

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

До захисту допущено
В.о. завідувача кафедри

_____ Явіся В.С. _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
“ ” _____ 2018_р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка,
(код і назва)

спеціалізація Мобільні телекомунікації

на тему: Підхід динамічного доступу до спектру в мережах когнітивного радіо, що використовує теорію ігор.

Виконала: студентка _2_ курсу, групи ТМ-71мп
(шифр групи)

_____ Журавель Анастасія Сергіївна _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ професор, д.т.н. Кравчук С.О. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018_ рік

РЕФЕРАТ

ТЕМА: «Підхід динамічного доступу до спектру в мережах когнітивного радіо, що використовує теорію ігор»

Пояснювальна записка викладена на x сторінках та включає x ілюстрацій та x джерела за переліком посилань.

Об'єктом дослідження є технологія динамічного доступу до спектру.

Предметом дослідження є підхід, що використовує теорію ігор.

Метою даної роботи є проведення аналітичного огляду наявних різноманітних моделей ігор у контексті технології динамічного доступу до спектру. При цьому головна увага кооперативним та некооперативним іграм.

На даний час безпроводові мережі доступу є основним аспектом розвитку та інтеграції телекомунікаційної галузі у будь-яку сферу людської діяльності. З розвитком технічного прогресу та кількості безпроводових мереж постає питання оптимального використання радіочастотного спектру. Технологія когнітивного радіо дозволяє таким мережам використовувати спектр динамічним чином. В даній роботі розглядається технологія динамічного доступу до спектру і її реалізація за допомогою підходу, що використовує теорію ігор. Було розглянуто ряд ігрових варіацій та моделей, основна увага приділена кооперативним та некооперативним іграм.

Результати досліджень опубліковані в тезах доповідей на наукових конференціях.

Ключові слова: когнітивне радіо, технологія динамічного доступу до спектру, теорія ігор, кооперативні та некооперативні ігри.

ABSTRACT

Topic: « The game theoretical approach of dynamic spectrum access in cognitive radio networks»

Explanatory memorandum presented on x pages and includes x illustrations and x sources for references.

Object of research is dynamic spectrum access technology.

The subject of the research is game theoretical approach.

Purpose of this work is to conduct an analytical review of the different game models due to which dynamic spectrum access technology can be implemented. The main focus of attention has been predominantly on cooperative and non-cooperative games.

Nowaday, wireless access networks are the key aspect of the development and integration of the telecommunication industry in any field of human activity. With the advent of technical progress and the number of wireless networks, the question about the optimal use of the radio frequency spectrum is raised. The technology of cognitive radio allows such networks to use the spectrum dynamically. Dynamic spectrum access is the most vital application of cognitive radios. [will be contined]

The research results were published in abstracts of scientific conferences.

Keywords: cognitive radio, dynamic spectrum access technology, game theory, cooperative games, non-cooperative games.

ЗМІСТ

1. БЕЗПРОВОДОВІ МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ.....	9
1.1 Введення.....	9
1.2 Архітектура мережі.....	10
1.3 Функціональні можливості МНП.....	13
1.3.1 Ліцензований діапазон.....	13
1.3.2 Неліцензований діапазон.....	14
1.4 Висновок	15
2. КОГНІТИВНЕ РАДІО	17
2.1 Введення.....	17
2.2 Принцип когнітивного радіо.....	17
2.3 Основні характеристики.....	18
2.4 Основні функції.....	19
2.5 Висновок	22
3. ДИНАМІЧНИЙ ДОСТУП ДО СПЕКТРА.....	23
3.1 Введення.....	23
3.2 Моделі динамічного доступу до спектра.....	24
3.3 Архітектура динамічного доступу до спектра	27
3.4 Висновок	30
4. ПРОБЛЕМА РОЗПОДІЛУ СПЕКТРА	32
4.1 Введення.....	32
4.2 Процедура рішення проблеми спектрального розподілу	32
4.3 Висновок	34
5. ТЕОРІЯ ІГОР	36
5.1 Введення.....	36
5.2 Підхід, що використовує теорію ігор.....	36
5.2.1 Формулювання часу перебування.	38
5.2.2 Статична модель Бертрана.....	38
5.3 Типи ігор	39
5.3.1 Кооперативні та некооперативні ігри	39

5.3.2 Статичні та динамічні ігри.....	40
5.3.3 Стратегічні та екстенсивні (великі) ігри.....	40
5.3.4 Статична гра в нормальній формі	43
5.3.5 Рівновага Неша.....	43
5.4 Застосування ігор в динамічному доступі до спектра.....	45
5.5 Висновок	47
6. КООПЕРАТИВНА ГРА.....	48
6.1 Введення.....	48
6.2 Впровадження моделі кооперативної гри.....	49
6.2.1 Вибір реле	50
6.2.2 Ітераційний алгоритм для основного користувача.....	50
6.3 Результати моделювання і аналіз	52
6.4 Висновок	55
7. НЕКООПЕРАТИВНА ГРА	56
7.1 Введення.....	56
7.2 Популяційні ігри	56
7.3 Динаміка реплікатора	57
7.4 Динаміка реплікатора для гри динамічного доступу	57
7.5 Моделювання гри в залежності від параметра, що цікавить.....	59
7.6 Нееластичні SU: прості CRN сценарії	60
7.6.1 Сценарії 4х користувачів.....	60
7.6.2. Ланцюговий сценарій інтерференції CRN	62
7.7 Нееластичні вторинні користувачі: випадкові сценарії CRN.....	63
7.7.1. Вплив кількості SUs (I).....	63
7.7.2. Вплив кількості безпроводових каналів (N).....	64
7.7.3 Вплив швидкості передачі (ri).....	66
7.8 Еластичні вторинні користувачі: сценарії 4х користувачів CRN	66
7.9. Еластичні вторинні користувачі: випадкові сценарії CRN.....	67
7.10. Динаміка реплікатора: сценарії 4-х користувачів CRN	67
7.11 Висновок	69

ВИСНОВКИ.....	70
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	71

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

BS Base-station

BLP Binary linear programming

CR Cognitive radio

CRN Cognitive radio network

DSA Dynamic spectrum access

FCFS First come first serve

FLBS Fuzzy Logic Based System

GTA Game Theoretic Approach

MNLP Mixed integer non-linear programming problem

МНП Мережа наступного покоління

PU Primary user

QoS Quality of Service

RF Radio Frequency

SNR the Signal to Noise Ratio

SU Ssecondary user

WLAN Wireless Local Area Network

ВСТУП

Зважаючи на широке застосування безпроводових мереж доступу, як основного методу передачі даних між системами, не можливо не брати до уваги проблему обмеженості вільного радіочастотного спектру, що з кожним роком вимагає більш прогресивних та оптимальних рішень щодо його використання. Технологія когнітивного радіо дозволяє безпроводовим мережам використовувати спектр динамічним чином, що забезпечує можливість використовувати і розділяти спектр найбільш зручним та оптимальним чином [1].

Це досягається за допомогою технології динамічного доступу до спектра. Покращення малоефективного використання спектру пропонується досягти через, так званий, відкритий доступ до ліцензованих смуг, при цьому не перешкоджаючи вже існуючим користувачам мережі.

Серед методів вирішення проблеми обмеженості спектра виділяють лінійне програмування, евристичний метод, метод нечіткої логіки, теорію графів і теорію ігор, що вважається найбільш оптимальним та раціональним способом до вирішення вище зазначеної проблеми. В подальшому теорія гри та різні види ігор будуть розглянуті.

1. БЕЗПРОВОДОВІ МЕРЕЖІ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

1.1 Введення

На сьогоднішній день безпроводові мережі можна охарактеризувати фіксованою політикою присвоєння спектру. У ситуації обмеженості вільного радіочастотного спектру, питання про оптимальне використання даного спектру постає, як ніколи, гостро. При цьому, велика частина визначеного спектру використовується нерегулярно та нерівномірно, географічні варіації використання певного спектру можуть коливатись від 15 до 80 відсотків з високою дисперсією в часі [4]. Ряд вищезазначених причин зумовив необхідність появи нової мережевої парадигми, так званих, мереж нового покоління. Дані мережі на ряду зі своїми ключовими технологіями забезпечують нові функціональні можливості та пропонують сучасні рішення існуючих проблем оптимального використання спектру.

Покращення малоефективного використання спектру пропонується досягти через, так званий, відкритий доступ до ліцензованих смуг, при цьому не перешкоджаючи вже існуючим користувачам мережі. На шляху до цього, мережі наступного покоління зіштовхуються з рядом складнощів та технічних задач, серед яких відповідність нормам та рівням якості обслуговування (QoS), розробка нових протоколів зв'язку для можливості динамічного доступу до спектру, адже існуючі протоколи зв'язку були розроблені з прив'язкою до фіксованого спектру, та інші внутрішньо-мережні виклики.

Компоненти такої мережі та їх зв'язки можна побачити на Рис.1.1.

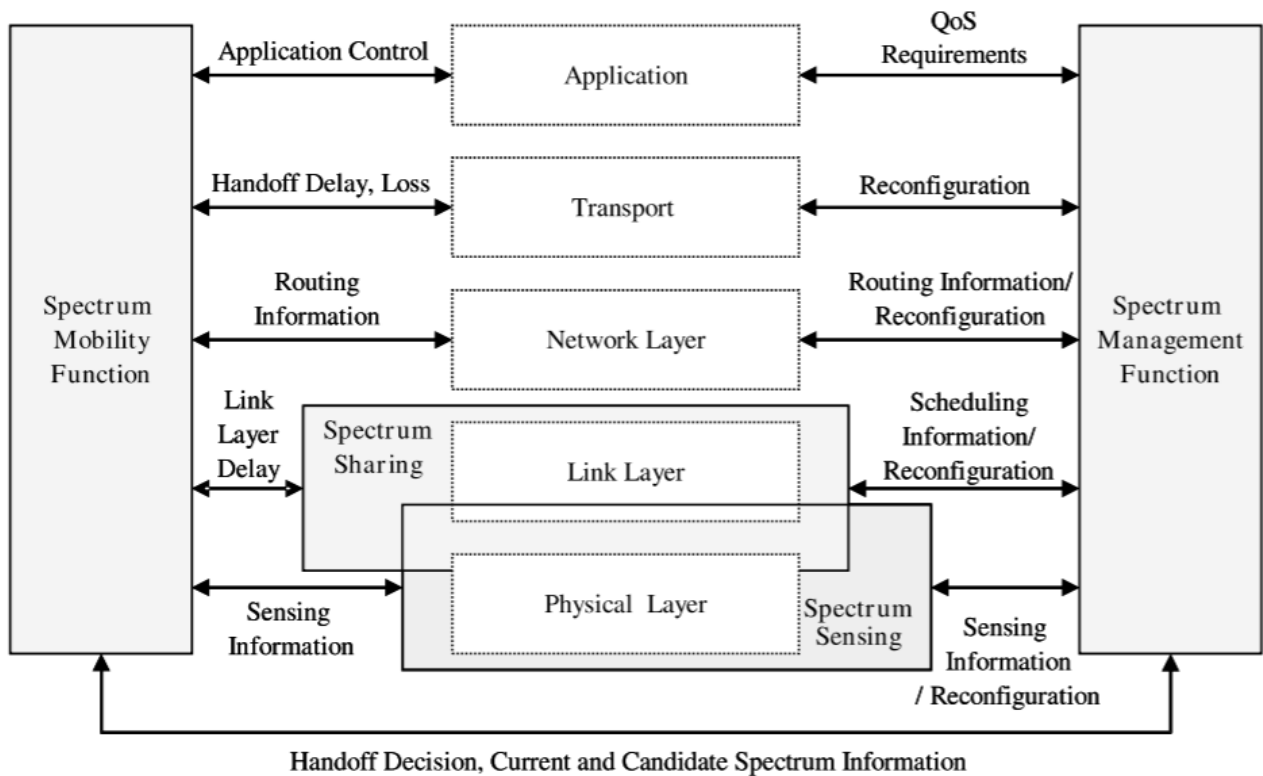


Рис.1.1. Функціональні можливості мереж наступного покоління.

Зі значної кількості взаємодій, зображеної на Рис.1.1. очевидно, що функціональні можливості такої мережі вимагають прогресивного та конструктивного підходу в розробці між-рівневої взаємодії.

Більш конкретно, зондування спектру та спільне використання спектру співпрацюють один з одним для підвищення ефективності використання спектру. У функціях управління спектральною діяльністю та функціями мобільності спектру застосування, транспортування, маршрутизація, доступ до середовища та функції фізичного рівня виконуються спільним способом, враховуючи динамічний характер базового спектру. В наступних розділах ці функціональні можливості будуть розглянуті детальніше.

1.2 Архітектура мережі

Розгляд архітектури мережі, нехай і загальний, необхідний з точки зору подальшої взаємодії з її компонентами, розгляду та адаптації існуючих

протоколів та можливого створення нових протоколів зв'язку. На Рис.1.2. наведена гетерогенна архітектура мережі, з точки зору політики спектра. Частина спектру залишається неліцензованою, в той час, як певна частина вже ліцензована користувачами та учасниками мережі.

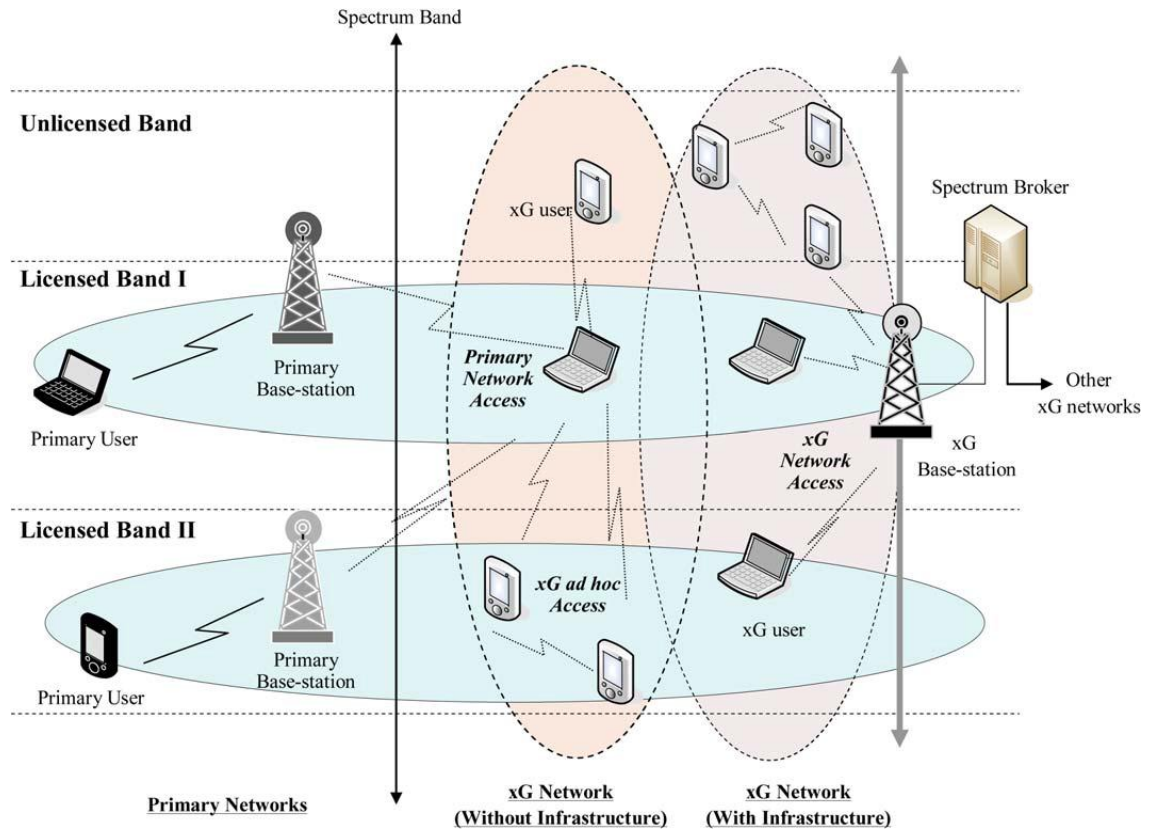


Рис.1.2. Еталонна архітектура мереж наступного покоління

Архітектурні компоненти даної мережі можна представити як сукупність компонентів основної мережі та мережі наступного покоління.

Основну мережу можна охарактеризувати тим, що за нею закріплюється певна частина спектру, тобто вона має ліценцію на функціонування в певному, визначеному діапазоні спектру. Серед її компонентів:

- 1) Основний користувач - PU (Primary user): даний користувач має ліцензію на використання визначеної частини спектру. При цьому доступ до спектру користувачу надає основна базова станція, гарантуючи, що даний

доступ не буде порушений зі сторони інших, неліцензійних учасників мережі. При цьому PU можуть співіснувати з базовими станціями мереж наступного покоління і їх користувачами без введення додаткових конфігурацій та обмежень.

