

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Інфокомунікацій _____
(повна назва)

Кафедра _____ Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського _____
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Дослідження методу управління радіочастотним спектром в
когнітивній радіомережі
(тема)

Виконала: студентка 2 курсу, групи ТСМм-20-1

_____ Ткаченко А.М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність: 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми: Освітньо-професійна

Освітня програма: Телекомунікаційні системи та мережі
(назва освітньої програми)

Керівник: професор кафедри ІКІ ім. В.В. Поповського
_____ Коляденко Ю.Ю.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Лемешко О.В.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2022 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій

Кафедра Інфокомунікаційної інженерії

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка

Тип програми: Освітньо-професійна

Освітня програма: Телекомунікаційні системи та мережі

(повна назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентки Ткаченко Альони Миколаївни

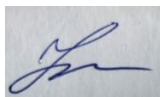
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження методу управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі затверджена наказом по університету від «15» травня 2022 р. № 586 Ст
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 20.05.2022 р.
3. Вихідні дані до роботи: системи когнітивного радіо на основі стандарту IEEE 802.22, зміна математичного очікування рівня перешкод (перешкода + шум) в каналі від -102 до -82 дБм, зміна середньоквадратичного відхилення рівня перешкод (перешкода + шум) в каналі від 0 до 10 дБ.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 1) Радіо з програмним конфігуруванням
 - 2) Аналіз технології когнітивного радіо в телекомунікаціях
 - 3) Управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі

4) Розробка і аналіз методу управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі, який засновано на математичному апараті нечіткої логіки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслень, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій: Демонстраційний матеріал у вигляді ppt-презентації

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		(підпис)	(дата)
Основна Частина	Професор Коляденко Юлія Юріївна		22.05.2022р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	24.03.2022	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	02.04.2022	Виконано
3	Розробка 1 розділу	14.04.2022	Виконано
4	Розробка 2 розділу	24.04.2022	Виконано
5	Розробка 3 розділу	04.05.2022	Виконано
5	Оформлення атестаційної роботи	15.05.2022	Виконано

Дата видачі завдання 24 березня 2022 року

Студент  Ткаченко А.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник роботи  професор Коляденко Ю.Ю.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 16 рис., 1 табл., 28 джерел.

ТЕХНОЛОГІЇ КОГНІТИВНОГО РАДІО, РАДІОЧАСТОТНИЙ СПЕКТР, ДИНАМІЧНИЙ РОЗПОДІЛ, КОГНІТИВНА РАДІОМЕРЕЖА, НЕЧІТКА ЛОГІКА

Об'єкт дослідження: когнітивна мережа.

Предмет дослідження: методи управління радіочастотним спектром.

Мета роботи: аналіз методів управління радіочастотним спектром управління радіочастотним спектром.

Методи досліджень: аналіз, розрахунки та порівняння.

Стрімкий розвиток бездротових телекомунікаційних систем виявило серйозну проблему – практично весь частотний діапазон до теперішнього часу розподілений і ліцензований. Сучасні пристрої бездротових технологій заважають один одному працювати, створюючи перешкоди і конкуруючи за смуги пропускання, і при цьому спектр використовується недостатньо ефективно.

Значно підвищити ефективність використання спектра дозволяє механізм динамічного управління спектром, згідно з яким вторинним користувачам (які не закріплені за даними частотним діапазоном) надається можливість використовувати діапазони первинних користувачів (закріплених за даними діапазоном) на час, поки цей діапазон не використовується первинним користувачем.

Механізм динамічного управління спектром може застосовуватися тільки в інтелектуальних радіосистемах. Для опису таких систем був запропонований термін — когнітивне радіо (Cognitive Radio, CR).

В його основі лежить система радіозв'язку з програмованими параметрами (Software Defined Radio (SDR)). Воно в змозі відслідковувати особливості апаратури для того, щоб програмуватися по смузі частот або за режимом використання.

Використання технології когнітивного радіо передбачає підвищення функціональності окремих кінцевих радіопристроїв і їх

конвергенцію – для прийому відео- і аудіосигналів радіомовної служби, сигналів рухомої служби буде вимагатися тільки один пристрій.

ABSTRACT

The report contains: 72 p., 16 fig., 1 tables, 28 sources.

COGNITIVE RADIO TECHNOLOGIES, RADIO FREQUENCY SPECTRUM, DYNAMIC DISTRIBUTION, COGNITIVE RADIO NETWORK, FUZZY LOGIC

The rapid development of wireless telecommunications systems has revealed a serious problem - almost the entire frequency range is still distributed and licensed. Modern wireless devices interfere with each other's work, creating interference and competing for bandwidth, and the spectrum is not used efficiently enough.

The mechanism of dynamic spectrum management allows to significantly increase the efficiency of spectrum use, according to which secondary users (who are not assigned to the frequency band) are able to use primary user bands (assigned to this band) for as long as this band is not used by the primary user.

The dynamic spectrum control mechanism can be used only in intelligent radio systems. The term Cognitive Radio (CR) has been proposed to describe such systems.

It is based on a software communication system with programmable parameters (Software Defined Radio (SDR)). It is able to monitor the features of the equipment in order to be programmed by frequency band or mode of use.

The use of cognitive radio technology involves increasing the functionality of individual terminal radio devices and their convergence - for the reception of video and audio signals of the broadcasting service, the signals of the mobile service will require only one device.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів.....	9
Вступ.....	10
1 Радіо з програмним конфігуруванням.....	12
1.1 Основні особливості SDR.....	15
1.2 Принцип роботи SDR.....	16
1.3 Апаратна частина SDR.....	17
2 Аналіз технології когнітивного радіо в телекомунікаціях	20
2.1 Концепція когнітивного радіо в телекомунікаціях	20
2.2 Система когнітивного радіо на даний момент.....	24
2.3 Властивості систем когнітивного радіо	25
2.3.1 Сканування та аналіз спектру.....	25
2.3.2 Формування спектру.....	26
2.4 Архітектура мереж когнітивного радіо	27
2.5 Інтерференція користувачів	29
2.6 Застосування теорії машинного навчання для реалізації функцій когнітивного радіо.....	30
3 Управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі....	37
3.1 Методи вирішення задач динамічного розподілу спектру.....	37
3.2. Математичні основи нечіткої логіки.....	41
4 Метод управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі, який засновано на математичному апараті нечіткої логіки.....	47
4.1 Узагальнена методика динамічного оновлення робочих частот в когнітивній системі радіодоступу.....	47
4.2 Методика формування переліку робочих частот для мережі радіодоступу	50
4.3 Методика формування матриці вагових коефіцієнтів.....	53

Висновок.....	67
Перелік джерел посилань.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

PEO – радіоелектронна обстановка.

CR – Cognitive Radio – когнітивне радіо;

CRS – Cognitive Radio System – система когнітивного радіо;

DEUM – динамічна модель ексклюзивного використання спектра;

SDR – Software defined radio – програмно-обумовлене радіо;

SU – Secondary Unlicensed – вторинний користувач;

ВСТУП

Безпроводовий зв'язок розвивається швидко, що призводить до підвищення попиту на частотні ресурси. Дані обставини привели до розвитку ідеї вторинного використання спектра на основі застосування технологій когнітивного радіо (Cognitive Radio – CR) [1-5].

Система когнітивного радіо (Cognitive Radio System – CRS) – це радіосистема, що функціонує на основі постійного вивчення навколишнього електромагнітного середовища і свого внутрішнього стану. Вона використовує отримані знання для динамічного коригування своїх експлуатаційних параметрів і протоколів в інтересах досягнення поставлених цілей.

В основі вторинного використання спектра лежить безперервний моніторинг радіоелектронної обстановки в точках розміщення радіо засобів з метою виявлення і використання вільних радіочастотних смуг. Система передбачає наявність і облік даних про режими роботи, точки розміщення і зони покриття радіомереж ліцензованих користувачів виділеної смуги частот (первинних користувачів).

Відповідно до концепції CRS, вторинне використання спектра засноване на безперервному моніторингу радіоелектронної обстановки в точках розміщення радіозасобів з метою виявлення і використання вільних радіочастотних смуг. При цьому передбачається наявність і облік даних про режими роботи, точках розміщення і зонах покриття радіомереж ліцензованих користувачів виділеної смуги частот (первинних користувачів).

Важливість останньої вимоги обумовлюється необхідністю забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) між мережами, що використовують спектр на вторинній (динамічній) основі (CRS) та бездротових мереж первинних користувачів (що працюють на закріплених частотах). В даний час на принципах когнітивного радіо побудовані бездротові системи стандарт IEEE 802.22.

Однією з проблем, що виникають при управлінні радіочастотним спектром, може бути відсутність чітких правил прийняття рішення. У таких випадках, як правило, використовують непараметричні

алгоритми та методи, такі, наприклад, як алгоритми, засновані на математичному апараті нейронних мереж, або алгоритми, побудовані на математичному апараті нечіткої логіки [6-10].

Таким чином, розробка та дослідження методу управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі, що базується на математичній моделі нечіткої логіки, є актуальною науковою задачею.

1 РАДІО З ПРОГРАМНИМ КОНФІГУРУВАННЯМ

Програмно-конфігуроване радіо (Software Defined Radio - SDR) є радіообладнанням, в якому всі або більшість функцій фізичного рівня виконуються в програмному вигляді, а функції, що виконуються апаратно, повинні оперативно модифікуватися за вимогами робочого стандарту зв'язку.

Програмна реалізація більшості функцій з обробки високочастотних сигналів та оперативне програмне управління апаратурою забезпечують кардинальне підвищення функціональних можливостей радіостанції шляхом підтримки роботи в різних сервісах, широкій смузі частот та різних стандартах зв'язку.

