

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  
(ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА)**

**ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ БАКАЛАВР**

**Тема:** «Безпроводові мережі доступу з динамічним вибором спектру»

**Виконавець:** \_\_\_\_\_ Андрій ДЗЮБА  
(підпис)

**Керівник:** \_\_\_\_\_ Володимир КЛИМЧУК  
(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

Дзюби Андрія Сергійовича

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

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Безпроводові мережі доступу з динамічним вибором спектру»

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: механізм динамічного керування спектром, модель активного спільного використання мережі

4. Зміст пояснювальної записки: вступ, моделі динамічного вибору спектру, оппортуністичний доступ до спектру в когнітивних радіомережах, порівняльне дослідження різних методів спільного використання спектру

5. Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: модель когнітивного формування променя, сценарії з активним спільним використанням інфраструктури

## 6. Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1	Розробити деталізований зміст розділів кваліфікаційної роботи	11.04.2023- 13.04.2023	Виконано
2	Вступ	14.04.2023	Виконано
3	Моделі динамічного вибору спектру	16.04.2023- 03.05.2023	Виконано
4	Опportunістичний доступ до спектру в когнітивних радіомережах	04.05.2023- 16.05.2023	Виконано
5	Порівняльне дослідження різних методів спільного використання спектру	17.05.2023- 28.05.2023	Виконано
6	Усунення недоліків та захист кваліфікаційної роботи	03.06.2023- 09.06.2023	Виконано

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

Керівник кваліфікаційної роботи

\_\_\_\_\_ (підпис керівника)

Володимир КЛИМЧУК

(П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_ (підпис випускника)

Андрій ДЗЮБА

(П.І.Б.)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота «Безпроводові мережі доступу з динамічним вибором спектру» містить 51 сторінку, 15 рисунків, 1 таблицю, 10 використаних джерел.

Динамічний вибір спектру, когнітивне радіо, радіочастотний спектр

Об'єкт дослідження – процес розподілу та спільного використання радіочастотного спектру у системах безпроводового доступу.

Предмет дослідження – алгоритми динамічного розподілу спектру у системах безпроводового доступу.

Мета кваліфікаційної роботи – дослідження проблем, пов'язаних з ефективним використанням радіоспектра у безпроводових мережах доступу.

Метод дослідження – аналіз, опис, порівняння, прогнозування.

Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при вивченні принципів побудови безпроводових мереж доступу.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	6
ВСТУП.....	7
1. МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОГО ВИБОРУ СПЕКТРУ .....	8
1.1. Оппортуністичний доступ до спектру .....	8
1.2. Одночасний доступ до спектру.....	11
1.3. Когнітивне радіо для динамічного керування спектром.....	14
1.4. Блокчейн для динамічного керування спектром.....	18
2. ОППОРТУНІСТИЧНИЙ ДОСТУП ДО СПЕКТРУ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ .....	23
2.1. Огляд моделі оппортуністичного доступу до спектру .....	23
2.2. Компроміс між зондуванням і пропускнуою здатністю .....	25
2.3. Планування зондування спектру.....	29
2.4. Послідовне визначення спектру .....	31
3. ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ .....	35
3.1. Система одночасного доступу до спектру з однією антеною.....	35
3.2. Модель когнітивної системи МІМО.....	37
3.3. Навчання каналу перешкод .....	41
3.4. Переваги одночасного доступу до спектру .....	45
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	51

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

OSA (Opportunistic Spectrum Access) – оппортуністичний доступ до спектру.

PU (Primary User) – первинний користувач.

SU (Secondary User) – вторинний користувач.

QoS (Quality of service) – якість обслуговування.

FCC (Federal Communications Commission) – Федеральна комісія зі зв'язку.

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

SINR (Signal Interference + Noise Ratio) – співвідношення сигнал/перешкода плюс шум.

CSI (Channel State Information) – інформація про стан каналу.

CR (Cognitive Radio) – когнітивне радіо.

DSA (Dynamic Spectrum Access) – динамічний доступ до спектру.

CSA (Concurrent Spectrum Access) – одночасний доступ до спектру.

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Протиріччя між дефіцитом доступного спектру та недостатнім використанням виділеного спектру зумовлює необхідність зміни парадигми від неефективного доступу до фіксованого спектру до динамічного та високоефективного доступу до спектру. У цьому контексті динамічне управління спектром запропоновано та визнано ефективним підходом до пом'якшення проблеми дефіциту спектру.

**Мета і завдання дослідження.** Дослідження методів та алгоритмів, які дозволять ефективно використовувати радіоспектр у безпроводових мережах для покращення продуктивності, надійності та швидкості передачі даних.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі наукові завдання.

1. огляд моделей динамічного вибору спектру;
2. дослідження технологій ефективного використання радіоспектру;
3. огляд структури послідовного визначення спектру;
4. порівняльне дослідження різних методів спільного використання спектру.

**Об'єктом дослідження** – процес розподілу та спільного використання радіочастотного спектру у системах безпроводового доступу.

**Предметом дослідження** – алгоритми динамічного розподілу спектру у системах безпроводового доступу.

**Методи дослідження.** Аналіз, опис, порівняння, прогнозування.

**Практичне значення отриманих результатів.** Матеріали кваліфікаційної роботи рекомендується використовувати при вивченні принципів побудови безпроводових мереж доступу.

**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

## МОДЕЛІ ДИНАМІЧНОГО ВИБОРУ СПЕКТРУ

### 1.1. Оппортуністичний доступ до спектру

Використання спектру в моделі OSA показано на рис. 1.1. Через спорадичний характер передачі PU існують часові інтервали, смуги частот або просторові напрямки, в яких PU неактивний. Смуги частот, на яких PU неактивні, називають дірами в спектрі. Після виявлення однієї або кількох дірок у спектрі SU можуть тимчасово отримати доступ до основного спектру, не створюючи перешкод для PU, налаштувавши несучу частоту, смугу пропускання та схему модуляції для передачі через діри спектру.

Коли PU стають активними, SU повинні припинити свою передачі та вийти з поточного спектру. Щоб увімкнути роботу OSA, SU має отримати точну інформацію про діри в спектрі, щоб можна було захистити якість послуг (QoS) PU [1]. Два фактори визначають метод, який SU може прийняти для виявлення дірок у спектрі. Одним фактором є передбачуваність присутності та відсутності PU, а іншим фактором є те, чи може первинна система активно надавати інформацію про використання спектру. Відповідно, є в основному два методи, які можуть бути використані SU для виявлення дірок у спектрі.



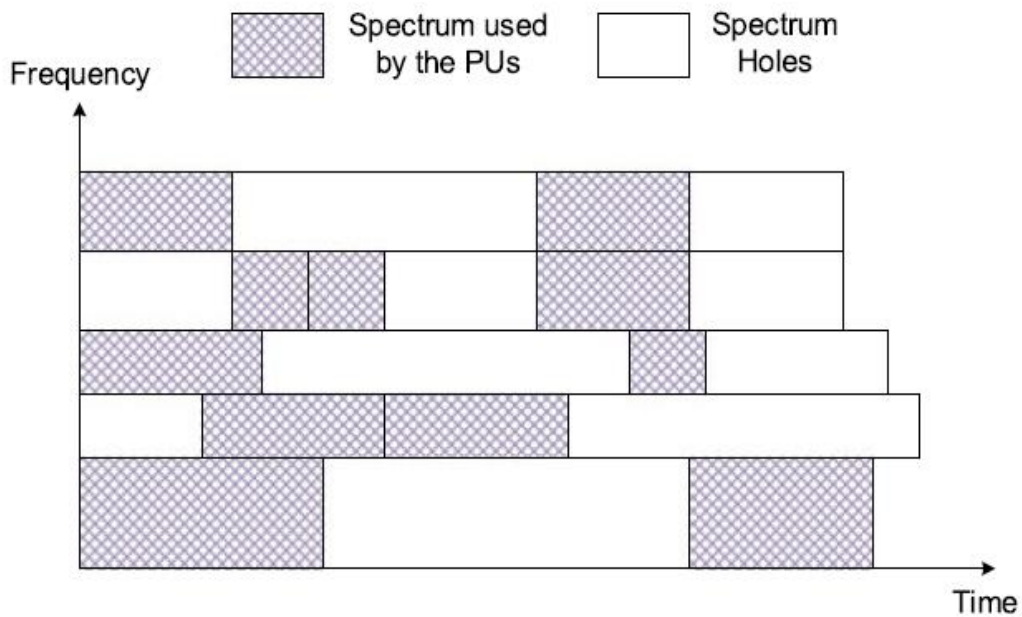


Рис. 1.1. Ілюстрація використання спектру в моделі OSA

Якщо діяльність PU є регулярною та високопередбачуваною, географічне та часове використання спектру можна записати в базу даних геолокації, щоб забезпечити точний статус первинного спектру. Щоб отримати доступ до основного спектру без втручання в PU, SU спочатку отримує власні географічні координати за допомогою доступної системи позиціонування, а потім перевіряє базу даних геолокації на наявність списку діапазонів, на яких PU неактивні в місці розташування SU. Підхід бази даних геолокації підходить для випадку, коли присутність і відсутність PU є високопередбачуваними, а інформація про використання спектра може бути оприлюднена для досягнення високоефективного використання спектра. Наприклад, в остаточних правилах, встановлених FCC для неліцензійного доступу через телевізійні діапазони, база даних геолокації є єдиним підходом, який використовується неліцензійними пристроями для захисту існуючих послуг телевізійного мовлення [1]. Тим не менш, для інших послуг, таких як стільниковий зв'язок, діяльність користувачів важко передбачити, і немає стимулів для PU забезпечувати використання свого спектру, особливо коли первинні та вторинні послуги належать різним операторам. У цьому випадку база даних геолокації непридатна.

Без геолокаційної бази даних SU може періодично або постійно здійснювати зондування спектру для моніторингу первинного спектру та виявлення дірок у спектрі. Якщо є кілька SU, кооперативне зондування спектру може бути застосоване для підвищення точності зондування. На відміну від попереднього методу, де точна інформація про використання спектру записується в базі даних геолокації, визначення спектру є, по суті, технікою виявлення сигналу, яка може бути недосконалою через наявність шуму та погіршення каналу, наприклад дрібномасштабне завмирання та великомасштабне тінювання. Для вимірювання продуктивності зондування спектру використовуються дві основні метрики, тобто ймовірність виявлення та ймовірність помилкової тривоги. Перший — це ймовірність виявлення PU як присутнього, коли PU справді активний. Таким чином, він описує ступінь захисту для PU, тобто більша ймовірність виявлення забезпечує кращий захист для PU. Останній — це ймовірність виявлення PU як присутнього, коли PU фактично неактивний. Таким чином, це можна розглядати як ознаку дослідження потенціалу доступу до спектру. Менша ймовірність помилкової тривоги вказує на те, що SU можуть використовувати більше можливостей передачі, і таким чином можна досягти кращої продуктивності SU, наприклад пропускну здатності. З цією метою хороша конструкція зондування спектру повинна мати високу ймовірність виявлення, але низьку ймовірність помилкової тривоги. Однак ці два показники зазвичай суперечать один одному. Враховуючи схему зондування спектру, покращення ймовірності виявлення досягається за рахунок збільшення ймовірності помилкової тривоги, що призводить до менших можливостей доступу до спектру для SU. Іншими словами, кращий захист PU відбувається за рахунок погіршення продуктивності SU [2]. Щоб покращити продуктивність зондування спектру, було проведено багато роботи над розробкою різних схем виявлення або наданням можливості декільком SU спільно виконувати зондування спектру. Варто зазначити, що вимірювання спектру є важливим інструментом для включення DSA і заслуговує на продовження розвитку з боку дослідницьких спільнот. Хоча визначення спектру не є обов'язковим для неліцензійного доступу через білий простір телевізора, поточні розроблені стандарти, такі як IEEE 802.22 та ECMA 392, все ще використовують комбінацію бази даних

геолокації та визначення спектру. У деяких літературах модель OSA також називають накладенням спектру або парадигмою переплетення.

## **1.2. Одночасний доступ до спектру**

Типова модель CSA показана на рис. 1.2, де SU та PU передають на тому самому первинному спектрі одночасно. У цьому типі DSA вторинний передавач (SU-Tx) неминуче створює перешкоди первинному приймачу (PU-Rx). Таким чином, щоб увімкнути роботу CSA, SU-Tx повинен передбачити рівень перешкод на PU-Rx, спричинений його власною передачею, і обмежити перешкоди до прийняттого рівня з метою захисту послуги PU. На практиці система зв'язку зазвичай проектується таким чином, щоб витримувати певну кількість перешкод. Наприклад, користувач у стільниковій мережі третього покоління (3G) на основі множинного доступу з кодовим розділенням каналів (CDMA) може терпіти перешкоди від інших користувачів і компенсувати погіршення співвідношення сигнал/перешкода плюс шум (SINR) через вбудоване керування потужністю внутрішнього контуру. Такий рівень допустимих перешкод відомий як температура перешкод, яка в деяких літературах також називається запасом перешкод. Одночасна передача SU-Tx дозволяється лише тоді, коли перешкоди, отримані PU-Tx, не перевищують температуру перешкод. Таким чином, на відміну від моделі OSA, де база даних геолокації або зондування спектру використовуються для виявлення дірок у спектрі, контроль перешкод є критичним для CSA для захисту послуг PU [2].