- 2) Основна базова станція BS (base-station): елемент мережі, що має ліцензію на спектр. В основному, дана базова станція не володіє необхідними характеристиками для забезпечення можливості спільного доступу до спектра як своїм користувачів, так і користувачів мережі наступного покоління. Проте можна забезпечити дану станцію протоколом мережі наступного покоління для первинного доступу до мережі користувачів мережі наступного покоління [5].

Мережа наступного покоління (МНП) – мережа, що не має ліцензії на функціонування в необхідному діапазоні. Для даної мережі прийнятним варіантом стає тільки відкритий доступ до спектра. Серед її компонентів:

- 1) Користувач МНП: неліцензійний користувач, що не має виключного права на функціонування в спектрі. Це породжує необхідність нових можливостей та умов для реалізації спільного використання спектру.
- 2) Базова станція МНП: елемент мережі, що має ліцензії на спектр. Проте дана базова станція оснащена можливостями МНП, може надати своїм користувачам, що позбавлені ліцензії, одне хоп-підключення, завдяки чому користувач отримує доступ до інших мереж.
- 3) Спектральний агент (посередник): елемент мережі, що відіграє ключову роль у обміні спектральними ресурсами між різними мережами МНП. Посередник має можливість підключення до кожної мережі, таким чином виступаючи у ролі інформаційного управляючого, що здатен забезпечити одночасне існування декількох МНП [5,6,7].

Взаємодію між користувачами МНП можна забезпечити декількома способами:

- 1) Користувачі МНП можуть мати доступ до власних базових станцій як у ліцензованому, так і неліцензованому діапазоні.
- 2) Користувачі МНП можуть взаємодіяти через спеціальний зв'язок як у ліцензованому, так і неліцензованому діапазоні.
- 3) Користувачі МНП можуть мати доступ до основної базової станції через ліцензований діапазон.

1.3 Функціональні можливості МНП

З урахуванням всього вище зазначеного, можна зробити висновок, що МНП можуть функціонувати як у ліцензійному, так і у неліцензійному спектрі. Від так і функціональні можливості мереж різнитимуться залежно від типу діапазону спектра.

1.3.1 Ліцензований діапазон

Ліцензійний діапазон містить певні отвори або діри, що тимчасово, або взагалі не використовуються основними користувачами. Це робить можливим одночасне функціонування основної мережі та МНП в тому ж діапазоні спектру, користувачі МНП за допомогою когнітивних технологій можуть займати спектральні отвори та розпоряджатись ними, в той час, коли вони не затребувані основними користувачами. На шляху до реалізації спільного використання вторинні користувачі зазнають чимало перешкод, проте основною метою лишається невтручання та неперешкоджання основним користувачам. Таким чином, коли займаний користувачами МНП спектр знадобиться основним користувачам, перші зобов'язані покинути даний діапазон і шукати інший вільний [7].

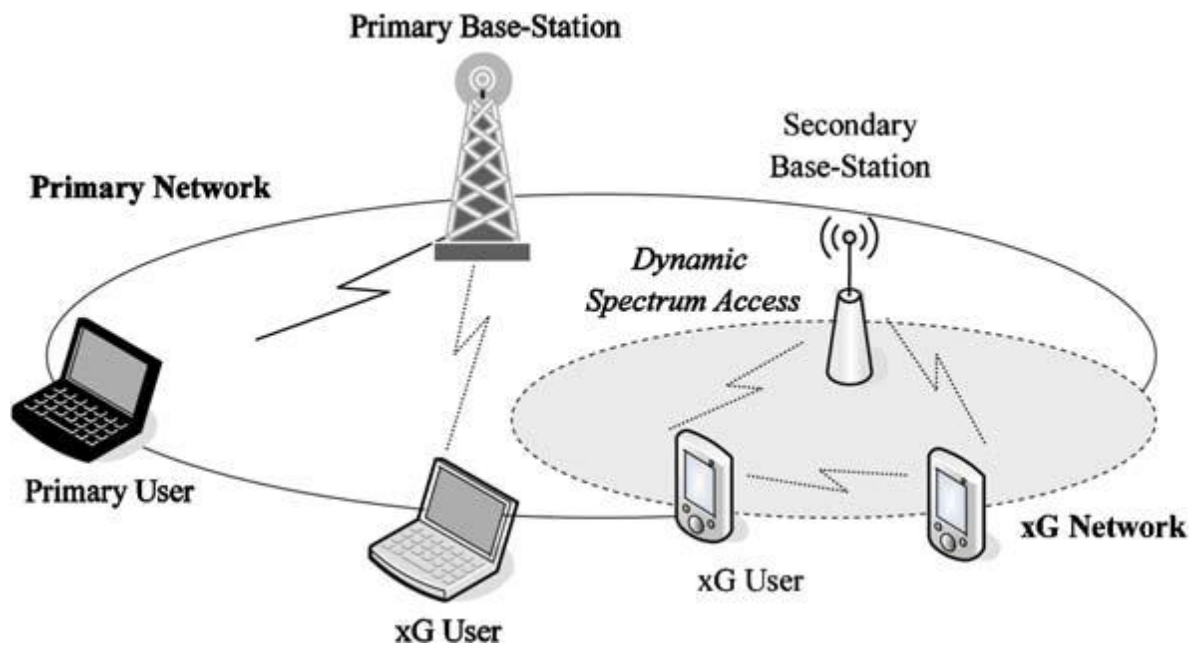


Рис.1.3. МНП у ліцензованому діапазоні

1.3.2 Неліцензований діапазон

Даний сценарій можна охарактеризувати відсутність будь-яких ліцензій чи унікальних прав на діапазони спектру. Таким чином, усі користувачі мають однакову пріоритетність та права на функціонування у одній і тій же частині спектру. Це в свою чергу спричинює ряд питань, що потребують вирішення : підтримання задовільного рівня QoS, ефективна комунікація між користувачами для ефективного виявлення один одного, і основне – справедливий розподіл спектру між усіма учасниками мережі [5-7].

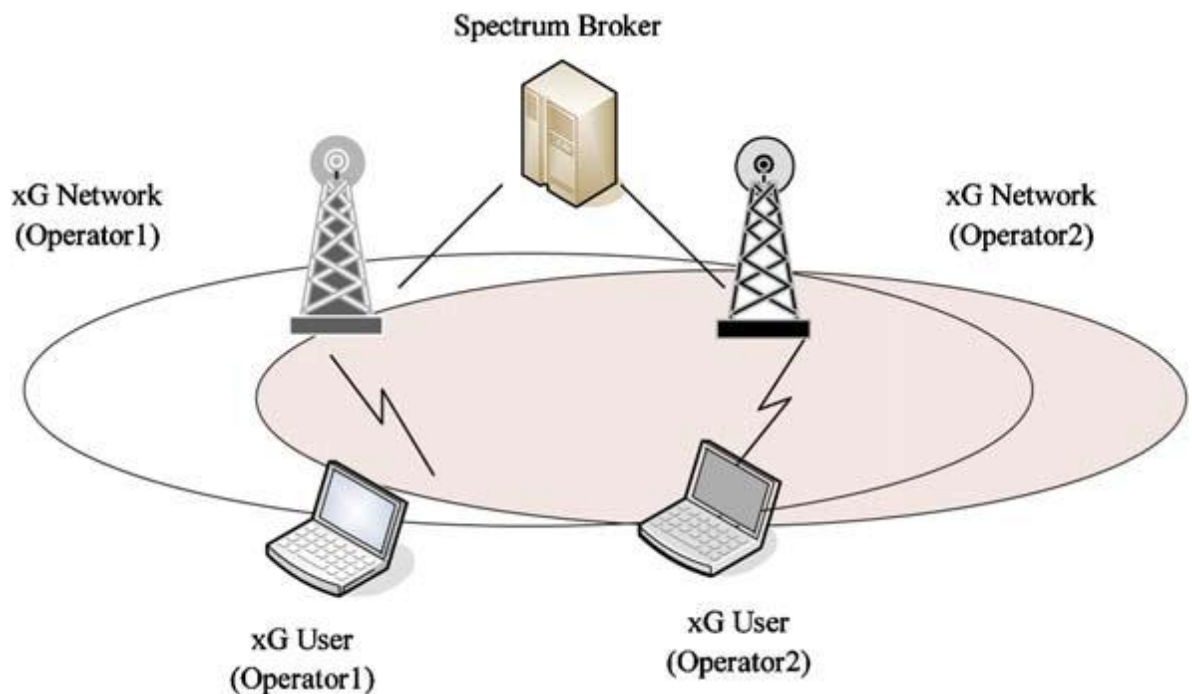


Рис.1.4. МНП у неліцензованому діапазоні

1.4 Висновок

Телекомунікаційні мережі безпроводового доступу наступного покоління на даний час розробляються для знаходження рішень проблем сучасної бездротової мережі, що викликані обмеженнями доступного спектру та ефективності його використання.

Ці мережі забезпечують високу пропускну здатність для користувачі через гетерогенну безпроводову архітектуру. Існуючі архітектури безпроводових мереж використовують гетерогенність з точки зору як політики спектра, так і комунікаційних технологій.

Компоненти архітектури МНП можуть бути класифіковані на дві групи: основну мережу та мережу МНП. Серед елементів основної мережі: основний користувач (PU) та основна базова станція. Серед елементів МНП: користувач

МНП, базова станція МНП та спектральний агент. Як вже пояснювалося у даному розділі, МНП може працювати як в ліцензованих, так і в неліцензованих діапазонах. Отже, функціональні можливості, необхідні для МНП варіюватимуться в залежності від того, ліцензійний чи неліцензійний діапазон спектру.

2. КОГНІТИВНЕ РАДІО

2.1 Введення

Технологія когнітивного радіо є ключовою технологією розглянутих вище мереж наступного покоління. Дана технологія забезпечує можливість використовувати спектр динамічним чином [3].

Ідея когнітивного радіо була офіційно представлена Джозефом Мітолою на семінарі в Королівському технологічному інституті в Стокгольмі в 1998 році [8].

Термін «когнітивне радіо» використовується для опису системи з можливістю виявляти та розпізнавати контекст свого використання, з метою динамічно і автономно коригувати свої параметри роботи, а також дізнатися результати своїх дій та функціонування середовища.

Когнітивне радіо - це форма бездротового зв'язку, в якій передавач / приймач може виявити розумні канали комунікації, які використовуються, а також ті, які не використовуються, і має здатність переміщатись у невикористані канали. Це оптимізує використання доступної радіочастоти спектру при мінімізації перешкод для інших користувачів [9].

2.2 Принцип когнітивного радіо

Принцип CR, що входить до стандартів IEEE 802.22 та IEEE 802.16h [10], вимагає альтернативного управління спектром, тобто: користувач, що називається вторинним (SU), може в будь-який час отримати доступ до вільних частотних діапазонів, тобто таких, які не зайняті основним користувачем (PU) ліцензованої групи. При цьому вторинний користувач зобов'язаний звільнити діапазон по завершенню роботи, чи в той момент, коли даний частотний діапазон знадобиться ліцензованому основному користувачу. Такий незадіяний

радіоспектр відомий також під назвою 'білий простір' [11] або спектральна дірка. Спектральна дірка – це загальна концепція, яка є латентною можливістю для безпечного використання спектру, який не задіяний і розглядається як багатовимірні області в межах частоти, часу і простору [12].

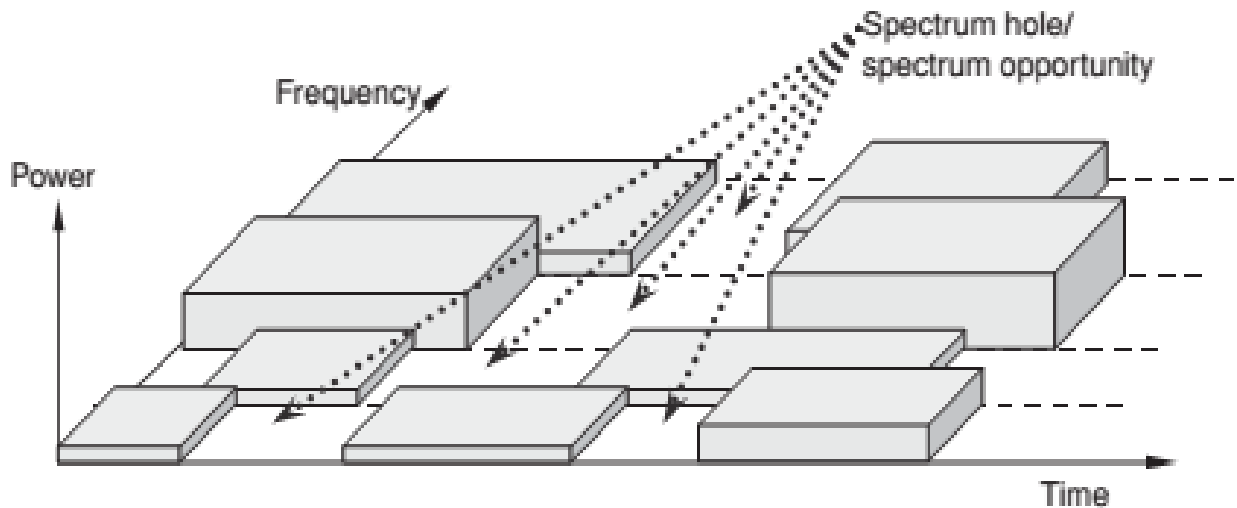


Рис.2.1 Схематичне зображення наявності спектральної дірки

2.3 Основні характеристики

З визначення когнітивного радіо випливає дві основні характеристики даної технології:

1. Когнітивна здатність: здатності виявляти та розпізнавати інформацію з власного середовища. Реалізація даної здатності не обмежується лише моніторингом потужності в деякій смузі частот, що нас цікавить, але реалізується більш складними методами для захоплення тимчасових та просторових варіацій в радіо середовищі і униканням перешкоджання іншим користувачам. За допомогою даної здатності визначаються незадіяні (в певному місці чи часовому відрізку) частини спектра.

2. Реконфігурація: дозволяє динамічну запрограмованість відповідно до умов радіо середовища. Таким чином, когнітивне радіо може бути запрограмоване для передачі і прийому на різноманітних частотах і

використовувати різні технології передачі доступу за підтримки його апаратного забезпечення [13].

2.4 Основні функції

Когнітивна радіосистема вимагає також чотирьох основних функцій, які дозволяють використовувати спектр динамічним чином[14].

1) Зондування спектру.

Основне призначення функції зондування спектру є визначення статусу спектра і активності ліцензованого користувача за допомогою періодичного зондування діапазону цільової частоти. Зокрема, приймач когнітивного радіо виявляє спектр, який не використовується або дірку (у діапазоні, часі чи просторі), а також визначає спосіб доступу до нього (тобто передачі потужності і тривалості доступу) без перешкоджання ліцензованим користувачам.

Зондування спектру може бути централізованим або розподіленим.

При централізованому зондуванні спектру, контролер зондування (точка доступу або базова станція) відчуває цільовий діапазон частот, і отримана інформація використовується спільно з іншими вузлами в системі.

Наприклад, контролер зондування може бути не в змозі виявити неліцензійного користувача на краю осередку.

При розподіленому зондуванні спектру неліцензійні користувачі відчувають спектр незалежно один від одного, і зондування досягається або використовується окремим когнітивним радіо (некооперативне зондування) або спільно з іншими користувачами (кооперативне зондування). Точність зондування при кооперативному зондуванні більша, ніж при некооперативному зондуванні [15].

2) Спектральне рішення.

Для доступу до спектра потрібна модель прийняття рішень. Складність цієї моделі залежить від параметрів, що розглядаються при аналізі спектра.

Модель рішення стає більш складною, коли SU має кілька цілей. Наприклад, SU може мати намір максимально збільшити продуктивність, мінімізувати перешкоди, викликані основним користувачем. Стохастичні методи оптимізації стануть цікавим інструментом для моделювання та вирішення проблеми доступу до спектру в CR.

Коли декілька користувачів (як основних, так і вторинних) знаходяться в системі, то ці користувачі можуть співпрацювати або не співпрацювати у доступі до спектра. У не кооперативному середовищі кожен користувач має свою мету, а в кооперативному - всі користувачі можуть працювати разом для досягнення однієї мети. Наприклад, багато SU можуть конкурувати між собою для доступу до спектру радіосигналу (наприклад, O1, O2, O3, O4 на Рис.2.2.), так що їх індивідуальна пропускна спроможність максимізується. Під час змагань між SU всі гарантують, що перешкоди, спричинені по відношенню до PUs, підтримуються нижче гранично допустимих лімітів.

У кооперативному середовищі CRs співпрацюють один з одним для прийняття рішення щодо доступу до спектру та максимізації цільової функції з урахуванням загальних обмежень. У такому випадку центральний контролер може координувати управління спектром [16].