Технологія SDR є ключовою у передбачуваному подальшому розвитку радіообладнання: адаптивне радіо (Adaptive Radio – AR), когнітивне «розумне» радіо (Cognitive Radio – CR) та інтелектуальне радіо (Intelligent Radio – IR).

На інтуїтивному рівні програмно-конфігуроване радіо визначають як напрямок розвитку радіозв'язку, покликане об'єднати на єдиній апаратній платформі роботу радіостанцій різних типів та різних стандартів. Передбачається, що програмно-конфігуроване радіо реалізує функції радіоприймача та радіопередавача у програмному вигляді або за допомогою програмно керованих апаратних компонентів, які в силу своєї фізичної природи не можуть бути реалізовані програмно, як, наприклад, підсилювач потужності або антена.

У термінах концептуальної моделі відкритих систем зв'язку OSI-7 програмно-конфігуроване радіо визначається як радіостанція, в якій усі або більшість функцій фізичного рівня виконуються у програмному вигляді і можуть бути програмно реконфігуровані відповідно до вимог стандарту зв'язку та/або змінюватись іншим програмно-керованим обладнанням [11].

Відповідно до звіту MCE-R SM.2152 (09/2009) "Визначення системи радіозв'язку з програмованими параметрами (SDR) та системи когнітивного радіо (CRS)". Радіопристрій із програмованими

параметрами (SDR) – це радіопередавач та/або радіоприймач, що використовує технологію, що дозволяє за допомогою програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи, зокрема, діапазон частот, тип модуляції або вихідну потужність, за винятком зміни робочих параметрів, що використовуються в ході звичайної попередньо визначеної роботи з попередніми установками радіопристрою, згідно з тією чи іншою специфікацією або стандартом системи [12].

Інститут інженерів з електротехніки та електроніки (IEEE) визначає програмно-конфігуроване радіо як програмно-конфігуроване обладнання, в якому радіочастотні параметри можуть бути встановлені або змінені за допомогою програмного забезпечення та/або обладнання, за допомогою якого це досягається. Програмне зміна стосується діапазону частот, типу модуляції, вихідний потужності, але з обмежується цими параметрами.

Федеральна комісія зв'язку США визначає програмно конфігуроване радіо як радіообладнання (приймач), в якому такі параметри режиму роботи, як діапазон частот, тип модуляції та вихідна потужність можуть бути змінені за допомогою програмного забезпечення без змін в апаратних компонентах, що використовуються для випромінювання та прийому радіочастот.

В даний час існує значна кількість типів та модифікацій систем зв'язку та відповідного їм обладнання (радіостанцій). Кожна радіостанція включає аналогову та цифрову частину, окремі електричні компоненти та мікросхеми високого ступеня інтеграції, механічні компоненти, антену.

В цілому радіостанція є високотехнічно логічним продуктом, що досить ефективно виконує функції зв'язку за допомогою електромагнітних хвиль. Однак взаємодія типових радіо станцій різних стандартів на сьогоднішній день якщо і не виключено, то є рідкісним випадком, та й то в обмеженій функціональності.

Одне з основних завдань програмно-конфігурованого радіо таки полягає у забезпеченні граничної гнучкості зміни параметрів обладнання з метою забезпечити максимальну сумісність радіостанцій

різних стандартів незалежно від методу модуляції, робочого діапазону частот, методу доступу до каналів і т.п. за збереження всіх функціональних можливостей мережі зв'язку.

До основних функцій фізичного рівня, які зазвичай реалізуються в апаратному вигляді, відносяться: посилення, модуляція/демодуляція, канална селекція в приймачі та придушення побічного випромінювання в передавачі, перетворення частоти при модуляції/демодуляції на проміжній частоті. У програмно-конфігурованому радіо ці функції, які сьогодні виконуються в апаратному вигляді змішувачами, фільтрами, підсилювачами, модуляторами/демодуляторами, детекторами частково реалізуються програмно, а частково програмно-керованими апаратними засобами відповідно до параметрів модульованих сигналів та методом поділу каналів у різних стандарти зв'язку.

В результаті програмне радіо є економічно більш вигідним продуктом у порівнянні зі спеціалізованими пристроями, тому що виробляються для ширшого кола користувачів, а модернізація радіообладнання полягає лише у зміні програмного забезпечення. Програмно-конфігуроване радіо передбачає істотне зміна апаратної частини трансівера та вимог, що висуваються до апаратної частини.

Апаратура програмно-конфігурованого приймача повинна, перш за все, забезпечувати перетворення прийнятого високочастотного модульованого сигналу з метою максимально точного (без втрати достовірності прийому) подання в цифровому вигляді за допомогою аналого-цифрового перетворювача. Апаратура передавача повинна забезпечувати пряме формування модульованого сигналу та посилення потужності.

Функції високочастотної апаратної частини прийомопередавача програмно-конфігурованого радіо зводяться до забезпечення енергетичного потенціалу радіоканалу - посилення потужності в передавачі і малопотужне посилення прийнятого сигналу в приймачі.

Для користувача програмно-конфігуроване радіо дозволяє реалізувати такі функції: оперативна зміна поточної конфігурації радіостанції з мінімальними витратами часу та коштів;

- оперативне додавання нових функцій та можливостей без дорогої зміни апаратної частини;
- здешевлення поточного обслуговування апаратної частини загальної для значної кількості радіозасобів;
- використання однієї і тієї ж радіостанції в різних мережах та для різних застосувань [11].

1.1 Основні особливості SDR

Конфігурація SDR відбувається або за допомогою програмного забезпечення або за допомогою апаратних засобів. Для цього в SDR використовуються DSP-процесори або матриці FPGA.

Програмним методом налаштовуються робоча частота, смуга пропускання, швидкість, кількість несучих тип модуляції та інші параметри. Нові параметри або завантажуються з носія або бездротовим каналом, або вводяться безпосередньо та іншими методами. Це дуже зручно, оскільки зміни параметрів схеми її потрібно переробляти.

SDR переводить аналогові РЧ-сигнали, що займають різні смуги в спектрі, потік цифрових даних, який після обробки знову переводиться в аналогову форму.

Однак SDR – це не лише програмне забезпечення. Розрахунки показують, що повністю програмна реалізація не оптимальна як у споживанні, і по ефективності. Для деяких операцій, наприклад передачі або посилення сигналу, в силу їх природи оптимальна апаратна реалізація.

Перевага SDR полягає в простоті апаратної частини. Стандартні радіочастотні схеми скорочуються до мінімуму, їхня вартість знижується. Сигнальний процесор перебирає більшу частину функцій, які раніше виконувались у аналогових схемах. Цей підхід дуже вдалий, враховуючи гнучкість програмної реалізації та можливість компенсації деяких небажаних ефектів, що виникають в апаратній частині.

Більш того, програмна реалізація дозволяє усувати несправності, змінювати та доповнювати функціонал пристрою та покращувати його

характеристики з мінімальними витратами. Зокрема, SDR дозволяє швидко додавати нові типи модуляції, протоколи передачі тощо. У разі апаратної реалізації це вимагало б виготовлення нової схеми.

Недоліки SDR теж є. По-перше, це складність програмного забезпечення, витрати на розробку, у т.ч. тимчасові, більше енергоспоживання та в деяких випадках обмежений частотний діапазон. Ключові особливості програмно-конфігурованого радіо перераховані нижче:

1. Багатосмуговий.

Для вирішення низки завдань потрібна одночасна робота на кількох частотах. Зазвичай при цьому використовують кілька приймачів з різними діапазонами. Програмоване радіо може замінити їх та працювати як на одній смузі частот, так і на кількох одночасно.

2. Багатоканальність.

SDR може працювати одночасно на декількох частотах, наприклад, передавати дані та голос на двох різних несучих частотах.

3. Здатність одночасної роботи у різних стандартах (AM, FM, GMSK, CDMA та ін.).

4. Можливість передавати дані з різною швидкістю, наприклад, при одночасній роботі з двома сигналами в різних стандартах або при обробці частин того самого сигналу (багатошвидкісний фільтр).

5. Смуга пропускання програмованого радіо визначається цифровими фільтрами, тому його можна легко міняти. Понад те, цифрові фільтри не реагують деякі перешкоди, і навіть можуть компенсувати спотворення, внесені лінією передачі [13].

1.2 Принципи роботи SDR

Вхідний сигнал посилюється малошумним підсилювачем і ділиться на компоненти I і Q шляхом змішування з сигналом гетеродина із синтезатора частот у ФАПЧ (для отримання квадратурної компоненти він зміщується на 90°). Частота гетеродина підлаштовується під частоту сигналу, щоб різниця вихідних сигналів змішувачів дорівнювала нулю без модуляції. Для модульованого

сигналу вона дорівнює сигналу основної смуги або вихідному модульованого сигналу.

Ця архітектура отримала назву пряме перетворення чи перетворення з нульовою проміжною частотою. Після фільтрації сигналів основної смуги ФНЧ вони оцифровуються в парі АЦП. Далі в цифровому перетворювачі частота сигналу знижується до робочого діапазону сигнального процесора.

У сучасних передавачах DSP-модулятор розділяє дані на I і Q і передає їх на підвищує перетворювач і ЦАП. Сигнал фільтрується і надходить у змішувач підвищення частоти до частоти передачі. Потім сигнал проходить через підсилювач та подається на антену. У міру збільшення швидкодії перетворювачів схема спрощується.

Цифровим методом виконуються такі функції: фільтрація (НЧ, ВЧ, смугові та фільтри, що загороджують), модуляція (AM, FM, PM, FSKM, BPSK, QPSK, QAM, OFDM, ін.), демодуляція, вирівнювання, стиснення і відновлення, аналіз спектру, попередження. [18]

Нові типи модуляції та пов'язані з ними процедури мають загальний термін «форма сигналу» (waveform). Змінивши програмне забезпечення, радіо переналаштовується на іншу частоту та протокол передачі [14].