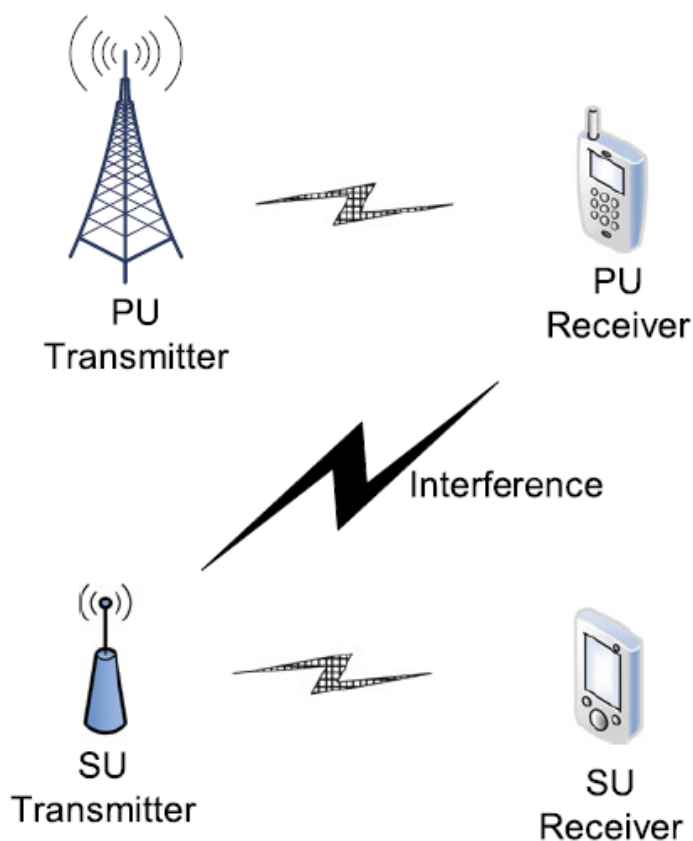


Рис. 1.2. Ілюстрація моделі спільного використання спектру

Захист PU математично формулюється як обмеження потужності перешкод. Базове обмеження потужності перешкод вказує на те, що миттєва потужність перешкод, отримана PU-Rx, не перевищує температуру перешкод. Таке формулювання вимагає, щоб SU-Tx мав інформацію про інтерференційну температуру, яку надає PU-Rx, і інформацію про стан каналу (CSI) від SU-Tx до PU-Rx, також відому як інформація про міжканальний стан (C-CSI), щоб кількісно визначити фактичні перешкоди, отримані PU-Rx. Варіанти основного обмеження потужності перешкод призводять до різної продуктивності вторинної системи. Наприклад, обмеження середньої потужності перешкод дає кращу вторинну пропускну здатність, ніж обмеження пікової потужності перешкод. Це пояснюється тим, що перше обмеження менш суворе, і в деяких станах завмирання воно дозволяє перешкодам перевищувати температуру перешкод. Крім того, якщо є кілька SU, вторинна система може використовувати багатокористувацьке рознесення (MUD) для покращення вторинної пропускну здатності, вибираючи SU з найкращою якістю прийому та найменшими перешкодами для PU-Rx, щоб бути активним для передачі

або отримання. MUD спільного використання однієї смуги частот було ретельно вивчено. Щоб скористатися перевагами рознесення перешкод або MUD, CSI від SU-Tx до SU-Rx і SU-Tx до PU-Rx має бути відомий SU-Tx.

Використання первинної системної інформації може запропонувати більше можливостей обміну. Було запропоновано обмеження втрати швидкості для обмеження погіршення продуктивності PU через вторинну передачу. Щоб сформулювати це обмеження, потрібні не тільки C-CSI, але також CSI від PU-Tx до PU-Rx і потужність передачі PU-Tx. Без прямої взаємодії між первинною та вторинною системами SU-Tx може ініціювати адаптацію потужності первинної системи шляхом навмисного надсилання зондуючого сигналу з високою потужністю [2]. Щоб усунути сильні перешкоди, PU-Tx збільшить потужність передачі, яку SU-Rx може почути. Потім вторинна система визначає температуру перешкод, яку забезпечує первинна система, і оцінює C-CSI, який є критичною інформацією для вторинної системи для успішного спільного використання первинного спектру.

Варто зазначити, що, як і в OSA, захист первинної системи та вторинної пропускної здатності суперечать один одному. Суворі вимоги до захисту первинної системи призводять до низької вторинної пропускної здатності. Таким чином, ефективне використання температури перешкод є способом оптимізації продуктивності вторинної системи в моделі CSA. У деяких літературах модель CSA також називають спектральною підкладкою.

Порівняння OSA та CSA наведено в таблиці 1.1. Можна побачити, що коли PU вимкнено, SU може передавати з максимальною потужністю на основі моделі OSA. Однак, коли PU увімкнено, SU все ще може передавати, регулюючи свою потужність передачі на основі моделі CSA, а не мовчати відповідно до моделі OSA. Така гібридна модель доступу до спектру поєднує в собі переваги OSA та CSA, що забезпечує більш високе використання спектру. Крім того, у вищезазначених моделях OSA та CSA PU мають вищий пріоритет, ніж SU, і тому їх слід захищати. Така aDSA також відома як ієрархічна модель доступу, оскільки пріоритети доступу до спектру відрізняються залежно від того, мають користувачі ліцензію чи ні. У моделі ієрархічного доступу, оскільки PU зазвичай є застарілими користувачами, співпраця між первинною та

вторинною системами недоступна, і лише SU відповідають за виявлення спектру або контроль за перешкодами. У деяких випадках первинна система готова передати в оренду свій тимчасово невикористаний спектр операторам, отримуючи плату за оренду, що є стимулом для операторів забезпечувати певну форму співпраці. У літературі модель DSA, в якій усі користувачі мають однакові пріоритети для доступу до спектру, також отримала багато уваги, наприклад, ліцензований доступ (LSA) і спільне використання спектру в неліцензованій смузі. Незважаючи на те, що обмеження на перешкоди для інших не встановлено, у цій моделі DSA кожен користувач має взяти на себе відповідальність за захист інших або дотримання справедливості під час доступу до спектру.

Таблиця 1.1

### Порівняння OSA і CSA

	OSA	CSA
Чи SU завжди увімкнено?	Ні	Так
Як вивчає оточення?	Спектр зондування, геолокація бази даних	Оцінка каналів, прогнозування перешкод
Методи захисту PU	Немає передачі, коли PU увімкнено	Контроль перешкод
Вимірювання захисту PU	Імовірність виявлення	Температура перешкод, запас втрати продуктивності

### 1.3. Когнітивне радіо для динамічного керування спектром

Когнітивне радіо (CR) було широко визнано ключовою технологією для забезпечення DSA. CR означає інтелектуальну радіосистему, яка може динамічно та автономно адаптувати свої стратегії передачі, включаючи несучу частоту, смугу

пропускання, потужність передачі, промінь антени або схему модуляції тощо, на основі взаємодії з навколишнім середовищем та усвідомлення його внутрішньої стану (наприклад, архітектура апаратного та програмного забезпечення, політика використання спектру, потреби користувачів тощо), щоб досягти найкращої продуктивності. Така можливість реконфігурації реалізована програмно-визначеним радіопроцесором (SDR), за допомогою якого стратегії передачі регулюються комп'ютерним програмним забезпеченням. Крім того, CR також побудований на когнітивних здібностях, які дозволяють йому спостерігати за навколишнім середовищем за допомогою відчуттів, аналізувати та обробляти спостережувану інформацію за допомогою навчання та вирішувати найкращу стратегію передачі через міркування. Хоча більшість існуючих досліджень CR на сьогоднішній день були зосереджені на вивченні та реалізації когнітивних можливостей для сприяння DSA, зовсім нещодавні дослідження були проведені для вивчення більшого потенціалу штучного інтелекту (ШІ), притаманного технології CR.

Типовий когнітивний цикл для CR показано на рис. 1.3. SU з можливістю CR потрібен для періодичного або постійного спостереження за навколишнім середовищем для отримання інформації, такої як діри в спектрі в OSA або температура перешкод і C-CSI в CSA. На основі зібраної інформації він визначає найкращі робочі параметри для оптимізації власної продуктивності за умови захисту PU, а потім відповідно реконфігурує свою систему. Інформацію, зібрану з часом, також можна використовувати для аналізу радіосередовища, наприклад статистику трафіку та статистику завмирання каналів, щоб пристрій CR міг навчитися працювати краще під час майбутньої динамічної адаптації [4].

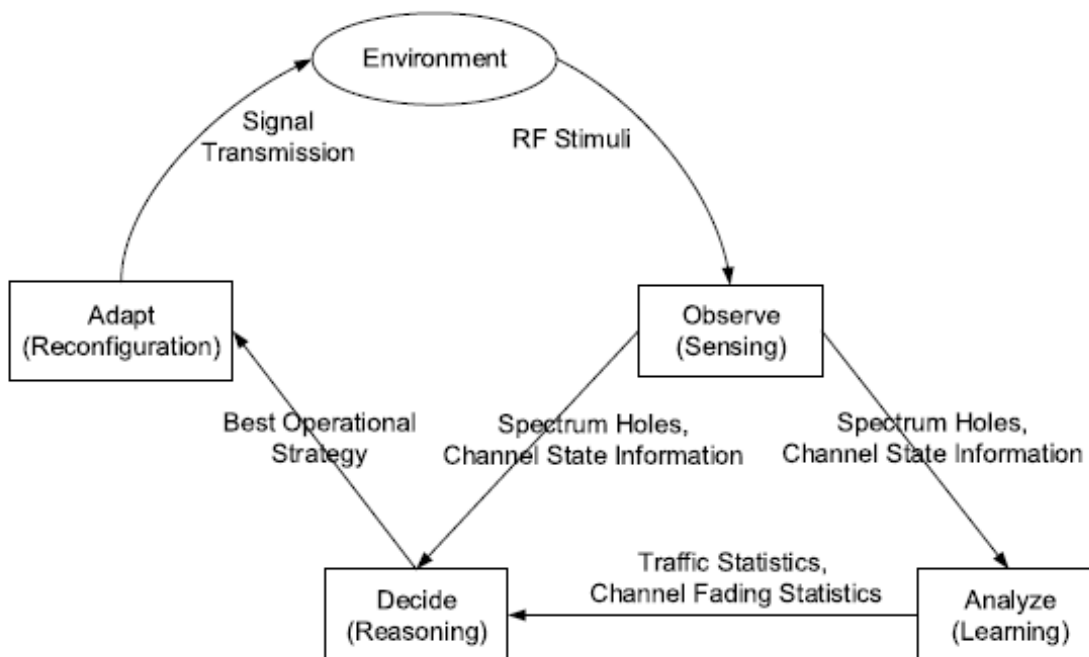


Рис. 1.3. Когнітивний цикл для CR

Хоча включення DSA з CR є технічною проблемою, яка передбачає міждисциплінарні зусилля різних дослідницьких спільнот, таких як обробка сигналів, теорія інформації, зв'язок, комп'ютерні мережі та машинне навчання, її реалізація також значною мірою залежить від готовності регуляторів відкрити спектр для неліцензійного доступу. На щастя, протягом останніх десятиліть ми спостерігали зусилля регулюючих органів у всьому світі щодо усунення регуляторних бар'єрів для полегшення DSA. Наприклад, у США FCC висунула кілька пропозицій щодо усунення непотрібних правил, які перешкоджають розвитку ринків вторинного спектру в листопаді 2000 року. Пізніше, у грудні 2003 року, FCC визнала важливість CR і сприяла його використанню для покращення використання спектру. У травні 2004 року Федеральна комісія з зв'язку (FCC) випустила повідомлення про запропоновану нормотворчість (NPRM), яке пропонує дозволити неліцензійним пристроям (як стаціонарним, так і персональним/портативним) повторно використовувати тимчасово невикористаний спектр телеканалів, тобто пробіли на ТБ, і правила такого неліцензійного використання були остаточно розроблені у вересні 2010 року. У національному плані широкосмугового зв'язку, опублікованому в березні 2010 року, FCC також вказала на свій намір забезпечити більш гнучкий доступ



до спектру для неліцензійного та випадкового використання. Білий простір телевізора вважається дуже перспективним для широкого спектру потенційних застосувань через його сприятливі характеристики розповсюдження, і, отже, він також привернув увагу інших регуляторів у всьому світі. Наприклад, у Великобританії Ofcom запропонував дозволити неліцензійним CR-пристроєм працювати в спектрі, звільненому внаслідок переходу з аналогового на цифрове телебачення, у заяві проєкту перегляду цифрових дивідендів, опублікованій у грудні 2007 року. У Сінгапурі IDA також визнала потенціал технології білого телевізійного простору та провела випробування для перевірки здійсненності та розробки нормативної бази для полегшення цього [5].

Окрім зусиль регуляторів щодо «дерегуляції» спектру, різні співтовариства зі стандартизації також активно працюють над розробкою промислових стандартів, які прискорюють комерціалізацію додатків на основі CR. Після NPRM FCC у травні 2004 року в листопаді 2004 року було сформовано робочу групу IEEE 802.22, яка має на меті розробити перший міжнародний стандарт, який використовує білий простір телевізора на основі CR. Стандарт визначає повітряний інтерфейс (як фізичний (PHY) рівень, так і рівень керування доступом до середовища (MAC)) для бездротової регіональної мережі (WRAN), який призначений для забезпечення бездротового ширококутового доступу для сільських або приміських районів для фіксованого зв'язку, звільненого від ліцензії. пристрої через вторинний необхідний доступ через УКХ/УХФ телевізійні діапазони між 54 і 862 МГц. Остаточна версія була опублікована в липні 2011 року. Першим міжнародним стандартом CR щодо використання персональних/портативних пристроїв через TVWhite Spaces є ECMA 392. Перше видання стандарту було завершено в грудні 2009 року компанією ECMAInternational на основі проєкту специфікації, наданого альянсом когнітивних мереж (CogNeA). Він визначає повітряний інтерфейс, а також підрівень MUX для протоколів вищого рівня, який призначений для застосування вдома, у будівлях і на околицях у міських районах. Інші стандарти, засновані на CR, включають IEEE 802.11af, IEEE 802.19, IEEE SCC 41 (раніше відомий як IEEE 1900), а також проєкт партнерства третього покоління (3GPP) LTE Release 13, який представляє

ліцензований допоміжний доступ (LAA) для використання Неліцензовані діапазони 5 ГГц для роботи LTE [6].

