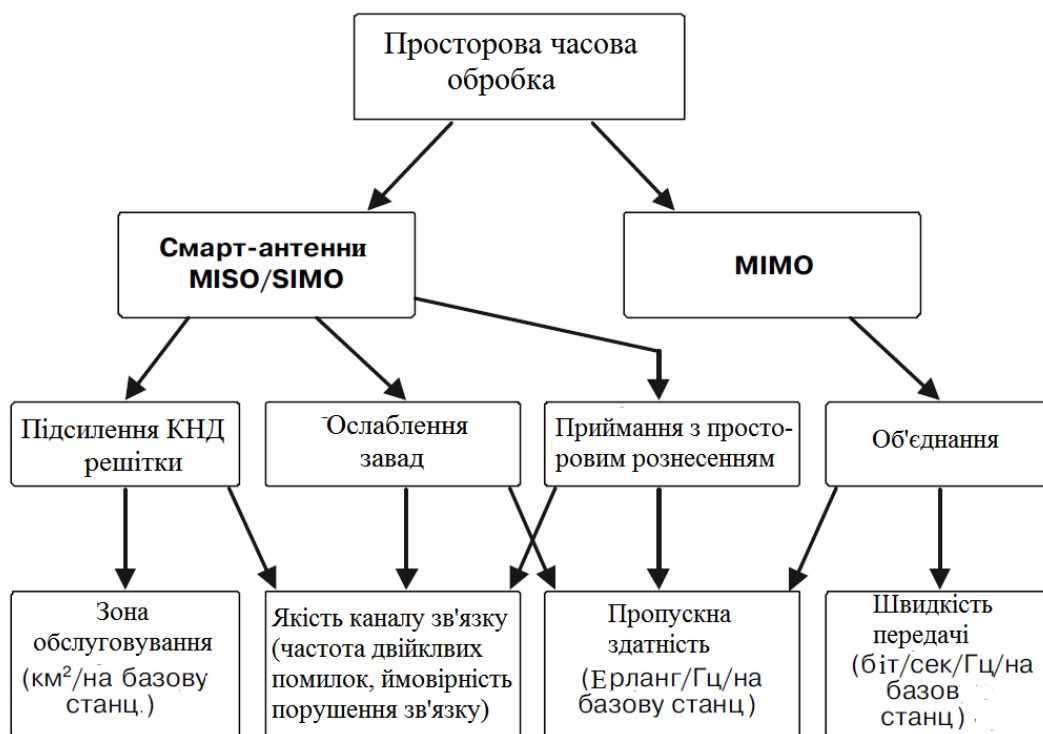


Рис. 2.3. Застосування й переваги просторово-часової обробки

Кожен об'єднаний потік даних із завадою аналізується MIMO-приймачем, що призводить до придушення перешкоди як окреміюго сигналу. Таким чином, для зменшення чи усунення перешкоди використовується N антен, а інші N антен – вже для отримання корисних потоків даних чи отримання підсилення у випадку рознесеного прийому.

Отже передумовою появи новітніх високоефективних технологій для систем бездротового зв'язку є, звичайно, рішення, які гарантують одночасну реалізацію перерахованих вище умов на технологічному рівні.

2.2. Моделі сигналу та часового просторово-часового каналу

Розглянемо дискретну модель такого каналу [17]. Для цього скористуємося допомогою часової й просторової дискретизації прийнятого сигналу.

Почнемо з випадку передачі модульованого сигналу від одного абонента у середовищі з багатопробеневи́м поширенням. Тоді цифрова модуляція відбувається саме у передавачі і сам процес це просто перетворення НЧ-сигналу на високочастотний, а далі він придатний до передачі. Відомо, що лінійна модуляція цифрової послідовності $\{I_k\}$ ґрунтується на функції формування імпульсів $g(t)$ так, НЧ сигнал $s(t)$ що підлягає процесу передачі, в загальному виді має вигляд:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_k g(t - kT),$$

де T – період сигналу чи символу. Зазначимо, що в якості джерела вибірки даних I_k може виступати будь-яка множина векторів чи сукупність сигналів. Зокрема, при дворазовій фазовій маніпуляції (binary phase-shift keying - BPSK) можливі символи даних це дві одиниці з різними знаками (± 1). А при застосуванні інших методів модуляції, зокрема квадратурної фазової (quadrature phase-shift keying - QPSK) чи квадратурної амплітудної (QAM), вибірка I_k є комплексною, бо сигнальні точки мають представлення двовимірне. Для бездротової передачі, зокрема у стандарті GSM використовують двійкові або ж бінарні сигнали, як і гауссівську маніпуляцію з мінімальним частотним зсувом (Gaussian Minimum Shift Keying-GSMK).

Основна функція каналу при обробці сигналів чи системах зв'язку це встановлення співвідношення між сигналом передачі й його прийнятим варіантом. У випадку немодульованого вихідного сигналу $s(t)$ прийнятий сигнал $x(t)$ можемо виразити за допомогою згортки імпульсної характеристики цього каналу, а саме

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau, t) s(t - \tau) + n(t), \quad (2.1)$$

Відомо, що імпульсна характеристика $h(\tau, t)$ це функція тривалістю часу t , і в той же час це функція часової затримки τ , яку вносить канал зв'язку за наявності багатопробеневого поширення. Більш того, у виразі (2.1) також враховано і $n(t)$ - адитивний білий шум. Зазначимо, що незважаючи на можливість інших припущень, що пропонуються в багатьох сучасних наукових джерела, все ж таки використання адитивного шуму все ще залишається є найпоширенішим.

Вираз (2.1) використовують для одиночної приймально-передавальної антени, і він розширюється для випадку застосування кількох антен. Якщо канал зв'язку формує N приймальних і M передаючих антен, тоді описуємо його матрицею $H(\tau, t)$ з $N \times M$ комплексних імпульсних характеристик смуги, що займають сигнали модуляції несучої.

Позначимо елементом матриці $H_{ij}(\tau, t)$ відповідну імпульсну характеристику каналу зв'язку між i -ю приймальною й j -ою передавальною антенами. В цьому випадку кожна приймальна антена буде спостерігати за шумовим накладенням від M переданих сигналів, які можуть спотворюються при поширенні каналом багатопробеневого поширення із завмиранням. Тоді, для математичного опису багатоелементної антени (Multi-Element Antenna - MEA) чи MIMO-каналу нам треба відповідно мати NM імпульсних характеристик. Кожен рядок H -матриці, наприклад $[H_{i1}, H_{i2}, \dots, H_{iM}]$ для кожного моменту часу є відповідною характеристикою каналу від M -передаючих елементів до єдиного приймального елемента, а характеристику каналу від одного елемента передачі до N -приймальних представляє кожний рядок H -матриці, зокрема $[H_{1j}, H_{2j}, \dots, H_{Nj}]$. Таке представлення часто називають просторово-часовою сигнатурою, яка створена j -ою передавальною антеною на антенній решітці приймача. Відмітимо, що використовують і безліч інших моделей каналів зв'язку, що враховують розмірність простору, для дослідження кореляційних властивостей двох просторово рознесених антен чи отримання коефіцієнтів каналів зв'язку.

У випадку застосування MEA і пам'ятаючи, що канали між антенними парами є некорельованими й незалежними, $N \times 1$ вектор прийнятих сигналів $x(t)$ представляють як

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\tau, t) s(t - \tau) d\tau + n(t), \quad (2.2)$$

де $s(t)$ представляє собою $M \times 1$ вектор сигналів передачі, а $n(t)$ - вектор перешкод тієї ж самої довжини. Варіант схеми такого MEA-каналу подано на наступному рисунку.

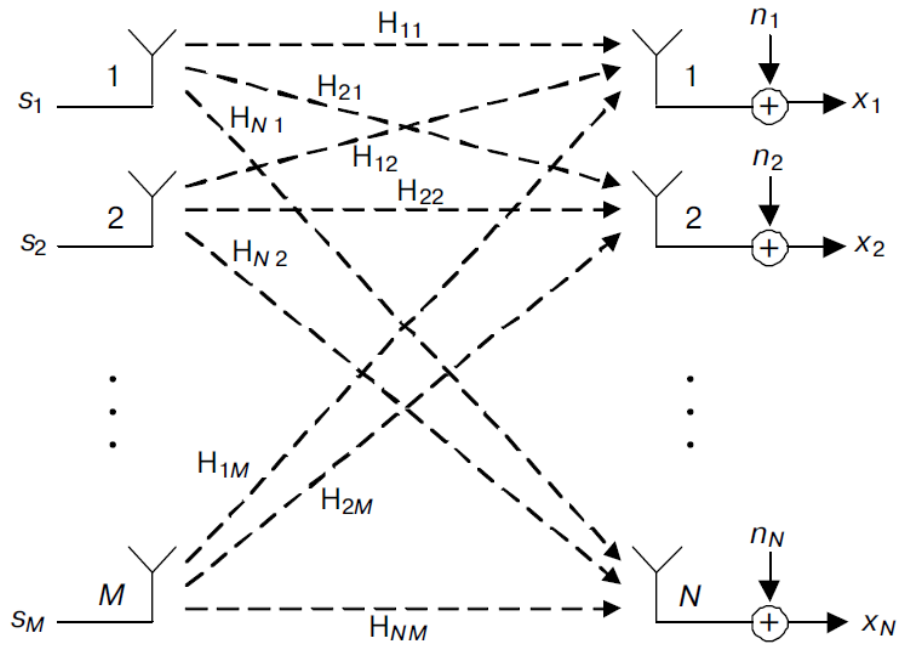


Рис. 2.4. Бездротовий канал зв'язку на базі M передаючих й N приймальних антен

Звернемо увагу, що у цьому виразі використовується неперервне представлення сигналів й імпульсних характеристик, так як фізична модель каналу ґрунтується на підставі законів електродинаміки. Але сьогодні у переважній більшості систем бездротового зв'язку використовують цифрову обробку сигналу, і ця тенденція збережеться у майбутньому. Отже для розробки приймальної частини чи алгоритмів детектування зазначених систем більш зручним є, саме, дискретне представлення часу. І для дискретизації прийнятого сигналу з періодом T часто застосовують вирази $x(n) = x(nT)$ та