1.3 Апаратна частина SDR

Основними елементами SDR є АЦП, ЦАП, сигнальні процесори DSP або матриці FPGA. Аналоговий сигнал антени перетворюється на цифровий, обробляється, потім знову перетворюється на аналоговий. Частота вибірки перетворювача постійно підвищується, подолавши вже гігагерцевий рубіж.

Поряд із швидкістю перетворення важливий фактор — швидкодія процесора, який повинен встигати обробляти дані. Наприклад, перетворювач ADC12Dxx00RF Texas Instruments має частоту вибірки до 3,6 млрд виб/с. За великим рахунком, замість сигнального процесора можна використовувати процесор загального призначення.

Однак не завжди його використання буде оптимальним, оскільки зустрічаються алгоритми, для реалізації яких потрібні спеціалізовані функції. Інший підхід – використовувати рекомендований сигнальний процесор, що має спеціальну архітектуру, вбудовану пам'ять та набір арифметико-логічних інструкцій, завдяки яким його швидкодія буде максимально високою. [20]

Дедалі частіше DSP реалізуються на матрицях FPGA. Такі функції, як швидке перетворення Фур'є, можуть бути виконані за допомогою цифрових логічних схем і легко реалізуються на FPGA. Оскільки вартість матриці постійно знижується, вони набувають все більшої привабливості, як заміна сигнальним процесорам [14].

Ще один варіант – логічні елементи з жорсткими з'єднаннями, які можна використовувати для реалізації функцій, що не потребують програмування, таких як протоколи зв'язку.

Логічні схеми мають високу швидкодію та мале споживання, займають трохи місця на кристалі. Такі логічні блоки часто називають апаратними прискорювачами.

Існує кілька архітектур для програмної частини SDR:

- FGA (Fine-Grained reconfigurable Arrays) — дрібнозернисті матриці, що перепрограмуються. Ця архітектура дуже гнучка, але має один великий недолік - через велику кількість міжз'єднань збільшується споживання енергії.
- CGA (Coarse-Grained reconfigurable Arrays) — крупнозернисті перепрограмовані матриці. Цей варіант позбавлений цього недоліку. Матриці CGA складаються з меншої кількості функціональних блоків, проте блоки власними силами стають складніше. Ще одна перевага цієї архітектури в тому, що для неї вже розроблені компілятори.
- Архітектури з командними словами дуже великої довжини VLIW; - хороші компілятори, що дозволяють отримати оптимальні програми.
- Векторні архітектури (один потік команд – багато потоків даних SIMD) – виграють у ефективності використання енергії.

Проте традиційні VLIW архітектури із загальним файлом регістрів не дозволяють виконувати багато, скажімо більше восьми,

паралельних операцій через високу складність реалізації файлу реєстрів та мережі пересилання операндів.

Приймачі та передавачі SDR бувають двох типів: супергетеродинні та прямого перетворення.

- Супергетеродинна структура найпоширеніша. Це пов'язано з тим, що вона забезпечує хороші характеристики на досить великому діапазоні частот. Супергетеродинні схеми мають хорошу селективність і чутливість на всьому діапазоні.

- Приймачі та передавачі прямого перетворення простіші і характеризуються малим ступенем інтеграції. Вони застосовуються там, де вимоги до характеристик системи не дуже жорсткі [13].

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЇ КОГНІТИВНОГО РАДІО В ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

2.1 Концепція когнітивного радіо в телекомунікаціях

Когнітивне радіо необмежене первісною концепцією, яку представив Джозеф Мітола III. Сьогодні це поняття представлено в багатьох дослідженнях і тісно пов'язане з поняттям програмно-обумовленого радіо (англ. Software defined radio (SDR)).

Для подальшої роботи необхідно розуміти відмінності, які існують між когнітивною системою (CRS) та програмним радіо (SDR). Для цього розглянемо звіт Міжнародного союзу електрозв'язку MCE-R (ITU-T) SM.2152 [1]:

Радіопристрій з програмованими параметрами (SDR): Радіопередавач і / або радіоприймач, який використовує технологію, що дозволяє за допомогою програмного забезпечення встановлювати або змінювати робочі радіочастотні параметри, включаючи, зокрема, діапазон частот, тип модуляції або вихідну потужність, за винятком зміни робочих параметрів, використовуваних в ході звичайної попередньо визначеної роботи з попередніми установками радіоустройства, згідно з тією чи іншою специфікації або стандарту системи. "

"Система когнітивного радіо (CRS): Радіосистема, що використовує технологію, що дозволяє цій системі отримувати знання про своєму середовищі експлуатації та географічному середовищі, про усталені правила і про свій внутрішній стан; динамічно і автономно коригувати свої експлуатаційні параметри і протоколи, згідно отриманим знанням, для досягнення заздалегідь поставлених цілей; і вчитися на основі отриманих результатів".

Саме когнітивна система виконує функції збору інформації, враховує задані правила і динамічно коригує необхідні параметри.

Виходячи з вище сказаного подальше дослідження буде проводиться виключно в рамках когнітивної системи та тільки

безпосередня робота з обладнанням і натурне моделювання буде засноване на понятті програмованого радіо (SDR).

Після першої публікації концепції когнітивного радіо про нього не раз згадували, говорячи про оптимальне використання спектра радіочастот [23].

В першу чергу це було пов'язано зі стрімким зростанням кількості носіїв пристроїв (смартфони, планшетні ПК і т.п.) у населення. Багатьом мобільним операторам було запропоновано шукати рішення по більш раціональному використанню спектру.

На рисунку 2.1 представлений графік використання спектра в межах 960 - 3100 МГц [3].

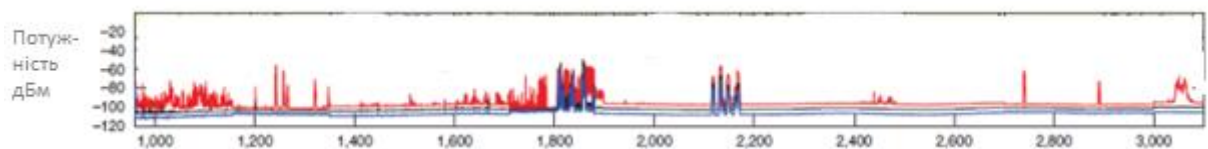


Рисунок 2.1 – Щільність спектра в діапазоні 960 - 3100 МГц

Суть концепції когнітивного радіо полягає в використанні так званих «Білих плям» (англ. Spectrum white spots) в спектрі радіочастот. Саме вони можуть бути використані «вторинними» користувачами для передачі даних [8].



Рисунок 2.2 – Розташування білих плям в спектрі

В певні моменти часу, в вибраному діапазоні, наявність білих плям може відрізнятися. Бувають також ситуації повної відсутності білих плям. Саме тому когнітивне радіо не зможе гарантувати вторинному користувачу доступ до спектру. Отже, CRS не може бути окремою службою електрозв'язку з гарантованим наданням послуг.

Спочатку для когнітивного радіо пропонувалося використовувати частоти, призначені для телевізійного мовлення, приблизно від 200 до 900 МГц в залежності від країни. Були проведені дослідження завантаженості спектра в даному діапазоні. Графік використання спектра, отриманий за допомогою спеціальних вимірювань в Чехії (рис. 2.3).

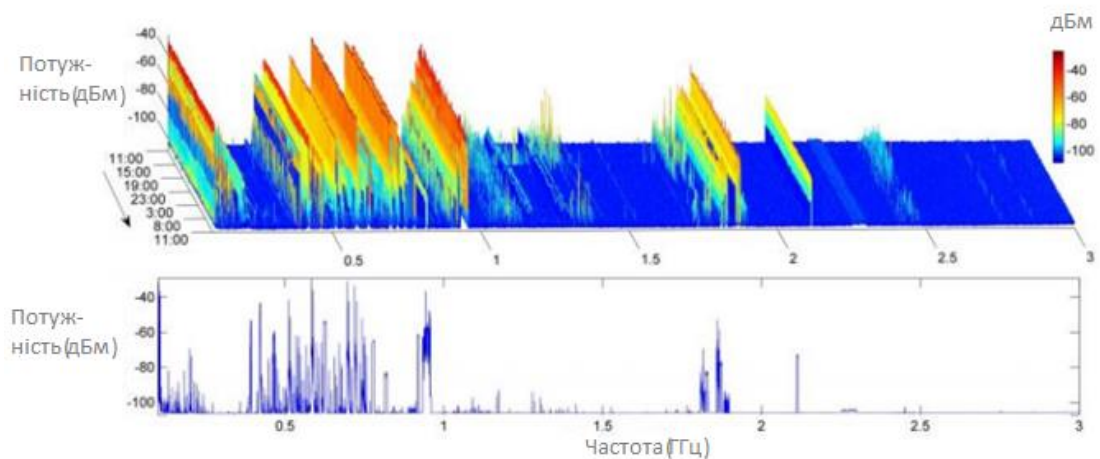


Рисунок 2.3 – Приклад використання спектра для частот ТВ в Європі

Вище описане дослідження вказує на можливість використання білих плям в спектрі для когнітивної системи.

CRS повинна виконувати розширені завдання в порівнянні з звичайним приймачем і передавачем. Через це, виникає деяка складність реалізації алгоритмів роботи всіх функцій пристрою і безпосередньо самого пристрою [19].

Через складність реалізації пристрою і відсутності завершених досліджень в області алгоритмів роботи когнітивної системи на момент написання роботи були відсутні готові пристрої [12].