#### **1.4. Блокчейн для динамічного керування спектром**

Останнє десятиліття стало свідком спалаху блокчейну, який, по суті, є відкритою та розподіленою книгою. Криптовалюта, зокрема біткойн, є одним із найуспішніших застосувань блокчейну. Ціна за один біткоїн стартувала з 0,30 долара на початку 2011 року і досягла піку в 19 783,06 долара 17 грудня 2017 року, що свідчить про оптимізм фінансової галузі в ній. Facebook, одна з найбільших у світі технологічних компаній, оголосила про свій власний криптовалютний проєкт Libra у червні 2019 року. Окрім криптовалюти, з її основними характеристиками, блокчейн має багато застосувань, включаючи фінансові послуги, розумні контракти та Інтернет речей. Відповідно до звіту Tractica, фірми, що займається аналізом ринку, до 2025 року дохід корпоративного блокчейна досягне 19,9 мільярда доларів. Крім того, вважається, що блокчейн надасть нові можливості для підвищення ефективності та зниження витрат на динамічне управління спектром.

Блокчейн — це по суті відкрита розподілена книга, у якій транзакції надійно записуються блоками. У поточному блоці записується унікальний показник, визначений транзакціями в попередньому блоці. Таким чином, блоки зв'язуються в хронологічному порядку та захищені від втручання, тобто втручання в будь-яку транзакцію, збережену в попередньому блоці, може бути ефективно виявлено. Транзакції, ініційовані одним вузлом, транслюються на інші вузли, і алгоритм консенсусу використовується для визначення того, який вузол має право перевірити новий блок, додавши його до блокчейну [3]. Завдяки децентралізованому механізму перевірки та запису блокчейн стає прозорим, перевіреним і стійким до єдиної точки збоїв. Залежно від рівня децентралізації блокчейн можна класифікувати на публічний блокчейн, приватний блокчейн і блокчейн консорціуму. Публічний блокчейн може бути перевіреним і доступним для всіх вузлів у мережі, тоді як приватний блокчейн або блокчейн консорціуму можуть підтримуватися лише дозволеними вузлами.

Смарт-контракт, який підтримується технологією блокчейн, є самовиконуваним контрактом, пункти якого перетворюються на сценарії програмування та зберігаються в транзакції. Коли така транзакція зберігається в блокчейні, смарт-контракту призначається унікальна адреса, через яку вузли в мережі можуть отримувати до нього доступ і взаємодіяти з ним. [4]. Розумний контракт може бути запущений, коли задовольняються попередньо визначені умови або коли вузли надсилають транзакції на його адресу. Після запуску смарт-контракт виконуватиметься встановленим і визначеним способом. Зокрема, той самий вхід, тобто транзакція, надіслана в смарт-контракт, отримує той самий вихід. Використовуючи смарт-контракт, суперечки між вузлами щодо транзакцій усуваються, оскільки цей вузол може ідентифікувати результат свого виконання смарт-контракту, отримавши доступ до нього.

Блокчейн було досліджено для підтримки різних програм IoT. Як реєстр децентралізації блокчейн може допомогти інтегрувати різноманітні пристрої IoT і безпечно зберігати масивні дані, створені ними. Наприклад, завдяки таким даним, як, де та коли завершуються різні процеси виробництва, які незмінно записуються в блокчейні та простежуються до споживачів, можна гарантувати якість продукції. Інші способи використання блокчейну в IoT включають інтелектуальне виробництво, розумну мережу та охорону здоров'я. Крім того, блокчейн також застосовується для управління мобільними периферійними обчислювальними ресурсами для підтримки пристроїв IoT з обмеженою обчислювальною потужністю [5].

Останнім часом телекомунікаційні регулюючі органи приділили багато уваги застосуванню технології блокчейн для покращення якості послуг, таких як керування телефонними номерами та керування спектром. У Великобританії Ofcom ініціювала проєкт, щоб дослідити, як можна використовувати блокчейн для керування телефонними номерами. Зокрема, децентралізовану базу даних можна створити за допомогою технології блокчейн, щоб покращити взаємодію з клієнтами під час переміщення номера між постачальниками послуг, зменшити нормативні витрати та запобігти неприємним дзвінкам і шахрайству. З іншого боку, також вважається, що блокчейн надає нові можливості для управління спектром. Блокчейн можна

використовувати для моніторингу та управління ресурсами спектру, щоб зменшити адміністративні витрати та прискорити процес аукціону спектру. Також зазначено, що завдяки прозорості блокчейну використання спектру в режимі реального часу, записане в ньому, може бути доступне будь-якому зацікавленому користувачеві. Таким чином, ефективність використання спектру можна додатково підвищити шляхом динамічного розподілу діапазонів спектру відповідно до динамічних вимог, які подають користувачі, які використовують блокчейн.

Дослідники досліджують застосування блокчейну в управлінні спектром. У обговорюються застосування блокчейну для управління спектром шляхом поєднання різних режимів спільного використання спектру з різними типами блокчейнів. У автори надають переваги застосування блокчейну до схеми спільного використання спектру Citizens Broadband Radio Service (CBRS). У динамічний доступ до спектру, доступний за допомогою аукціонів спектру, забезпечується використанням блокчейну. У смарт-контракт, що підтримується блокчейном, використовується для передачі послуги визначення спектру, що надається датчиками, вторинним користувачам для можливого доступу до спектру. У динамічний доступ до спектру забезпечується завдяки поєднанню криптовалюти, яка підтримується блокчейном, і механізму аукціону, щоб забезпечити ефективний механізм стимулювання для спільного зондування та справедливий метод для розподілу можливостей доступу до спектру, отриманого спільно [6].

По суті, існує потреба вивести деякі основні принципи, щоб дослідити, чому та як застосування блокчейну для динамічного керування спектром може бути корисним. Зокрема, можна використовувати блокчейн (1) як безпечну базу даних; (2) створити самоорганізований ринок спектру. Крім того, слід також вирішити такі проблеми, як розгортання мережі блокчейн через мережу когнітивного радіо.

- Блокчейн як безпечна база даних: звичайна база даних геолокації для використання діапазонів спектру, таких як пробіли на телебаченні, може бути досягнута блокчейном із підвищеною безпекою, децентралізацією та прозорістю. Крім того, інша інформація, така як історичні результати зондування, результати аукціонів спектру та записи доступу, також може зберігатися в блокчейні.

- Самоорганізований ринок спектру: Бажаний самоорганізований ринок спектру завдяки його підвищеній ефективності та зниженим витратам на адміністрування порівняно з централізованим органом управління ресурсами спектру. Завдяки поєднанню розумного контракту, криптовалюти та криптографічних алгоритмів для ідентифікації та верифікації транзакцій, блокчейн можна використовувати для створення самоорганізованого ринку спектру. Наприклад, для традиційних аукціонів використання спектру зазвичай потрібен надійний орган для перевірки автентифікації користувачів, визначення користувача-переможця та врегулювання процесу оплати. Завдяки блокчейну, зокрема за допомогою смарт-контракту, аукціони використання спектру можуть проводитися безпечно, автоматично та несуперечливий спосіб. Крім того, завдяки безпеці, яку забезпечує блокчейн, транзакції можуть здійснюватися між користувачами без жодної довіри один до одного. Таким чином, висока планка для отримання ресурсів спектру може бути знижена. Окрім права доступу до спектру, іншу власність/послуги, пов'язані з керуванням спектром, наприклад зондування спектру, також можна торгувати між користувачами за смарт-контрактами.

- Розгортання блокчейну: консенсусний алгоритм, наприклад Proof of Work (PoW), за допомогою якого новий блок, що містить транзакції, може бути доданий до блокчейну, зазвичай потребує інтенсивних обчислень. Таким чином, необхідно враховувати обмежену обчислювальну потужність і акумулятор мобільних користувачів при розгортанні блокчейну через традиційну мережу когнітивного радіо. Виходячи з цього, запропоновано три способи, включно з наданням користувачам можливості безпосередньо підтримувати блокчейн, використанням спеціального блокчейну, який підтримується стороннім органом, і дозволено користувачам просто перевантажувати обчислювальне завдання на край постачальники обчислювальних послуг (ECSP), зберігаючи при цьому повноваження верифікації та підтвердження за собою.

## ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

Статистика розподілу спектру в усьому світі показує, що радіоспектр уже майже повністю розподілений, а доступний спектр для розгортання нових послуг досить обмежений. Поява масових підключень пристроїв Інтернету речей (IoT) прискорює кризу дефіциту спектру. Спектральний ресурс близько 76 ГГц необхідний для розміщення мільярдів кінцевих пристроїв шляхом ексклюзивного зайняття спектру.

Когнітивне радіо (CR) було широко визнано ключовою технологією для забезпечення DSA. CR означає інтелектуальну радіосистему, яка може динамічно та автономно адаптувати свої стратегії передачі, включаючи несучу частоту, смугу пропускання, потужність передачі, промінь антени або схему модуляції тощо, на основі взаємодії з навколишнім середовищем та усвідомлення його внутрішньої стану (наприклад, архітектура апаратного та програмного забезпечення, політика використання спектру, потреби користувачів тощо), щоб досягти найкращої продуктивності.

Хоча більшість існуючих досліджень CR на сьогоднішній день були зосереджені на вивченні та реалізації когнітивних можливостей для сприяння DSA, зовсім нещодавні дослідження були проведені для вивчення більшого потенціалу штучного інтелекту (ШІ), притаманного технології CR.

Технології блокчейну створюють нові можливості для динамічного керування спектром, покращують децентралізацію, безпеку та автономію, а також зменшують витрати на адміністрування. Хоча такі проблеми, як споживання енергії, розгортання та проектування мережі блокчейн через традиційну когнітивну радіомережу також слід досліджувати.

## РОЗДІЛ 2

# ОПОРТУНІСТИЧНИЙ ДОСТУП ДО СПЕКТРУ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

### 2.1. Огляд моделі оппортуністичного доступу до спектру

Модель оппортуністичного доступу до спектру (OSA) є однією з найбільш широко використовуваних моделей для динамічного доступу до спектру. Розпізнавання спектру є функцією активації OSA. Неможливість для вторинного користувача (SU) здійснювати зондування спектру та доступ до спектру одночасно вимагає спільної розробки стратегій зондування та доступу, щоб максимізувати власне бажання SU щодо передачі, забезпечуючи достатній захист для первинних користувачів (PU).

Модель оппортуністичного доступу до спектру (OSA), також згадувана як парадигма переплетення в або накладення спектру, ймовірно, є найбільш привабливою моделлю для неліцензійних/вторинних користувачів для доступу до радіочастотного спектру [7].

У цій моделі вторинні користувачі (SU) можуть отримати доступ до смуг спектру первинних користувачів (PU), які тимчасово не використовуються. Уможливаючи неліцензійне використання спектру, гарантуючи пріоритет ліцензованих користувачів, модель OSA привернула велику увагу як дослідницьких, так і регуляторних організацій. За визначенням, перед передачею SU в моделі OSA повинні знати стан зайнятості/неактивності смуг спектру, які їх цікавлять. З такими знаннями SU можуть отримати доступ до невикористаних смуг спектру PU, тобто спектру дірки або білий простір спектру, щоб QoS PU не погіршувався. Можна отримати за допомогою двох підходів, включаючи використання бази даних геолокації та техніки спектрального зондування. Перший підхід може бути застосований, коли використання спектру PU є дуже передбачуваним і PU готові оприлюднити використання спектру, можливо, для покращення використання

спектру. Однак, коли використання спектру PU може бути непередбачуваним або PU не бажають ділитися такою інформацією, визначення спектру стає критично важливим способом виявлення доступного спектру, що забезпечує роботу моделі OSA.

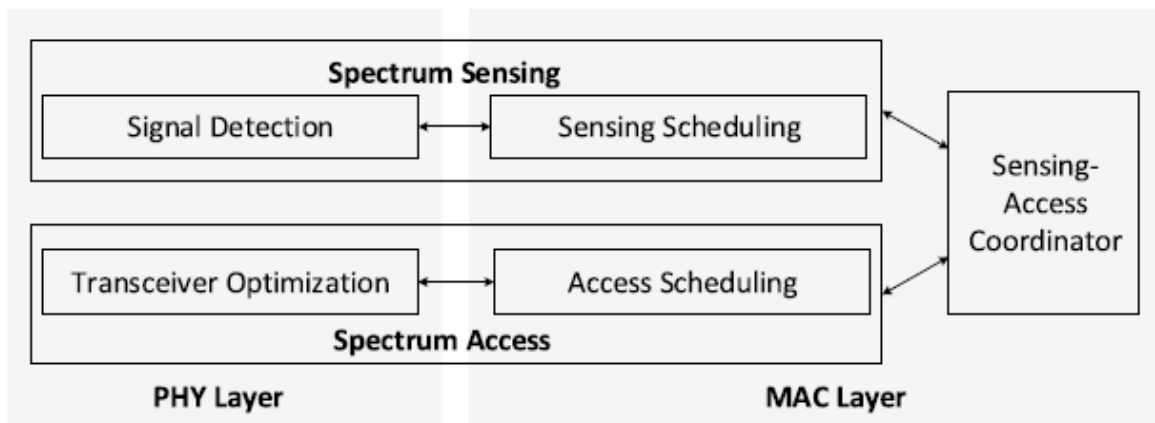


Рис. 2.1. Ключові функції рівня PHY і MAC в моделі OSA

Розробка OSA на основі зондування спектру пройшла бурхливий розвиток в академічних колах. Одна група робіт була зосереджена на покращенні точності зондування спектру, тоді як інші були зосереджені на координації зондування спектру та доступу, тобто дизайну зондування доступу. Будучи, по суті, технікою виявлення сигналу, зондування спектру може призвести до неправильних результатів через невизначеність шуму та ефекти каналу, такі як завмирання багатопроменевого поширення та затінення. Однак точність визначення спектру має вирішальне значення для виявлення дірок спектру та захисту PU. Таким чином, багато робіт зосереджено на розробці ефективних алгоритмів виявлення або взаємодії SU для збільшення різноманітності. Структура доступу до зондування OSA показує, що доступ до спектру значною мірою залежить від результатів зондування спектру. Крім того, оптимізація продуктивності зондування спектру та доступу може суперечити деяким практичним проблемам, таким як обмежені обчислювальні можливості SU, що призводить до компромісного дизайну між зондуванням спектру та доступом [7].