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} H(k, n) s(n - k) + n(n), \quad (2.3)$$

Очевидно, що (2.3) матриця H – це дискретний аналог матриці H в (2.2), тому, що далі розглядатимемо дискретизовані аналоги переданого сигналу й перешкоди, як позначено відповідно $s(n)$ й $n(n)$. Саме таку систему позначень пропонують у переважній більшості наукових робіт, хоч й супроводжується деякими спотвореннями. У системах із вузькою смугою, де частотну характеристику каналу

вважають практично рівномірною, основна частина енергії на стороні приймання надходить практично одночасно, і тоді модель можна спростити як

$$x(n) = H(n)s(n) + n(n). \quad (2.4)$$

Зараз модель каналу представляється комплексними матрицями, які ґрунтуються на комплексних скалярах, що зв'язують прийняті відповідно кожним елементом сигнали з самим сигналом, що передається кожною антеною за допомогою простої математичної матриці перетворення, яка дає опис загальної поведінки у каналі зв'язку.

У випадку гіпотези про наявність стаціонарності каналу, його часовою залежністю, як правило, можна знехтувати.

Тепер розглянемо широкосмугові сигнали. Це випадок, коли їх смуга частот ніж когерентна смуга каналу, і відповідно тут використовуються інші підходи. Фактично, точна модель має враховувати копії того самого сигналу, який надходить до приймача у різні моменти часу. Тут кожен прийнятий сигнал залежить від наступних, які передані у інтервал часу від $L-1$ періодів дискретизації (попередніх) і до поточного періоду, ґрунтуючись на нульовому часі проходження сигналу. Таку модель представимо як

$$x(n) = \tilde{H}(n)\tilde{s}(n) + n(n). \quad (2.5)$$

де матриця \tilde{H} це $N \times ML$ і вектор \tilde{s} відповідно - $ML \times 1$. Введений параметр L відображує поглинання майже всієї енергії сигналу, який надходить із часовими різними затримками, а задається як відношення розподілу затримок до всієї тривалості символу, тобто $L = T_m/T$.

Матрицю \tilde{H} представимо у вигляді

$$\tilde{H} = \begin{bmatrix} \tilde{h}_{11} & \tilde{h}_{12} & \dots & \tilde{h}_{1M} \\ \tilde{h}_{21} & \tilde{h}_{22} & \dots & \tilde{h}_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{h}_{N1} & \tilde{h}_{N2} & \dots & \tilde{h}_{NM} \end{bmatrix},$$

де кожен елемент цієї матриці \tilde{h}_{ij} це вектор-рядок із довжиною L і містить відповідні імпульсні характеристики від i -ї передаючої антени й до j -ої приймальної антени від поточного моменту часу до $L - 1$ попередніх моментів.

2.3. Просторово-часове формування променю

Відомо, що просторова обробка працює значно краще у випадку, коли сигнал, який приходить на кожен з антенних елементів, має однакову часову дисперсію, й, відповідно, однакову форму імпульсної характеристики. Хоча у реальному житті це не так, і в середовищі з багатопроменевим поширенням рівень прийнятої потужності буде завжди випадковою функцією розташування МТ й часу залежно від завмирання у цьому каналі. Крім того, для боротьби із багатопроменевим розповсюдженням відбувається окрема корекція для кожної антени до просторового формування сигналів, що є оптимальним при ситуаціях, коли кожній затримці компоненти багатопроменевого поширення надходять з одного напрямку.

Доцільним є застосування суміщеного просторово-часового фільтру з метою використання переваги двовимірної обробки у порівнянні з одновимірною. Зазначимо, що просторово-часове формування є, все ж таки, узагальненим випадком просторового формування.

Позначимо число відліків суматора K , а кожен відлік - $w(i)$, де $i = 0, 1, \dots, K-1$, а $N \times 1$ – це ваговий вектор. Вихід просторово-часового формувача у матричній формі має вигляд:

$$y(n) = W^H X(n),$$

де W й $X(n)$ це $KN \times 1$ вектори.

На рис. 2.5 запропонована схема просторово-часового формувача діаграми напрямлення (ДН).

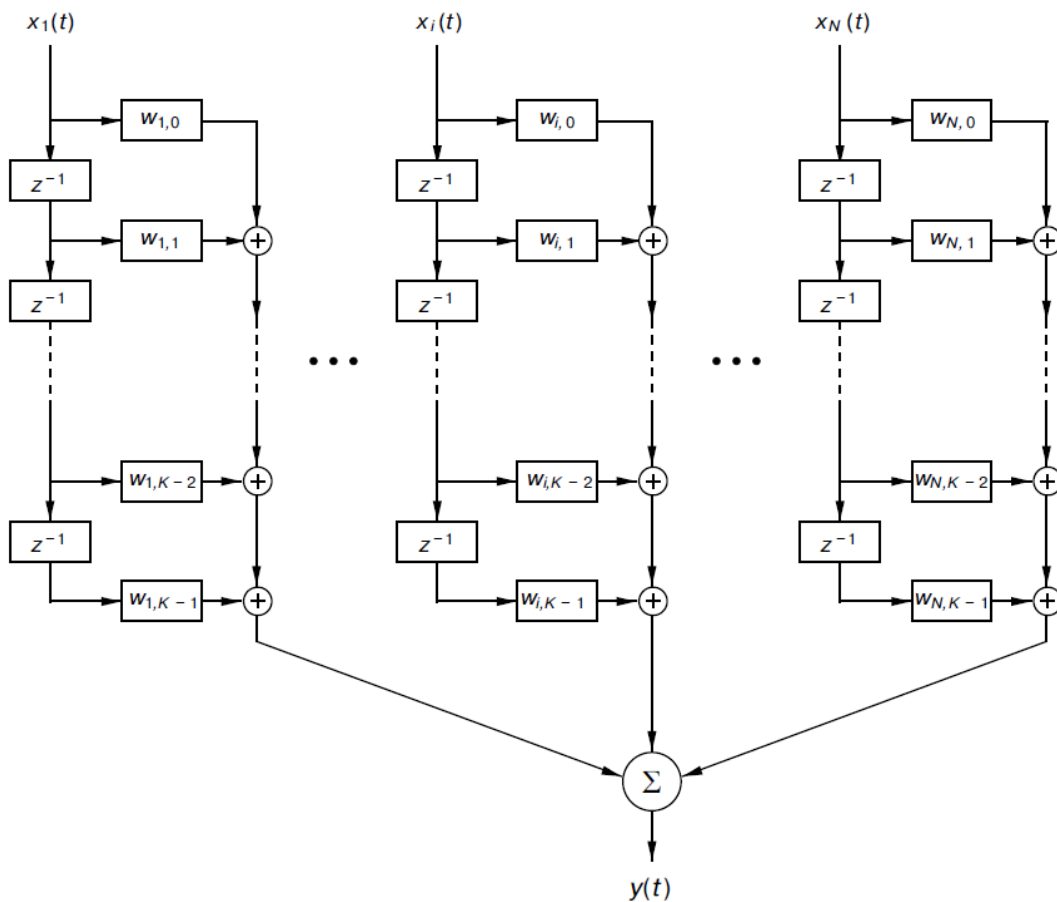


Рис. 2.5. Схема просторово-часового формувача діаграми напрямлення

2.4. Придушення міжсимвольних та міжканальних завад

Сучасні наявні моделі забезпечують необхідний апарат для демонстрації високих можливостей просторово-часової обробки, що дає придушення внутрішньоканальних (Suppression Co-Channel - CCI) як і міжсимвольних (InterSymbol - ISI) перешкод одночасно. Відповідно до застосованої моделі сигнали, прийняті N елементи за інтервал із K часовими відліками від j -го джерела сигналу, представляємо як $KN \times 1$ просторово-часового вектору

$$X_j(n) = H_j S_j(n) + N_j(n),$$

де $S_j(n) = s_j(n), s_j(n-1), \dots, s_j(n-K-L+2)^T$ та H_j це $KN \times (K+L-1)$ канална матриця, яка задається як

$$H_j = \begin{bmatrix} \hat{H}_j & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \hat{H}_{j,n-1} & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \hat{H}_{j,n-K+1} \end{bmatrix},$$

де $0 - N \times 1$ це вектор-колонка з нульовими елементами.