У багатьох лабораторіях когнітивне радіо існує на основі прототипу. Наприклад, пристрій під назвою «CogRadio». Його зовнішній вигляд представлений на рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд пристрою CogRadio

Пристрій, про який йде мова вище, був створений компанією Radio Technology Systems в Ocean Grove, Нью Джерсі. Він може швидко змінювати радіоканал, а також безперервно передавати відеопотік.

CogRadio активно використовується для тестування програмного забезпечення, яке автори планують використовувати в комерційних цілях.

«Це найбільш зручний і універсальний широкосмуговий пристрій, який раніше не був доступний дослідникам », – розповідає директор Winlab, в Rutgers University. «Сьогодні це найкращий з експериментальних прототипів когнітивного радіо. Це дуже важливо, адже всі зацікавлені в тестуванні і розгортанні такої технології», – додає він [25].

Пристрій може працювати в діапазоні від 100 МГц до 7500 МГц, включаючи частоти для ТВ, Wi-Fi, GSM і ін. За словами авторів,

пристрій здатний детектувати незайняті частоти і перемикатися між ними за 50 мкс (в деяких випадках – за 1 мкс).

Когнітивне радіо може маршрутизувати стільникові дзвінки на Wi-Fi і використовуватися для резервування трафіку з оптоволокна, через наявний спектр телебачення в 400 МГц діапазоні.

2.2 Система когнітивного радіо зараз

Когнітивне радіо – радіобладнання, в якому система зв'язку визначає поточні умови роботи та стан обладнання та може приймати рішення про методи радіозв'язку. Зокрема, контролюються умови проходження радіохвиль, географічне розташування абонента, завантаження робочої ділянки спектра, аналіз поточного трафіку.

За результатами аналізу ситуації можлива зміна несучої частоти, потужності, типу модуляції тощо. аж до переходу до іншого стандарту зв'язку.

Технологія CR може бути реальною базою для сумісності різних стандартів зв'язку, які через умови застосування та вимог користувачів не можуть використовувати загальні для всіх методи модуляції, єдині методи поділу каналів, швидкість передачі даних тощо [11].

У звіті MCE-R SM.2152 (09/2009) було наведено таке визначення. Система когнітивного радіо (CRS):

- Радіосистема, що використовує технологію, що дозволяє цій системі отримувати знання про своє середовище експлуатації та географічне середовище, про встановлені правила та про свій внутрішній стан; динамічно та автономно коригувати свої експлуатаційні параметри та протоколи, згідно з отриманими знаннями, для досягнення заздалегідь поставлених цілей; та навчатися на основі отриманих результатів [12-15].

Для когнітивних систем Міжнародним Союзом електрозв'язку (MCE P) визначено три основні принципи:

- Технології когнітивного радіо можуть забезпечити переваги користувачам за рахунок підвищення ефективності використання наявного радіочастотного спектру та пом'якшити проблему

перевантаженості мереж (забезпечуючи збільшення пропускнуєї спроможності систем радіозв'язку або радіомовлення за рахунок використання додаткових радіоканалів).

- Впровадження та робота станцій, що використовують технології когнітивного радіо, не повинні накладати жодних додаткових обмежень на інші радіослужби, що спільно використовують відповідну смугу частот.

- Будь-яка система, яка використовує технології когнітивного радіо в певній розподіленій відповідній радіослужбі смузі частот, повинна функціонувати відповідно до положень Регламенту радіозв'язку та інших адміністративних правил, що регулюють використання смуг частот та критерії захисту.

Когнітивне радіо не є окремою службою радіозв'язку, і може використовуватись як технологія в рамках будь-якої з існуючих радіослужб.

Для використання систем когнітивного радіо будь-якою службою радіозв'язку у певній смузі частот, ця служба повинна мати ліцензію у відповідній смузі частот із правом роботи на первинній або вторинній основі [19].

Технології когнітивного радіозв'язку можуть використовуватися при реконфігурації з'єднань між терміналами і декількома радіосистемами, операторами систем радіозв'язку для більш ефективного управління ресурсами використовуваного ними радіочастотного спектру, як інструмент колективного доступу до радіочастотного спектру, як інструмент організації більш гнучкого доступу до радіочастотного спектру [15].

2.3 Властивості систем когнітивного радіо

2.3.1 Сканування та аналіз спектру

Когнітивне радіо має бути в змозі сканувати спектр та вимірювати різні характеристики каналу, крім того, система повинна вміти ідентифікувати сигнали різних користувачів у спектрі, а також

визначати: чи мають вони ліцензію, тобто є первинним користувачем або тимчасово безліцензійно використовує канал, тобто вторинний користувач. Ця особливість дає можливість когнітивній радіосистемі ідентифікувати частини спектра, що не використовуються первинними користувачами [24].

У системах когнітивного радіо важливо, щоб вторинні користувачі не заважали первинним працюючим у цьому діапазоні, а також, що не маловажно таким же вторинним користувачем працюючим на цьому ж діапазоні.

Одним із підходів за узгодженням роботи вторинних користувачів полягає в обміні даними про спектральну обстановку в радіоефірі між декількома пристроями когнітивного радіо, щоб зменшити або навіть усунути ймовірність перешкод для ліцензованих користувачів та один одному [16-21].

При сканування та аналізі спектра можна використовувати складніші і просунуті алгоритми, але треба пам'ятати, що дані системи критичні швидкість обробки даних, оскільки за повільному реагуванні створюється перешкода первинним користувачем.

Сканування спектра має відбуватися з певним інтервалом. З одного боку цей інтервал має бути якнайменше, щоб не створити перешкоди первинним користувачем і оперативно скористатися вільним радіоефіром.

З іншого боку занадто короткі інтервали між скануванням спектра знижують ефективність системи в цілому (знижується спектральна ефективність, збільшуються енерговитрати) і збільшується складність апаратури .

2.3.2 Формування спектра

Після того, як когнітивна радіосистема сканує спектр, визначає активних ліцензованих користувачів і доступні можливості, вона приходить до наступного кроку: формування спектра.

Теоретично, бажано, щоб когнітивні користувачі вільно використовували доступні невикористані частини спектра.

У когнітивних користувачів повинна бути можливість гнучко формувати спектр сигналу, що передається, і контролювати параметри форми сигналу, такі як: смугу пропускання, рівень потужності, центральну частоту і, перш за все, гнучку спектральну маску [17].

Різна потужність піднесучих може бути використана для формування сигналу згідно з деякою маскою. Наприклад, з більш високими значеннями відношення сигнал/шум (SNR) може призначатися менша потужність, ніж з нижчим ставленням сигнал/шум (SNR) для поліпшення загального коефіцієнта бітових помилок (BER) системи.

Ще одна причина полягає у зменшенні перешкод сусіднього каналу від системи OFDM шляхом зменшення потужності крайових піднесучих [22].

Під час зменшення проводиться сканування на приклад звільнення нових частот для їхнього подальшого використання системою когнітивного радіо або навпаки, припинення використаних даних частот у зв'язку з їх використанням ліцензійним користувачем [17].

2.4 Архітектура мереж когнітивного радіо

Сучасні системи зв'язку розробляються з урахуванням моделі OSI (відкритих систем). Кожен з рівнів розробляється незалежно і може бути змінений або розширений без впливу на компоненти інших рівнів.

На кожному рівні інтерфейса обладнання різних виробників може взаємодіяти один з одним. Однак усі операції між рівнями проводяться послідовно (від найвищого рівня до нижчого). Це веде до витрат обчислення та великих затримок. Через ізолюваність рівнів, вищий рівень не може отримувати інформацію про нижчий, а отже взаємодія рівнів обмежена.

Розвиток існуючої системи рівнів спричинило створення нових варіантів міжрівневої взаємодії. Наприклад, резервування функцій одного з рівнів (контроль помилки на фізичному та каналному рівнях).

Головною метою системи міжрівневої взаємодії є збільшення інформаційного потоку між рівнями.

Взаємодія може здійснюватися як від найвищого рівня до нижчого, і навпаки. Наприклад, інформація про швидкість передачі каналу з каналного рівня може передаватися на рівень додатків і тим самим змінювати швидкість кодування відео потоку у відповідному додатку. Якщо швидкість передачі каналу зменшується, швидкість відеостиснення також зменшується.

Рівні можуть бути поєднані для інтегрування своїх функцій. Наприклад, каналний та транспортний рівні можуть бути об'єднані для спільного забезпечення управління чергами та доступу до каналу.

Концепція міжмережевої взаємодії передбачає створення єдиного інтерфейсу для обміну даними та контролем між усіма рівнями.

Корисно пояснити принцип дії когнітивного радіо, використовуючи терміни "вимірювач" і "параметр, що змінюється".

Покази вимірювача відображають поточне значення параметра, після чого параметр може бути змінено для отримання нової характеристики. Таким чином, діє не що інше як встановлення параметрів когнітивного радіопристрою для отримання необхідної продуктивності (характеристик).

При проектуванні когнітивного радіопристрою закладає таку кількість змінюваних параметрів, при якому характеристики пристрою змінювалися максимально ефективно для здійснення всіх необхідних функцій [22].

Зручно розділити керовані параметри за рівнем телекомунікаційної системи. На кожному рівні параметри для зміни. Фізично: потужність передачі, вид модуляції, частота несучої, ширина смуги частот.

На каналі: тип пакета, величина пакета, швидкість передачі, протокол передачі.

На мережному та транспортному рівнях: алгоритм планування мережі, параметри протоколу.

На рівні програм: вид стиснення або кодування.

Інформація зібрана когнітивним радіо велика і радіоінтерфейсу потрібно виділити лише необхідну інформацію. Для цього можна використати алгоритм нечіткої логіки. У такій системі параметри протоколів різних рівнях можуть бути змодельовані як змінні нечіткої логіки, керований контролером нечіткої логіки.