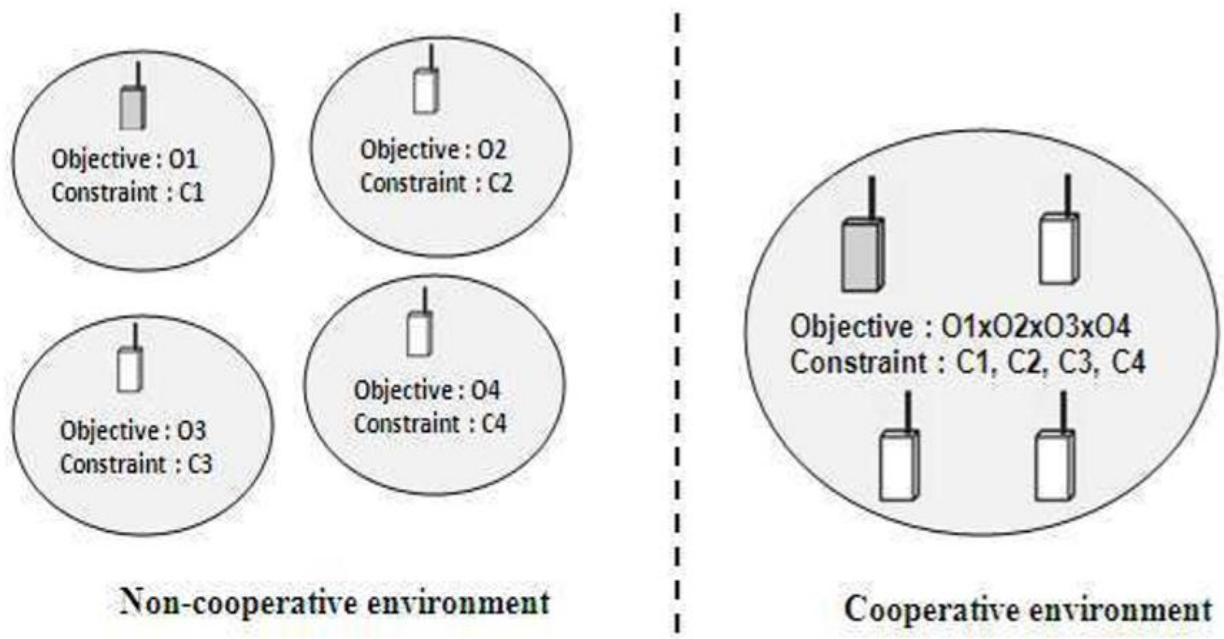


Рис.2.2. Кооперативний та некооперативний доступ до спектру

У розподіленому багатокористувацькому середовищі, при доступі до некооперативного спектра, кожен користувач може самостійно досягти оптимального рішення, спостерігаючи за поведінкою інших користувачів. Тому, щоб SU прийняв рішення про доступ до спектра самостійно (незалежно), потрібен розподілений алгоритм.

3) Спектральний аналіз чи спільне використання спектру.

Результати зондування спектру аналізуються для оцінки якості спектру. Складність тут полягає в тому, як виміряти якість спектру, до якої може отримати доступ SU. Ця якість характеризується співвідношенням сигнал/шум (SNR), середньою кореляцією та наявністю спектральних дір. Інформація про доступну якість спектру для користувача CR може бути неточною. Навчальні алгоритми методів штучного інтелекту можуть бути використані користувачами CR для аналізу спектру [17].

4) Мобільність спектру.

Мобільність спектру - це процес, який дозволяє користувачеві CR змінювати робочу частоту. Мережі CR намагаються використовувати спектр динамічно, що дозволяє радіостанціям працювати у найкращому доступному

діапазоні частот, щоб підтримувати прозорі вимоги до зв'язку під час переходу на більш високу частоту [17].

На Рис.2.3. показані чотири основних функції керування спектром когнітивного радіоциклу, а також взаємодія між ними.

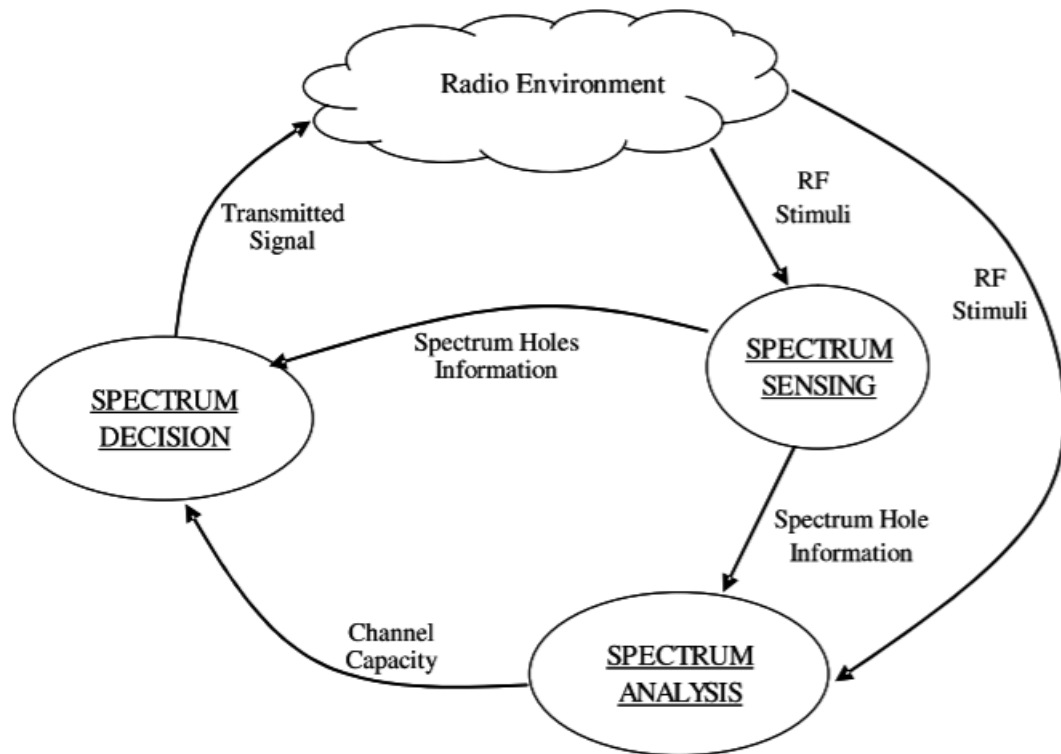


Рис. 2.3. Когнітивне коло

2.5 Висновок

Техноогія когнітивного радіо дозволяє МНП використовувати спектр динамічним чином. Дана технологія забезпечує можливість використовувати і розділяти спектр найбільш зручним та оптимальним чином.

Можна визначити дві основні характеристики когнітивного радіо : а) когнітивна здатність - відноситься до здатності радіо технології виявляти або відчувати інформацію з його середовища; б) реконфігурація - дозволяє радіо бути динамічно запрограмованим відповідно до умов радіо середовища.

До основних функцій технології когнітивного радіо відносяться: зондування спектру; спектральне рішення; мобільність спектру; спільне

використання спектру. Спектр спільного використання дозволяє користувачам когнітивного радіо ділитися смугами спектру ліцензійних користувачів на вторинній основі.

3. ДИНАМІЧНИЙ ДОСТУП ДО СПЕКТРА

3.1 Введення

Вибуховий ріст безпроводових послуг протягом останніх декількох років ілюструє величезний і зростаючий попит споживачів на комунікації, отже спектр стає все більш перевантаженим. Відомо, що статичний розподіл спектру є основною проблемою в області безпроводових мереж. Як правило, такий розподіл призводить до неефективного використання, створюючи порожні діапазони чи пробіли. Для вирішення даної проблеми, мережі CR використовують динамічний доступ до спектра.

Динамічний доступ до спектру є найбільш відомим і важливим застосуванням технології когнітивного радіо. Коли PU хоче почати передачу, то CR дозволяє пристрою звільнити цю смугу і перейти на іншу вільну зону. Смуги PU мають відкритий доступ до мережі SU в такий спосіб, що перешкоди, спричинені по відношенню до PUs - мінімальні [15].

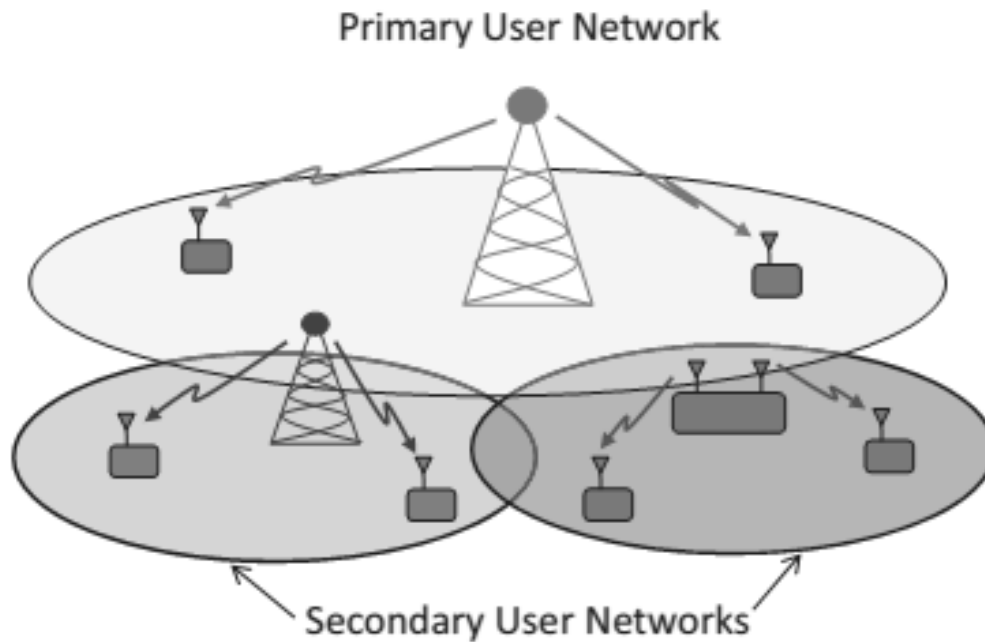


Рис.3.1 Співіснування декількох PUs та SUs

Кооперативна комунікація відома як спосіб подолання обмежень безпроводових систем [18]. Однак, оскільки користувачі, як правило, мають обмежені відомості про своє середовище, можна припустити, що кооперативна поведінка може надати їм необхідну інформацію для вирішення глобальних проблем.

Фактично, SU не володіє ліцензією на використання свого спектру, і може отримати доступ до спектру як відкрито, так і шляхом співіснування з сусідніми ліцензованими користувачами. Цей вид доступу називається "обміном ліцензіями", і досить велика кількість рішень вже існує в літературі [19-21].

3.2 Моделі динамічного доступу до спектра

Динамічний доступ до спектру дозволяє різноманітним користувачам та різним типам сервісів використовувати радіо спектр.

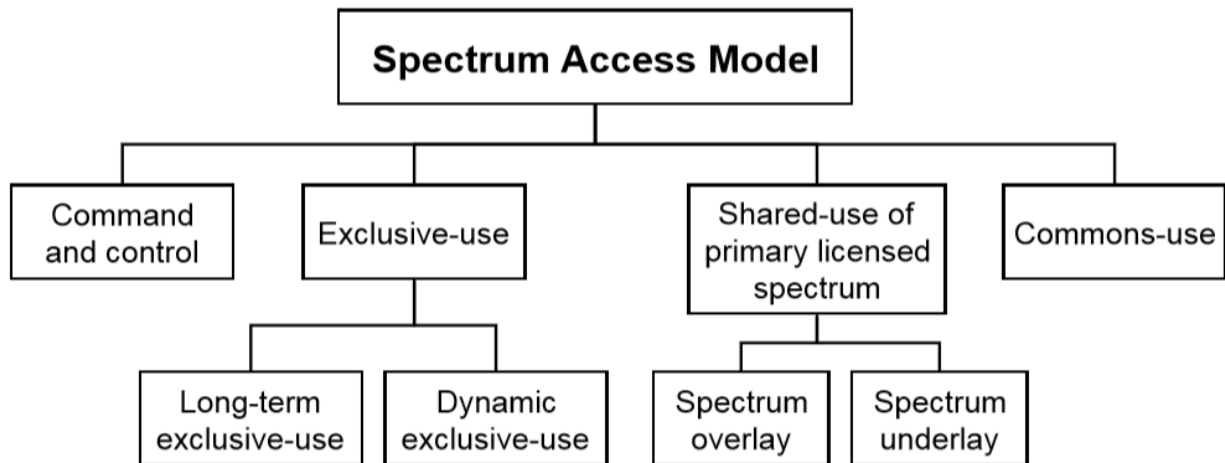


Рис.3.2. Моделі динамічного доступу до спектра

1) Модель ексклюзивного використання.

У даній моделі єдиний користувач має унікальне право на володіння та використання спектра. Умовно дану модель можна розділити ще на два підтипи:

- Довготривале ексклюзивне використання [22] – можна охарактеризувати наявністю ліцензій на стільникову службу, можливістю зміни бездротових технологій (GSM, CDMA, OFDMA). При цьому такі критерії як визначений власник ліцензії і її тривалість – лишаються незмінними.
- Динамічне ексклюзивне використання: основна концепція полягає в поліпшенні ефективності використання спектру шляхом введення гнучкості. Включає в себе два основних підходи: права володіння спектром і динамічний розподіл спектру. Перший підхід дозволяє ліцензії на продаж і торгівлю спектром, а також вільний вибір технологій. Другий підхід прагне підвищення ефективності спектру через динамічне призначення спектру з використанням статистики просторового і часового трафіку різних послуг [11].

2) Модель спільного використання ліцензійного спектру.

Можна продемонструвати за допомогою нище наведеної схеми:

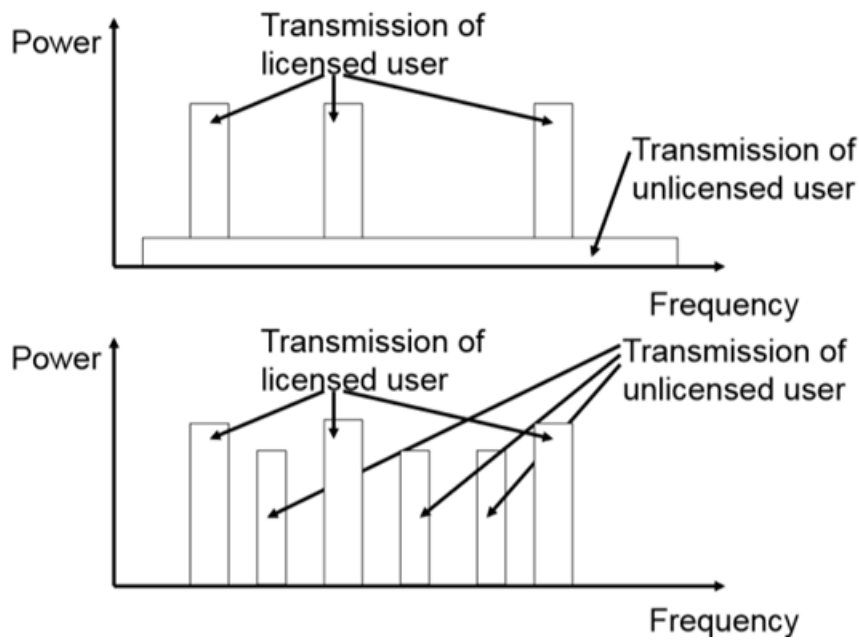


Рис.3.3. Модель спільного використання ліцензійного спектру

Дана модель включає в себе два підходи:

- Спектральне підкладання UWB (Spectrum Underlay).

Даний підхід обмежує передавальну потужність SU таким чином, що вони здатні працювати нижче граничної температури інтерференції PU. Один з можливих підходів є передача сигналів у дуже широкому частотному діапазоні (UWB комунікації), таким чином висока швидкість передачі даних забезпечується надзвичайно низькою потужністю передачі. Спектральне підкладання ґрунтується на найгіршому випадку, коли первинні користувачі передають весь час, без зупинок, таким чином не використовуючи спектр білого простору.

Технології UWB працюють в використовуваному спектрі на дуже низькій потужності для іншого ліцензійного чи неліцензійного використання, але без обмеження користувачів. Використання UWB не ліцензоване.

- Спектральне накладання OSA (Spectrum Overlay).

Даний підхід необов'язково накладає жорсткі обмеження на потужність передачі вторинними користувачами - дозволяє вторинним користувачам

ідентифікувати та експлуатувати дірки спектру, визначені в просторі, часі та частоті (відкритий доступ до спектру). Даний підхід сумісний з існуючим розподілом спектру - старі системи можуть продовжувати працювати не зазнаючи впливу вторинних користувачів. Регуляторна політика визначає основні правила для вторинних користувачів для забезпечення сумісності з старими системами [23-24].