На рис. 2.1 проілюстровано ключові функції для фізичного (PHY) і рівня керування доступом до середовища (MAC) мереж CR (CRN). На рівні PHY вимірювання спектру дає змогу SU виявляти діри в спектрі, тоді як контроль доступу оптимізує конструкцію трансивера щодо несучої частоти, модуляції та схеми кодування тощо. На рівні MAC в основному є дві функції, у тому числі: планування зондування та планування доступу. Перший визначає, коли, на якому каналі, як довго та як часто слід впроваджувати зондування спектру, а другий керує доступом кількох користувачів до виявлених дірок у спектрі. Встановлюється координатор двох функцій, який називається координатором доступу до зондування. У наступних розділах ми дослідимо три класичні проблеми в дизайні сенсорного доступу, спочатку представивши їхні основні ідеї та проблеми, а потім проаналізувавши існуючу літературу щодо їх вирішення.

## **2.2. Компроміс між зондуванням і пропускною здатністю**

У зв'язку з напівдуплексною роботою трансивера, SU не може виконувати визначення спектру та доступ одночасно. У результаті він повинен чергуватися між операцією визначення та операцією доступу в кадрі даних. Припускаючи, що визначення спектру виконується періодично в кожному кадрі, структура кадру для SU проілюстрована на рис. 2.2. Позначимо  $\tau$  як час сприйняття спектру, а  $T$  як довжину кадру. Таким чином, тривалість часу, що залишився для потенційного доступу до спектру, становить  $T - \tau$ . Інтуїтивно зрозуміло, що з довшим часом вимірювання можна підвищити точність вимірювання спектру та збільшити ймовірність правильного визначення статусу спектра. Однак це зменшує час, що залишився для доступу до спектру, і, таким чином, впливає на пропускну здатність SU. Таким чином, існує компроміс між визначенням спектру та пропускною здатністю. Нижче наведено основне формулювання такої проблеми. Потім слідує розширення на випадок, коли використовується кооперативне зондування спектру.

Продуктивність зондування спектру характеризується двома показниками ефективності, а саме ймовірністю помилкової тривоги  $P_f$  (тобто ймовірністю

виявлення PU як присутнього, коли PU фактично немає) та ймовірністю виявлення  $P_d$  (тобто ймовірністю виявлення PU як присутнього, коли PU присутній) [6]. Рішення про доступ до спектру залежить від результату вимірювання спектру. Є два сценарії, коли SU може отримати доступ до спектра.

- Коли PU відсутній і не генерується помилкова тривога за допомогою зондування спектру.

- Коли PU присутній, але не виявляється спектральним зондуванням. Середню пропускну здатність вторинної мережі можна розрахувати, беручи до уваги досяжну пропускну здатність для обох сценаріїв

$$R = R_0 + R_1, \quad (2.1)$$

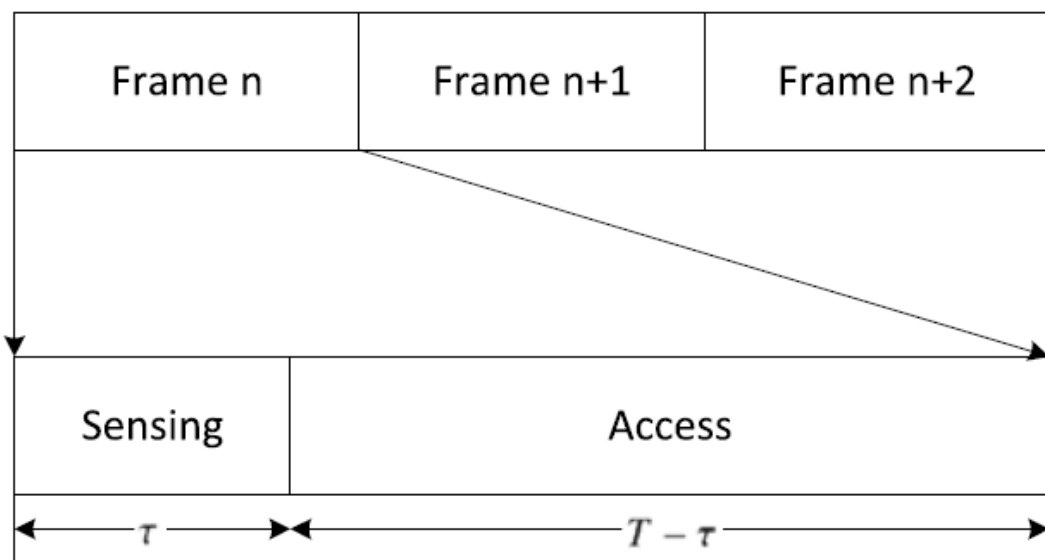


Рис. 2.2. Ключові функції рівня PHY і MAC в моделі OSA

де  $R_0$  — це кількість пропускну здатності, що забезпечується першим сценарієм, тоді як  $R_1$  — пропускну здатність, що забезпечується другим сценарієм. Позначимо  $P(H_0)$  як ймовірність того, що PU відсутня. Позначте  $C_0$  і  $C_1$  як всю SU, коли він безперервно передає відповідно в першому та другому сценаріях. Тоді  $R_0$  і  $R_1$  можна виразити наступним чином

$$R_0(\epsilon, \tau) = P(H_0) \frac{T-\tau}{T} C_0 (1 - P_f(\epsilon, \tau)), \quad (2.2)$$

$$R_1(\epsilon, \tau) = (1 - P(H_0)) \frac{T-\tau}{T} C_1 (1 - P_d(\epsilon, \tau)), \quad (2.3)$$

де  $\epsilon$  поріг виявлення енергії для зондування спектру. Оскільки як поріг  $\epsilon$ , так і час чутливості  $\tau$  впливають на точність чутливості спектру,  $P_f$  і  $P_d$  є функціями  $(\epsilon, \tau)$ , а також  $R_0$  і  $R_1$ .

Зверніть увагу, що на відміну від першого сценарію, у другому сценарії SU передає в присутності PU. Отже, у загальному випадку маємо  $C_0 > C_1$ . Крім того, зазвичай більш вигідно досліджувати спектр, який недостатньо використовується, наприклад, коли  $P(H_0) \geq 0,5$ . Тому можна з упевненістю припустити, що  $R_0$  домінує над загальною пропускну здатністю  $R$ . Отже,  $R(\epsilon, \tau) \approx R_0(\epsilon, \tau)$  [5].

Проблема компромісу пропускну здатності зондування полягає в оптимізації параметрів зондування спектру для максимізації досяжної пропускну здатності SU за умови, що PU достатньо захищений.

Розглянемо сценарій, коли  $P(H_0) = 0,8$ ,  $T = 100$  мс і  $f_s = 6$  МГц. Імовірність помилкової тривоги  $P_f$  і нормована досяжна пропускну здатність  $R/(C_0 P(H_0))$  вторинної мережі нанесені на графік відносно часу чутливості спектру  $\tau$  на рис. 2.3 і 2.4, відповідно, при різних отриманих SNR первинного сигналу  $\gamma$ . Як і очікувалося, з рис. 2.3 видно, що з довшим часом зондування якість спектрального зондування покращується, а отже ймовірність помилкової тривоги зменшується [8].

Однак це призводить до скорочення доступного часу доступу до спектру. Загалом, з рис. 2.4 можна побачити, що існує оптимальний час чутливості, який максимізує досяжну пропускну здатність. Крім того, можна спостерігати, що коли  $\gamma$  зменшується це вказує на більш жорсткі вимоги до зондування спектру, SU має приділяти більше часу для зондування спектру, щоб захистити PU, що призводить до збільшення оптимального часу визначення спектру та зменшення максимально досяжної пропускну здатності.

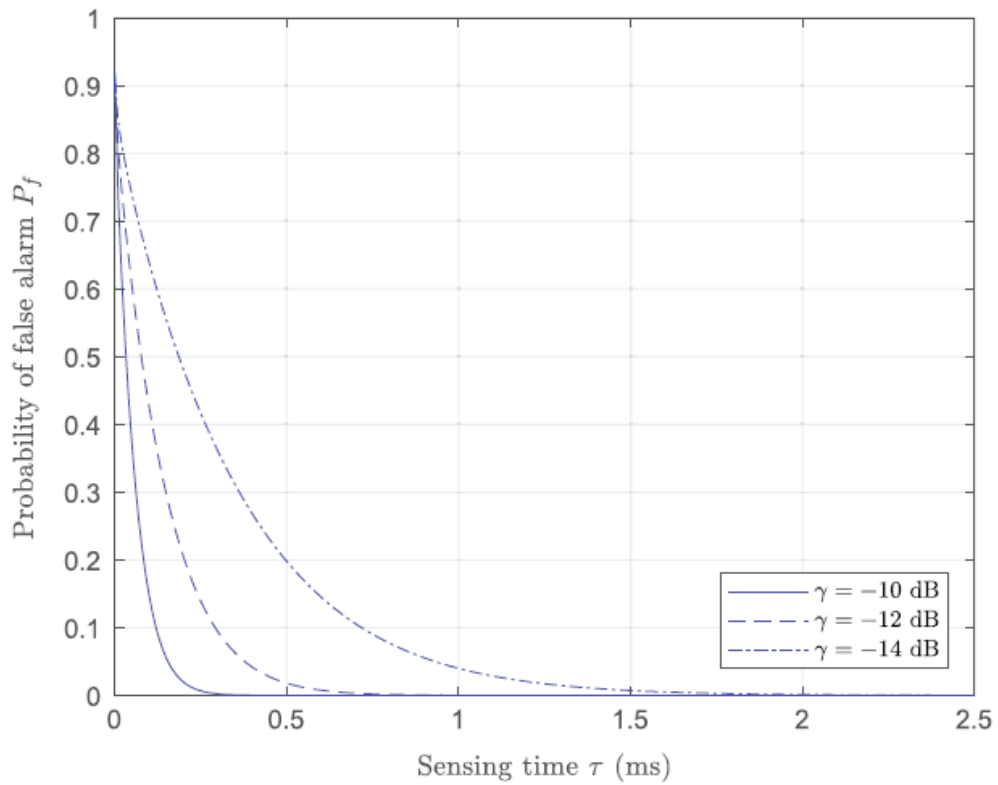


Рис. 2.3. Імовірність хибної тривоги  $P_f$  від часу чутливості  $\tau$  при різних прийнятих SNR  $\gamma$  первинного сигналу

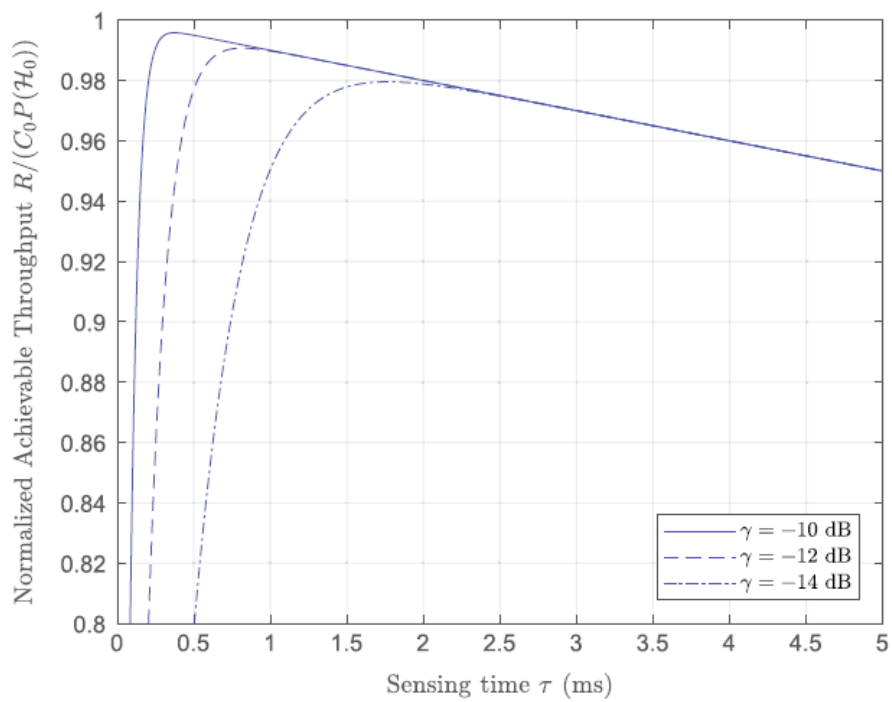


Рис. 2.4. Нормована досяжна пропускна здатність  $R/(C_0P(H_0))$  від часу чутливості  $\tau$  за різних отриманих SNR  $\gamma$  первинного сигналу

### 2.3. Планування зондування спектру

У проблемі компромісу пропускної здатності зондування час детектування спектру оптимізується з урахуванням фіксованої тривалості кадру. У наведеному вище формулюванні неявно передбачається, що статус PU залишається незмінним протягом усього кадру. Іншими словами, це означає, що SU має бути синхронізовано з кадром PU. Це може бути нелегко досягти, якщо PU відмовляється співпрацювати для надання такої інформації синхронізації. У цьому випадку для схеми періодичного визначення спектру тривалість кадру, яка визначає частоту запланованого визначення спектру, також впливає на досяжну пропускну здатність вторинної мережі.