Архітектура мереж когнітивного радіо може бути типу інфраструктура, що самоорганізується (ad-hoc) і mesh.

2.5 Інтерференція користувачів

Інтерференцією користувачів когнітивного радіо називають явище одночасного заняття спектра первинним і вторинним користувачем.

Первинний (англ. Primary, Licensed) користувач це приймач і передавач, які закріплені за даним діапазоном частот, в якій використовується система. Вторинним (англ. Secondary Unlicensed) користувачем називається приймач і передавач, який використовує білі плями в діапазоні частот, за яким він не закріплений.

При виникненні інтерференції вторинний користувач повинен негайно звільнити займані ресурси. Це є основною перешкодою для впровадження системи когнітивного радіо в діючий спектр частот і подальшого надання послуг користувачам. Інтерференція сигналу первинного і вторинного користувача показана на рисунку 2.5.

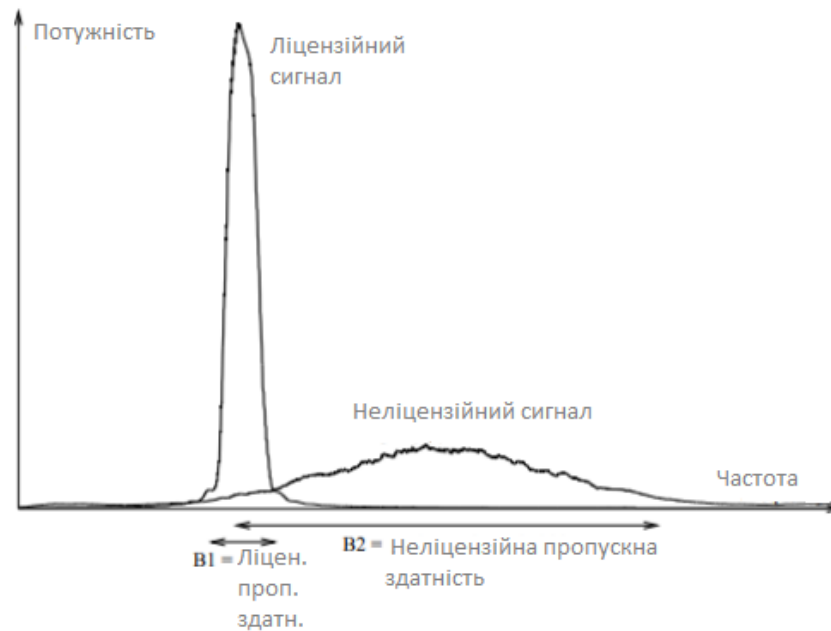


Рисунок 2.5 – Графік інтерференції сигналу користувачів

Дослідження проблеми інтерференції, передбачає створення моделей інтерференції і використання методу ITMA (англ. Interference Temperature Multiple Access) для дослідження даного впливу.

2.6 Застосування теорії машинного навчання для реалізації функцій когнітивного радіо

Повертаючись до визначення системи когнітивного радіо (CRS), звернемо увагу на функції, які реалізує ця система. Насамперед, це збір інформації (англ. Sensing) з можливим зберіганням, що дозволяє системі збирати інформацію в реальному часі про середовище експлуатації, поточний стані каналів та інших.

Потім це система прийняття рішень, так як система динамічно та автономно здатна змінювати свої робочі параметри.

Виходячи з даних вимог у системі мають бути реалізовані відповідні алгоритми, від функціонування яких залежить ефективність роботи системи загалом.

У великій кількості досліджень для повноцінного функціонування моделей пропонуються різні алгоритми вирішальні завдання [26].

Аналізуючи запропоновані алгоритми та результати їх роботи сформуємо основні вимоги щодо їх реалізації:

- Простота реалізації;
- Швидкість обробки емпіричних даних;
- Мінімізація втрат ресурсів.

Оптимізація витрат на обчислювальні ресурси є актуальною питанням, тому зі збільшенням складності алгоритмів зростає також кінцева ціна пристрою.

Грань, що визначає необхідну складність логічно вибрати виходячи з графіків ефективності функціонування алгоритмів.

Швидкість обробки даних, отриманих когнітивною системою впливає на швидкість прийняття рішень, що визначає загальну швидкість роботи пристрою та його ефективність.

Також необхідно враховувати принцип роботи алгоритмів, який враховує не лише поточний стан каналів, а й перспективу зміни каналу, виражену в коефіцієнтах прогнозу, що у свою чергу дозволить уникнути зайвих тимчасових витрат на процедуру зміни каналу [24].

Машинне навчання (Machine Learning) – це великий підрозділ штучного інтелекту (англ. Artificial intelligence), що вивчає методи побудови алгоритмів, здатних вчитися.

Розрізняють два основні типи навчання:

- навчання з прецедентів, або індуктивне навчання, засноване на виявленні загальних закономірностей за приватними емпіричними даними;
- дедуктивне навчання передбачає формалізації знань експертів та їх перенесення до комп'ютера як бази знань.

Машинне навчання знаходиться на стику математичної статистики, методів оптимізації та класичних математичних дисциплін, але має також та власну специфіку, пов'язану з проблемами обчислювальної ефективності та перенавчання.

Багато методів індуктивного навчання розроблялися як альтернатива класичним статистичним підходам. Багато методів тісно пов'язані з вилученням інформації та інтелектуальним аналізом даних (англ. Data Mining).

Теоретичні розділи машинного навчання об'єднані окремо в напрямок, названий теорією обчислювального навчання (Computational Learning Theory, COLT).

Машинне навчання – не тільки математична, а й практична, інженерна дисципліна. Чиста теорія, як правило, не призводить відразу до методів і алгоритмів, які застосовуються на практиці. Щоб змусити їх добре працювати, доводиться винаходити додаткові евристики, що компенсують невідповідність зроблених теоретично припущень умовам реальних завдань [28].

Майже жодне дослідження в машинному навчанні не обходиться без експерименту на модельних або реальних даних, що підтверджує практичну працездатність методу.

Розглянемо типове завдання навчання з прецедентів:

Дана кінцева множина прецедентів (об'єктів, ситуацій), по кожному з яких зібрані (виміряні) деякі дані.

Дані про прецедент називають також його описом. Сукупність всіх наявних описів прецедентів називається навчальною вибіркою. Потрібно за цими приватними даними виявити загальні залежності, закономірності, взаємозв'язки, властиві не тільки цій конкретній вибірці, але взагалі всім прецедентам, у тому числі тим, які ще не спостерігалися.

Найбільш поширеним способом опису прецедентів є ознаковий опис. Фіксується сукупність n показників, що вимірюються в усіх прецедентів.

Якщо всі n показників числові, то ознакові описи є числові вектори розмірності n . Можливі і більше складні випадки, коли прецеденти описуються тимчасовими рядами або сигналами, зображеннями, відеорядами, текстами, попарними відносинами подібності чи інтенсивності взаємодії, тощо.

Для вирішення завдання навчання за прецедентами насамперед фіксується модель відновлюваної залежності.

Потім, вводиться функціонал якості, значення якого показує, наскільки добре модель описує дані, що спостерігаються. Алгоритм навчання (англ. Learning algorithm) шукає такий набір параметрів моделі, при якому функціонал якості на заданій навчальній вибірці набуває оптимального значення.

Процес налаштування (англ. Fitting) моделі з вибірки даних у більшості випадків зводиться до застосування чисельних методів оптимізації.

Розглянемо класифікацію завдань навчання з прецедентів:

- Навчання з учителем (англ. supervised learning) – найпоширеніший випадок. Кожен прецедент є парою «об'єкт, відповідь». Потрібно знайти функціональну залежність відповідей від описів об'єктів та побудувати алгоритм, що приймає на вході опис об'єкта та видає на виході відповідь. Функціонал якості зазвичай визначається як середня помилка відповідей, виданих алгоритмом по всіх об'єктах вибірки.

- Завдання класифікації (англ. classification) відрізняється тим, що безліч допустимих відповідей збісно. Їх називають мітками класів (англ. class label). Клас – це безліч всіх об'єктів з цим значенням мітки.

- Завдання регресії (англ. regression) відрізняється тим, що допустимим відповіддю є дійсне число чи числовий вектор.

- Завдання ранжирування (англ. learning to rank) відрізняється тим, що відповіді треба отримати відразу на безлічі об'єктів, після чого відсортувати їх за значенням відповідей.

- Завдання прогнозування (англ. forecasting) відрізняється тим, що об'єктами є відрізки часових рядів, що обриваються в той момент, коли потрібно зробити прогноз у майбутнє. Для вирішення задач прогнозування часто вдається пристосувати методи регресії чи класифікації, причому у другому випадку йдеться швидше про завдання прийняття рішень.

- Навчання без вчителя (англ. unsupervised learning). У цьому випадку відповіді не задаються і потрібно шукати залежності між об'єктами.

- Завдання кластеризації (clustering) полягає в тому, щоб згрупувати об'єкти в кластери, використовуючи дані про попарну схожість об'єктів. Функціонали якості можуть визначатися по-різному, наприклад, як відношення середніх міжкластерних та внутрішньокластерних відстаней.

- Завдання пошуку асоціативних правил (англ. association rules learning). Вихідні дані подаються як ознакових описів. Потрібно знайти такі набори ознак, і такі значення цих ознак, які особливо часто (невипадково часто) зустрічаються в ознакових описах об'єктів.

- Завдання фільтрації викидів (англ. outliers detection) - Виявлення в навчальній вибірці невеликої кількості нетипових об'єктів. В деяких додатках їх пошук є самоціллю (наприклад, виявлення шахрайства). В інших програмах ці об'єкти є наслідком помилок у даних чи неточності моделі, тобто шумом, що заважає налаштовувати модель, і повинні бути видалені з вибірки.