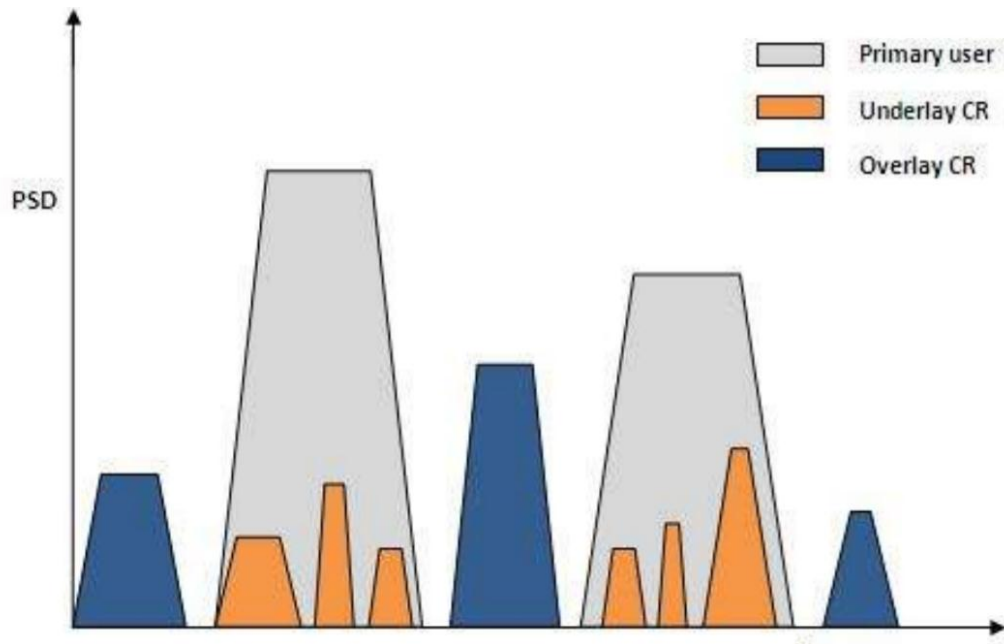


Рис.3.4. Спектральне підкладання та спектральне накладання

3.3 Архітектура динамічного доступу до спектра

Розглянемо архітектуру даного підходу.

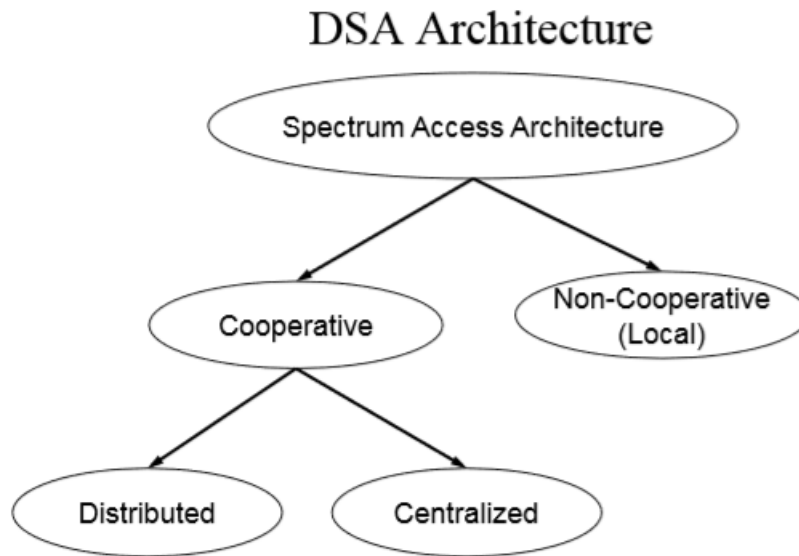


Рис.3.5. Архітектура DSA

1) Некооперативний (локальний) доступ до спектра:

- Кожен когнітивний вузол несе відповідальність за свої власні рішення
- Якщо велика ймовірність виявлення помилок, політика доступу повинна бути консервативною. Якщо імовірність помилкової тривоги є великою, політика доступу повинна бути агресивною, тобто стратегія доступу може бути спільно оптимізована за допомогою стратегії зондування.
- Мінімальні вимоги до зв'язку (отже, менші накладні витрати), але використання спектру може бути низьким.

2) Кооперативний централізований DSA:

- Централізований сервер підтримує базу даних доступності спектру та інформації про доступ (на основі інформації, отриманої від вторинних користувачів, наприклад, через спеціальний канал керування).
- Управління спектром є простішим та скоординованим та дає можливість ефективного спільного використання спектру.

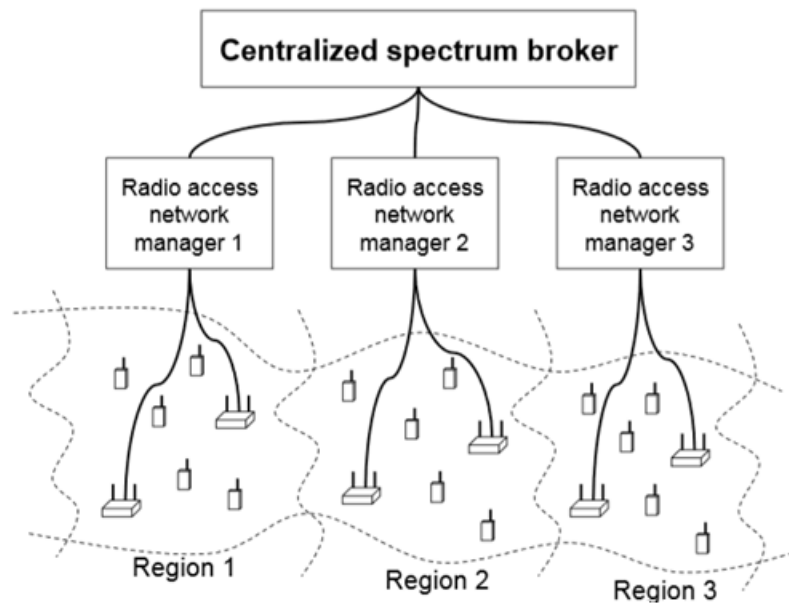


Рис.3.6. Кооперативний централізований DSA

3) Кооперативний розподілений DSA:

- Заснований на кооперативній локальній дії по всій мережі (для досягнення продуктивності, близької до глобальної оптимальної продуктивності).
- Може страждати через проблему прихованих вузлів та великих накладних витрат на управління
- У централізованій та розподіленій стратегії головний користувач може співпрацювати або не співпрацювати [25].

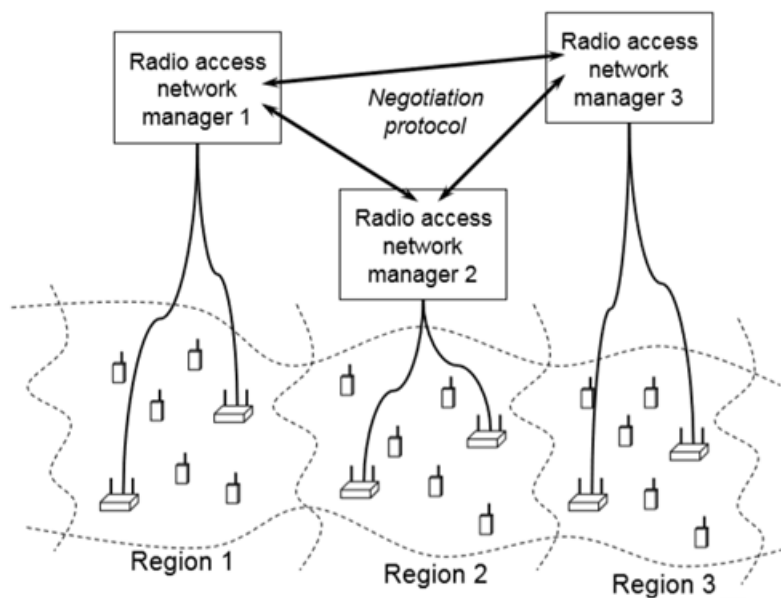


Рис.3.7. Кооперативний розподілений DSA

На шляху до реалізації DSA зіштовхується з рядом труднощів таких, як :

- як розподілити спектр серед вторинних користувачів;
- локальна оптимізація (рішення приймається не кооперативним способом - розподіляється);
- глобальна оптимізація (кооперативне рішення - централізоване або розподілене);
- як повідомляти про рішення щодо доступу до спектра серед когнітивних радіопередавачів та приймачів;
- цінові підходи/методи для DSA.

3.4 Висновок

Концепція динамічного доступу до спектру полягає у визначенні мертвих зон спектра (смуг частот, які є достатньо вільними, щоб бути використаними) або білих просторів і використанні їх для комунікації.

За допомогою DSA радіосистема динамічно адаптується до наявних дірок (вільних частотних смуг) у спектрі з обмеженим використанням у відповідь на зміну оточуючих обставин та умов. DSA широко використовується в когнітивній мережі, а його важливість спонукає появу різноманітних методів та алгоритмів його реалізації.

DSA можна розділити на некооперативний доступ до спектру, тобто локальний, де кожен когнітивний вузол несе відповідальність за свої власні рішення, а також кооперативний доступ до спектру. Останній в свою чергу поділяється на централізований та розподілений доступ до спектру.

4. ПРОБЛЕМА РОЗПОДІЛУ СПЕКТРА

4.1 Введення

Спектральний розподіл SA (Spectrum allocation) відповідає за присвоєння найбільш підходящої частотної зони на інтерфейсі когнітивного радіопристрою за деякими критеріями (можливості максимально збільшити пропускну спроможність, ефективність спектра тощо), одночасно уникаючи перешкод для основних мереж, що працюють в одній географічній зоні. Функція SA для кожного SU повинна визначати не тільки центральну частоту, а також пропускну здатність спектру, яка буде використовуватися цим SU. Більш того, доступні частоти та спектральні діри динамічно змінюються з часом і місцем розташування. Проблема SA полягає у складності реалізації.

4.2 Процедура рішення проблеми спектрального розподілу

Процедура рішення проблеми спектрального розподілу в мережах когнітивного радіо CRN (Cognitive radio networks) полягає у проходженні трьох наступних кроків [26]:

- Вибір критеріїв, що визначають цільову мету. Наприклад таких критеріїв, як максимізація пропускну спроможності, максимальна кількість даних, мінімізація перешкод, спектральна ефективність, енергоефективність тощо.
- Вибір відповідної методики для моделювання проблеми SA, яка найкраще відповідає цільовій меті. Наприклад таких підходів, як евристичний метод, лінійне проблемне програмування, теорія графів, теорія ігор тощо.
- Кінцевим кроком є вибір процедури або алгоритму, який спростить та допоможе вирішити проблему SA для досягнення цільової мети.

4.3 Методи вирішення проблеми спектрального розподілу

Розглянуті деякі з існуючих методів, які використовуються для вирішення проблеми SA.

1) Лінійне програмування

Проблема з координованим доступом до спектра у багатокористувацькій мережі CR з одним трансивером формулюється як змішана цільна проблема нелінійного програмування MNLP (Mixed integer non linear programming problem). Проблема в MLNP може бути перетворена в двійкове лінійне програмування BLP (Binary linear programming). Завдяки його цілісності в природі це можна вирішити, використовуючи лінійне програмування у часі програмування [27].

2) Евристика.

Одним з найпростіших методів, які використовуються для вирішення розподілу спектру, є евристичний підхід. У випадках, коли вичерпний пошук є недоцільним, евристичні методи можуть бути прийняті, щоб знайти швидке рішення. Вони дозволяють використовувати моделі, що більш репрезентують реальні проблеми. У [28] розподіл каналів здійснюється на основі евристичної моделі, в якій кооперація вузлів використана для покращення продуктивності відстеження спектру.

3) Нечітка логіка

Система, заснована на нечіткій логіці FLS (Fuzzy Logic System) унікальна тим, що вона здатна одночасно обробляти числові дані та мовні знання. Нечітка логіка може бути використана в тих випадках, коли потрібні конкретні висновки на основі нечіткої, неоднозначної, неточної вхідної інформації. У [29] запропоновано новий підхід, що використовує FLS, який використовується для управління процедурами розподілу та доступу до спектру, щоб запобігти зіткненню кількох користувачів з частинами спектра, що накладаються. Одним

з недоліків методу нечіткої логіки є те, що дуже важко визначити точні правила, коли беруться до уваги численні параметри.

4) Теорія графів

В [30] технологія графів мережі використовується як технологія вирішення проблеми розподілу частот. Мережеві графи широко використовувалися в призначенні когнітивного спектру, в основному для випадків, коли структура мережі вважається відома апіорі. Проблема розподілу вирішується шляхом нанесення (відображення) когнітивної мережі на граф. Основним недоліком моделювання графів є те, що складно враховувати всі параметри CRN, такі як вимоги QoS тощо.

5) Теорія ігор

Теорія ігор вважається найбільш підходящим математичним інструментом для вирішення конфліктів між користувачами. Вона намагається знайти оптимальне рішення, яке максимізує потреби усіх учасників мережі, не шкодячи один одному. Вперше дана теорія була застосована в економіці, проте на даний час вона широко застосовується у багатьох галузях, а від недавня і в когнітивних радіо мережах.

4.3 Висновок

Проблема спектрального розподілу особливо актуальна для технології динамічного доступу до спектру і потребує вирішення.

Вирішення даної проблеми можливо у три кроки: вибір критерії, що визначають мету, вибір методики для моделювання проблеми, вибір алгоритму спрощення проблеми.

Серед методів вирішення виділяють лінійне програмування, евристичний метод, метод нечіткої логіки, теорію графів і теорію ігор, що вважається

найбільш оптимальним та раціональним способом до вирішення вище зазначеної проблеми.

5. ТЕОРІЯ ІГОР

5.1 Введення

Теорія гри – це сукупність математичних моделей та технік, що були розроблені в економіці, для аналізу інтерактивних процесів прийняття рішень, прогнозування результатів взаємодії, визначення оптимальних стратегій [осн док].

Техніка ігрової теорії була прийнята для вирішення багатьох питань проектування протоколів (наприклад, розподіл ресурсів, управління потужністю, співпраця правозастосування) в безпроводових мережах.

Фундаментальним компонентом теорії ігор є саме поняття гри.

Поняття гри можна описати набором раціональних гравців, стратегій, пов'язаними з гравцями, і виграшів для гравців. Раціональний гравець має свій власний інтерес, і тому він буде діяти, вибравши доступну стратегію для досягнення своїх інтересів.

Передбачається, що гравець зможе точно або імовірно оцінити результат або виграш (зазвичай вимірюваний утилітою) гри, яка залежить не тільки від його дії, але й від дій інших гравців.

5.2 Підхід, що використовує теорію ігор

Розглянемо метод, що використовує теорію ігор GTA (Game Theoretic Approach).

GTA може бути пояснений як математична структура, що включає в себе моделі та методи, які використовуються для аналізу поведінки рішень індивіда, з огляду на його інтерес до власної вигоди. В загальному ж, це математичний інструмент, що аналізує та планує взаємодію між декількома особами, що приймають рішення.

Основними компонентами даного підходу є: особи, що приймають рішення; простір дій; комплект утиліт (чи функцій виграшу).

$$G = \{N, A_1, A_2, \dots, A_N, U_1, U_2, \dots, U_N\} \quad (1)$$

- 1) Особи, що приймають рішення (**N**): вважається, що кожна гра має скінченне число осіб, що приймають рішення або гравців N .
- 2) Простір дій (**A**): кожен гравець 'i' має свій власний простір дій (A_i), який є набором дій, що включає в себе всі можливі дій, до яких може вдатись гравець. Загальний простір дій 'A' можна вирахувати наступним чином.

$$A = A_1 \times A_2 \times A_3 \times \dots \times A_N \quad (2)$$

- 3) Комплект утиліт: це набір утиліт чи функцій виграшу для усіх гравців.

$$U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_N\} \quad (3)$$

Когнітивний приймач має здатність відчувати і переналаштувати власні параметри пристрою відповідно до навколишнього середовища.

За допомогою цієї гнучкої власності приймача, використання спектра може бути покращено при використанні поділу смуги частот спектра серед ліцензованих (PU) і неліцензованих (SU) користувачів.

Беручи до уваги егоїстичну поведінку поточних мережевих пристроїв, критерій спільного використання з теорії ігор буде покликаний максимізувати задоволення потреб первинного і вторинного користувачів [31].

Коли виділений частотний спектр використовується не повністю первинними користувачами, то вони можуть отримати більше прибутку, продаючи його вторинним користувачам, які хочуть використовувати його. При зондуванні невикористаного спектра частот постає необхідність у відповідних критеріях. Коли численні покупці і продавці існують, то олігополістична модель ціноутворення використовується для методу обміну.

Спільне використання спектра може бути змодельоване як ринок олігополії, де основний користувач має недостатню кількість спектра, щоб

продати його у зв'язку з визначеними схемами використання каналу первинними користувачами. Для вторинних користувачів, ця недостатня кількість спектра менш приваблива, так як вторинні користувачі хочуть утримувати смугу частот невикористаною якомога довше. Таким чином, необхідно враховувати переваги довгого часу перебування [32].

5.2.1 Формулювання часу перебування.

Під часом перебування мається на увазі та кількість часу, яку об'єкт передбачається провести у системі, перш ніж покинути систему назавжди.

Формульно час перебування можна виразити так:

$$f_x = \int \frac{1-F(x)}{E[x]} dx \quad (4)$$

Де x – деяка випадкова величина, $F(x)$ – функція розподілу, $E[x]$ – очікуване значення випадкової величини.

$$L_i = \int_t^{t+T_p} x^{1-F} \cdot \frac{T_{OFF}^1(x)}{E[T_{OFF}^1]} dx \quad (5)$$

Де t - перший чутливий час серед послідовного зондування. Це обмеження часу перебування розглядається як межа попиту на канал i .