Зазначена матриця H_j має блокову структуру (тобто рівне число діагональних елементів), її отримують з лінійної, не залежної від часу операції згортки над наявною символною послідовністю. Враховуючи обмежену за часом безперешкодну обстановку, вихід із просторово-часового лінійного суматора, що обумовлено наявністю j -го джерела, запишемо як

$$y_j(n) = W_j^H H_j S_j(n),$$

а за наявності Q каналів передачі абонентів у напрямку БС із N елементів вихід просторово-часового приймача тоді має вигляд

$$y_j(n) = \sum_{j=1}^Q W_j^H H_j S_j(n).$$

Розглянемо придушення ISI. Як правило, лінійні фільтри W_j використовують з метою вирівнювання каналу для компенсації впливу міжсимвольних завад на j -го користувача, але без внутрішньоканальних перешкод. Отже для придушення міжсимвольних перешкод у j -му каналі зв'язку згортка між W_j й каналними характеристиками має задовольняти такій умові або зверненню в нуль незначних матричних коефіцієнтів, тобто

$$W_j^H = H_j [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, 0].$$

Місце розташування елемента «1» позначає затримку комбінованої імпульсної характеристикою для каналного еквалайзера. Таким чином, для реалізації придушення міжсимвольних перешкод необхідним є наявність просторово-часового фільтру з великою кількістю часових відліків K .

Метою придушення внутрішньоканальних перешкод у сучасних стільникових системах зв'язку є визначення й підсилення корисного сигналу кожного j -го каналу абонента й усуненні всіх інших завад одночасно. Все це може бути зроблено на підставі встановлення ортогональності між відомою характеристикою просторово-часового суматора й каналною характеристикою інших абонентів, які підлягають такій корекції.

Розглянемо зараз одночасне придушення внутрішньоканальної й міжсимвольної перешкод. В умовах наявності ISI й CCI для повного відновлення сигналу, що передається певним абонентом, потрібно забезпечити одночасно вирівнювання й поділ каналів. Вихід просторово-часового суматора, що задовольняє попереднім виразам, перепишемо як:

$$W_j^H = \tilde{H}_j [0, 0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0, 0].$$

Тут матриця $\tilde{H} \triangleq [H_1, \dots, H_{j-1}, H_j, H_{j+1}, \dots, H_Q]$ має розмір $KN \times Q(N+L-1)$. Відмітимо, що в реальності одночасне ідеальне придушення перешкод типу ISI й CCI обмежується присутністю шуму й відсутністю ідеальної синхронізації.

Вчені та розробники пропонують деякі алгоритми просторово-часової обробки для придушення ISI й CCI у нестационарних каналах. Зокрема алгоритм просторово-часової обробки для придушення ISI й CCI для систем GSM/DCS ґрунтується на оптимізації потрібної цільової функції для розділених просторово-часових каналів та комбінованому оцінюванні часового каналу для приймача з декодуванням Вітербі й вагових коефіцієнтів формувача діаграми направленості.

Новітні адаптивні антенні решітки можуть забезпечити альтернативні способи розв'язання проблеми у ближній зоні. Залежності стійкості до перешкод й пропускної спроможності каналу зв'язку певного абонента від інших користувачів цієї мережі, системного опору від далекого й близького розташування можна значно зменшити за рахунок напряму максимуму діаграми направленості, а також і зменшити рівень сумарної потужності перешкод колективного доступу (multiuser access interference - MUAI).

Крім подолання проблеми ближньої-дальньої зони, також антенні решітки значно збільшують пропускну здатність систем CDMA через придушення перешкод.

Це пов'язано з тим, що пропускна здатність таких системи обмежується тільки перешкодами, а не смугою пропускання, як це притаманно системам TDMA. До того ж зниження мінімального рівня шуму цих системи через просторово вибірково передачу й прийом, що сприяє прямому збільшенню пропускної здатності.

Відмітимо зростання інтересу останнім часом до приймачів 2D RAKE (тобто, кореляційних приймачів), які провадять комбіноване просторово-часове рознесення через використання там адаптивних антен. Фактично 2D RAKE-приймачі дають можливість конструктивно складати сигнали багатопроменевого поширення, які приймають AP, і одночасно мінімізувати перешкод колективного доступу. Цей досить ефективний засіб комбінування сигналів дає оптимальне значення відношення сигналу до суміші перешкоди з шумом для певного абонента. Потенційні можливості приймачів 2D RAKE перевірені й підтверджені результатами багатьох сучасних досліджень.

У випадку застосування AP із N елементів й при наявності L -роздільних шляхів поширення сигналу, у приймачах RAKE з просторово-часовою обробкою передбачено формувач для кожного компонента з обраними вагами w_{in} , за якими знаходиться стандартний приймач RAKE. За формувачем діаграми направленості MMSE-типу далі знаходиться RAKE-суматор. На рис. 2.6 представлено типову схему RAKE-приймача просторово-часової обробки.

Подібний приймач збільшує добротність, що призводить і до збільшення зони обслуговування або ж пропускної здатності каналу.

Підсумовуючи можна зробити висновок, що незважаючи на поширене використання антенних решіток, можна казати, що лише їх одночасне застосування на базовій станції й терміналах абонентів забезпечить значні переваги використання багатовимірних сигнальних просторів як і, значне зростання швидкостей передачі даних чи пропускної здатності каналів.

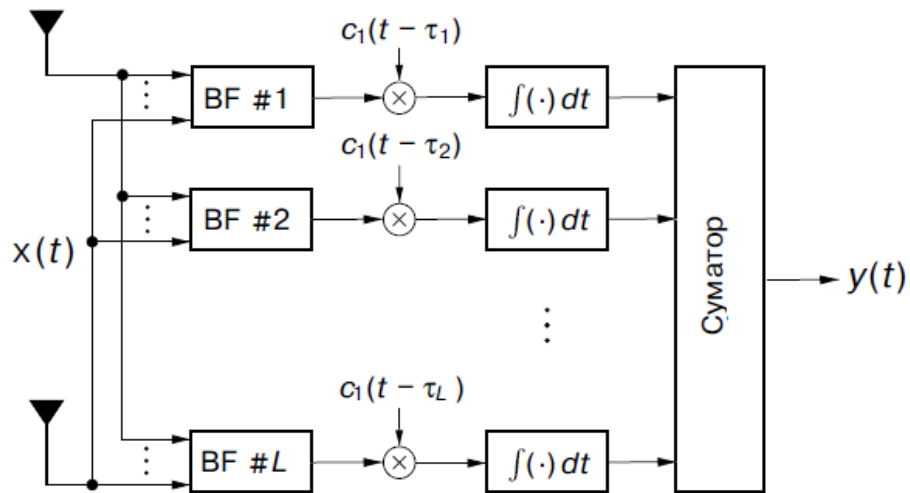


Рис. 2.6. Схема RAKE-приймача просторово-часової обробки

Для отримання переваг, що пов'язані з MIMO-системами, все ж таки ще треба подолати низку проблем. По-перше, успіх новітніх концепцій щодо їхнього широкого впровадження повинен ґрунтуватися на правильному виборі геометричних характеристик й антенних конструкцій. Зокрема, сучасний тренд щодо мініатюризації розмірів стільникових телефонів не залишає необхідного місця для розміщення декількох антен.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Просторово-часова обробка є вагомю технологією мобільного зв'язку, оскільки надає можливість розв'язання проблем, пов'язаних із:

- придушенням перешкод і завад;
- економією частотної смуги і покращенням пропускної спроможності;
- збільшенням швидкості передачі та дальності дії.

Реалізується зазвичай MIMO-системами.

2. Давні системи мобільного зв'язку – конвенціональні, трангінгові, мережеві до 4G – використовували виключно часову обробку.

Мережеві технології, починаючи з 4G, використовують сумісну просторову обробку та часову.

3. Технологія MIMO знайшла практичне застосування в бездротових локальних мережах стандарту IEEE 802.11n, а також в бездротових мережах мобільного зв'язку WiMAX, 4G та пізніших.

4. Одночасне застосування антенних решіток на базовій станції й терміналах абонентів забезпечить переваги використання багатовимірних MIMO-систем, де енергетичний виграш зростає пропорційно до числа приймальних антен.

5. Цифрова модуляція корисного сигналу відбувається у передавачі як зміна у часі одного чи декількох параметрів високочастотної несучої згідно інформаційного НЧ-сигналу із наступним перетворенням до цифрової форми.

6. У разі багатьох передаючих антен, виграш від антенної решітки може бути отриманий за умови використання просторового кодування. При такому кодуванні багато копій переданих сигналів досягатимуть одиночних приймальних антен когерентно, тобто синфазно.

7. У системах бездротового зв'язку використовують просторово-часову цифрову обробку сигналу, і ця тенденція збережеться у майбутньому.

8. Доцільним є застосування суміщеного просторово-часового фільтру для переваги двовимірної обробки у порівнянні з одновимірною.

РОЗДІЛ 3

ЕФЕКТИВНІ МЕТОДИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВОЇ ОБРОБКИ В СИСТЕМАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

3.1. Методи просторово-часового кодування

На сьогодні, зокрема, у збройних силах високо розвинених держав оперують такими новітніми формами ведення воєнних дій, як різні інформаційні операції (спеціальні, наступальні чи оборонні), способи збройної боротьби, із сучасними системами бойового управління. Технічним підґрунтям забезпечення новітніх форм ведення воєнних дій, зрозуміло, що служать польові сучасні системи зв'язку та інформаційних технологій. А пріоритетом розвитку системи зв'язку збройних сил, саме, України є переоснащення й модернізація мобільної компоненти, серед якої виділимо польову опорну мережу зв'язку, як і лінії прямого зв'язку між кількома пунктами управління.