- Завдання побудови довірчої галузі (англ. quantile estimation) - області мінімального обсягу з досить гладкою межею, що містить задану частку вибірки.

- Завдання скорочення розмірності (англ. dimensionality reduction) полягає в тому, щоб за вихідними ознаками за допомогою деяких функцій перетворення перейти до найменшої кількості нових ознак, не втративши при цьому жодної суттєвої інформації про об'єкти вибірки. В класі лінійних перетворень найбільш відомим прикладом є метод основних компонентів.

- Завдання заповнення пропущених значень (англ. missing values)
 - заміна значень у матриці об'єкти-ознаки їх прогнозними значеннями.

- Часткове навчання (англ. semi-supervised learning) займає проміжне становище між навчанням з учителем та без вчителя. Кожен прецедент має пару «об'єкт, відповідь», але відповіді відомі лише на частини прецедентів. Приклад прикладного завдання – автоматична рубрикація великої кількості текстів за умови, що деякі з них віднесені до якоїсь рубрики.

- Трансдуктивне навчання (англ. transductive learning). Дана кінцева навчальна вибірка прецедентів. Потрібно за цими приватними

даними зробити передбачення щодо інших приватних даних - тестової вибірки.

На відміну від стандартної постановки, тут не потрібно виявляти загальну закономірність, оскільки відомо, що нових тестових прецедентів не буде. З іншого боку, з'являється можливість покращити якість пророкувань за рахунок аналізу всієї тестової вибірки цілком, наприклад, шляхом її кластеризації. У багатьох додатках трансдуктивне навчання практично не відрізняється від часткового навчання.

- Навчання з підкріпленням (англ. reinforcement learning). Роль об'єктів грають пари «ситуація, прийняте рішення», відповідями є значення функціоналу якості, що характеризує правильність прийнятих рішень (реакцію середовища). Як і завдання прогнозування, тут істотну роль грає чинник часу.

Приклади прикладних завдань: формування інвестиційних стратегій, автоматичне управління технологічними процесами, самонавчання роботів і т.д.

- Динамічне навчання (англ. online learning) може бути як навчанням з вчителем, так і без вчителя. Специфіка у тому, що прецеденти надходять потоком. Потрібно негайно приймати рішення щодо кожного прецеденту та одночасно доучувати модель залежності з урахуванням нових прецедентів. Як і у завданнях прогнозування, тут важливу роль відіграє фактор часу.

- Активне навчання (англ. active learning) відрізняється тим, що має можливість самостійно призначати наступний прецедент, який стане відомий.

- Метанавчання (англ. meta-learning) відрізняється тим, що прецедентами є раніше вирішені завдання навчання. Потрібно визначити, які з використовуваних в них евристик працюють найефективніше. Кінцева мета – забезпечити постійне автоматичне вдосконалення алгоритму навчання з плином часу.

- Багатозадачне навчання (англ. multi-task learning). Набір взаємопов'язаних або подібних завдань навчання вирішується одночасно, за допомогою різних алгоритмів навчання, що мають схоже

внутрішнє уявлення. Інформація про подібність завдань між собою дозволяє більш ефективно вдосконалювати алгоритм навчання та підвищувати якість вирішення основного завдання.

- Індуктивне перенесення (англ. *inductive transfer*). Досвід вирішення окремих приватних завдань навчання за прецедентами переноситься на вирішення наступних приватних завдань навчання. Для формалізації та збереження цього досвіду застосовуються реляційні чи ієрархічні структури уявлення знань.

Основною метою машинного навчання є часткова чи повна автоматизація вирішення складних професійних завдань у різних галузях людської діяльності. Машинне навчання має широкий спектр додатків у біоінформатиці, медицині, геології, економіці, соціології, офісній автоматизації і звичайно техніки.

Деякі приклади додатків машинного навчання у техніці:

- технічна діагностика;
- робототехніка;
- комп'ютерний зір;
- розпізнавання мови та інші.

У сучасному світі сфера застосування машинного навчання постійно розширюється. Повсюдна інформатизація призводить до накопичення величезних обсягів даних у науці, виробництві, бізнесі, транспорті, охороні здоров'я.

Виникають при цьому завдання прогнозування, управління та прийняття рішень часто зводяться до навчання з прецедентів. Раніше, коли таких даних не було, ці завдання або взагалі не ставилися, або вирішувалися зовсім іншими методами.

3 УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМ СПЕКТРОМ В КОГНІТИВНІЙ РАДІОМЕРЕЖІ

3.1. Методи вирішення задач динамічного розподілу спектру

У системах когнітивного радіо прийнято розрізняти первинних і вторинних користувачів. Первинний користувач володіє ексклюзивними правами на використання деякої ліцензованої смуги частот. Вторинний користувач має право використання ліцензованої смуги частот тільки в тому випадку, якщо вона не зайнята первинним користувачем.

Передача прав на використання спектра від первинних користувачів вторинним з подальшим динамічним розподілом спектра між ними дозволяє значно збільшити ефективність використання спектрального ресурсу.

Для опису технологій розподілу спектра між користувачами використовують велику кількість різноманітних технічних термінів. Хоча, деякі з них протиставляються один одному: динамічний доступ спектра проти динамічного розподілу спектра, право власності на спектральний діапазон проти вільного використання спектра, гнучкий доступ до спектру проти об'єднання спектра, spectrum overlay проти spectrum underlay. Класифікації моделей динамічного доступу до спектру представлена на рисунку 3.1.

Динамічна модель ексклюзивного використання спектра (Dynamic Exclusive Use Model). Дана модель передбачає видачу дозволів (ліцензій) на використання радіочастот або радіочастотних каналів, але допускається деяка додаткова ступінь свободи при закріпленні частот.

В рамках моделі пропонується розглядати два підходи: право власності на спектр і динамічний призначення спектра. У першому випадку допускається можливість для ліцензованого користувача перепродувати частину своїх частот, а також надається свобода у виборі використовуваних технологій.

Другий підхід передбачає прив'язувати розподіл спектра в конкретному місці і в конкретний час до певних служб (сервісів), ґрунтуючись на статистичних даних про трафік.

Модель вільного розподілу (Open Sharing Model) заснована на вільному доступі тимчасових користувачів до спектрального діапазону. В рамках цієї моделі досліджувалися централізована і розподілена стратегії розподілу. Послідовники цієї моделі в якості позитивного прикладу приводять успішний розвиток бездротових систем які працюють в неліцензованому діапазоні – індустриальні, наукові та медичні системи (ISM).

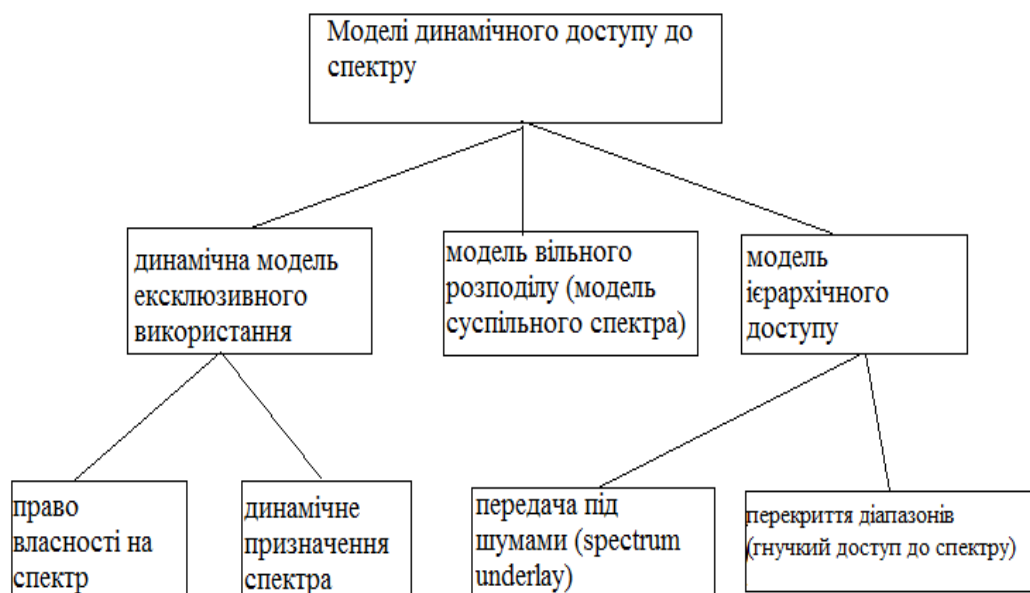


Рисунок 3.1 – Класифікації моделей динамічного доступу до спектру

Модель ієрархічного доступу (Hierarchical Access Model).

Основна ідея в тому, що вторинні користувачі можуть використовувати ліцензовані (для первинних користувачів) спектральні діапазони, але при цьому накладаються жорсткі обмеження на перешкоди, створювані для первинних користувачів.

Існує два підходи розподілу і спільного використання спектра первинними і вторинними користувачами: spectrum underlay і spectrum overlay.

При першому підході вторинним користувачам дозволяється робота з малою потужністю, якщо ця потужність не перевищує шумовий поріг для систем первинних користувачів. Це так звана передача під шумами.

Такий підхід може бути реалізований при використанні вторинними користувачами надширокосмугових систем передачі [27].

Другий підхід (spectrum overlay) відомий також як гнучкий доступ до спектру (opportunistic spectrum access). В цьому підході обмеження накладаються на потужність передавача вторинного користувача, на час, місце передачі і частоти, які можливо використовувати. Завдяки цьому, вторинні користувачі визначають незайняті області спектра і здійснюють передачу, не заважаючи первинним користувачам [5].