5.2.2 Статична модель Бертрана

Розглянемо статичну модель Бертрана.

У цій моделі є взаємодія між фірмами (продавцями) і їх клієнтами (покупцями). Покупці вибирають обсяги за ціною, зафіксованою продавцями. Ми можемо сформулювати гру Бертрана наступним чином.

Стратегія кожного каналу гравця (PU) - встановити ціну одиниці кількості спектра. Віддачею є отримання прибутку від продажу спектра вторинних користувачів. Кількість спектра (тобто попит з боку вторинних користувачів) залежить від цінової конкуренції (тобто якості каналу) і не може перевищувати

потужність (тобто часу перебування обмеження). Рішення гри - встановити чисті стратегії для досягнення рівноваги Неша.

Функція прибутку для кожного каналу основного користувача задається наступним чином:

$$p_i * q_i = -b_i p_i^2 + (a_i + \sum_{j \neq i} c_{ij} p_{ij}) p_i \quad (6)$$

У теорії ігор, якщо кожен гравець вибрав стратегію і жоден гравець не може принести користь, змінивши свою стратегію, в той час як інші гравці зберігають її незмінною, тож поточний набір варіантів стратегії і відповідні виплати складають рівновагу Неша.

Математично для отримання рівноваги Неша в цій грі ми повинні вирішити декілька граничних функції прибутку (тобто, часткова диференціація функції прибутку по p_i): $\partial \pi_i(p) / \partial p_i = 0$ для всіх учасників ігор в такий спосіб:

$$p_i = \frac{a_i + \sum_{j \neq i} c_{ij} p_{ij}}{2b_i} \quad (7)$$

Таким чином, ми можемо отримати рівновагу Неша при обмеженні часі перебування (попит перевищує ємність) на вимогу (тобто q_i) і ємність (тобто, L_i), що еквівалентно наступному:

$$p_i = \frac{a_i - L_i + \sum_{j \neq i} c_{ij} p_{ij}}{b_i} \quad (8)$$

5.3 Типи ігор

5.3.1 Кооперативні та некооперативні ігри

На основі співпраці серед користувачів, ігри можуть бути класифіковані як кооперативні та некооперативні. У кооперативній грі існує обов'язкова згода серед користувачів. Кожен користувач має уявлення про простір дії інших і відповідні йому утиліти. Для обміну цією інформацією є загальний канал

керування. Тому користувачі співпрацюють у прийнятті рішень таким чином, щоб отримати сприятливу для всіх рівновагу Неша. З іншого боку, в некооперативних іграх користувачі поведуться егоїстично. Кожен турбується лише про свою користь. Тому для таких ігор потрібен більш швидкий алгоритм конвергенції для досягнення рівноваги Неша [33]. Більш детально огляд даних ігор буде проведений у наступних розділах.

5.3.2 Статичні та динамічні ігри

Виходячи з часу прийняття рішення, ігри можна класифікувати як статичні та динамічні. У статичних іграх гравці роблять свої кроки в ізоляції, не знаючи, що зробили інші гравці. Але це не обов'язково означає, що всі рішення приймаються одночасно, а скоріше, якби рішення приймалися одночасно. У динамічній грі існує послідовність порядку гри [34]. Обсяг інформації, доступний гравцям, може змінюватися з часом. Тому гравці можуть спостерігати за тим, як інші грають і приймають рішення відповідно до прогресу гри.

5.3.3 Стратегічні та екстенсивні (великі) ігри

Стратегічні ігри також називаються звичайними іграми. У цьому типі гри гравці приймають рішення одночасно на початку гри. Звичайні ігри завжди представлені за допомогою трьох елементів: кількості гравців, місця дії та корисності. У великих іграх гравці приймають рішення, реагуючи на дії інших гравців, коли йде прогрес [26]. Тут гра грається кілька разів, і гравці можуть спостерігати за результатами попередньої гри, перш ніж відвідувати наступне повторення. Великі ігри представлені як ігрове дерево, що складається з чотирьох елементів, тобто. вузли, гілки, вектори та набір інформації. Тому ігри в обширній формі дають додаткову інформацію, необхідну для опису гри, такої

як час прийняття рішень та обсяг інформації, доступної кожному гравцеві, коли необхідно прийняти кожне рішення.

1) Гра в нормальній (стратегійчній) формі.

Дана форма гри характеризується такими показниками:

- Гравці: скінченна кількість гравців, $\{1, 2, \dots, N\}$;
- Набір ігрових рішень (стратегій), $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N$;
- Комплект утиліт (функцій виграшу) $\{U_1, U_2, U_3, \dots, U_N\}$.

Як приклад можна розглянути дилему в'язнів:

- Гравці: двоє підозрюваних;
- Набір ігрових рішень (стратегій): {Мовчання, Каяття};
- Комплект утиліт (функцій виграшу): $U_1(\text{Каяття}, \text{Мовчання})=0$,
 $U_1(\text{Мовчання}, \text{Мовчання})=-2$, ..., $U_2(\text{Мовчання}, \text{Каяття})=-10$,
 $U_2(\text{Мовчання}, \text{Мовчання})=-2$, ...

		Suspect 2	
		Confess	Quiet
Suspect 1	Confess	-5,-5	0,-10
	Quiet	-10,0	-2,-2

Рис. 5.1 Ілюстрація дилеми в'язнів

2) Гра в екстенсивній (великій) формі.

Розглянемо чотири основні елементи ігрового дерева даної гри.

- Вузли: це позиція в грі, де один з гравців повинен прийняти рішення.
Перша позиція, яка називається початковим вузлом, є відкритою точкою,

а всі інші заповнюються. Кожен вузол позначається так, щоб визначити, хто приймає рішення.

- Філії: вони представляють альтернативні варіанти, з якими стикається гравець, і відповідно відповідають доступним діям.
- Вектори: це відображення виплат для кожного гравця. Коли ці вектори виграшів є загальновизнаними, гра вважається такою, що володіє повною інформацією. Якщо гравці, однак, не впевнені в тому, що інші гравці можуть отримувати виплати, то це неповна інформаційна гра.
- Набори інформації: коли шість чи більше вузлів з'єднані пунктирною лінією, це означає, що гравець, прийняв рішення не знати, у якому вузлі він або вона. Коли це відбувається, гра характеризується як гра, що володіє недосконалою інформацією. Коли кожному вузлу рішення має власний сет інформація, то гру характеризують як таку, що володіє досконалою інформацією, оскільки всі гравці знають результат попередніх рішень.

Example: The Prisoner's Dilemma

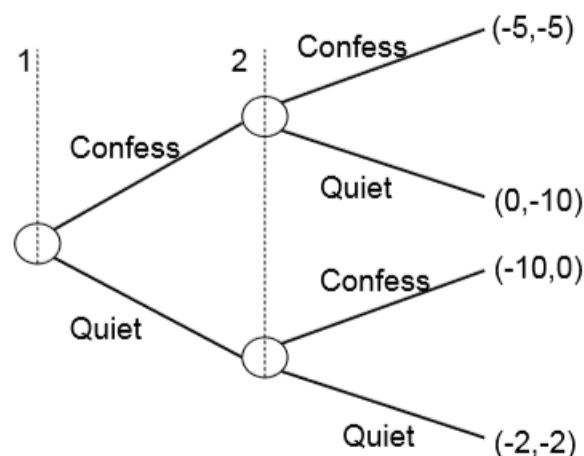


Рис. 5.2 Ілюстрація дилеми в'язнів для даного випадку

У той час як нормальна форма дає мінімальний обсяг інформації, необхідної для опису гри, в екстенсивній формі надається додаткова інформація про гру щодо часу прийняття рішень та обсягу інформації, доступної кожному гравцеві, коли кожне рішення має бути зроблено .

Для кожної екстенсивної форми гри існує одна і єдина відповідна нормальна гра. Для кожної гри у нормальній формі існують, загалом, кілька відповідних екстенсивних ігор.

5.3.4 Статична гра в нормальній формі

Статичні ігри переважно представлені як звичайні ігри. Оскільки в таких іграх кількість інформації, що доступна гравцям, не змінюється протягом гри, і час рішень не впливає на вибір гравців.

Спробуємо змоделювати дану гру.

Зауважимо[35]: Нехай a – це профіль дій, в якому дія кожного гравця і є a_i . Нехай a'_i - будь-яка дія гравця і (або дорівнює a_i , або відрізняється). Тоді (a'_i, a_{-i}) позначає профіль дії, в якому всі гравці, крім і, дотримуються a , в той час, як і "відхиляється" до a'_i . Наприклад, в іграх з трьома гравцями (a'_2, a_{-2}) позначає профіль дії, в якому гравці 1 та 3 дотримуються певного часу, а гравець 2 відхиляється до a'_2 .

5.3.5 Рівновага Неша.

Рівновага неша NE (Nash Equilibrium) – це профіль дій a^* з такою властивістю, що жоден гравець і не може покращити свій виграш, обрав стратегію відмінну від a_i^* , враховуючи що кожен інший гравець j дотримується a_j^* . Отож для кожного гравця і, справедлива нерівність $u_i(a^*) \geq u_i(a_i, a_{-i}^*)$.

Рівновага Неша відповідає стабільному стану гри серед «досвідчених» гравців. Являє собою результат, що досягається одночасною максимізацією окремих виплат.

Якщо рівновага Неша є загальновизнаною, то кожен гравець дійсно відтворюватиме стратегію рівноваги Неша, в результаті чого буде відтворена рівновага Неша. Іншими словами, профіль стратегії NE є саморегулюючою структурою. Якщо гравці шукають результати або рішення, від яких ніхто не матиме стимулу відхилитись, то єдиними стратегічними профілями, які задовольняють таку вимогу, є профілі рівноваги Неша.

Приклад рівноваги Неша на основі дилеми в'язнів:

- Гравці: двоє підозрюваних S_1 та S_2 ;
- Набір ігрових рішень (стратегій): {Мовчання, Каяття};
- Комплект утиліт (функцій виграшу): $U_1(\text{Каяття}, \text{Мовчання})=0$, $U_1(\text{Мовчання}, \text{Мовчання})=-2$, ..., $U_2(\text{Мовчання}, \text{Каяття})=-10$, $U_2(\text{Мовчання}, \text{Мовчання})=-2$, ...

Гравець 1 надає перевагу (К, М) аніж (М, М) аніж (К, К) аніж (М, К)

Гравець 2 надає перевагу (М, К) аніж (М, М) аніж (К, К) аніж (К, М)

		Suspect 2	
		Confess	Quiet
Suspect 1	Confess	-5,-5	0,-10
	Quiet	-10,0	-2,-2

Рис.5.3. Дилема в'язнів у стратегічній формі гри

Таким чином, єдиною рівновагою Неша тут є комплект утиліт (Каяття, Каяття). Для того, щоб показати, що пара дій не є рівновагою Неша, достатньо показати, що один гравець бажає відхилитися від неї (NE стійка до будь-якого

однобічного відхилення). Загалом, в рівновазі Неша дія для гравця є оптимальною, якщо інші гравці вибирають свої NE дії, але інша дія є оптимальною, якщо інші гравці вибирають невірні дії [25].

Розглянемо приклад гри без NE.

P1 грає T -> P2 грає L -> P1 грає B -> P2 грає R (відсутність NE)

		Player 2	
Player 1	Strategy	L	R
	T	(0,3)	(3,0)
	B	(3,0)	(0,3)

Рис.5.4. Гра без рівноваги Неша

5.4 Застосування ігор в динамічному доступі до спектра

У розподілі динамічного спектра PU дозволяє лізинг спектру в обмін на різні типи компенсацій, таких як гроші або ресурси. У грошово-компенсаційній моделі розподілу спектра PU збирає прибуток у відповідь на лізинг спектру. Стратегія спільного використання спектра компенсації грошей часто є ефективною, коли PUs мають деякі тимчасово незадіяні ресурси.

Більшість пов'язаних робіт зосереджені на некомерційному характері користувачів. Тут конкуруючі користувачі є егоїстичними та динамічними. Кожен користувач приймає свої рішення / дії одночасно, не повідомляючи один одного. Такі ситуації можна моделювати за допомогою некооперативної гри Стакелберга, теорії аукціону [34]. Утиліта - це сума необхідної потужності та суми отриманих / сплачених доходів. У конкурсі для простою PU вибирає лише декілька людей, з якими вона отримує максимальну вигоду. Ці користувачі

мають право на доступ до незадіяного спектру у годинах, днях або навіть місяцях, сплачуючи відповідні гроші PU.

Для моделі компенсації грошей потрібна надійна білінгова система, за допомогою якої PU та SU можуть торгувати спектром на основі їхніх реальних індивідуальних потреб, що важко спроектувати на практиці. У таких випадках модель компенсації ресурсів є кращим вибором, в якому PU можуть отримати полегшення продуктивності за допомогою SU в обмін на смуги спектру. У методі спільного використання спектра обговорюється, чи SU бажає ретранслювати трафік PU для отримання переваг від можливостей передачі. Збірна гра використовується для моделювання взаємодії PU-SU, де як PU, так і SU конкурують за власними перевагами. Теорія відповідності використовується в ситуаціях для опису взаємовигідних відносин між двома непересічними наборами, такими як PU та SU.

Гра Стакелберга може бути використана для моделювання багатокористувацької кооперативної комунікації. Дана гра є стратегічною грою в контексті лідер/послідовник, в якій лідер вибирає своє рішення спочатку, а потім послідовники налаштовують свої дії відповідно до лідерського рішення. У дистрибутивному кооперативному повідомленні джерело моделюється як покупець, а вузли ретранслюють як "продавці" [36]. Гра йде таким чином, що джерело знаходить покупця у відносно кращих місцях і "купує" оптимальну кількість енергії, але також допомагає конкуруючим покупцям максимізувати власні утиліти, задаючи оптимальні ціни. Таким чином, стратегія покупця-продавця відтворюється у грі Стакелберга, де покупець або вихідний вузол виступають як лідер, а продавці як послідовники.

У розподіленому середовищі, в якому кілька SUs обмінюються результатами зондування один з одним, потрібен спеціальний загальний канал керування. Загальний канал керування може мати обмежену зону покриття

через неоднорідність спектра. Завдання полягає в призначенні якнайменше можливих частотних каналів як загальних каналів управління в вторинній користувацькій мережі. Кожен вторинний користувач віддає перевагу частотним каналам без будь-якої або мінімальної основної активності користувача. Проблему можна легко моделювати, використовуючи некооперативну гру, названу потенційною грою. Потенційна функція розроблена таким чином, що утиліти всіх SU можуть бути зіставлені. Точка рівноваги Неша виявляється за допомогою найкращої динаміки відповідей для послідовних та асинхронних оновлень стратегії [30].

5.5 Висновок

Динамічний розподіл спектру визнано ключовим механізмом, який забезпечує ефективну роботу як МНП, так і первинних мереж. Його основна ідея полягає в тому, щоб присвоїти діапазони спектрів вторинним користувачам, щоб уникнути перешкод ліцензованим користувачам та максимізувати їх ефективність. У даному розділі був розглянутий найбільш оптимальний та прийнятний метод вирішення проблеми розподілу спектру динамічним чином – теорія ігор.

Теорія ігор, прийнята з економіки, була розвинена як ефективний математичний інструмент для вирішення конфліктів серед користувачів. Були розглянуті основні концепції теорії ігор та різні типи ігор.

6. КООПЕРАТИВНА ГРА

6.1 Введення

Розглянемо проблему спільного розподілу спектра між основним користувачем та кількома вторинними користувачами, де основний користувач формує добірку вторинних користувачів, яка слугує кооперативними реле для його передачі. У свою чергу, основний користувач отримує частину часу доступу каналу для власної передачі. Основний користувач вирішує, яку частину часу доступу до каналу надати для обраних вторинних користувачів (тобто кооперативних реле), а кооперативні реле вирішують рівень їхньої потужності, який використовується для досягнення пропорційного часу доступу до каналу. Згідно з [37], що основний користувач та вторинні користувачі є раціональними та егоїстичними, тобто вони ставлять за мету лише максимізацію власних потреб.

В ідеальному сценарії, основний користувач обирає правильну частину часу доступу каналу для кооперативних реле, для досягнення найвищого рівня потужності. Цікавим є випадок сформульований в [38], де розглядається проблема некооперативної гри між основним користувачем та вторинними користувачами. Згідно з [39], унікальна точка рівноваги була досягнута використовуючи ітеративний алгоритм оновлення.