Зараз у стаціонарних чи рухомих системах зв'язку для отримання більш високих швидкостей передачі даних, як відомо, застосовують багатоантенну техніку, яку часто розглядають в якості системи зв'язку із кількома просторовими каналами. Зазначимо, що усі канали працюють одночасно і у одній єдиній смузі частот, а розділяються лише завдяки просторовому рознесенню антен приймальних та випромінюючих, що забезпечує високу спектральну ефективність.

Процедура просторово-часового блокового кодування (Space-time block code - STBC) на сьогодні є найбільш простою технікою, яка застосовує рознесення передавальних антен [18, 19, 20]. Це дає вигреш, який досягається без додаткового ускладнення блоку приймання, не потребує знання характеристик радіоканалу при передачі даних, а також не потребує складних алгоритмів оброблення сигналів при їх прийманні. Недоліком цієї техніки є забезпечення не досить високої швидкості передачі інформації, порівняно з іншими способами просторового кодування.

У системах МІМО, як зазначалося у розділі 2, використовуються декілька антен і у передавачі, і у приймачі. Тоді ми можемо одержати швидкості передачі

інформації, які близькі до граничних без спеціальних процедур адаптації, тобто коли параметри каналів у передавачі невідомі. Відмітимо, що коли число приймальних та передавальних антен однакові, то пропускна спроможність зростає в залежності від кількості антен.

Разом із MIMO технологією й просторово-часовим кодуванням сигналів, доцільним є використання підходу, яка ґрунтується на додатковому стробуванні відліків АЦП й методі неортогональної дискретної частотної модуляції (Non-Orthogonal Frequency Division Multiplexing - N-OFDM). На відміну від методу OFDM, тут рознесення частот не прив'язують до максимумів АЧХ фільтрів.

У разі використання квадратурної амплітудної модуляції, для демодуляції подібних сигналів є необхідність визначення квадратурні складові їх амплітуд. Для розв'язання подібної задачі найбільш часто застосовують метод максимуму правдоподібності. Саме тому, при синтезі процедур цифрового оброблення сигналів постає задача його використання у режимі реального часу.

Всі перераховані аргументи роблять перспективним використання MIMO-технології із просторово-часовим кодуванням сигналів саме у системах зв'язку мобільної компоненти та БС.

Розглянемо просторово-часове решітчасте кодування (ПЧРК). Цей метод поєднує істотні переваги методів просторового рознесення із здатністю виправляти помилки коригуючим кодом у разі використання оптимальних алгоритмів декодування, і одночасно застосовують оптимальний поширений алгоритм об'єднання рознесених сигналів. Відмітимо, що при так званому традиційному коригувальному кодуванні (фактично часовому) треба вводити у часовій області надмірність. А у системах із ПЧРК вводиться також надмірність й у просторовій ділянці, яка утворюється декількома передавальними й лише однією приймальною антенами, що це показано на наступному рисунку (рис.3.1).

При застосуванні ПЧРК можна отримати вигреш у завадостійкості завдяки ускладненню методів передачі чи обробки сигналів на їх прийомі. Для реалізації ПЧРК обирають згортковий код зі швидкістю $R=k/n$ (може бути $R=1/2, 2/3, 3/4$). Кодер запропонованого коду генерує послідовності, які створюють кодові решітки,

якими під час декодування за алгоритмом Вітербі іде пошук максимально правдоподібного шляху.

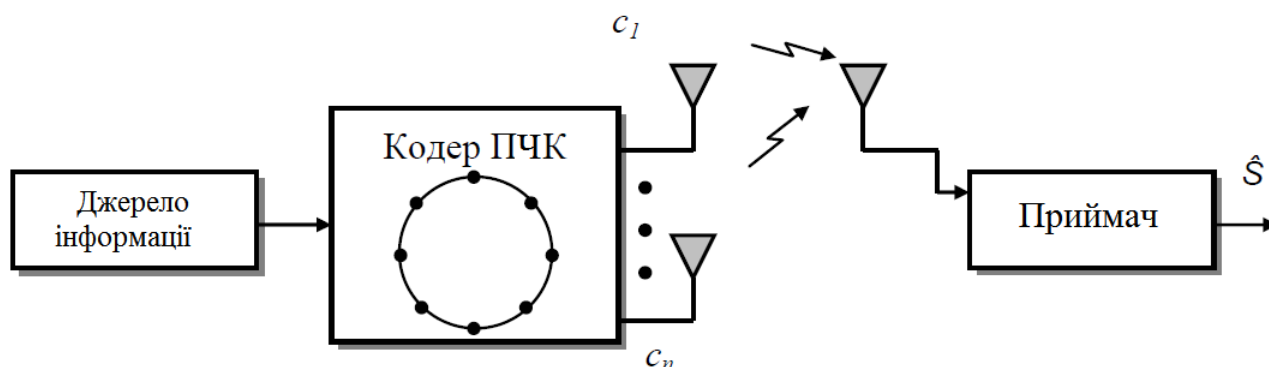


Рис.3.1. Модель системи із ПЧРК

Відмітимо, що символи гілок подібного кодеру (на рис. 3.1 це $c_1 \dots c_n$.) подаються на відповідні входи передавачів. Далі на рис. 3.2 пропонується модель системи з ПЧРК, яка містить відповідний кодер ПЧРК з n -виходами, які підключають відповідно до n передаючих антен. Прийом, зазвичай, ведеться однією антеною, а у приймачі є декодер просторово-часового коду. Відмітимо, що тут розглядаємо MIMO систему типу $(n \times 1)$, яка має об'єм рознесення $m=n$.

На рис. 3.2 запропоновано приклади кодера ПЧРК, з конфігурацією сигнального сузір'я 8-позиційної фазової модуляції або ФМ-8 й решітчастої діаграми коду. Тут на рис. а представлено кодер згорткового коду із двома виходами ($n = 2$), одиничною пам'яттю й поліномами, які породжують $g_1=5$ й $g_2=1$ (D є символом затримки). Таке кодування проводиться у так званому алфавіті кільця алгебри Z_8 (це є кільцем цілих чисел із операціями складання чи множення за модулем 8). Під час синтезу цієї сигнально-кової конструкції досить широко застосовують ізоморфізм між символами кільця алгебри Z_8 й сигналами обраної фазової модуляції ФМ-8. Виходи кодеру c_1 й c_2 відповідно підключені до входів передавачів передаючих рознесених антен. Фазова модуляція ФМ-8 тут застосовується для збільшення питомої швидкості передачі. Відмітимо, що один крок решітчастої діаграми ПЧРК (рис. 3.2, в) буде містити набори як попередніх, так і наступних станів кодеру а також гілок, що поєднують їх.

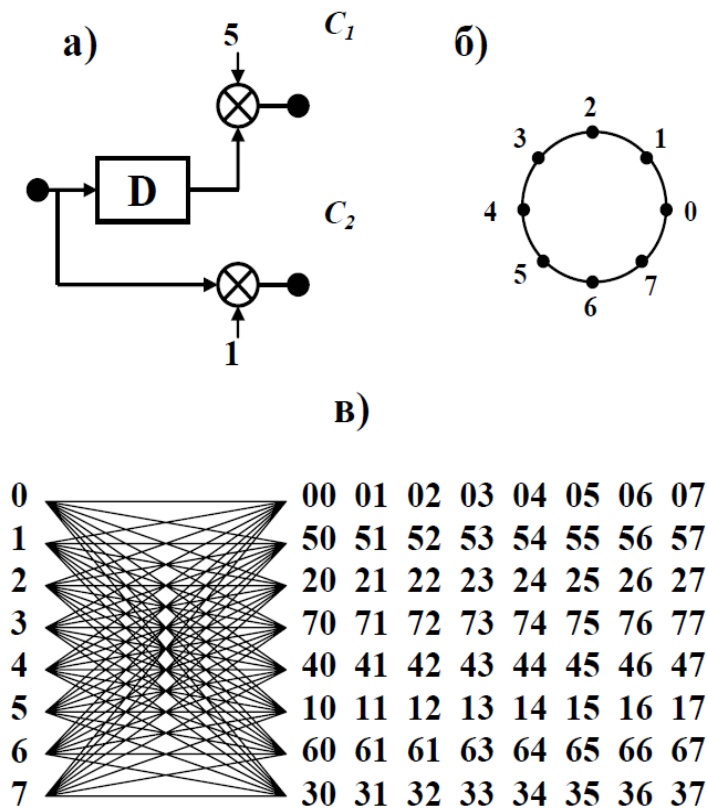


Рис. 3.2. Приклад кодеру (а), сигнального сузір'я (б) й решітчастої діаграмі ПЧРК (в)

Кожну таку гілку маркують, зазвичай, кількома символами на виходах кодеру c_1c_2 . Праворуч на діаграмі представлені рядки із парами символів, які застосовують для маркування кожної з гілок, що виходять із конкретного стану i , обов'язково, у порядку їх перерахування зверху вниз. Зокрема, пара 2-х символів $(c_1c_2) = (52)$, яка знаходиться у 2-му рядку на 3-му місці зліва маркує гілку, яка поєднує попередній стан «1» із станом наступним «3». Оброблення сигналів на прийомі відбувається за рахунок декодування по решітках ПЧРК на базі відомого алгоритму Вітербі.