Для підвищення ефективності використання спектра обидва підходи (Overlay і underlay) можуть бути задіяні спільно. Приклад роботи когнітивної радіосистеми представлений на рисунку 3.2.

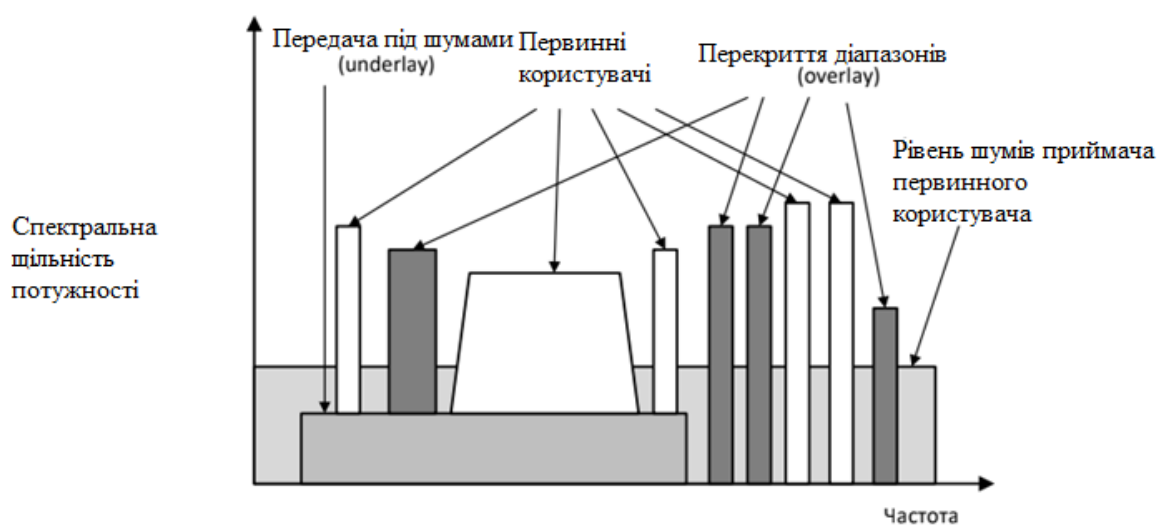


Рисунок 3.2 – Приклад роботи когнітивної радіосистеми в режимах underlay і overlay

Існують різні методи динамічного розподілу спектра в системах когнітивного радіо (рисунок 3.3). Розподіл спектра між базовими станціями стандарту IEEE 802.22 на основі алгоритму розфарбовування графа розглянуто в роботі.

В роботі розглядаються моделі аукціонів, спрямованих на розподіл спектра між приймально-передавальними терміналами шляхом управління потужністю вузлів-передавачів, результатом яких є тимчасова передача прав на використання деякого частотного діапазону від первинного користувача вторинному.

Періодичний аукціон передачі прав первинного використання частотних діапазонів розглядається в роботі.

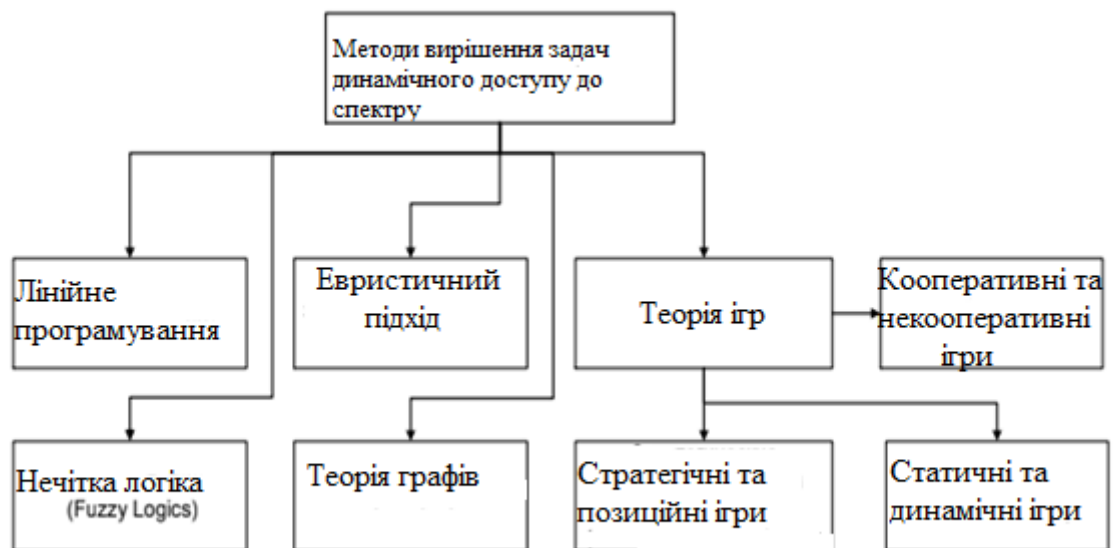


Рисунок 3.3 – Методи вирішення задач динамічного розподілу спектра

Методи лінійного програмування використовуються при виконанні завдання на координації доступу до спектру декількох користувачів когнітивної радіомережі, що використовують один приймально-передавач в напівдуплексному режимі.

Евристичний підхід, серед усіх методів, які застосовуються для вирішення завдань пов'язаних з динамічним доступом, є одним із найпростіших. Він дозволяє використовувати субоптимальні евристичні алгоритми для зниження складності рішення задачі.

Коли необхідно приймати рішення на основі невизначеної, неточної або неповної інформації – застосовується нечітка логіка.

Елементи нечіткої логіки використовуються для максимізації доступу до спектру вторинних користувачів когнітивної радіомережі.

На основі лінгвістичних знань про спектральний доступ, було сформовано 27 нечітких правил [6]. В якості дескрипторів, при формуванні бази знань, використовуються: ефективність використання спектра вторинними користувачами; їх ступінь мобільності і відстань до первинного користувача.

У тих випадках, коли структура досліджуваної когнітивної мережі відома, для вирішення завдання розподілу спектральних ресурсів застосовують методи теорії графів. Розподіл спектра між базовими станціями стандарту IEEE 802.22 на основі алгоритму розфарбовування графа розглянуто в роботі.

Методи теорії ігор добре зарекомендували себе при вирішенні економічних завдань. Останнім часом ці методи знаходять застосування і в інших сферах. У когнітивному радіо алгоритми теорії ігор розглядається як досить ефективна модель рішення задач динамічного доступу до спектральних ресурсів.

Якщо в когнітивній радіомережі прийняття рішення щодо розподілу спектра здійснюється в умовах неповної інформації, то вибирається метод нечіткої логіки.

3.2. Математичні основи нечіткої логіки

Математична теорія нечітких множин і нечітка логіка є узагальненням класичної теорії множин та формальної логіки. Дані поняття були запропоновані американським ученим З. Лотфі у 1965 році. Основною причиною появи нової теорії було наявність нечітких і

наближених міркувань при описі людиною процесів, систем, об'єктів [7].

Широкий спектр додатків нечітких моделей та методів: від управління процесом відправлення та зупинки поїзда метрополітену, управління вантажними ліфтами та доменною піччю, до пральних машин, пилососів та печей НВЧ.

При цьому нечіткі системи дозволяють підвищити якість продукції при зменшенні ресурсу та енерговитрат та забезпечують більш високу стійкість до дії факторів, що заважають.

Математична теорія нечітких множин дозволяє описувати нечіткі поняття та знання, оперуючи цими знаннями, і робити нечіткі висновки. Нечітка логіка забезпечує ефективні засоби відображення, невизначеностей та неточностей реального світу [13].

Нехай E – універсальна множина, x -елемент E , а R – деяке властивість. Звичайна (чітка) підмножина A універсальної множини E , елементи якого задовольняють властивості R визначається як безліч упорядкованих пар $A = \{\mu_A(x)/x\}$, де $\mu_A(x)$ – характеристична функція приналежності (або просто функція приналежності), що приймає значення в деякій цілком упорядкованій множині M (наприклад, $M = [0,1]$).

Функція приладдя вказує рівень (або рівень) приналежності елемента x підмножини A . Безліч M називають безліччю приладдя. Якщо $M = \{0,1\}$, то нечітке підмножина A може розглядатися як звичайне чи чітке безліч.

Нечітка безліч відрізняється від звичайного тим, що для елементів x з підмножини E немає однозначної відповіді (так/ні) щодо якості R .

У зв'язку з цим нечітка підмножина A універсальної множини E визначається як безліч упорядкованих пар. Функція приналежності $\mu_A(x)$ вказує ступінь (рівень) приналежності елемента x підмножини A .

Основні характеристики нечітких множин:

Величина $\sup \mu_A(x)$ називається висотою нечіткої множини A . Нечітка безліч A – нормально, якщо його висота = 1, тобто верхня межа його функції власності дорівнює 1.

При $\sup \mu_A(x) < 1$ – нечітка множина субнормальна. Якщо функція власності = 0, то нечітка множина порожня. Якщо функція приналежності дорівнює 1, $\mu_A(x) = 1$ лише для одного елемента X , то нечітка множина унімодально.

Якщо підмножина містить функції приналежності > 0 , воно називається A - носієм нечіткої підмножини.

Якщо функція приналежності дорівнює 0, $0 = \mu_A$, то елементи X для якого виконується ця умова називається точками переходу.