Де точка рівноваги може бути сформульована як сукупність:

- 1) Nash рівноваги що існує в некооперативній грі з вибором рівня потужності, $G = [S, \{T_i\}, \{U_i\}]$. Nash рівновага існує в некооперативній грі, таким чином, ми можемо отримати функцію найкращого відгуку, коли перша похідна від U_i щодо P_i дорівнює 0, тобто

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_i} = (1 - \alpha) w_i \frac{G_{i,P} G_{P,i} \sum_{j \in S, j \neq i} (P_j G_{j,P} G_{P,j})}{(\sum_{j \in S} (P_j G_{j,P} G_{P,j}))^2} R_i - \frac{1}{2} \alpha = 0 \quad (9)$$

для довільного обраного вторинного користувача $i \in S$. Через прості маніпуляції ми маємо

$$P_i^* = \frac{1}{G_{i,P}G_{P,i}} \left(\sqrt{2w_i \frac{1-\alpha}{\alpha} G_{i,P}G_{P,i}AR_i} - A \right), \quad (10)$$

$$\text{якщо } A < 2w_i \frac{1-\alpha}{\alpha} G_{i,P}G_{P,i}R_i, \quad (11)$$

$$\text{де } A = \sum_{j \in S, j \neq i} (P_j G_{j,P} G_{P,j}). \quad (12)$$

Рівновага Неша в некооперативній грі є унікальною. Використовуючи рішення рівняння для кожного вторинного користувача $i \in S$ в (13) запропонованого в [40], можна отримати унікальну Nash рівновагу:

$$P_i^* = \frac{2(1-\alpha)(N_0-1)}{\alpha G_{i,P}G_{P,i}B^2} \left(B - \frac{N_0-1}{w_i G_{i,P}G_{P,i}R_i} \right), \quad (13)$$

$$\text{де } B = \sum_{j \in S} \frac{1}{w_j G_{j,P}G_{P,j}R_j}, \quad (14)$$

а N_0 - загальна кількість обраних вторинних користувачів, тобто $N_0 = |S|$.

- 2) Оскільки мета основного користувача - максимізувати корисність, вибравши оптимальний параметр α^* .

Параметр може бути вираженим з рівняння

$$\alpha^* = \alpha^*(\sigma^2, \{w_i\}, \{G_i\}, \{G_{i,P}\}, \{G_{P,i}\}), i \in S. \quad (15)$$

Маючи оптимальний параметр α^* та відповідний оптимальний коефіцієнт потужності P_i^* , ці два рішення утворюють рівновагу Штакельберга.

6.2 Впровадження моделі кооперативної гри

Протокол співпраці був запропонований в [41], який може бути реалізований у практичній системі. Якщо що канали стабільні то на основі цієї інформації основний користувач може вибрати належний набір вторинних користувачів як кооперативні реле та обчислити оптимальний параметр ділянки

α^* . На початку передачі основний користувач встановить параметр $\alpha = 1$, після чого він зменшуватиметься поступово, доки α досягне оптимального значення. Також основний користувач транслюватиме значення основні параметри для вторинних користувачів, так що вторинні користувачі можуть обчислити свій оптимальний рівень потужності, відповідний отриманій величині α .

6.2.1 Вибір реле

Оскільки весь аналіз вище спирається на припущення, що реле вже було обране, ми обговоримо метод вибору реле в цьому підрозділі. Щоб розмістити можливих користувачів у хорошому становищі в мережі, ми вибираємо вторинних користувачів, які задовольняють критеріям вибору описаним в [42]. Тоді ми виберемо вторинних користувачів як реле за алгоритмом, наведеним на Рис.6.1.

A. Relay Selection Algorithm	
1:	put all the secondary users in the network into relay set S
2:	arrange the secondary users in this order: $w_1 G_{1,P} G_{P,1} R_1 \geq w_2 G_{2,P} G_{P,2} R_2 \geq \dots \geq w_{N_S} G_{N_S,P} G_{P,N_S} R_{N_S}$
3:	for $t = 0$ to $N_S - 1$ step by 1 do
4:	$N_0 = N_S - t$
5:	$flag = \sum_{j \in S} \frac{1}{w_j G_{j,P} G_{P,j} R_j} - \frac{N_0 - 1}{w_{N_0} G_{N_0,P} G_{P,N_0} R_{N_0}}$
6:	if $flag \leq 0$ then
7:	remove secondary user N_0 from relay set S
8:	else
9:	break
10:	end if
11:	end for

Рис.6.1. Алгоритм вибору реле

6.2.2 Ітераційний алгоритм для основного користувача

Також в [41] був запропонований алгоритм оновлення для досягнення рівноваги Штакельберга. Оскільки обрані вторинні користувачі повинні

адаптувати свою стратегію відповідно до стратегії основного користувача, основний користувач може розглядатися як "лідер", а обрані вторинні користувачі можуть розглядатися як "послідовники". Треба лише спроектувати алгоритм оновлення для основного користувача, щоб досягти його оптимального параметра α^* . Тоді, кожен обраний вторинний користувач досягне власного оптимального рівня потужності P_i^* .

Параметр α було встановлено рівним значенню 1, а потім поступово зменшувався. Це рішення є оптимальне оскільки основний користувач збільшить час, що залишився для передачі вторинних користувачів. Відповідно, обрані вторинні користувачі збільшать свій коефіцієнт потужності P_i , що збільшить швидкість передачі основного користувача.

Алгоритм оновлення був визначений таким чином: спочатку був встановлюємо $\alpha = 1$. У кожному циклі основний користувач обчислює свою корисність відповідно до поточного значення α і записує його та порівнює його корисність у попередньому циклі. Якщо корисність основного користувача все ще збільшується, тобто не досягнуте оптимальне α^* . Якщо α буде меншим за дуже мале значення δ , це може означає, що досягнуто оптимальне α^* , тоді ми α визначається як $\alpha + \delta$, що є оптимальним α^* . Потім ми припиняємо оновлення α . Весь процес оновлення представлений в таблиці В. Очевидно, що ми можемо нарешті досягти значення, яке лежить в інтервалі $(\alpha^* - \delta, \alpha^* + \delta)$. Коли δ достатньо мале значення, можна вважати отримане значення як α^* .

B. Updating Algorithm	
1:	<i>flag</i> = 0 /* <i>flag</i> identifies whether optimal α^* is achieved */
2:	<i>record</i> = 0 /*used for recording primary user's previous utility */
3:	$\alpha = 1$
4:	for $t = 1$ to L do /* L is a number large enough*/
5:	calculate U_P according to (17)
6:	if $U_P > record \&\& flag == 0$ then
7:	$\alpha = \alpha - \delta$ /* δ is a number small enough*/
8:	$record = U_P$
9:	elseif $U_P < record$ then
10:	$\alpha = \alpha + \delta$
11:	$flag = 1$
12:	end if
13:	end for

Рис.6.2. Алгоритм оновлення

6.3 Результати моделювання і аналіз

Опираючись на модель аналізу запропонованого в [40] де початкові приймачі розташовані випадковим чином на квадратну одиницю, центровану на відповідному вторинному передавачі. Коефіцієнт втрат поширення становить 2. В мережі існує 10 вторинних користувачів. Рівень шуму $\sigma^2 = 10^{-4}$ та крок оновлення $\delta = 10^{-5}$.

На Рис.6.3. представлена топологія моделюючої мережі. Сині кола та зелені квадрати означають вторинні передавачі ST та вторинному приймачі SR, відповідно, пара ST та SR з'єднана зеленою лінією. Вторинні передавачі, вибрані як первинні передавачі ідентифікуються зафарбованими колами; в той час як інші вторинні передавачі ідентифікуються порожнистими колами.

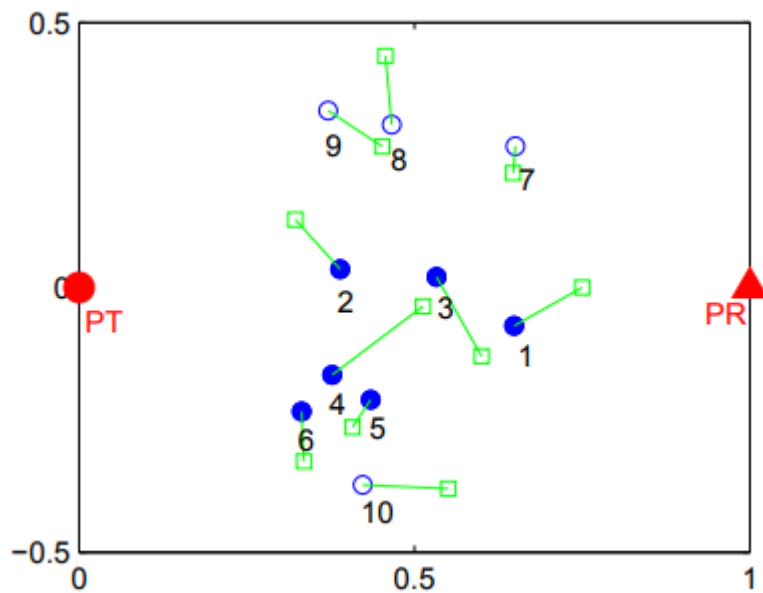


Рис.6.3. Топологія системи

З рисунка легко зрозуміти, що перші 6 вторинних користувачів вибираються як первинні передавачі як кооперативні реле. Існує два фактори, які впливають на вибір реле: розташування вторинного передавача та відстань між вторинним передавачем та вторинним приймачем. Оскільки вторинний користувач отримає більший дохід від співпраці з однаковими витратами електроенергії, такий вторинний користувач матиме більше стимулів брати участь у співпраці, що є корисним для основного користувача. З цієї причини всі вибрані вторинні користувачі на рисунку мають прийнятне положення та відстань між передавачем і приймачем не є занадто довгою.

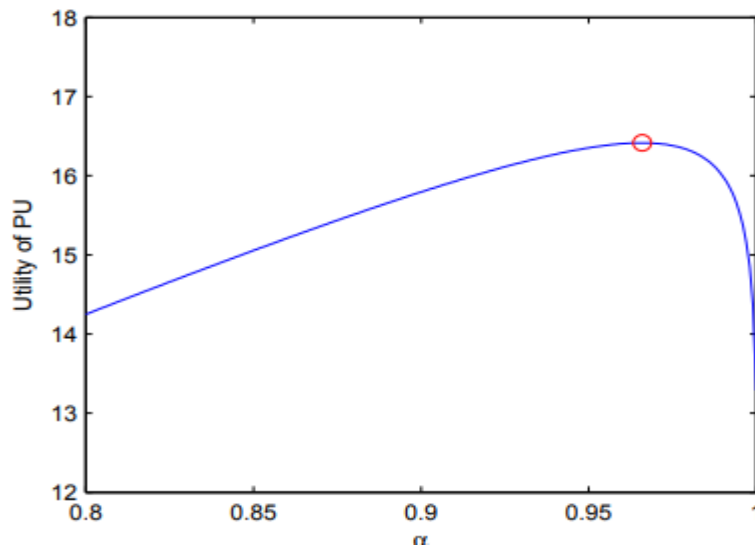


Рис.6.4. Оптимальне значення α первинного користувача

На Рис.6.4 показано корисність основного користувача, коли α коливається від 0 до 1. Виявляється, що коли $\alpha^* = 0,96$ то відповідне оптимальне використання первинного користувача $UP(\alpha^*) = 16,43$. Коли $\alpha = 1$, основний користувач зберігає весь часовий простір для власної передачі, $UP(1) = 13.2879$. Відповідно до результатів моделювання, покращення у використанні ресурсу основного користувача становить 20% ~ 35%.

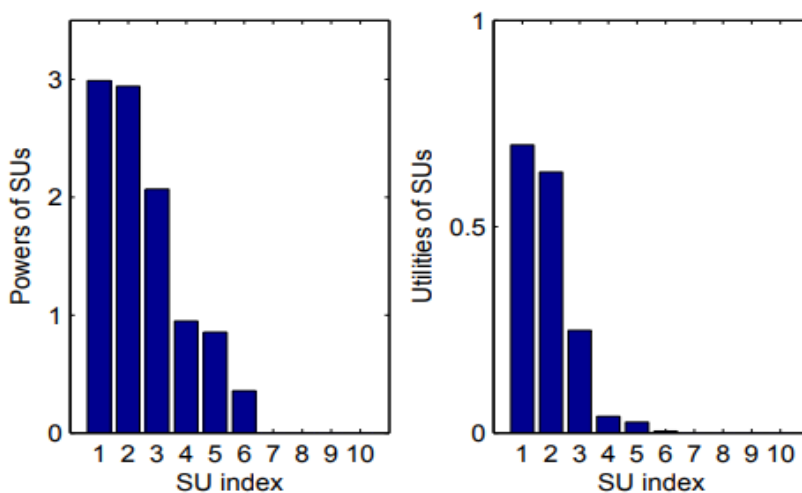


Рис.6.5. Оптимальна потужність і використання ресурсу вторинних користувачів

На Рис.6.5. вище вторинний користувач, що має кращий стан каналу, пропонує вищу кооперативну потужність та отримує більший дохід. Вторинний користувач що має кращий стан каналу буде отримувати більший дохід від співпраці з однаковими витратами на енергію, тому він буде схильний пропонувати вищу кооперативну потужність. У свою чергу, завдяки підвищенню кооперативної потужності та збільшенню надходження каналу, вторинний користувач із хорошим станом каналу отримає більший дохід, тобто більшу корисність. Також зрозуміло, що вторинні користувачі, які не обрані, не дають жодної сили, а їх корисність 0.

6.4 Висновок

Як висновок, можна характеризувати запропонований новий механізм співпраці в когнітивній мережі радіо, де первинний користувач вибирає належних вторинних користувачів як кооперативне релеб як такий що має переваги і недоліки. У свою чергу, основний користувач орендує частину часового інтервалу для вторинних користувачів для їх передачі. У запропонованому механізмі можливість доступу вторинних користувачів позитивно корелює з рівнем кооперативності. Також запропонований в [40] метод вибору ретрансляції для розміщення всіх можливих користувачів у мережі.

7. НЕКООПЕРАТИВНА ГРА

7.1 Введення

Розглянемо дану некооперативну гру динамічного доступу до спектра, як популяційну гру (population game) [43], де використовується динаміка реплікатора для моделювання еволюції стратегій вторинних користувачів. Це дозволяє вивчити ситуацію, в якій вторинні користувачі коригують свої стратегії динамічно адаптуючи свої вибори до заторів, отриманих на кожному бездротовому каналі.

З цією метою спочатку представимо фонові дані про популяційні ігри, які є простою основою для опису стратегічних взаємодій серед великої кількості гравців. Потім коротко проілюструємо динаміку реплікатора, що дозволяє моделювати поведінку агентів, що грають в такі ігри.

7.2 Популяційні ігри

Популяційна гра G , з Q неатомними класами гравців визначається масою та стратегією, встановленими для кожного класу, і функцією виплат (виграшу) для кожної стратегії. Під неатомною популяцією гравців, мається на увазі, що внесок кожного учасника популяції є нескінченно малим. Набір класів позначається як $Q = \{1, \dots, Q\}$, і кожен клас асоціюється з масою, що позначена як $m^q > 0$. Нехай S^q – набір стратегій, доступних для гравців класу q , де $S^q = \{1, \dots, s^q\}$.

Під час гри всі гравці класу q вибирають стратегію з S^q . Маса гравців класу q , що обрали стратегію $p \in S^q$, визначена як x_n^q , де $\sum_{n \in S^q} x_n^q = m^q$. Позначимо вектор розподілу стратегії, який використовується даною популяцією як $x = \{x^1, \dots, x^Q\}$, де $x^i = \{x_1^i, \dots, x_{s^i}^i\}$. Вектор x можна розглядати як стан системи.

Гранична функція виплат (за одиницю маси) гравців класу q , які грають стратегію n , коли стан системи x , позначається через $F_n^q(x)$. Таким чином, загальний виграш гравців класу q $\sum_{n \in S^q} F_n^q(x) x_n^q$.

7.3 Динаміка реплікатора

Динаміка реплікатора описує поведінку великої кількості агентів, які випадково підібрані для гри у іграх звичайної форми. Це вперше було продемонстровано в біології Тейлором та Джонкером [44] для моделювання еволюції видів, і також використовується в галузі економіки. Останнім часом така динаміка була застосована до багатьох мережевих проблем, таких як маршрутизація та розподіл ресурсів [45, 46].

Враховуючи x_n^q , який представляє частку гравців класу q , які вибирають стратегію n , як показано раніше, динаміка реплікатора може бути виражена наступним чином:

$$\dot{x}_n^q = x_n^q \left(F_n^q(x) - \frac{1}{m^q} \sum_{n \in S^q} F_n^q(x) x_n^q \right), \quad (16)$$

де $\dot{x}_n^q$ являє собою похідну від x_n^q по часу.

7.4 Динаміка реплікатора для гри динамічного доступу

Використовуємо динаміку реплікатора, щоб змоделювати та проаналізувати поведінку вторинних користувачів у грі, орієнтуючись на нееластичний трафік.

Нееластичний трафік: кожен SU $i \in U$ має фіксовану кількість потоків (r^i) для передачі, та прагне мінімізації своєї цільової функції, котра відображає загальну вартість заторів, сприйману на всіх використаних каналах.

Вартість, сприймана нескінченно малими SUs в популяції і, які використовують канал задана як:

$$C_n^i(x_n) = (x_n^i r^i) \left[a_n \left(\sum_{k \in U} a_{k,i}^n x_n^k r^k + f_n^{PU} \right)^{\beta(n)} + b_n \right], \quad (17)$$

де $x_n = \{x_n, \dots, x_n^l\}$.