Інтуїтивно зрозуміло, що з фіксованим часом розпізнавання, що більша тривалість кадру, то більший ефективний час передачі. Це потенційно призводить до підвищення пропускної здатності. Однак, коли тривалість кадру велика, існує більша ймовірність того, що статус PU зміниться під час передачі SU. Це може призвести до конфлікту в середині вторинної передачі, якщо основний користувач стане активним. Пропускна здатність СУ в цьому випадку постраждає. Тому тривалість кадру потрібно оптимізувати, щоб збалансувати компроміс між захистом PU та продуктивністю SU [8].

Є два сценарії, коли SU отримує доступ до спектру. Подібно до розгляду в проблемі компромісу пропускної здатності зондування, розглядається лише досяжна пропускна здатність першого сценарію, оскільки вона є домінуючим фактором.

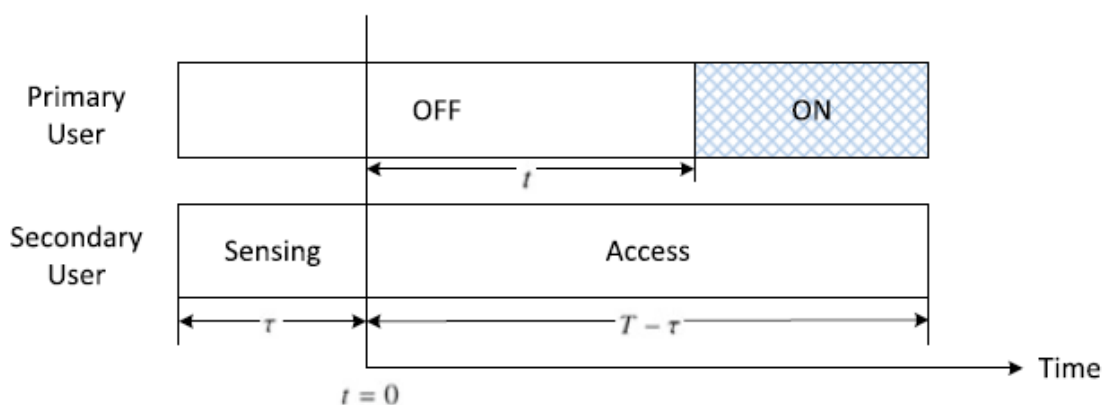


Рис. 2.5. Сценарій з не активний користувачем

Розглянуто перший сценарій, коли основний користувач не активний під час визначення спектру, як показано на рис. 2.5. Припустимо, що основний користувач має експоненціальну модель трафіку, в якій тривалість активного та неактивного періодів експоненціально розподілена із середньою тривалістю  $\mu_1$  та  $\mu_0$  відповідно.

Через властивість експоненціального розподілу без пам'яті, без втрати загальності, кінець чутливого слота можна вважати початковим часом  $t = 0$ . Позначено випадок, коли основний користувач стає активним,  $t$ . Тоді тривалість часу, протягом якого відбувається зіткнення, є випадковою величиною, яка може бути виражена як

$$x(t) = \begin{cases} T - \tau - t, & 0 \leq t \leq T - \tau \\ 0, & t < T - \tau \end{cases}, \quad (2.4)$$

Розглянуто сценарій із середньою тривалістю неактивності  $\mu_0 = 650$  мс, середньою тривалістю активності  $\mu_1 = 352$  мс, часом чутливості спектру  $\tau = 1$  мс та ймовірністю зіткнення з ціллю  $P_c = 0,1$ . На рисунку 2.6 показано нормалізовану досяжну пропускну здатність та ймовірність зіткнення PU, відповідно, щодо тривалості кадру. З малюнка видно, що в цьому сценарії існує унікальна тривалість кадру, яка максимізує нормалізовану досяжну пропускну здатність і в той же час задовольняє обмеження ймовірності зіткнення PU.

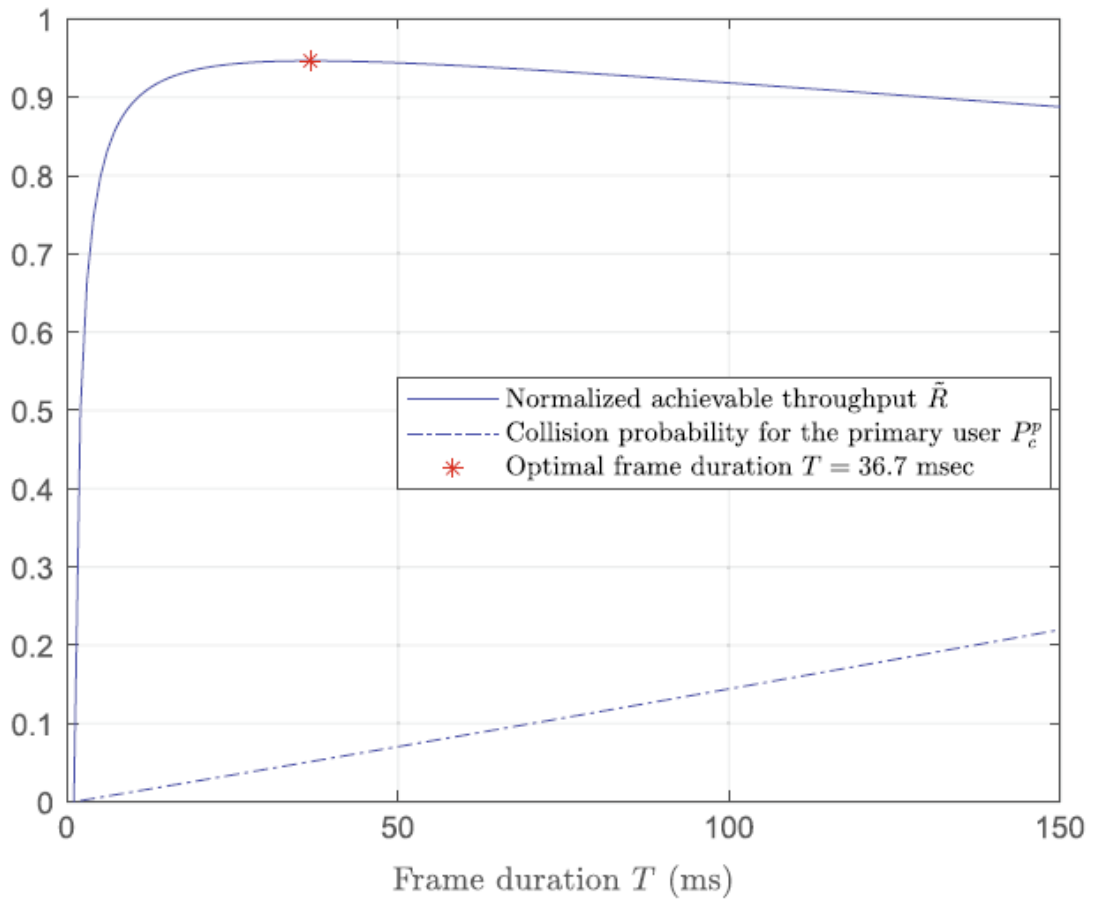


Рис. 2.5. Нормована досяжна пропускна здатність і ймовірність зіткнення PU при різних тривалостях кадру  $T$

#### 2.4. Послідовне визначення спектру

У такій структурі зондування, якщо визначено, що канал зайнятий, SU повинен чекати до наступного кадру, щоб визначити той самий канал або інший канал, щоб визначити будь-яку можливість спектра. Це може призвести до затримки доступу до спектру. Іншим підходом, який принципово відрізняється від періодичного спектрального зондування, є послідовне спектральне зондування. У такій структурі зондування SU буде послідовно сприймати кілька каналів без будь-якого додаткового періоду очікування між ними, перш ніж він вирішить, по якому каналу передавати. У цьому випадку SU може динамічно визначати, скільки каналів має бути виявлено перед передачею. Цей підхід дозволяє SU досліджувати різноманітність у зайнятості між різними ліцензованими каналами. Отже, у випадку,

якщо один канал виявлено як зайнятий, SU може швидко визначити можливість використання спектра, продовжуючи вимірювати інші канали. Крім того, це дозволяє SU досліджувати різноманітність у статистиці завмирання вторинного каналу, щоб SU міг, можливо, скористатися перевагами кращого каналу для максимізації свого власного бажання.

Зрозуміло, що коли визначається більше каналів, є більший шанс ідентифікувати канал із вищою пропускнуою здатністю. Однак це може призвести до втрати енергії та часу на визначення спектра. Потрібно знайти компроміс між пропускнуою здатністю та споживанням енергії. Досліжено конструкцію доступу до зондування для послідовного зондування спектру з точки зору енергоефективності. Зокрема, розроблено політику чутливості, яка визначає, коли зупинити чутливість і розпочати передачу, політику доступу, яка визначає, скільки енергії використовується під час передачі, і порядок чутливості, який визначає, який канал визначати наступним, якщо поточний канал відмовляється від передачі для максимізації загальної енергоефективності всього процесу послідовного визначення спектра. Далі спочатку описано енергоефективну конструкцію доступу до вимірювання з фіксованим порядком вимірювання, а потім розширюється на випадок, коли порядок вимірювання оптимізований.

Розглянуто структуру послідовного визначення спектра, за якої SU може послідовно сприймати максимальну кількість  $K$  каналів із смугою пропускання  $B$  кожен. Приклад розглянутого процесу послідовного визначення каналу, коли порядок визначення задано відповідно до логічних індексів каналів, проілюстровано на рис. 2.7. Для кожного каналу, наприклад, каналу  $k$ , SU виконає вимірювання спектру, щоб визначити, чи канал  $k$  зайнятий чи неактивний, тобто статус  $\delta_k$  каналу  $k$  з  $\delta_k = 1$  і  $\delta_k = 0$ , що представляє канал  $k$  зайнятий і неактивний відповідно. Якщо канал  $k$  буде визначено як зайнятий, SU продовжуватиме розпізнавати наступний канал [9].

Якщо визначено, що канал  $k$  неактивний, SU продовжить виконувати оцінку каналу, щоб визначити посилення каналу  $h_k$ , а потім вирішить, чи вибрати рівень потужності для передачі по цьому каналу протягом періоду  $T_k$  або продовжити визначення наступного каналу. Відповідно до такої послідовної системи зондування



спектру рішення має бути прийнято після зондування кожного каналу, перш ніж SU вирішить отримати доступ до каналу. Необхідно прийняти максимум  $K$  рішень. Такий процес можна змоделювати як  $K$ -етапну стохастичну послідовну задачу прийняття рішень.

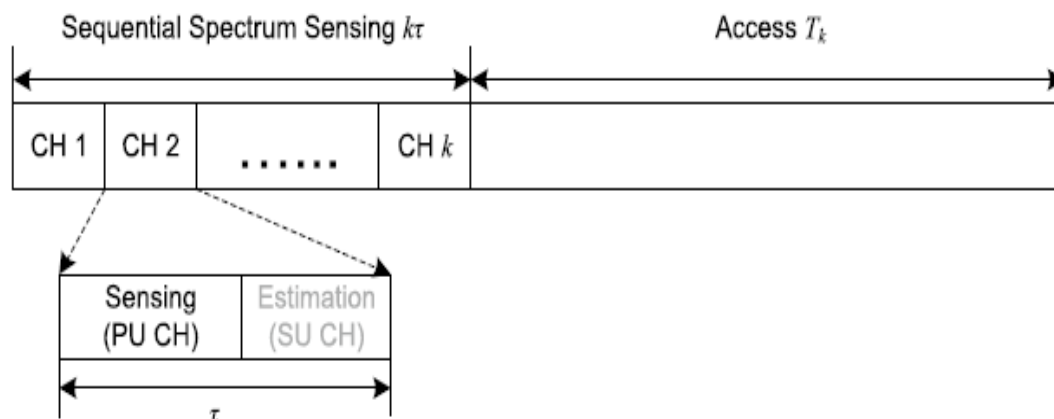


Рис. 2.5. Ілюстрація процесу послідовного визначення спектру

Оскільки Wi-Fi використовує доступ до медіа на основі конкуренції, доступ LTE призведе до зіткнення з передачею Wi-Fi. Щоб пом'якшити цю колізію, LTE може використовувати схему слухання перед розмовою (LBT), яка дозволяє LTE контролювати стан каналу, яка, як було показано, здатна підтримувати більшість переваг LTE при співіснуванні з системою Wi-Fi. Крім того, коли LTE передає по каналу, користувачі Wi-Fi мовчатимуть і чекатимуть, поки канал перестане працювати. Щоб гарантувати нормальну роботу Wi-Fi, LTE має залишити канал після певного періоду передачі даних і залишити канал для роботи Wi-Fi.