Завадостійкість декодування ПЧРК цього алгоритму, зазвичай, визначають як відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму E_s/N_0 , який є необхідним для забезпечення типової ймовірності помилки $P_o=10^{-5}$ для сучасних цифрових систем. Тоді у порівнянні з некодованою передачею результуючий енергетичний вигаш, який забезпечується використанням коду №1 із 2-ма передаючими антена, визначається такою формулою

$$\Theta = \theta_k + \theta_p = 17 \text{ дБ},$$

де $\theta_k=15$ дБ це вигреш використання згорткового кодування, а $\theta_p=2$ дБ це вигреш застосування 2-ох рознесених передаючих антен. Відзначимо й наявний недолік методу ПЧРК, яким є наявність відносно малого виграшу (лише 2 дБ) за рахунок рознесення, що пов'язано з малим значенням обсягу рознесення $m=n=2$. Але відмітимо, що збільшення величини m можливе виключно за рахунок пониження швидкості коду (фактично збільшення n).

Принцип дії просторово-часового блокового кодування розглянемо на прикладі, а якого структура наведена на рис.3.3. Фактично тут зображена система кодування у MIMO каналі (2×1), де маємо 2 передавальні антени й 1 приймальну антену приймача.

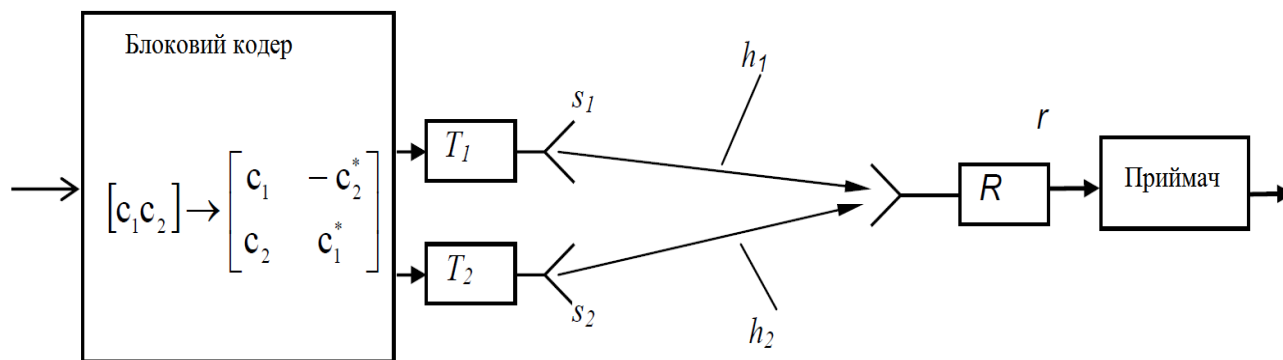


Рис.3.3. Приклад блокового кодування у каналі MIMO(2×1)

Згідно з методикою обробки вхідний потік символів розбивають на пари, наприклад, $[c_1 \ c_2]$, але на першому напівтактовому інтервалі символ c_1 буде передаватися через антену T_1 , а вже символ c_2 проходить через антену T_2 . Далі на 2-му напівтактовому інтервалі порядок передачі змінюється навпаки: вже через антену T_1 передається інверсія символу c_2 (на рис. це позначено як $(-c_2^*)$), а символ c_1 проходить через антену T_2 (на рис. це позначено як (c_1^*)). Також на рис.3.3 наведено правило розташування символів у вигляді матриці у структурі кодера, як і використаний тут блоковий код Alamouti. Також припускають, що коефіцієнти передачі каналу залишаються незмінними у сусідніх інтервалах.

3.2. Rake-приймач

Досить специфічні умови застосування мобільного радіозв'язку часто призводять до виникнення завмирань сигналів у цих трактах [21, 22, 23]. Такі завмирання поділяють на “пласкі” й селективні. Пласкі відрізняються зниженням рівня сигналу однаковою мірою на усіх частотах. І вони виникають через зміну рефракції радіохвиль у тропосфері, але на відносно коротких трасах малопомітні.

Другий тип завмирання, як виходить із назви, мають істотну нерівномірність на різних частот. Причина їх виникнення полягає у багатопроменевості поширення радіохвиль. Зазначимо, що наслідки селективних завмирань полягають у спотворенні спектру й форми сигналів, що далі призводить до появи міжсимвольної інтерференції. Глибина завмирань при цьому орієнтовно може становити 20-30 дБ. Основні методи боротьби із багатопроменевим завмиранням сигналів, що застосовуються сьогодні, зображені на рис. 3.4. Зокрема, для боротьби із завмираннями, як правило, використовують рознесення у просторі або ж за частотою прийому (або diversity reception) чи перемежування, яке вважають різновидом рознесення у часі (або time diversity). Усі зазначені на рис. 3.4 методи досить ефективні у широкосмугових чи вузькосмугових системах.

Хоча лише у широкосмугових системах є унікальна можливість поділу й оптимального складання сигналів, які приходять на вхід приймача через різні промені. З метою окремого спостереження проходження сигналів, які йдуть різними траєкторіями, на виході фільтра приймача необхідно виконати умову - відгуки фільтра на кожну із зміщених компонент мають бути коротші, порівняно з їх взаємними зрушеннями у часі. За умови, що фільтр узгоджено з сигналом, тоді його відгук це автокореляційна функція сигналу, а відношення сигнал/шум є максимальним у момент його пікового значення.

Узгоджений фільтр (УФ) характеризується часовим стисненням сигналу, і як результат маємо поділ копій сигналу. Сумування сигналів проходить у спеціальному пристрої – RAKE-приймачі (rake – англ. граблі).

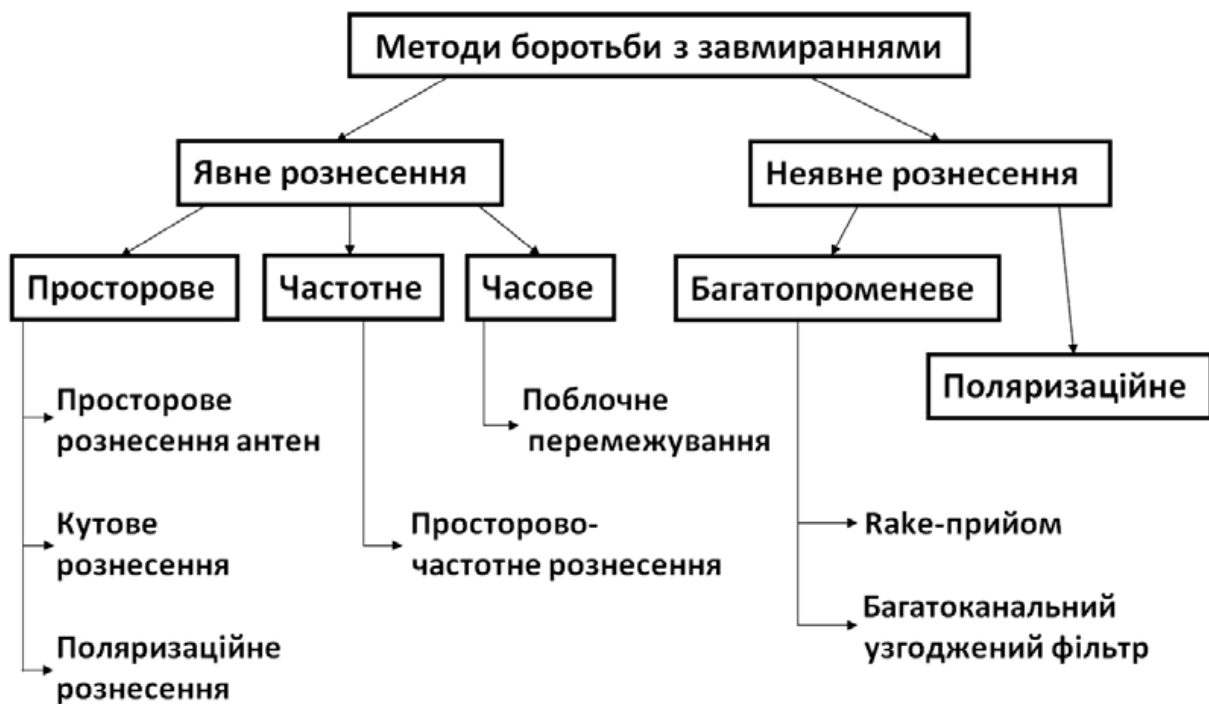


Рис. 3.4. Основні сучасні методи боротьби із завмираннями

Принцип дії такого приймача, початково був створений лише для приймання сигналів рознесених у часі, і ґрунтується на відокремленому обробленні декількох променевих компонентів (а саме найпотужнішого променю, що приходить по самому коротшому шляху, й кількох інших, які відстоять від 1-го на певні, вже відомі проміжки часу) й розрахунків їх середньозваженої суми. Відзначимо, що кожна така компонента обробляється окремим каналом.

Можна сказати, що Rake-приймач є набором кореляторів, які налаштовані на компоненти багатопроменевого сигналу. Для кореляторів в якості опорних сигналів застосовують M зсунутих за часом копій вихідної послідовності, де M визначає число потрібних гілок рознесення. Базову структурну схему Rake-приймачів зображена на рис. 3. 5.

Такий тип приймачів мінімізує впливи міжсимвольної інтерференції, яка з'являється через багатопроменеве поширення радіохвиль.