Динаміка реплікатора:

$$\dot{x}_n^i = x_n^i [V^i(x) - v_n^i(x_n)], \quad (18)$$

де $v_n^i(x_n)$ - є маргінальною вартістю заторів, яка передбачає наступну форму:

$$\begin{aligned} v_n^i(x_n) = \frac{\partial C_n^i}{\partial f_n^i} = a_n \left(\sum_{k \in U} a_{k,i}^n x_n^k r^k + f_n^{PU} \right)^{\beta(n)} \\ + a_n \beta(n) x_n^i r^i \left(\sum_{k \in U} a_{k,i}^n x_n^k r^k + f_n^{PU} \right)^{\beta(n)-1} + b_n, \end{aligned} \quad (19),$$

в той час коли $V^i(x) = \sum_{n \in V} x_n^i v_n^i(x_n)$ середня вартість популяції.

Обґрунтування рівняння (18) полягає в наступному: коли гравець і спостерігає (маргінальні) витрати на затори на каналі n, що перевищує середню вартість, що відчувається на всіх доступних каналах, він зменшує кількість потоку, що передається на цьому каналі. У протилежному випадку він реагує, збільшуючи таку суму.

7.5 Моделювання гри в залежності від параметра, що цікавить

Перед початком моделювання, оговоримо декотрі необхідні змінні та розглянемо один з можливих сценаріїв гри.

Розгляд гри буде проведено з урахування набору $V = \{1, \dots, N\}$ первинних операторів, кожен з яких працює на окремому частотному спектрі F_n і має власних первинних користувачів, а також набір $U = \{1, \dots, I\}$ вторинних користувачів SU (Secondary User), які бажають розділяти частотні спектри $\{F_1, \dots, F_n\}$ з основними користувачами.

Кожен SU може одночасно передавати по декількох смугах спектра, розподіляючи свій трафік на безліч доступних каналів, тим самим вибираючи, які первинні оператори будуть транспортувати свій трафік. Розглядається два різних типи трафіку:

1. Нееластичний трафік: кожен SU має фіксовану кількість потоку для передачі, і має на меті мінімізувати його об'єктивну функцію, що являє собою загальну вартість затворів (затримок), виявлену на всіх використовуваних каналах.

2. Еластичний трафік: у цьому випадку вимоги користувачів залежать від витрат через перевантаження каналів, а також від корисності, що визначається при передачі трафіку через доступні канали.

Для розгляду вищеописаної системи мережі когнітивного радіо може бути використаний наступний сценарій (Рис.7.1):

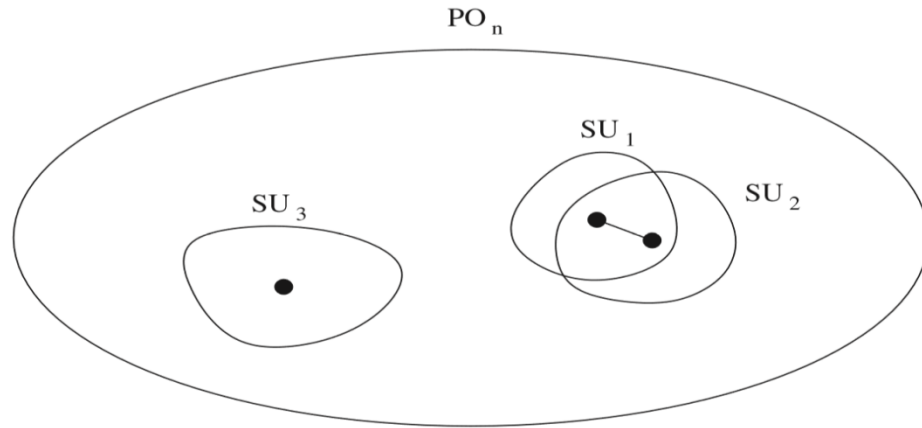


Рис.7.1. Приклад сценарію

Рис.7.1 ілюструє приклад сценарію з одним первинним оператором та трьома вторинними користувачами (SU_1 , SU_2 and SU_3): SU_1 та SU_2 взаємодіють один з одним на каналі n , в той час як SU_3 не взаємодіє з жодним з них [47].

У даному сценарії матриця інтерференції A_n має вигляд:

$$A_n = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

7.6 Нееластичні SU: прості CRN сценарії

Нижче будуть розглянуті деякі прості топології мережі когнітивного радіо з різними моделями інтерференції, а саме мережеві сценарії з 4-х користувачів і ланцюгові сценарії мережі, обговорюючи якість рівноваги Неша, що досягається вторинними користувачами, шляхом визначення меж до (параметру) Ціни анархії PoA (Power of Anarchy).

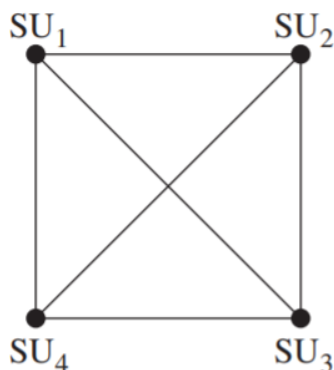
7.6.1 Сценарії 4х користувачів

Розглянемо мережу когнітивного радіо з двома основними операторами POs (Primary operators), тобто двома безпроводовими каналами та 4-ма SUs

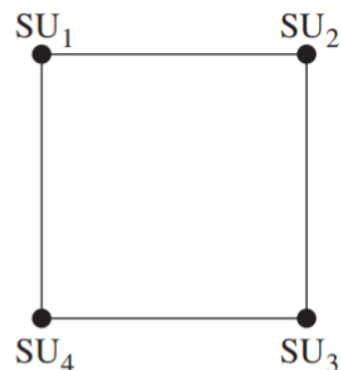
(SU₁, SU₂, SU₃ та SU₄), усі мають такі ж вимоги до трафіку $r^i = 1$. Для оцінки впливу інтерференційної матриці на ефективність даної гри, розглянемо два різні сценарії: повної та часткової інтерференції між SUs.

У випадку повної інтерференції PoA дорівнює 1, так як, як в рівновазі Неша, так і в оптимальному рішенні, всі SUs розділяють свій трафік рівномірно на доступні канали. З іншого боку, в сценарії часткової інтерференції існують нескінченні точки рівноваги Неша, тобто ті, в яких SU₁ та SU₃ передають p та $1 - p$ одиниць трафіку відповідно на канали 1 та 2, тоді як SU₂ та SU₄ передають $1 - p$ та p одиниць трафіку на цих каналах ($p \in [0,1]$). Загальна вартість цих рівноваги: $-8p^2 + 8p + 4$, що припускає його максимальне значення, 6, для $p = 1/2$; з іншого боку, при оптимумі SU₁ - SU₃ відправляють весь свій трафік на один канал, а SU₂ - SU₄ - на інший, загальною вартістю 4, що приводить до PoA = 3/2.

Отже, можна помітити, що якість рівноваги, що досягається користувачами когнітивного радіо, суттєво залежить від конкретного сценарію інтерференції, але при цьому, при повній інтерференції отримаємо PoA, який нижче отриманого для сценарію часткового втручання.



(a)



(b)

Рис.7.2. Сценарії 4х користувачів: графи інтерференції. (а) Повна інтерференція та (б) часткова інтерференція між користувачами SUs.

7.6.2. Ланцюговий сценарій інтерференції CRN

Розглянемо ланцюговий сценарій інтерференції, зображений на Рис.7.3., з двома безпроводовими каналами та I вторинними користувачами. Для всіх користувачів $r^i = 1$. З точки зору соціально-оптимального рішення: користувачі $SU_1, SU_3, SU_5 \dots$ передають весь свій трафік на одному каналі, а користувачі $SU_2, SU_4, SU_6 \dots$ передають виключно на інший, загальною вартістю I . У рівновазі Неша, натомість, замість цього всі користувачі розділяють трафік однаково на доступні канали, що призводить до витрат, рівних $3/2$ для гравців $SU_2, SU_3, \dots, SU_{I-1}$, і дорівнює 1 для зовнішніх користувачів SU_1 та SU_I . Тому, в такому випадку, PoA буде представлена таким виразом:

$$PoA = \frac{3/2(I - 2) + 2}{I} = \frac{3I - 2}{2I}, \quad (20)$$

що збільшується з I , і що обмежується зверху при $3/2$ для $I \rightarrow \infty$. Отже, збільшення числа вторинних користувачів призводить до більш неефективної поведінки мережі.

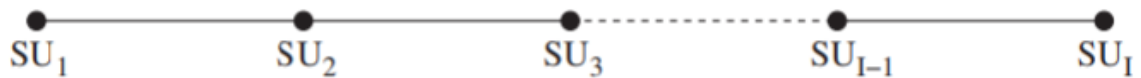


Рис.7.3. Ланцюговий сценарій: граф інтерференції.

7.7 Нееластичні вторинні користувачі: випадкові сценарії CRN

Випадкові мережеві сценарії когнітивного радіо отримуються за допомогою спеціального генератора, який розглядає квадратну область з краєм, рівним 1000, і випадково витягує положення I вузлів, кожен з яких відповідає SU. SU i інтерферує з SU k , тільки якщо останній знаходиться на відстані не більше R , інтерференційного діапазону i . Припускаємо для простоти, що такий діапазон для всіх вторинних користувачів однаковий.

Для кожного випадкового CRN-сценарію отримані результати усереднюють кожну точку на 3000 екземплярів, отримуючи таким чином дуже дрібні 95% довірчі інтервали, які для наочності не показані на рисунках.

7.7.1. Вплив кількості SUs (I)

Рис.7.4. ілюструє середнє значення RoA за даними інтерференційних діапазонів для різних значень I ($I \in [2,20]$). Можна спостерігати, що для обох, малих і високих, інтервалів діапазон RoA дуже малий (тобто близько 1). Ці два сценарії відповідають, відповідно, повній відсутності інтерференції та повній інтерференції між SU.

Крім того, RoA збільшується, коли число вторинних користувачів стає більшим, як ланцюговому сценарію інтерференції. Тому можна стверджувати, що координувати роботу декількох вторинних користувачів важче, що призводить до більш неефективної рівноваги мережі. Проте, потрібно відзначити, що найгірший RoA, який можна виміряти у всіх розглянутих випадках, і для всіх значень I , дорівнює 1.606, що все ще є прийнятною втратою ефективності щодо оптимуму бажаної мережі.

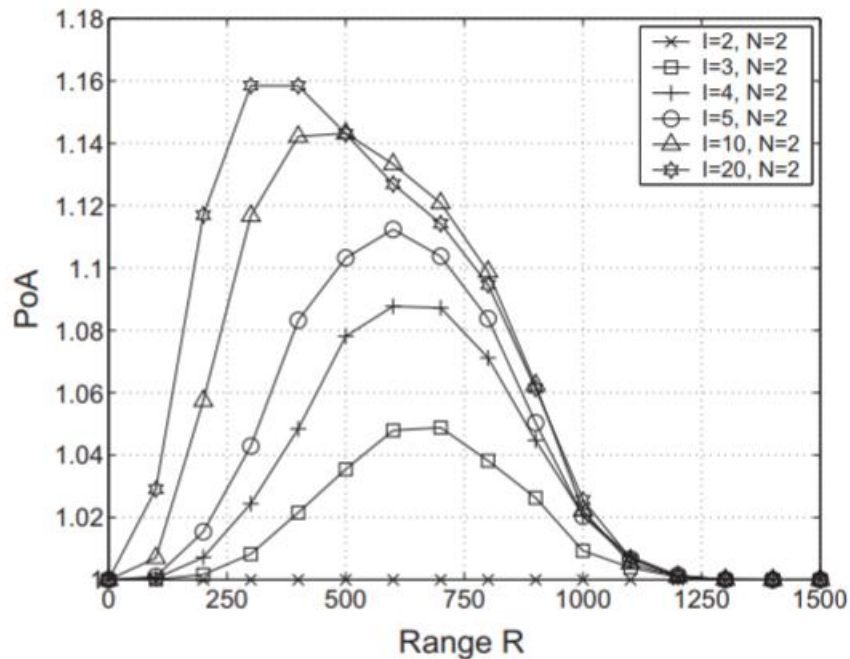
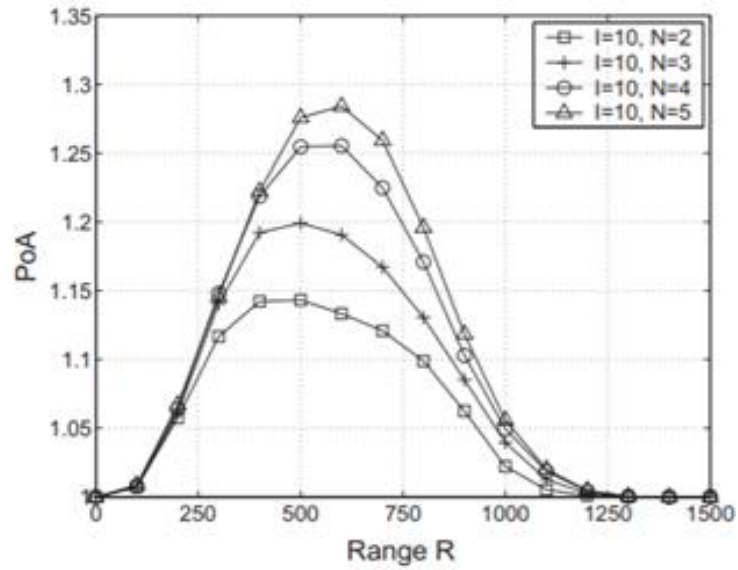


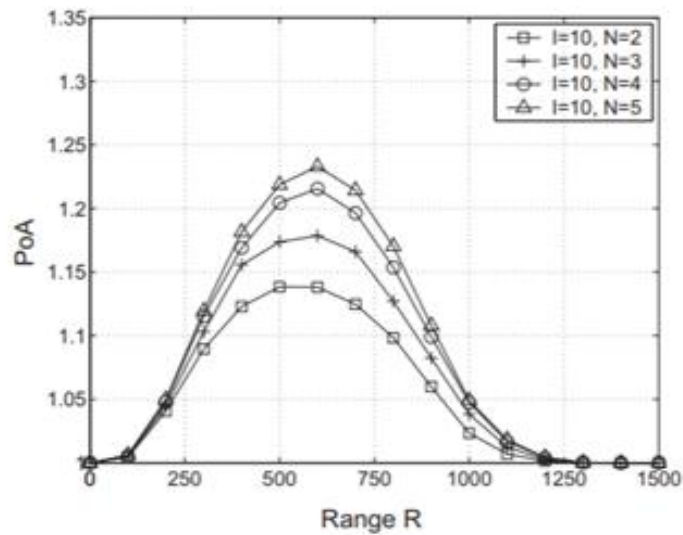
Рис.7.4. Нееластичні вимоги: середній PoA виміряний в сценаріях CRN з $N = 2$ доступними безпроводовими каналами та різною кількістю SU ($I \in [2, 20]$).

7.7.2. Вплив кількості безпроводових каналів (N)

Збільшимо кількість безпроводових каналів від 2 до 5, фіксуючи кількість SUs до 10; діапазон інтерференцій R змінюється від 0 до 1500. На Рис.7.5.(а) показано середнє значення PoA, отримане в таких сценаріях. Можна помітити, що такий показник збільшується з кількістю безпроводових каналів. Інтуїтивно, це пов'язано з тим, що коли N зростає, стратегічний простір SUs також збільшується, що призводить до потенційно гіршої рівноваги Неша. Таким чином, наявність більшої кількості каналів додатково посилює втрату ефективності, що можна спостерігати, особливо для проміжних значень R ($250 \leq R \leq 750$).



(a) $r^i = 1$



(b) $r^i = \{1/2, 3/2\}$

Рис.7.5. Нееластичні вимоги: середній PoA виміряний в сценаріях CRN з $I = 10$ користувачами та різним числом доступних каналів ($N \in [2,5]$); (а) 10 SUs для всіх них $r^i = 1$, та (б) 10 гетерогенних SUs (5 SUs мають $r^i = 1/2$, а інші - $r^i = 3/2$).

7.7.3 Вплив швидкості передачі (r^i)

Розглянемо варіацію попереднього сценарію, припустимо, що 5 користувачів пропонують таку швидкість, що дорівнює $1/2$, а інші 5 мають $r^i = 3/2$, таким чином підтримуючи той же загальний пропонований трафік (рівний 10), для можливості порівняння. Якщо порівнювати результати вимірювань у цьому сценарії, представлені на Рис.7.5. (б), з тими, які отримані для однорідних вимог до трафіку (Рис.7.5. (а)), бачимо, що РоА завжди менше, коли вимоги до трафіку різні. По суті, це пов'язано з тим, що на якість рівноваги найбільше впливає вибір користувачів "слонів" (тих, хто пропонує $r^i = 3/2$), і менше – користувачів "мишей" ($r^i = 1/2$). Отже, поведінка мережі ближче до когнітивної мережі радіозв'язку з меншою кількістю SU, і, як зазначалося раніше, коли число таких користувачів зменшується, РоА також зменшується (Рис.7.4.).