Таким чином, ми бачимо, що протокол MAC LTE-U на основі LBT повинен містити фазу періодичного визначення каналу, за якою слідує фаза передачі даних і фаза звільнення каналу. На етапі визначення каналу LTE відстежує статус незайнятого/неактивного каналу. Якщо канал виявлено неактивним, LTE передає дані протягом певного періоду часу [6].

Після цього система LTE звільняється від каналу для передачі Wi-Fi. Можна побачити, що протокол MAC на основі LBT подібний до протоколу передачі датчиків типової системи OSA, за винятком того, що фаза звільнення каналу відсутня в останній. Це пояснюється тим, що в типовій системі OSA первинна система має вищий пріоритет над вторинною системою, і, таким чином, вторинна система може лише пасивно адаптуватися, ніж

передача первинної системи. Однак у системі LTE-U, незважаючи на те, що застаріла система WiFi захищена, вторинна система LTE може активно контролювати передачу WiFi шляхом ретельного проєктування періоду виявлення та часу передачі.

## **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2**

У цьому розділі детально розглянуто техніку OSA з базової моделі OSA, на основі якої розроблено протокол доступу до зондування. Було представлено компроміс пропускної здатності зондування, за допомогою якого введено кооперативне визначення спектру, планування вимірювання та послідовне визначення спектру. Як нещодавнє застосування OSA в практичних мережах, було представлено LTE-U, в якому було розглянуто кілька критичних проблем, включаючи розробку та оптимізацію протоколу MAC, розподіл ресурсів і асоціацію користувачів.

Модель оппортуністичного доступу до спектру є однією з найбільш широко використовуваних моделей для динамічного доступу до спектру. Розпізнавання спектру є функцією активації OSA. Неможливість для вторинного користувача здійснювати зондування спектру та доступ до спектру одночасно вимагає спільної розробки стратегій зондування та доступу, щоб максимізувати власне бажання SU щодо передачі, забезпечуючи достатній захист для первинних користувачів.

Розробка OSA на основі зондування спектру пройшла бурхливий розвиток в академічних колах. Одна група робіт була зосереджена на покращенні точності зондування спектру, тоді як інші були зосереджені на координації зондування спектру та доступу, тобто дизайну зондування доступу. Будучи, по суті, технікою виявлення сигналу, зондування спектру може призвести до неправильних результатів через невизначеність шуму та ефекти каналу, такі як завмирання багатопроменевого поширення та затінення. Однак точність визначення спектру має вирішальне значення для виявлення дірок спектру та захисту PU. Таким чином, багато робіт зосереджено на розробці ефективних алгоритмів виявлення або взаємодії SU для збільшення різноманітності.

## РОЗДІЛ 3

# ПОРІВНЯЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РІЗНИХ МЕТОДІВ СПІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ

### 3.1. Система CSA з однією антеною

Дослідження системи CSA з SU, оснащеними однією антеною, головним чином зосереджено на аналізі пропускної здатності вторинного каналу. Було показано, що пропускна здатність вторинної системи з каналом із завмиранням перевищує таку з каналом з адитивним білим гаусовим шумом (AWGN) за умов обмеження потужності перешкод. Причина полягає в тому, що канал із завмиранням із варіацією може забезпечити більше можливостей передачі для вторинної системи. Для каналу з рівним завмиранням пропускна здатність вторинного каналу при обмеженнях пікової та середньої потужності перешкод, тоді як ергодична пропускна здатність і пропускна здатність при відключенні за різних комбінацій обмежень пікової/середньої потужності перешкод і пікової/середньої потужності обмеження потужності передачі досліджено. Це показує, що пропускна здатність при обмеженні середньої потужності перевершує потужність при обмеженні пікової потужності, оскільки перше може забезпечити більше гнучкості для конструкції потужності передачі SU. Ергодична ємність і ємність відключень за обмеженням відключення PU-Rx. Це показує, що для досягнення того самого рівня втрат через збій PU-Rx, SU може досягти більшої швидкості передачі в рамках обмеження збою в роботі PU [8].

При дозволенних нульових втратах через збій SU все ще досягає масштабованої швидкості передачі з обмеженням збою в роботі PU. Інформація первинного каналу використовується для подальшого покращення продуктивності вторинного. Щоб передбачити потужність перешкод, яку отримує PU-Rx, CSI від SU-Tx до PU-Rx, яка називається інформацією про міжканальний стан (C-CSI), повинна бути відома SU-Tx. Для захисту PU при недосконалому C-CSI показано, що

температура перешкод повинна бути знижена, що, таким чином, призводить до зменшення пропускної здатності вторинної лінії зв'язку [9].

Найпростіша, але найбільш фундаментальна система CSA складається з пари SU та пари PU. Кожен з терміналів оснащений однією антеною. Одна вузька смуга частот ділиться первинною та вторинною передачею. Усі канали, задіяні в системі, є незалежними каналами з блоковим завмиранням (BF). Як показано на рис. 4.1,  $g_{pp}$ ,  $g_{ps}$ ,  $g_{sp}$  і  $g_{ss}$  позначають миттєвий приріст потужності каналу від PU-Tx до PU-Rx, PU-Tx до SU-Rx, SU-Tx до SU-Rx і SU-Tx до PU-Rx відповідно.

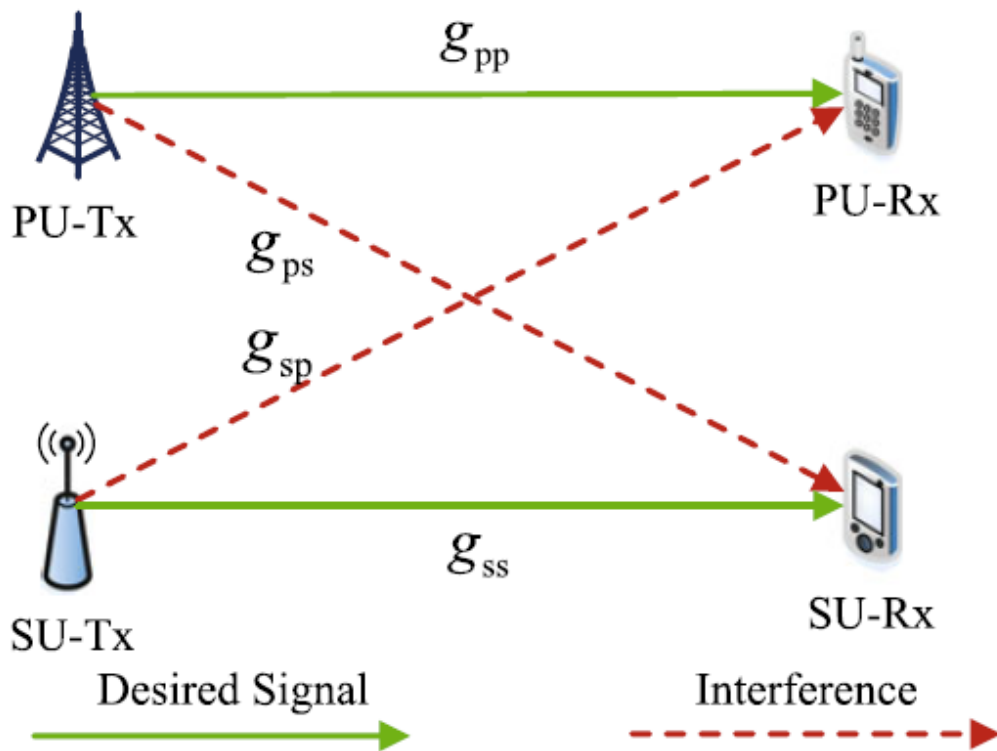


Рис. 3.1. Модель одноантенної системи CSA

Передбачається, що всі підсилення потужності каналу незалежні один від одного та є ергодичними та стаціонарними з безперервною функцією щільності ймовірності. Щоб вивчити обмеження пропускної здатності вторинного каналу, ми вважаємо, що миттєві прирости потужності каналу в кожному стані завмирання доступні в SU-Tx. Припускається, що AWGN на PU-Rx і SU-Rx є незалежними кругово-симетричними комплексними гаусовими змінними з нульовим середнім і

дисперсією  $N_0$ . Ми вважаємо, що PU-Tx не знає про співіснування SU, і, таким чином, приймає фіксовану потужність передачі  $P_{\text{stop}}$ . На практиці передачу SU можна помітити PU, оскільки потужність перешкод, отримана PU, збільшується. Щоб компенсувати втрату продуктивності, PU може збільшити свою потужність передачі.

Таким чином, замість того, щоб бути фіксованою, потужність передачі PU може бути адаптованою відповідно до вторинної передачі. Ця властивість була використана в проєкті CR для непрямого використання первинної системної інформації. У цій системі CR SU-Tx має регулювати потужність передачі, щоб захистити послугу PU. В основному існують дві категорії обмежень потужності, а саме обмеження потужності передачі та обмеження первинного захисту.

### **3.2. Модель когнітивної системи MIMO**

У цьому підрозділі розглядається використання кількох антен на вторинних терміналах, щоб ефективно балансувати між просторовим мультиплексуванням на SU-Tx і уникненням перешкод на PU. Основні виклики, які необхідно вирішити, включають:

- Дизайн просторового спектру для SU-Tx за умови, що вторинний сигнальний канал і канал перешкод точно відомі;
- Спільне формування променя передавання та прийому для SU, щоб уникнути перешкод для PU та одночасно придушити перешкоди від PU, за умови, що канал вторинного сигналу та канал перешкод невідомі. Модель когнітивної системи з декількома входами та декількома виходами (MIMO) показана на рис. 3.2, де пара SU поділяє той самий спектр з  $K$  основними користувачами. Кількість антен PU  $k$  позначається  $M_k$ , а кількість антен SU-Tx і SU-Rx позначається  $M_{\text{st}}$  і  $M_{\text{sr}}$  відповідно.

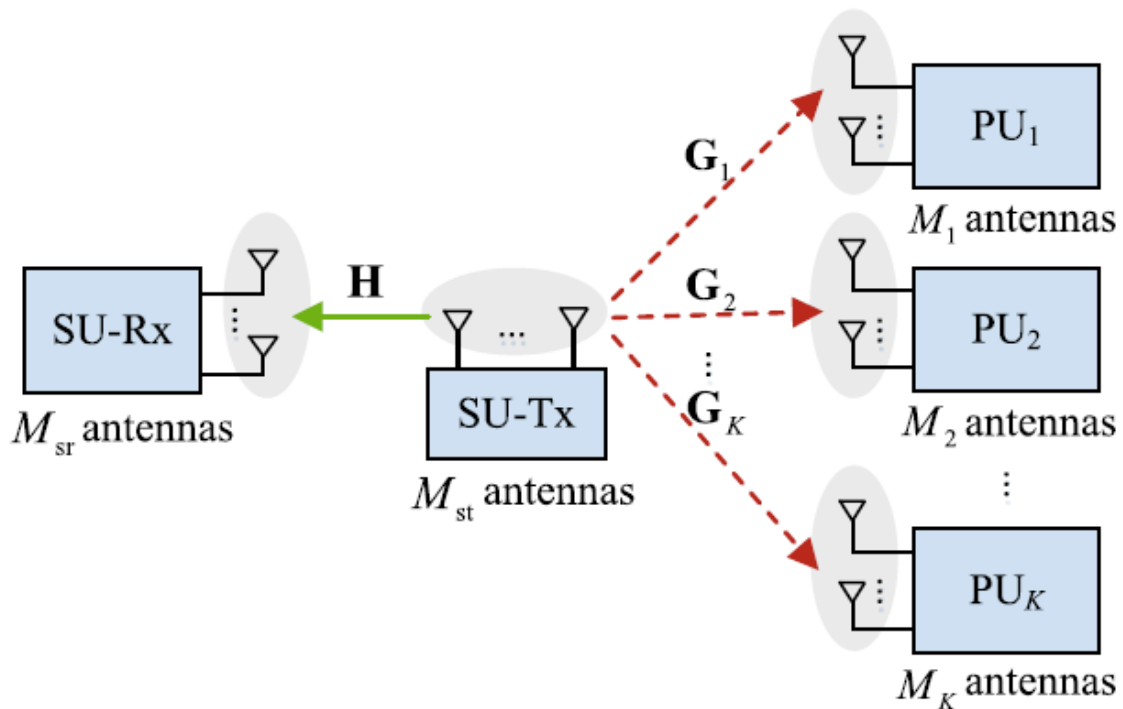


Рис. 3.2. Модель когнітивної системи MIMO

У цій частині ми дослідимо когнітивний MIMO шляхом вирішення двох проблем:

- Вторинний канал сигналу та канал перешкод невідомі;
- Перешкоди від PU пригнічуються шляхом розробки просторового спектру

на SU-Rx. Для простоти ми вважаємо, що в первинній системі є два PU, тобто  $K = 2$ , і лише один з PU знаходиться в зоні покриття вторинної передачі. Проте запропонований метод застосовний без цього припущення з використанням EIC, який був представлений у попередньому розділі. Щоб увімкнути передачу CR, пропонується трифазний протокол, як показано на рис. 4.5, інтерпретація якого виглядає наступним чином.

- Етап вивчення каналу: тривалість  $t_1$  використовується для навчання каналу, на якому SU-Tx і SU-Rx отримують часткові відомості про канали перешкод  $G_1$  і  $G_2$  через прослуховування передачі PU. Зокрема, SU наосліп оцінюють матрицю підпростору шуму з коваріаційної матриці прийнятого сигналу. Слід зазначити, що через кінцеву кількість відліків неминуче виникає збурення в матриці шумового підпростору.