Потрібний сигнал надходить на вхід приймача із виходу пристрою зважування, тобто підсилювача, де коефіцієнти підсилення залежать переважно від якості кожного із застосованих каналів. Ці коефіцієнти визначаються шляхом аналізу так званого пілот-сигналу, який приходить із БС на мобільну станцію (МС).

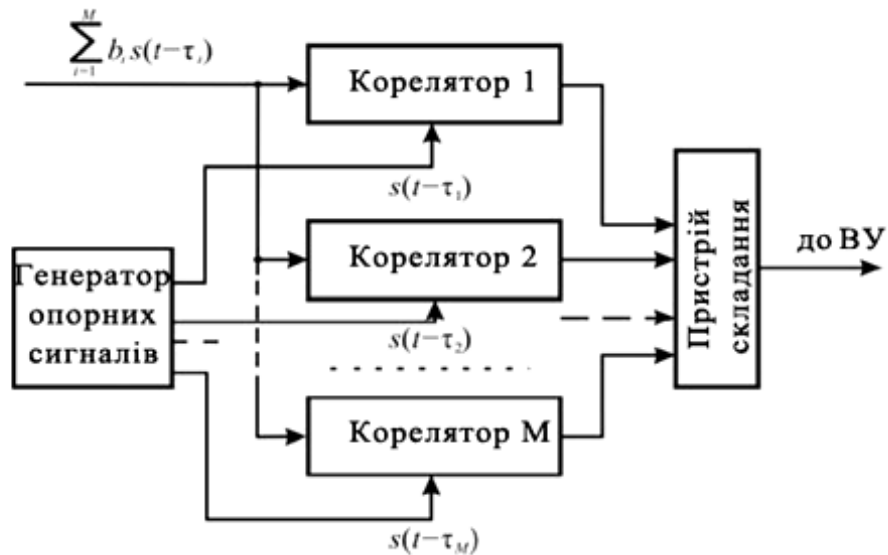


Рис.3.5. Типова структурна схема RAKE-приймача

Далі сигнал потрапляє на лінію затримки з метою забезпечення надходження одночасно сигналів з кожного з окремого каналу на вхід суматора. Потім переданий символ визначається вирішальним пристроєм.

На стороні БС у приймачі застосовують не менше 4-ох, а на стороні МС додають 3-и корелятори, які мають працювати паралельно. Якщо все розраховано правильно, то кожен з кореляторів формує свій відлік відгуку на певну компоненту вхідного сигналу. Всі виходи кореляторів потім зводять до єдиного моменту часу й сумують. Отримані результати додавання йдуть на вхід вирішального пристрою. Отже, явище багатопроменевості, яке безумовно тривалий час вважали шкідливим, зараз перетворили на засіб підвищення надійності зв'язку. На сьогодні Rake-технологію досить широко застосовують у стільникових мережах, де є кодовий розподіл сигналів. Це наглядно представлено у стандартах 2-го (CDMAOne) й 3-го (WCDME, CDMA2000) поколінь, де вона є складовою частиною приймача.

Основні принципи кодового розділення каналів ґрунтуються на застосуванні широкосмугових сигналів (ШСС). А головною характеристикою ШСС сигналів є їх база $B = PT$ (і вона є значно більшою за одиницю), тут P - спектр сигналу, а T це тривалість одного інформаційного символу. Прийом сигналів ШСС відбувається у приймачі, який вираховує кореляційний інтеграл за допомогою узгодженого фільтру або ж корелятору для сигналів з відомим повністю кодом розширення за формулою:

$$Z = \int_0^T x(t) \cdot u(t) dt$$

де $x(i)$ - вхідна суміш сигналів, тобто суму завади й корисного сигналу, $u(i)$ є індивідуальною псевдошумовою послідовністю абонента. Величина Z порівнюється з заданим порогом, який є відомим для певного коду розширення.

Корелятор реалізує так зване “стискання” спектру ШСС сигналу за рахунок його множення на суміш $u(i)$ з наступною його фільтрацією в межах смуги $1/T$. Математичну модель RAKE-приймача легко отримати, після аналізу процесу, які є у каналі зв'язку, а значення головних параметрів приймача запишемо як:

$$b_{opt} = \left(\frac{1}{\sigma_s^2} R + \sum_{i=-\infty}^{\infty} \Phi[i] \Phi^T[i] \right)^{-1} \Phi[0]$$

де b_{opt} - коефіцієнти масштабування каналів приймача, $\sigma_s^2 = E\{s_n^2\}$ є потужністю символу, s_i - інформаційні символи, $Rp(t) \equiv \int p(\tau)p(\tau+t)d\tau$ є імпульсною функцією автокореляції, а $p(i)$ є псевдошумовою послідовністю, елемент якої часто називають чіпом. Зазначимо, що тривалість такого чіпу в декілька разів менша за тривалість біта T_b , який передається у каналі. Матриця $\Phi[i]$ характеризує весь канал зв'язку, якому притаманна затримка визначена як:

$$\Theta_{opt} = \arg \max_{\Theta} \left[\Phi[0]^T \left(\frac{1}{\sigma_s^2} R + \sum_{i=-\infty}^{\infty} \Phi[i] \Phi^T[i] \right)^{-1} \Phi[0] \right]$$

Параметри b_{opt} й Θ_{opt} відповідають коефіцієнтам зважування й затримкам, які заздалегідь задають RAKE-приймачу при встановленому типі сигналів для отримання найкращого на його виході співвідношення сигнал/шум. Відмітимо, що у наземних радіоканалах сигнали при багатопроменевих компонентів можуть дещо відрізнятися (на величину приблизно рівну тривалості 1-го чіпу). Затримки, які є меншими за 1 чіп відразу усуваються синхронізацією приймача, яка дає змогу нівелювати ці малі зміни. Інші компоненти, які мають затримки більше одного чіпу, далі обробляються й складаються. Запропонована математична модель RAKE-приймача представлена на рис. 3.6.

У сучасних системах стільникового зв'язку із кодовим розділенням каналів дані й голос передаються одним каналом зв'язку. Але це призводить до невеликої

швидкості передачі даних, яка на практиці не більша за 512 кбіт/с. Хоча, цієї швидкості зараз достатньо для проведення елементарних операцій у мережі. Але при роботі з великими об'ємами даних необхідна значно вища швидкість передавання. Підвищення швидкості передачі інформації досягають 2 способами: розширенням смуги сигналів чи збільшенням кількості рівнів модуляції. Пам'ятаючи, що смуга частот це обмежений ресурс, зрозуміло, що більш ефективним буде підвищення кількості рівнів модуляції. Відмітимо зменшення відстань між символами із збільшенням рівнів фазової модуляції, що призводить до падіння завадостійкості коду, тому, в свою чергу, на вході детектора треба збільшувати співвідношення сигнал/шум.

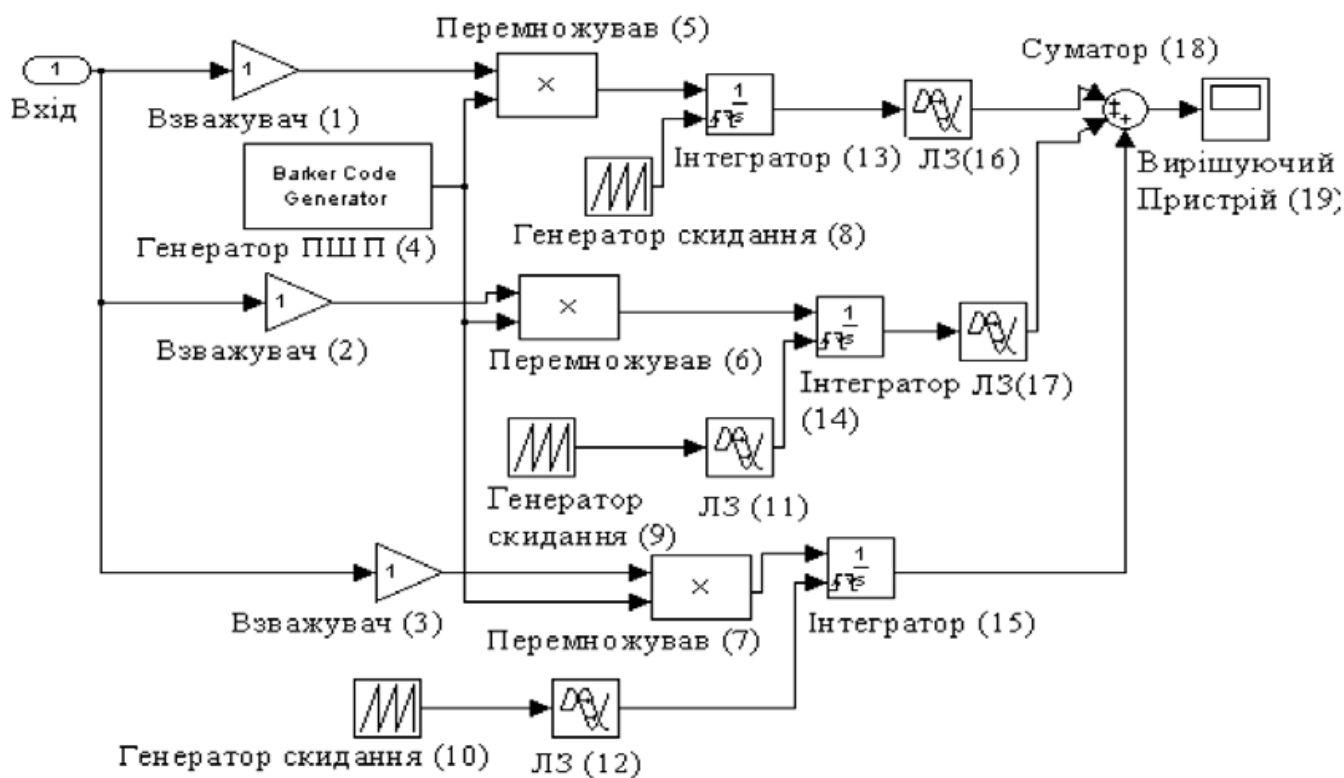


Рис. 3.6. Математична модель RAKE-приймача

З розвитком технологій в наші дні, все ж таки, не скрізь потрібна висока швидкість передачі інформації, а лише у місцях, існування великого трафіку (зокрема, он-лайн зустрічі в університетах чи офісах). Але такий простір обмежено досить невеликим радіусом біля 200 м і називається, часто, піко-сотою. В інших ситуаціях абоненти потребують, здебільшого, передачі голосу чи невеликих