7.8 Еластичні вторинні користувачі: сценарії 4х користувачів CRN

Розглянемо вторинних користувачів з еластичними вимогами до трафіку [47].

Для сценарію повної інтерференції, зазначемо $\text{РоА} = 1.562$, в той час, як для сценарію часткової інтерференції маємо $\text{РоА} = 1$. Отже, на відміну від нееластичного випадку, РоА зростає поступово, коли зростає інтерференція між вторинними користувачами.

Це пов'язано з тим, що при повній інтерференції, рішення, яке максимізує соціальний добробут, є дуже несправедливим у присутності еластичний користувачів: він розподіляє доступні діапазони спектрів для декількох SUs, при цьому не надаючи спектру іншим взагалі. Це рішення максимізує загальну

корисність користувачів, але це ніяк не відповідає тому, на що вказує рівновага Неша, яка розподіляє спектр більш справедливо серед вторинних користувачів.

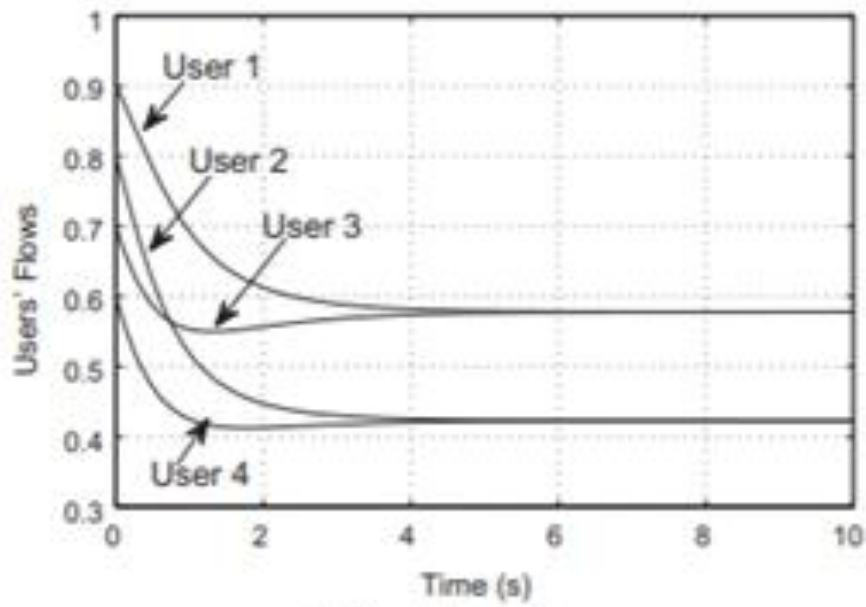
Більш конкретно, у сценарії повної інтерференції, соціально оптимальне рішення виділяє дві спектральні одиниці для SU_1 на обох каналах 1 і 2, тоді як інші три гравці взагалі не надсилають жодного трафіку. Це максимізує загальну корисність (рівну 8), що співпадає з корисністю SU_1 ; в той же час такий розподіл спектру, очевидно, несправедливий, оскільки всі мережеві ресурси виділяються одному користувачеві. Зауважимо, що такий поведінці немає місця при нееластичному трафіку, оскільки в цьому випадку кожен користувач і повинен передати всі r^i одиниці спектру.

7.9. Еластичні вторинні користувачі: випадкові сценарії CRN

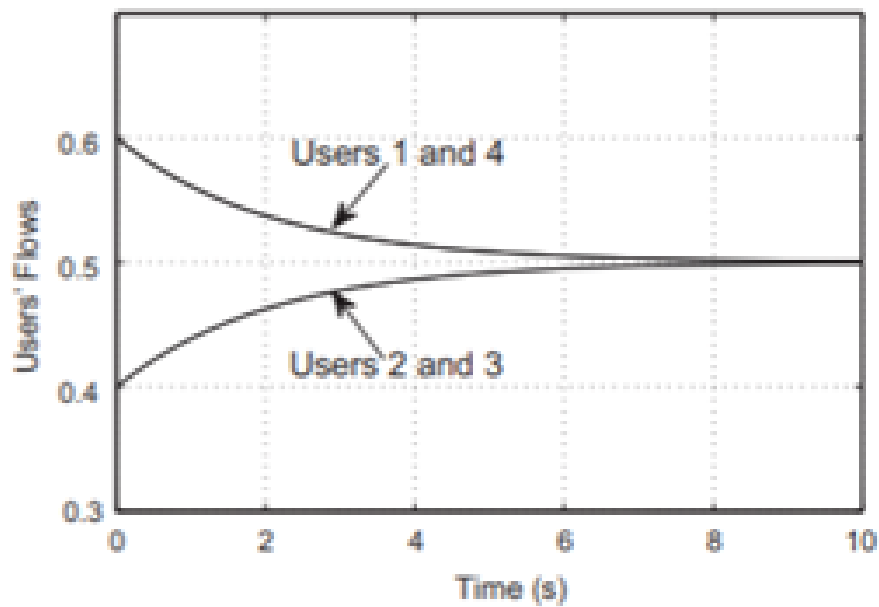
Випадкові сценарії мережі когнітивного радіо отримуються тим же генератором, який використовується у випадку нееластичного трафіку. Що стосується нееластичних сценаріїв, то результати отримують з дуже малими 95% -ми довірчими інтервалами, які на малюнках не показані для наочності.

7.10. Динаміка реплікатора: сценарії 4-х користувачів CRN

Розглянемо стабільність рівноваги Неша у розглянутій грі, де SUs адаптують свої стратегії використовуючи динаміку реплікатора, на основі рівня заторів, виміряного на кожному з'єднанні. З цією метою розглянемо сценарії 4-х користувачів CRN з повною інтерференцією та частковою інтерференцією (Рис.7.2. (а) та (б) відповідно), та зауважимо, що SUs використовують динаміки реплікатора. Нагадаємо, що в такому сценарії кожен нееластичний користувач повинен передати загальну кількість потоку $r^i = 1$ по двом доступним каналам.



(a) Partial interference



(b) Full interference

Рис.7.6. Нееластичні вимоги: конвергенція SUs' потоків (переданих по безпроводовому каналу 1) до точки рівноваги Неша під динаміками реплікатора в сценаріях 4-х користувачів CRN з (а) частковою інтерференцією та (б) повною інтерференцією між вторинними користувачами.

Рис.7.6. (а) та (б) ілюструють конвергенцію SUs' до точки рівноваги Неша під динаміками реплікатора, у випадках часткової та повної інтерференції, відповідно, між вторинними користувачами. Для наочності цифри відображають лише обсяг трафіку, який відправляється кожним користувачем на бездротовий канал 1, оскільки весь інший трафік передається по каналу 2.

У випадку часткової нтерференції, можемо розглянути приклад, в якому на початкових точках SU_1 , SU_2 , SU_3 та SU_4 надсилають відповідно 90%, 80%, 70% та 60% свого трафіку на канал 1 та весь інший обсяг на канал 2. Відмітимо, що потоки SU_1 та SU_3 сходяться до точки рівноваги приблизно 0,58 на каналі 1 і 0,42 на каналі 2, а потоки SU_2 та SU_4 сходяться до 0,42 і 0,58 на каналах 1 і 2, відповідно. Така поведінка користувачів вже розглядалася нами раніше, де на рівновазі SU_1 та SU_3 відправляють p одиниці трафіку на канал 1 і $1 - p$ на канал 2, тоді як SU_2 та SU_4 роблять протилежне, відправляючи $1 - p$ на канал 1 і p на каналі 2.

Якщо розглядати сценарій повної інтерференції (Рис.7.6.(б)), бачимо, що потоки SU завжди збігаються до точки рівноваги (0,5, 0,5) на каналах 1 і 2, однаково розподіляючи їхній трафік на 2 доступних каналах, і це відбувається незалежно від відправної точки, обраної для таких потоків.

7.11 Висновок

У даному розділі ми проаналізували некооперативну гру з урахуванням як еластичних, так і нееластичних вимог до трафіку. Було зазначено та продемонстровано існування рівноваги Неша. Розглянуто проблему динамічного доступу до спектра на основі популяційної гри та проведено аналіз даної гри з урахуванням впливу різноманітних параметрів.

ВИСНОВКИ

ДОПРАЦЬОВУЮ

- Теорія ігор як оптимальне рішення для реалізації/вирішення DSA
- Розгляд різноманитних форм/моделей ыгор
- Особлива увага придылена кооперативный та некооперативній іграм
- Порівняльний аналіз двох цих ігор
- Висновки щодо реалізації
- Подальший напрямок досліджень / знаходження нових стратегій до реалізації /

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ільченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системи широкосмугового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. – 312 с.
2. ДОПИШУ
3. Журавель А.С., Кравчук С.О. Беспроводові мережі доступу з динамічним вибором спектру. – 2017.
4. FCC, ET Docket No 03-222 Notice of proposed rule making and order, December 2003
5. M.M. Buddhikot, P. Kolody, S. Miller, K. Ryan, J. Evans, DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access, in: Proc. IEEE WoWMoM 2005, June 2005, pp. 78–85.
6. O. Ileri, D. Samardzija, N.B. Mandayam, Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via spectrum server, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 194–202.
7. S.A. Zekavat, X. Li, User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation, in: Proc. IEEE DySPAN 2005, November 2005, pp. 82–87.
8. Mitola J, Maguire G, “Cognitive radio: Making software radios more personal”, IEEE Personal Communications, 1999.
9. Badr Benmammar, Asma Amraoui, Francine Krief, A survey on dynamic spectrum access techniques in cognitive radio networks, IJCNI, 2013.
10. Gaurav S, Kasbekar, Sarkar S, “Spectrum auction framework for access allocation in cognitive radio networks”, IEEE.ACM Transactions on Networking, vol. 18, pp. 1841 – 1854, 2010.
11. Cognitive Radio and Dynamic Spectrum Access, Lars Berlemann Deutsche Telekom, Germany and Stefan Mangold Swisscom, Switzerland

12. A Survey of Dynamic Spectrum Access- Qing Zhao and Brian M. Sadler, 1053-5888/07/\$25.00©2007IEEE, MAY 2007.
13. F.K. Jondral, Software-defined radio-basic and evolution to cognitive radio, EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking 2005.
14. Prabhjot Kaur, Arun Khosla (2011), “Markovian Queuing Model for Dynamic Spectrum Allocation in Centralized Architecture for Cognitive Radios”, IACSIT, Vol. 3, no. 1, pp 1-4.
15. Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks- Ekram Hossain, Dusit Niyato, Zhu Han.
16. Dynamic Spectrum Access Techniques Dynamic Spectrum Access Techniques State of the art State of the art, Asma Amraoui, Badr Benmammar , LTT Laboratory, University of Tlemcen, ALGERIA.
17. Dynamic Spectrum Access in Cognitive Radio networks: aspects of MAC layer sensing - A thesis, Mohamed Hamid, December 2008.
18. Li Y, Wang X, Guizani M, “Resource pricing with primary service guarantees in cognitive radio networks: A Stackelberg game approach”, Proceedings of IEEE Globecom 2009, pp. 1-5, 2009.
19. Mir Usama, Leila Merghem-Boulahia, Dominique Gaïti, “A Cooperative Multiagent Based Spectrum Sharing”, Sixth Advanced International Conference on Telecommunications, 2010.
20. Mir Usama, “Utilization of Cooperative Multiagent Systems for Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks”, PHD theses, Sep 2011.
21. Xing Y et al, “Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks”, IEEE Journal on Selected Areas on Communications, vol. 24, pp. 626-637, 2006.
22. M. M. Buddhikot, “Understanding Dynamic Spectrum Access: Models, Taxonomy and Challenges,” in Proceedings of IEEE International Symposium on

New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN ' 07), pp. 649-663, April 2007.

23. 15. A Survey on Dynamic Spectrum Access Techniques for Cognitive Radio-Anita Garhwal and Partha Pratim Bhattacharya, International Journal of Next-Generation Networks (IJNGN) Vol.3, No.4, December 2011

24. Partha Pratim Bhattacharya, Ronak Khandelwal, Rishita Gera, Anjali Agarwal, (2011), "Smart Radio Spectrum Management for Cognitive Radio", International Journal of Computer Networks and Communications, Vol. 3, no. 4.

25. Ekram Hossain, Zhu Han, Game theory for Cognitive Radio Networks. IEEE GLOBECOM'09, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.

26. E. Z. Tragos, S. Zeadally, A. G. Fragkiadakis and V. A. Siris, "Spectrum Assignment in Cognitive Radio Networks: A Comprehensive Survey," in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 15, no. 3, pp. 1108 1135, Third Quarter 2013.

27. H. A. Bany Salameh, "Throughput-oriented channel assignment for opportunistic spectrum access networks", Mathematical and Computer Modeling, vol. 53, no. 11-12, pp. 2108–2118, Jun. 2011.

28. M. Bkassiny and S. K. Jayaweera, "Optimal Channel and Power Allocation for Secondary Users in Cooperative Cognitive Radio Networks," in 2nd Int'l. Conf. on Mobile Lightweight Wireless Systems , 2010.

29. Kaniezhil. R, Daniel Nesa Kumar. C and Prakash.A," Fuzzy Logic System for Opportunistic Spectrum Access using Cognitive Radio", in IJCSI, Vol. 10, Issue 1, No 1, Jan. 2013.

30. Yang Ge; Jun Sun; Shixiang Shao; Longxiang Yang; Hongbo Zhu, "An improved spectrum allocation algorithm based on proportional fairness in Cognitive Radio networks," in Commn. Tech. (ICCT), 2010 12th IEEE Int.l Conf. on , vol., no., pp.742- 745, 11-14 Nov. 2010.

31. Schul Lee ,Hwanseok Choi,Chong –Kwon Kim (2009), “A Game–theoretic Analysis of Spectrum Sharing in Cognitive Radio Network”’s, IEEE Vol. 9, pp. 415-416.
32. FCC (2003), ET Docket No 03-237, Notice of inquiry and notice of proposed Rulemaking.
33. Yanqing Liu, Liang Dong and R. J. Marks, "Common control channel assignment in cognitive radio networks using potential game theory," 2013 IEEE Wireless Commun. and Networking Conf. (WCNC), Shanghai, 2013, pp. 315-320.
34. Qiufen Ni, Rongbo Zhu, Zhenguo Wu, Yongli Sun, Lingyun Zhou, and Bin Zhou,” Spectrum Allocation Based on Game Theory in Cognitive Radio Networks”, in Journal of networks, vol. 8, no. 3, March 2013.
35. M. L. Puterman, Markov Decision Processes, Wiley 1994.
36. Gayathri R. Nair, Yamuna K. Moorthy, Sakuntala S. Pillai, A Survey on Dynamic Spectrum Sharing Using Game Theory In Cognitive Radio Networks, India, 2016.
37. M. Felegyhazi and J. P. Hubaux, “Game Theory in Wireless Networks: A Tutorial,” technical report, LCA-REPORT-2006-002, February, 2006.
38. Z. Han, Z. Ji, and K. Liu, “Fair Multiuser Channel Allocation for OFDMA Networks Using Nash Bargaining Solutions and Coalitions,” IEEE Trans. on Commu., 53(8): 1366–1376, Aug. 2005.
39. J. Huang, R. Berry, and M. Honig, “Auction-based Spectrum Sharing,” Mobile Networks and Applications, 11(3):405–408, June 2006.
40. Z. Ji and K. Liu, “Cognitive Radios for Dynamic Spectrum Access & Dynamic Spectrum Sharing: A Game Theoretical Overview,” IEEE Communications Magazine, 45(5):88–94, May 2007.

41. I. Stanojev, O. Simeone, Y. Bar-Ness et al., “Spectrum Leasing via Distributed Cooperation in Cognitive radio,” in Proc. IEEE ICC’08, 2008.
42. J. Zhang and Q. Zhang, “Stackelberg Game for Utility-Based Coop.
43. W. Sandholm, Population Games and Evolutionary Dynamics, MIT press, Cambridge, MA, 2009.
44. P. Taylor, L. Jonker, Evolutionary stable strategies and game dynamics, Mathematical Biosciences 40 (1–2) (1978) 145–156.
45. S. Shakkottai, E. Altman, A. Kumar, The case for non-cooperative multihoming of users to access points in IEEE 802.11 WLANs, in: Proceedings of the IEEE INFOCOM, Barcelona, Spain, April 23–29, 2006.
46. E. Altman, Y. Hayel, H. Kameda, Evolutionary dynamics and potential games in non-cooperative routing, in: Proceedings of the 5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks, WiOpt2007, Limassol, Cyprus, April 16–20, 2007, pp. 1–5.
47. Jocelyne Elias, Fabio Martignon, Antonio Capone, Eitan Altman. Non-cooperative spectrum access in cognitive radio networks: A game theoretical model. – Computer networks, 2011.
48. Haobing Wang, Lin Gao, Xiaoying Gan, Xinbing Wang, Ekram Hossain, Cooperative Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks: A Game-Theoretic Approach.