- Етап навчання каналу: оскільки канал вторинного сигналу невідомий SU-Tx, на етапі навчання тривалістю  $t_t$ , SU оцінюють канал після застосування спільного формування променя передавання та прийому. Розглядаючи перешкоди до та від PU, можна вивести оптимальну структуру навчання, щоб мінімізувати помилку оцінки каналу. Слід зазначити, що канал, який потрібно оцінити, не є фактичним каналом від SU-Tx до SU-Rx, а є ефективним каналом, який містить інформацію про матриці формування променя передавання та прийому та фактичний канал сигналу.

- Етап передачі даних: з інформацією про канал перешкод, отриманою на першому етапі, та інформацією про канал сигналу, оціненою на другому етапі, SU Tx передає сигнал під час етапу передачі даних із довжиною  $T - t_l - t_t$ .

Варто зазначити, що параметр  $t_l$  відіграє важливу роль у продуктивності CR. Інтуїтивно зрозуміло, що більший  $t_l$  може бути кращим з точки зору кращої оцінки простору, так що перешкоди для та від PU можуть бути мінімізовані. Однак збільшення часу навчання зменшить час передачі даних, якщо тривалість навчання фіксована. Це шкодить пропускну здатності CR. Крім того, беручи до уваги обмеження перешкод під час навчання та передачі даних, свобода розподілу потужності зменшується.

Таким чином, щоб дослідити продуктивність CR, оцінюється нижня межа вторинної ергодичної ємності, яка пов'язана як з помилкою оцінки каналу, так і з витоком перешкод до та від PU. Тоді нижня межа ергодичної ємності CR максимізується шляхом оптимізації потужності передачі та розподілу часу на етапах навчання, навчання та передачі. Оптимальний розподіл потужності закритої форми можна знайти для даного розподілу часу, тоді як оптимальний розподіл часу можна знайти за допомогою двовимірного пошуку в обмеженому наборі.

У цій частині досліджено когнітивний MIMO шляхом вирішення двох проблем:

- Вторинний канал сигналу та канал перешкод невідомі;
- Перешкоди від PU пригнічуються шляхом проектування просторового спектру на SU-Rx..

Для простоти вважається, що в первинній системі є два PU, тобто  $K = 2$ , і лише один з PU знаходиться в зоні покриття вторинної передачі. Проте запропонований метод застосовний без цього припущення з використанням EIC, який був представлений у попередньому розділі. Щоб увімкнути передачу CR, пропонується трифазний протокол, як показано на рис. 4.5, інтерпретація якого виглядає наступним чином.

- Етап вивчення каналу: тривалість  $t_l$  використовується для навчання каналу, на якому SU-Tx і SU-Rx отримують часткові відомості про канали перешкод  $G_1$  і  $G_2$  через прослуховування передачі PU. Зокрема, SU наосліп оцінюють матрицю підпростору шуму з коваріаційної матриці прийнятого сигналу. Слід зазначити, що через кінцеву кількість відліків неминуче виникає збурення в матриці шумового підпростору.

- Етап навчання каналу: оскільки канал вторинного сигналу невідомий SU-Tx, на етапі навчання тривалістю  $t_t$ , SU оцінюють канал після застосування спільного формування променя передавання та прийому. Розглядаючи перешкоди до та від PU, можна вивести оптимальну структуру навчання, щоб мінімізувати помилку оцінки каналу. Слід зазначити, що канал, який потрібно оцінити, не є фактичним каналом від SU-Tx до SU-Rx, а є ефективним каналом, який містить інформацію про матриці формування променя передавання та прийому та фактичний канал сигналу.

- Етап передачі даних: з інформацією про канал перешкод, отриманою на першому етапі, та інформацією про канал сигналу, оціненою на другому етапі, SU-Tx передає сигнал під час етапу передачі даних із довжиною  $T - t_l - t_t$ . Варто зазначити, що параметр  $t_l$  відіграє важливу роль у продуктивності CR. Інтуїтивно зрозуміло, що більший  $t_l$  може бути кращим з точки зору кращої оцінки простору, так що перешкоди для та від PU можуть бути мінімізовані. Однак збільшення часу навчання зменшить час передачі даних, якщо тривалість навчання фіксована. Це шкодить пропускну здатності CR. Крім того, беручи до уваги обмеження перешкод під час навчання та передачі даних, свобода розподілу потужності зменшується. Таким чином, щоб дослідити продуктивність CR, оцінюється нижня межа вторинної ергодичної ємності, яка пов'язана як з помилкою оцінки каналу, так і з витоком перешкод до та від PU.



Тоді нижня межа ергодичної ємності CR максимізується шляхом оптимізації потужності передачі та розподілу часу на етапах навчання, навчання та передачі. Оптимальний розподіл потужності закритої форми можна знайти для даного розподілу часу, тоді як оптимальний розподіл часу можна знайти за допомогою двовимірного пошуку в обмеженому наборі [9].

### 3.3. Навчання каналу перешкод

Конструкція формування променя, незалежно від того, на стороні приймача чи передавача, значною мірою залежить від матриці каналу. Формування променя в звичайній багатоантенній системі з виділеним спектром розроблено на основі матриці сигнального каналу. Однак конструкція СВ потребує інформації як матриці каналу вторинного сигналу, так і матриці каналу перешкод від SU-Tx до PU. У мережі CSA основною системою є, як правило, застаріла система, яка була розгорнута та працювала протягом певного періоду часу. Первинна і вторинна системи також можуть належати різним операторам. Таким чином, незважаючи на спільний доступ до спектру, первинній системі важко забезпечувати взаємодію з вторинною системою з точки зору оцінки та надсилання назад інформації про канал перешкод. Таким чином, ключовою проблемою для практичного СВ є те, як отримати матрицю каналу перешкод на SU-Tx.

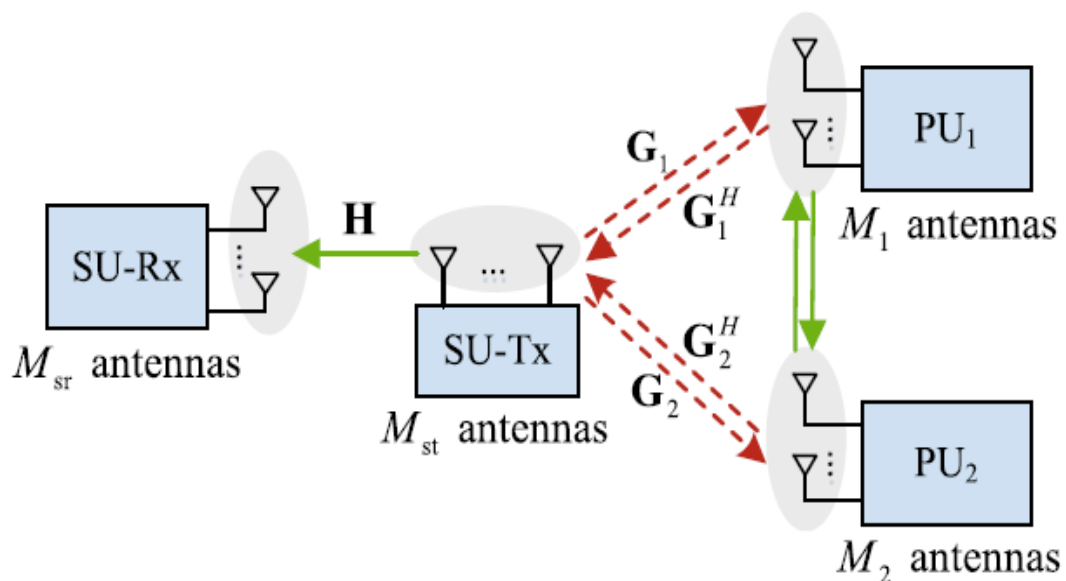


Рис. 3.3 Модель когнітивного формування променя

Щоб отримати певні відомості про канал перешкод, життєздатним способом є дозволити SU-Tx прослуховувати сигнал, надісланий PU перед власною передачею, і оцінити канал від PU до SU-Tx. Оскільки система працює в дуплексному режимі з поділом часу (TDD), оцінений канал можна розглядати як канал перешкод від SU-Tx до PU відповідно до взаємності каналів. Цей процес називається навчанням каналу. Протокол навчання та передачі проілюстрований на рис. 3.4, на якому  $T$  - довжина кадру,  $\tau$  - тривалість часу, що використовується для вивчення каналу перешкод, а залишок  $T - \tau$  використовується для передачі даних. На фазі навчання каналу SU-Tx прослуховує передачу PU у спектрі інтересу протягом  $N$  періодів символу.



Рис. 3.4 Двофазний протокол CSA на основі навчання

Щоб забезпечити високу пропускну здатність і безперебійне покриття для бездротового зв'язку, було запропоновано невеликі комірки для перекриття існуючих стільникових мереж. Традиційно малі комірки розгортаються для спільного використання радіочастотного спектру за допомогою того самого RAT з макростільниками. Таким чином малі стільники можуть безпосередньо розвантажувати трафік макростільників. Однак вони неминуче створюють перешкоди для користувачів макростільників і таким чином погіршують їх продуктивність. Щоб вирішити цю проблему, SR у гетерогенних мережах є життєздатним рішенням. Розглянемо неоднорідну мережу, як показано на рис. 4.10 (сценарій III), де кілька малих комірок OFDMA спільно використовують спектр макростільника CDMA.

Зокрема, низхідна лінія зв'язку малих стільників поділяє спектр, який використовується для висхідної лінії зв'язку CDMA, оскільки трафік висхідної лінії зв'язку системи CDMA зазвичай менший, ніж трафік низхідної лінії зв'язку. За допомогою кількісного визначення потужності перешкод, створюваної кожною малою коміркою, можна сформулювати проблему розподілу ресурсів, де метою є максимізація загальної пропускної

здатності всіх малих комірок, а обмеженнями є обмеження загальної потужності перешкод і обмеження індивідуальної потужності передачі. Задача трансформується для оптимізації потужності передачі та розподілу інтерференційної температури між малими комірками.

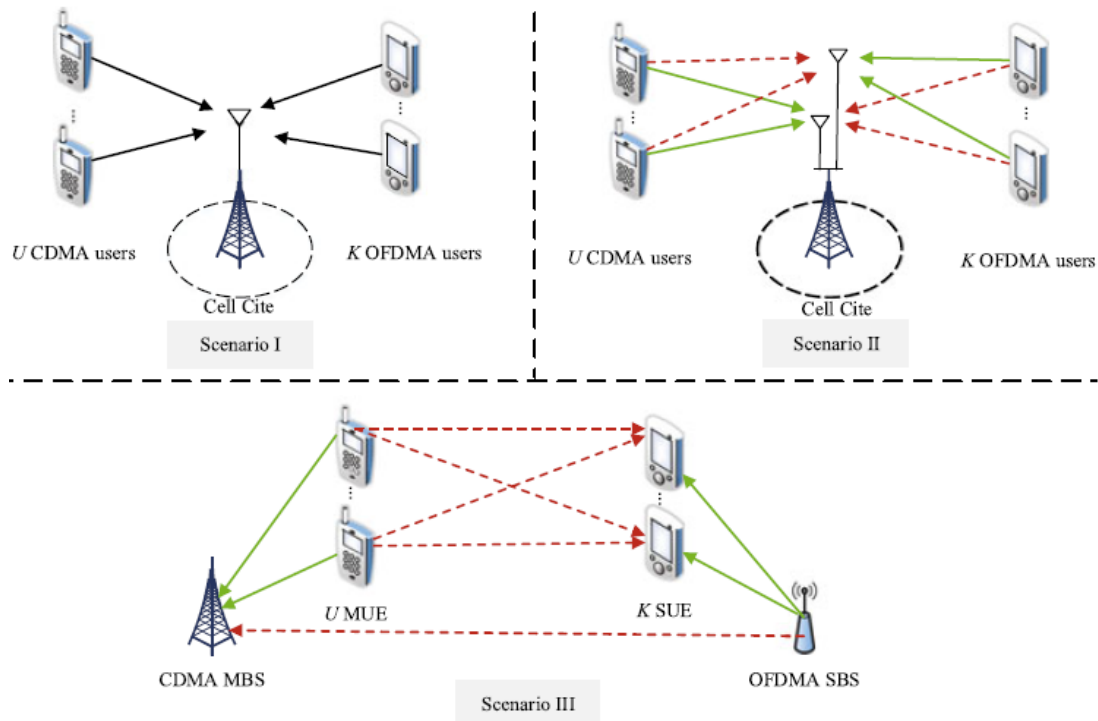


Рис. 3.5 Сценарії з активним спільним використанням інфраструктури

Для полегшення розгортання OFDMA може спільно використовувати ту саму стільникову станцію та ту саму антену BS із системою CDMA, як показано на рис. 4.10 (сценарій I). Цей вид спільного використання інфраструктури відомий як активний спільний доступ до інфраструктури. Візьмемо як приклад широкопasmову висхідну лінію зв'язку CDMA. На практиці він працює в смузі пропускання 5 МГц із швидкістю чіпа 3,84 Мбіт/с. Коефіцієнт розсіювання може змінюватися від 2 до 256. LTE може приймати 256 піднесучих при роботі в режимі 5 МГц з інтервалом піднесучих 15 кГц. Таким чином, частота дискретизації становить  $15 \text{ кГц} \times 256 = 3,84 \text{ МГц}$ , що дорівнює частоті мікросхем широкопasmового CDMA. Таким чином, дві системи можуть бути легко синхронізовані з тим самим опорним годинником.