текстових повідомлень. Як правило, для оброблення сигналу в якості приймальної частини абонентського терміналу застосовують трьох-канальний RAKE-приймач.

У разі використання OFDM кожний символ якби “розтягується” в часі і ще додатково збільшується у розмірі через додавання циклічного префіксу. Що, у свою чергу, дещо збільшує час передачі інформації (через наявну “надмірність”), ще й створює необхідність підвищення пропускної здатності. Значно менший час оброблення отриманої інформації (тобто “вирівнювання” прийнятих так званих “копій” сигналів відбитих променів й їх подальше додавання у суматорі) у RAKE-приймачі не дає подібних незручностей.

На відміну від MIMO, технологія RAKE не вимагає додаткового апаратного забезпечення, таких як дорогі модульні антенні комплекси, як і, потрібних для їх роботи й управління серйозних ресурсів для обчислення. Також відмітимо, що RAKE-приймачі при досить високій територіальній щільності абонентів не погіршують рівень своєї працездатності, крім того можуть з однаковою якістю приймати сигнали від будь-яких типів передавальних антен незважаючи на їх діаграми направленості.

Також важливим є компактність й енергоефективність RAKE-приймачів. Хоча, все ж таки, основною характерною особливістю, яка притаманна лише RAKE-приймачам, і їх перевагою, є можливість організації роботи одночасно із кількома джерелами сигналів тобто БС. Зазначена особливість дає змогу приймачу працювати у 3-ох наступних режимах:

– перший режим це збільшення швидкості приймання інформації (завдяки одночасному прийманню 2-х паралельних сигналів від різних БЗ і кожний несе свою інформацію),

– другий режим це збільшення завадозахищеності при досить низькому рівні сигналу (завдяки збільшенню надмірності даних методом дублювання, тобто прийому 2-х різних сигналів, які несуть однакову інформацію, паралельно, що призведе до зменшення кількості помилок у прийнятому сигналі й ймовірності прийняття так званих “битих” бітів),

– третій режим це організація процедури “м’якого” хендоверу (досягається одночасним прийомом сигналів від 2-х різних БС).

Зазначимо, що вибір одного з перерахованих вище режимів роботи, як і відповідні налаштування, проходять автоматично (при адаптації до певної якості отриманих сигналів чи умов їх розповсюдження у середовищі).

3.3. Адаптивний алгоритм обробки просторово-часових сигналів

Адаптивні антенні решітки застосовують у таких системах бездротового зв'язку, де потрібно мати характеристику спрямованості (ХС) необхідного виду для подальшої просторової фільтрації отриманих сигналів [24, 25]. Зупинимося на алгоритмі адаптації, де треба сформувати ХС у напрямку на зазначене джерело сигналу, а нуль на джерела перешкоди, за умови, що апріорно напрямок на них є невідомим.

Подібну систему з адаптивним формуванням ХС отримують із звичайної фазової АР завдяки застосуванню спеціальної вагової обробки. Тоді приймальну АР ділять на блоки, які формують приймальні антени МІМО системи. Вагова обробка це результат обчислень адаптивного процесора, який дає оптимальний ваговий вектор на основі критерія максимуму відношення сигнал/(суміш перешкода й шум).

Зазначений критерій формує ХН у напрямку сигналу із максимальною потужністю, якщо активних перешкод відсутні. У випадку, коли є джерела активних перешкод, то виникає необхідність застосування іншого критерію обчислення оптимального вагового вектору, а сама процедура адаптації буде незмінною.

На вході приймача мобільної станції ми маємо суміш прийнятих сигналів, які мають різні шляхів проходження, й шуму приймального тракту. Знаходження оптимальних вагових векторів базується на розрахунках власних значень й векторів. Зазначимо, що власні значення відповідають потужності певного джерела сигналів, у нашому конкретному випадку це будуть шляхи, якими приходять сигнали. На рис. 3.7 маємо структурну схему адаптивного блоку, яку розташовано на мобільній станції, а сам метод побудований на використанні фазових антенних решіток.

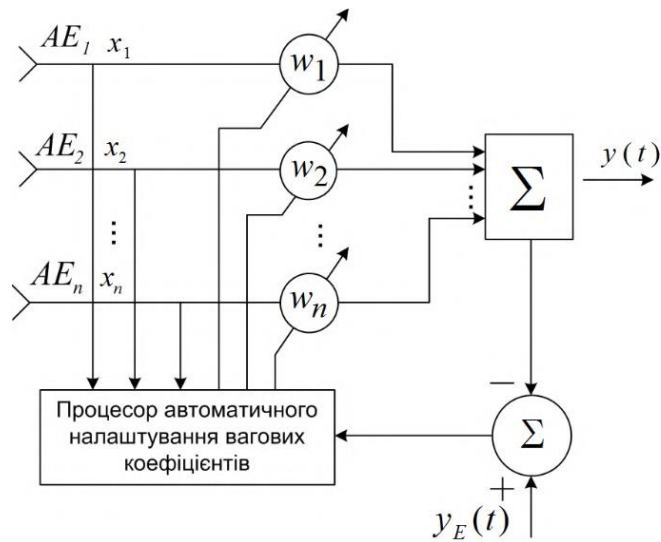


Рис. 3.7. Структурна схема блоку адаптивної обробки сигналів

Мобільна антенна решітка у системі з адаптивним обробленням містить в собі N елементів, які разом утворюють блоки для адаптації. Ґрунтуємося на тому, що процес формування ХС формує не тільки максимум у напрямку шляху з максимальною потужністю, але й формує нулів інші шляхи. Саме тому з'являються деякі обмеження щодо кількості елементів антенних решіток, бо їх кількість повинна бути більше кількості наявних шляхів.

З рис. 3.7 стає очевидним, що сигнал на виході адаптивного блоку відповідає наступному рівнянню

$$Y(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) = W^H X(t),$$

де x_i — вхідний сигнал; w_i — ваговий вектор; N це кількість АР у блоці.

Прийнятий сигнал $X(t)$ є, як зрозуміло, сумою корисного сигналу S й перешкоди, отже має такий вигляд:

$$X(t) = S(t) + N(t).$$

Відмітимо, що в ситуації затримки поширення сигналів більше, ніж на один інтервал, кореляції вихідного сигналу, вважають процеси від різних шляхів некорельованими. У випадку коли кількість шляхів є меншою за кількість елементів антенних решіток, тоді деяка частина діагональних елементів матриці власних чисел містить в собі потужності шляхів, а інші елементи, які залишаються, — це вже буде

потужність внутрішніх шумів. Задачею адаптації є визначення певного вагового вектору W_{opt} , який дає максимум відношенню сигнал/перешкода:

$$q = \frac{P_s}{P_{in}} = 0,5 \frac{|W^H S|^2}{W^H R W} = 0,5 \frac{W^H S S^H W}{W^H R^{1/2} R^{1/2} W}$$

де R це просторова кореляційна матриця; W є ваговим вектором; P_s – це потужність корисного сигналу на виході антенної решітки; P_{in} це середня потужність суміші перешкод й шумів на вході антенної решітки.

Із теорії відомо, що максимальне значення відношення Релея (останнє рівняння) забезпечується власним вектором ермітової матриці, яким є максимум її власного значення.

Обраний критерій мінімізації потужності на виході забезпечує власним вектором матрицю R , що відповідає максимуму її власного числа.

Після розрахунків оптимального вектору проходить вагове оброблення вхідного сигналу, і як її результат, сигнал із виходу блоку адаптивної обробки буде

$$Y_W = H_W X + N$$

де H_W є модифікованою матрицею каналу $H_W = H W_{opt}$

В кваліфікаційній роботі блок-схему алгоритму роботи запропонованого адаптивного блоку наведено на рис. 3.8.

3.4. Висновки до розділу 3

1. У мобільних системах із багатоантенною технікою утворюється кілька просторових каналів. Усі канали працюють одночасно і у єдиній смузі частот, а розділяються завдяки просторовому рознесенню антен випромінюючих та приймальних.

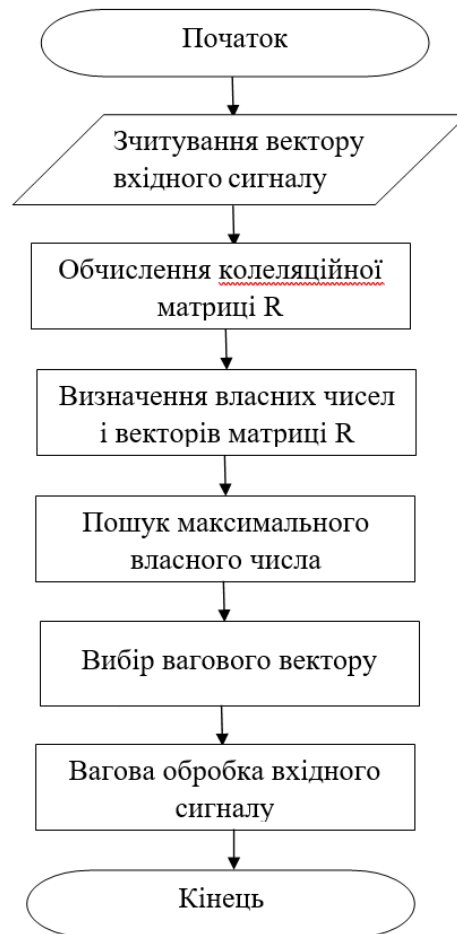


Рис. 3.8. Блок-схема пропонованого алгоритму адаптації

2. На вході приймача мобільної станції ми маємо суміш прийнятих сигналів, які мають різні шляхи проходження, й шуму приймального тракту.

3. Технології просторово-частотного кодування включають просторово-часові ґратчасті коди, просторово-часові блокові коди, просторово-частотні блокові коди, просторово-частотно-часові блокові коди.

4. При традиційному коригувальному кодуванні (фактично часовому) вводиться надмірність у часовій області із допоміжними символами.

5. Просторово-часове решітчасте кодування поєднує істотні переваги методів просторового рознесення із здатністю виправляти помилки коригуючим кодом і оптимального об'єднання рознесених сигналів.

6. Специфічні умови мобільного зв'язку призводять до виникнення завмирань сигналів до 30 дБ у просторових трактах, які характеризуються однаковими або різними рівнями зниженням потужності сигналу на частотах.

Для боротьби із завмираннями, використовують рознесення трактів радіозв'язку в просторі або ж за частотою чи перемежування.

7. Принцип дії RAKE-приймача (rake – граблі) є набір кореляторів, які налаштовані на зсунуті модельні компоненти багатопроменевого сигналу. Корелятори визначають схожість у часі пар сигналів. Виходи кореляторів зводяться до єдиного моменту часу й сумуються, результат чого йде на вирішальний пристрій.

8. RAKE-технологія здійснює сумісне одночасне застосування поряд із часовими просторових алгоритмів обробки багатовекторних сигналів.

RAKE-технологію широко застосовують у стільникових мережах, де є кодовий розподіл сигналів.

9. У сучасних системах стільникового зв'язку із кодовим розділенням каналів дані й голос передаються одним каналом зв'язку.

10. Адаптивні антенні решітки застосовують у системах бездротового зв'язку, де потрібно мати характеристику спрямованості необхідного виду для подальшої просторової фільтрації отриманих сигналів.

Система з адаптивним формуванням діаграми спрямованості отримується із звичайної фазової антенної решітки завдяки застосуванню вагової обробки сигналів з різних просторових трактів.

11. Адаптивна просторово-часова обробка сигналів забезпечує підлаштування багатоантенного приймача до поточного рівня сигналів.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі розглянуті принцип дії GSM мережі, системи MIMO та застосування й переваги просторово-часової обробки сигналів.

Проаналізовано роботу бездротового каналу зв'язку на базі M передаючих й N приймальних антен.

Розглянута базова структурна схема RAKE-приймача та її математична модель.

Доведена доцільність використання методів просторово-часового кодування сигналів.

Запропоновано блок-схему алгоритму адаптації каналу зв'язку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про електронні комунікації: Закон України від 16.12.2020 № 1089-IX / Офіційний вісник України. – 2021. № 6.
2. Кутін А. І. Конспект лекцій з дисципліни «Системи мобільного та супутникового зв'язку» / А. І. Кутін. – Кривий Ріг. 2019 р. – 116 с.
3. Мобільні системи транкінгового зв'язку: Навч. посібник / С.В. Давіденко, О.О. Лаврут, С.О. Івко, Б.М. Бойчук. – Львів: НАСВ, 2019. – 167 с.
4. Транкінгові-системи. URL: <https://www.prc.pl.ua/бібліотека/транкінгові-системи>.
5. What are the differences between 2G, 3G, 4G LTE, and 5G networks? .URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Список_поколінь_технологій_мобільного_зв'язку.
6. Васильківський М. Інтегрована радіосистема сканування та зв'язку / М. Васильківський, О. Городецька, О. Стальченко, М. Будащ. – Вісник Хмельницького національного університету. – Том 1, №2, 2023. – 56-63 с.
7. Barneto C. B., Riihonen T., Turunen M., Anttila L., Fleischer M., Stadius K., Ruynänen J., and Valkama M. Full-duplex OFDM radar with LTE and 5G NR waveforms: Challenges, solutions, and measurements, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 67, no. 10, pp. 4042–4054, 2019.
8. 4G vs LTE: What's the difference? URL: <https://www.techadvisor.co.uk/feature/mobile-phone/4g-vs-lte-whats-the-difference>три605656.
9. How 4G Works. URL: <https://electronics.howstuffworks.com/4g.htm/printable>.
10. 5G for the connected world / edited by D. Chandramouli, R. Liebhart, J. Pirskanen, – JohnWiley & Sons, 2019 – 455p.
11. Бойко Б. Р. Аналіз проблем впровадження мереж LTE // Тези науковотехнічної конференції «Фізика, електроніка, електротехніка», СумДУ. – 2021 р. – 45-47 с.
12. 5G Technology / Н. Holma, А. Toskala, Т. Nakamura. – 3GPP New radio. Wiley, 2020 – 506 p.

13. Сергійчук Д. М. Розвиток алгоритмів застосування технології MIMO у мобільних сенсорних мережах / Д. М. Сергійчук, О. І. Лисенко. – Матеріали 15-ї Міжнародної науково-технічної конференції перспективи телекомунікацій, 12-16 квітня, 2021 р. – м. Київ, Україна.
14. Технологія MIMO. URL: <https://shop-gsm.ua/blog/tehnologiya-MIMO-printsip-raboty-podbor-oborudovaniya-i-antenn/>.
15. Технологія MIMO: принцип роботи, підбір обладнання і антен. URL: <https://shop-gsm.ua/blog/tehnologiya-mimo-printsip-raboty-podbor-oborudovaniya-i-antenn/>.
16. Антени MIMO. URL: <https://usb-modem.com.ua/ua/blog/ua-testiruem-antenny-MIMO-2x2-pri-slabom-signale/>.
17. Ю. О. Головін. Основи теорії радіозв'язку теоретичні основи та практичні аспекти: Навч. посібник / Ю. О. Головін, Д. І. Могилевич. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського – 2023. – 248 с.
18. Солодовник В.І. Методи просторово-часового блочного кодування з індексною модуляцією піднесучих OFDM для частотно-селективних та нестационарних каналів безпроводового зв'язку / Солодовник В.І., Науменко М.І. – XIII МНТК "Перспективи телекомунікацій" ПТ-2019: К.: КПІ. – 2019. 153-155.
19. М. Васильківський. Оптимальні сигнально-кодові конструкції для підвищення ефективності інфокомунікаційних радіосистем мобільного зв'язку 5G та 6G / Васильківський М., Болдирева О., Варгатюк Г., Будащ М. – Вісник Хмельницького національного університету. – Том 1, №2, 2023. – 48-55 с.
20. MIMO-технологія (Multiple Input Multiple Output) — метод просторового кодування сигналу. URL: <http://hi-news.pp.ua/kompyuteri/8996-mimo-tehnologiya-multiple-input-multiple-output-metod-prostorovogo-koduvannya-signalu.html>.
21. Хлоп'ячий В.А. Метод обробки просторово-часових сигналів космічних навігаційних систем приймачами літальних апаратів / Sciences of Europe. – 2020. – р. 1-4.
22. Boiko J. M. Naukovo-prykladni pytannia zabezpechennia rozdilnoi zdatnosti i efektyvnosti obrobky syhnaliv u radiotekhnichnykh ta telekomunikatsiinykh systemakh za

naivnosti zavad / J. M. Boiko, O. M. Shynkaruk, L. V. Karpova, I. I. Chesanovskyi. – Khmelnytskyi: KhNU, 2019. – 218 s.

23. Дружинін В.А. Динамічні моделі просторово-часової обробки сигналів від джерел радіовипромінювання в умовах рознесеного прийому локаційної інформації / В.А. Дружинін, Ю.М. Бойко, О.І. Єрмоєнко, В.І. Корсун. – Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2020 – с. 12-25 Conference 28 June 2021.

24. Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model Valentin P. Fedosov; Jaleel Sadoon Jameel; Svetlana V. Kucheryavenko 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)/.

25. Радіомережі: Багатоантенні системи, навч. посіб. Для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В.А. Головін, О.О., Шпилька ; КПІ ім. Ігоря Сікорського.– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 169 с.