Щоб кількісно визначити температуру перешкод, створювану користувачами CDMA, слід отримати SINR користувачів CDMA з перешкодами від системи OFDMA. Враховуючи кількість користувачів CDMA (позначене  $U$ ) і коефіцієнт

посилення розширення (позначений  $N$ ), SINR користувача CDMA визначається конкретними кодами розширення, призначеними користувачам, і миттєвим S-CSI системи CDMA. Через відсутність взаємодії між системами CDMA та OFDMA ця інформація невідома системі OFDMA, і, таким чином, системі OFDMA важко передбачити SINR CDMA. Розглядаючи систему великих розмірів, де  $U, N \rightarrow \infty$  і  $U/N$  наближається до кінцевої константи, SINR користувачів CDMA наближається до асимптотичного значення, яке не залежить від конкретних кодів і миттєвого S-CSI. Таким чином, обмеживши асимптотичне SINR не менше цільового SINR, можна отримати інтерференційну температуру закритої форми.

Температура перешкод системи CDMA є функцією потужності передачі користувача CDMA. Більша потужність передачі забезпечує вищу температуру перешкод, але також створює більші перешкоди для користувача OFDMA. Таким чином, існує оптимальна потужність передачі CDMA для максимізації пропускної здатності OFDMA [10].

Ефективний алгоритм був запропонований у для вирішення спільної оптимізації ресурсів систем CDMA та OFDMA шляхом дослідження опуклості проблеми щодо потужності передачі CDMA та розподілу ресурсів OFDMA. Крім того, хоча потужність передачі систем CDMA і OFDMA оптимізована спільно, на практиці немає необхідності інформувати користувача CDMA про оптимальне значення потужності передачі. Фактично, як тільки система OFDMA працює з оптимальною потужністю передачі та розподілом піднесучих, як і система CDMA завдяки внутрішньому контролю потужності системи CDMA.

На практиці через обмежену передачу сигналів між макростільником і малими стільниками C-CSI між базовою станцією малого стільника (SBS) і базовою станцією макростільника (MBS) зазвичай відсутній.

Оскільки C-CSI враховує втрати на шляху на основі відстані, дрібномасштабне завмирання та великомасштабне затінення, слід визначити лише два останніх, оскільки відстань між SBS та MBS є фіксованою, і її можна легко дізнатися з глобальної географічної інформації. Виявлено, що оптимальний розподіл потужності для гетерогенних мереж SR по суті не залежить від компонентів

завмирання та затінення C-CSI і пов'язаний лише з втратами на шляху на основі відстані. Таким чином, можна уникнути потреби в миттєвій інформації про затухання та затінення C-CSI.

### **3.4. Переваги одночасного доступу до спектру**

Одночасний доступ до спектру пропонує численні переваги для систем бездротового зв'язку. По-перше, це дозволяє більш ефективно використовувати спектр, дозволяючи великій кількості користувачів і додатків співіснувати та працювати одночасно в тих самих діапазонах частот. Ця збільшена ємність допомагає задовольнити зростаючий попит на бездротове підключення та підтримує розгортання нових та інноваційних бездротових послуг.

По-друге, одночасний доступ до спектру покращує ефективність використання спектру шляхом зменшення кількості невикористаного або недостатньо використаного спектру. Шляхом динамічного перерозподілу спектру на основі попиту в реальному часі він максимізує використання доступних ресурсів, тим самим оптимізуючи загальну продуктивність системи.

Крім того, одночасний доступ до спектру сприяє спільному використанню спектру та співпраці між різними зацікавленими сторонами, включаючи ліцензованих операторів, неліцензованих користувачів та органи громадської безпеки. Забезпечуючи співіснування різноманітних бездротових служб, він сприяє створенню більш інклюзивної та різноманітної бездротової екосистеми.

Однак одночасний доступ до спектру також представляє ряд проблем. Точність визначення спектру, керування перешкодами та координація між кількома користувачами є критичними областями, які потребують пильної уваги. Розробка ефективних політик і протоколів спільного використання спектру, а також впровадження передових алгоритмів обробки сигналів необхідні для забезпечення справедливого та ефективного доступу до спектру.

Підсумовуючи, одночасний доступ до спектру має великі перспективи для вирішення проблеми дефіциту спектру та забезпечення ефективного бездротового

зв'язку. Застосовуючи динамічні та гнучкі моделі розподілу спектру, використовуючи технології когнітивного радіо та впроваджуючи ефективну політику доступу до спектру, ми можемо повністю розкрити потенціал обмежених доступних ресурсів спектру. Це не тільки задовольнить зростаючий попит на бездротові послуги, але й прокладе шлях до реалізації передових програм, таких як Інтернет речей, 5G і не тільки, а також розумних міст, що веде до майбутнього з більшою підключеністю та цифровими можливостями.

У бездротовому зв'язку, що постійно розвивається, попит на ресурси спектру продовжує зростати безпрецедентною швидкістю. Спектр, обмежений ресурс, який забезпечує бездротову передачу даних, голосу та інших сигналів, стає все більш перевантаженим. Ця перевантаженість становить серйозну проблему як для операторів бездротових мереж, так і для користувачів, оскільки обмежує пропускну здатність і якість бездротових послуг.

Щоб вирішити цю проблему, дослідники та експерти галузі досліджують інноваційні рішення, і одним із перспективних підходів є одночасний доступ до спектру. Одночасний доступ до спектру означає здатність кількох користувачів або пристроїв одночасно отримувати доступ до одних і тих самих діапазонів спектру та використовувати їх таким чином, щоб забезпечити ефективне співіснування без перешкод.

Традиційно розподіл спектру дотримувався статичної та ексклюзивної моделі, де смуги частот призначаються конкретним користувачам або програмам для ексклюзивного використання. Ця модель, хоч і ефективна у своїй простоті, часто призводить до недовикористання ресурсів спектру. Багато виділених діапазонів залишаються недостатньо використаними протягом значної частини часу, що призводить до втрати цінного спектру, який міг би бути використаний для підтримки додаткових бездротових з'єднань і послуг.

Одночасний доступ до спектру має на меті вирішити це недовикористання шляхом впровадження більш динамічного та гнучкого підходу до управління спектром. Замість виділення спектру виключно окремим користувачам або програмам, одночасний доступ дозволяє кільком користувачам спільно

використовувати однакові діапазони частот відповідно до їхніх потреб у реальному часі. У цьому підході використовуються передові технології та методи, які гарантують, що різні користувачі можуть співіснувати та передавати свої сигнали одночасно, не створюючи шкідливих перешкод.

Однією з ключових технологій для одночасного доступу до спектру є когнітивне радіо. Когнітивні радіосистеми мають здатність відчувати радіочастотне середовище, виявляти невикористані або недостатньо використані діапазони спектру та динамічно адаптувати свої параметри передачі для роботи в цих доступних діапазонах. Використовуючи технологію когнітивного радіо, пристрої можуть отримати доступ до ресурсів спектру, які тимчасово не використовуються або мало використовуються основними користувачами, такими як ліцензовані оператори.

Динамічний доступ до спектру є ще одним важливим компонентом одночасного доступу до спектру. Структури динамічного доступу до спектру сприяють ефективному спільному використанню спектру шляхом впровадження політик і протоколів доступу до спектру. Ці політики визначають, як користувачі можуть отримувати доступ і використовувати доступний спектр, забезпечуючи справедливість, ефективність і пом'якшення перешкод. Для координації одночасного використання ресурсів спектру декількома користувачами можна використовувати різні методи доступу до спектру, такі як множинний доступ із часовим, частотним і кодовим поділом.

### **ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3**

Одним із методів ефективного використання спектру є спільне використання спектру. Спільний доступ може бути здійснений різними способами – спільне використання з тим самим оператором, з іншим оператором, спільне використання ліцензованого спектру з неліцензованими користувачами тощо. Користувачі стільникового зв'язку спільно використовують спектр із користувачами ad hoc – це приклад спільного використання спектру між ліцензованими та неліцензованими користувачами.

Модель відкритого спільного використання та модель ієрархічного доступу є широкою класифікацією методів спільного використання спектру. Кожна мережа, яка отримує доступ до того самого спектру з однаковою ймовірністю, підпадає під модель відкритого спільного використання. Немає обмежень щодо перешкод від однієї мережі до її сусідів. Неліцензійний діапазон є прикладом цієї моделі.

Ієрархічна модель складається з первинної мережі та вторинної мережі. Вторинна мережа отримує доступ до спектру, не впливаючи на первинну мережу. Методи спільного використання спектру можна класифікувати як: переплетення, підкладка та накладання. Спільне використання спектру в переплетенні; вторинна система може динамічно отримувати доступ до дірок спектра. Для базового спектру вторинні користувачі передають одночасно з основними користувачами. Перешкоди, спричинені SU над PU, повинні бути нижче порогового рівня. У разі накладення спектру SU отримують доступ до спектру в часовій області, просторовій області або частотній області. В обмін на це SU активно допомагають у первинній передачі даних. Інша класифікація – це динамічний спільний доступ до спектру та кооперативний спільний доступ до спектру. Як вказує назва, динамічний спільний доступ до спектру є оппортуністичною технікою, яка отримує доступ до спектру динамічним способом. При спільному спільному використанні спектра спектр використовується між основними та вторинними користувачами.



## ВИСНОВКИ

Динамічний вибір спектру є ефективним підходом до покращення продуктивності та надійності безпроводових мереж доступу. Цей підхід дозволяє ефективно використовувати обмежені ресурси радіоспектра та уникати перешкод, що сприяє поліпшенню якості зв'язку.

Результати досліджень показали, що методи та алгоритми динамічного вибору спектру мають потенціал для покращення продуктивності безпроводових мереж доступу. Вони забезпечують ефективне розподілення ресурсів, зменшення впливу перешкод і підвищення пропускної здатності мережі.

Статистика розподілу спектру в усьому світі показує, що радіоспектр уже майже повністю розподілений, а доступний спектр для розгортання нових послуг досить обмежений. Поява масових підключень пристроїв Інтернету речей прискорює кризу дефіциту спектру. Спектральний ресурс близько 76 ГГц необхідний для розміщення мільярдів кінцевих пристроїв шляхом ексклюзивного зайняття спектру.

Когнітивне радіо було широко визнано ключовою технологією для забезпечення DSA. CR є інтелектуальною радіосистемою, яка може динамічно та автономно адаптувати свої стратегії передачі, включаючи несучу частоту, смугу пропускання, потужність передачі, промінь антени або схему модуляції тощо, на основі взаємодії з навколишнім середовищем та усвідомлення його внутрішньої стану (наприклад, архітектура апаратного та програмного забезпечення, політика використання спектру, потреби користувачів тощо), щоб досягти найкращої продуктивності.

Хоча більшість існуючих досліджень CR на сьогоднішній день були зосереджені на вивченні та реалізації когнітивних можливостей для сприяння DSA, зовсім нещодавні дослідження були проведені для вивчення більшого потенціалу штучного інтелекту (ШІ), притаманного технології CR.

OSA будучи, по суті, технікою виявлення сигналу, зондування спектру може призвести до неправильних результатів через невизначеність шуму та ефекти каналу,

такі як завмирання багатопроменевого поширення та затінення. Однак точність визначення спектру має вирішальне значення для виявлення дірок спектру та захисту PU. Таким чином, багато робіт зосереджено на розробці ефективних алгоритмів виявлення або взаємодії SU для збільшення різноманітності.

Модель відкритого спільного використання та модель ієрархічного доступу є широкою класифікацією методів спільного використання спектру. Кожна мережа, яка отримує доступ до того самого спектру з однаковою ймовірністю, підпадає під модель відкритого спільного використання. Немає обмежень щодо перешкод від однієї мережі до її сусідів. Неліцензійний діапазон є прикладом цієї моделі.

Загалом, кваліфікаційна робота підтверджує значення та актуальність безпроводових мереж доступу з динамічним вибором спектру та вносить внесок у розвиток цієї галузі, сприяючи поліпшенню продуктивності та ефективності безпроводових комунікацій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. T. Taher, R. Vacchus, K. Zdunek, D. Roberson, Long-term spectral occupancy findings in Chicago, in *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2019, pp. 100–107.
2. J. Bae, E. Beigman, R.A. Berry, M.L. Honig, R. Vohra, Sequential bandwidth and power auctions for distributed spectrum sharing. *IEEE J. Sel. Areas Commun*, (2020).
3. M. B. Weiss, K. Werbach, D.C. Sicker, C. Caicedo, On the application of blockchains to spectrum management. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* (2019).
4. Кравченко П. Блокчейн і децентралізовані системи: навч. посібник у 3 ч. Ч. 1 / П. Кравченко, Б. Скрябін, О. Дубініна. – Харків: ПРОМАРТ, 2019. – 452 с.
5. Архітектура та технології Інтернету речей: навч. посіб. / І.В. Пулеко, А.А. Єфіменко. – Електронні дані. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. – 234 с.
6. Y. Pei, S. Hu, F. Zhong, D. Niyato, Y.-C. Liang, Blockchain-enabled dynamic spectrum access: cooperative spectrum sensing, access and mining, in *Proceedings of the IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'19)* (2019), pp. 1–6.
7. W. M. Lees, A. Wunderlich, P. Jeavons, P.D. Hale, M.R. Souryal, Deep learning classification of 3.5 GHz band spectrograms with applications to spectrum sensing. *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.* 5(2), 224–236 (2019).
8. A. Goldsmith, S.A. Jafar, I. Maric, S. Srinivasa, Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective, (2021).
9. Z. Dai, J. Liu, K. Long, Selective-reporting-based cooperative spectrum sensing strategies for cognitive radio networks. *IEEE Trans. Veh. Technol*, (2020).
10. S. Han, Y.-C. Liang, B. Soong, S. Li, Dynamic broadband spectrum refarming for ofdma cellular systems. *IEEE Trans. Wirel. Commun*, (2019).