Логічні операції над нечіткими множинами:

1) Увімкнення: A міститься в B , якщо функція приналежності елементів

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$$

$A \subset B$ – включення B домінує над A

2) Рівенство: $A = B$, якщо $\mu_A(x) = \mu_B(x)$

3) Доповнення A и B доповнюють один одного, якщо $\mu_A(x) = 1 - \mu_B(x)$ $B = \bar{A}$ або $A = \bar{B}$

4) Перетинає: $A \cap B$ A перетинає B – нечітка підмножина, що містить одночасно в A та в B $\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$

5) Об'єднання (або в A , або в B) нечітка підмножина, що містить як A , так і B $A \cup B$ – об'єднання $\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$

6) Різниця: $A - B = A \cap \bar{B}$ $\mu_{A-B}(x) = \mu_{A \cap \bar{B}}(x) = \min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x))$

7) Дез'юнктивна сума: $A + B = (A - B) \cup (B - A) = (A \cap \bar{B}) \cup (\bar{A} \cap B)$

Функція приналежності $\mu_{A-B}(x) = \max(\min(\mu_A(x), 1 - \mu_B(x)), \min(1 - \mu_A(x), \mu_B(x)))$

Для нечітких множників вводиться поняття нечітко лінгвістичних змінних.

Нечітка змінна описується набором (α, χ, A) , де α - назва змінної, χ - універсальна множина (область α), A - нечіткі множини на χ , що описують обмеження $(\mu_A(x))$ на значення нечіткої змінної α [4].

Значення непарної лінгвістичної змінної можуть бути нечіткі змінні, описується набором (В, Т, Х, G, Р) В- лінгвістичне, Т- безлічі її значень, що являють собою найменування нечітких змінних- Х, областю визначення кожної з яких є безліч - Х.

Безліч Т називається базовою лінгвістичною змінною. G - синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами – Т (наприклад генерувати нові значення), М - синтаксична процедура, що дозволяє перетворити кожне нове значення лінгвістичної змінної, утворює процедурою G нечіткого змінного, тобто сформувати відповідні нечіткі безліч [11].

Існують безліч типових форм для завдання функцій приладдя. Найбільш поширене отримали Трикутна, Трапецеїдальна та Гаусова функція приналежності.

Основою проведення операції нечіткого логічного висновку є база правил, що містить нечіткі висловлювання у формі «якщо» і функція приладдя для відповідних лінгвістичних термінів.

При цьому повинні дотримуватися таких умов:

1) Існує хоча б одне правило для кожної лінгвістичної вихідний змінної.

2) Для будь-якого терму вихідний змінної є хоча б одне правило, в якому цей термін використовується як цільова частина правила. Інакше, має місце основа нечітких правил.

Результатом нечіткого виводу є чітке значення змінної y^* на основі заданих чітких значень x_k .

У випадку механізм нечіткого логічного висновку включає наступні етапи:

- 1) Введення нечіткості
- 2) Нечіткий висновок.
- 3) Композиція.
- 4) Приведення до чіткості

Алгоритми нечіткого висновку розрізняють переважно видам використовуваних правил логічної операції та різновидом методу диверсифікації.

Розроблено моделі нечіткого вигляду: Мамдані, Сугено, Ларсен, Цукамото.

Звичайний, булевий логічний висновок виходить з наступних тавтологій:

модус поненс: $(A \wedge (A \Rightarrow B)) \Rightarrow B$;

модус толленс: $(A \Rightarrow B) \wedge B \Rightarrow A$;

силлогізм: $((A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow C)) \Rightarrow (A \Rightarrow C)$;

контрапозиція: $(A \Rightarrow B) \Rightarrow (B \Rightarrow A)$;

У чіткому логічному висновку найчастіше застосовується правило модус поненс. Модус поненс виводить висновок "В є істинним", якщо відомо, що "А є істинно" і існує правило "Якщо А, то В" (А і В – чіткі логічні затвердження). Однак якщо прецедент відсутній, то модус поненс не зможе вивести жодного, навіть наближеного висновку.

Навіть у випадку, коли відомо, що близьке до А твердження А' є істинним, модус поненс може бути застосований. Одним із можливих способів прийняття рішень за невизначеної інформації є застосування нечіткого логічного висновку.

Нечітким логічним висновком називається отримання висновку як нечіткої множини, що відповідає поточним значенням входів, з використанням нечіткої бази знань та нечітких операцій. $B^t = A^t \circ (A \rightarrow B)$.

Основу нечіткого логічного висновку складає композиційне правило Заді. Композиційне правило виведення Заде формулюється наступним чином: якщо відомо нечітке відношення між входним (х) та вихідним (у) змінними, то при нечіткому значенні входний змінної $x = \tilde{A}$, нечітке значення вихідний змінної визначається так: $y = \tilde{A} \circ R$, де - максимінна композиція.

Нечіткий логічний висновок за алгоритмом Мамдані виконується за нечіткої бази знань у якій значення входних та вихідний змінної задані нечіткими множинами.

Нечіткий логічний висновок за алгоритмом Сугено (алгоритм Такагі-Сугено) виконується за нечіткою базою знань. База знань

Сугено аналогічна базі знань Мамдані, за винятком висновків правил, що задаються не нечіткими термами, а лінійною функцією від входів.

Правила в базі знань Сугено є свого роду перемикачами з одного лінійного закону "входи - вихід" на інший, також лінійний.

Кордони підобластей розмиті, отже, одночасно можуть виконуватися кілька лінійних законів.

4 МЕТОД УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМ СПЕКТРОМ В КОГНІТИВНІЙ РАДІОМЕРЕЖІ, ЯКИЙ ЗАСНОВАНО НА МАТЕМАТИЧНОМУ АПАРАТІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

4.1. Узагальнена методика динамічного оновлення робочих частот в когнітивній системі радіодоступу (КСР))

Початкові дані.

Нехай існує мережа радіо доступу. Вона складається з базової станції (БС) і $(N-1)$ кількостей абонентських терміналів ($АС_i$, $АСЦ_i$). На рисунку 3.4 представлена топологічна модель мережі.

Зона контролю радіусом R – для базової станції та r – для абонентських станцій. Передбачається, що зони контролю різномірні, радіус і конфігурація визначається характеристиками зовнішнього середовища мережі (а саме – рельєфом місцевості, наявністю екрануючих або відображаючих електромагнітні випромінювання перешкод).

Задано безліч (вторинних) робочих частот $Df = \{f_1...f_l\}$, які надані для функціонування мережі. Множинний доступ в мережі і дуплексування (поділ каналів прийому і передачі) – тимчасові. Отже, всі станції мережі використовують одночасно одну з наданої безлічі $\{f_1...f_l\}$ частот.

Всі станції мережі (базова і абонентські) виконують дві функції: приймають (або передають) інформацію і вивчають стан робочої («вільних» від трансляції і прийому тимчасових вікнах) і резервних частот.

Підвищення активності мережі первинних користувачів може привести до погіршення характеристик радіоканалу в місцях розташування однієї або декількох станцій мережі.

В когнітивній мережі радіозв'язку (КСР) здійснюється вибір кращої частоти на основі раніше отриманих мережових знань про зміни зовнішнього середовища [19].

Постановка задачі.

Необхідно розробити спосіб динамічного управління мережевими частотними ресурсами. В основі – знання, які формуються в ході постійного колективного вивчення (базовою станцією і абонентськими пристроями) стану виділених для здійснення зв'язку робочих частот.

Обмеження:

Крок сітки частот визначає кількість частотних каналів. Він передбачає наявність мінімально необхідного частотного розносу між сусідніми каналами для забезпечення ЕМС. Радіоканал зв'язку – канал з адитивним білим гауссовским шумом (АБГШ):

$$s'(t) = s(t) + n(t) \quad (4.1)$$

де:

$s'(t)$ – корисна складова вихідного сигналу;

$n(t)$ – АБГШ;

$s(t)$ – сумарний сигнал на вході приймача.

Рішення.

В зв'язку з тим, що місця розміщення абонентських станцій і базової станції різні, стан робочого і резервних радіоканалів також можуть бути різні.

Дана обставина обумовлюється наявністю перешкод різного походження і відмінністю умов поширення в місцях розміщення абонентських і базової станції.

З урахуванням впливу зовнішніх перешкод, формула (4.1) набуває вигляду:

$$s'(t) = s(t) + n(t) + n_{\text{п}}(t) = s(t) + n_{\text{пш}}(t). \quad (4.2)$$

де:

$n_{\text{п}}(t)$ – перешкода;

$n_{\text{пш}}(t)$ – сумарний сигнал АБГШ та перешкоди.

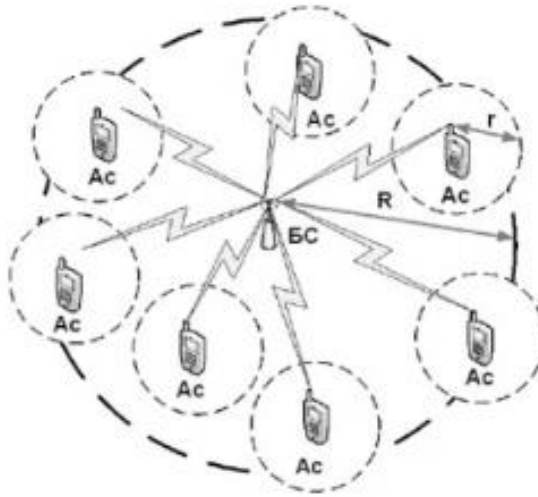


Рисунок 4.1 – Модель структури когнітивної радіосистеми

Відношення сигнал / шум на вході приймача в загальному вигляді визначається як:

$$SNR = \frac{P_c}{P_{ш} + P_c}. \quad (4.3)$$

При появі в радіоканалі тривалої перешкоди збільшення може бути досягнуто шляхом вибору частоти з більш низьким її рівнем.

Поява локальних зовнішніх перешкод призводить до змін локальної радіоелектронної обстановки (в місці розміщення абонентської або базової станції), які фіксуються їх аналізаторами якості робочих і резервних радіоканалів [19].

Радіоелектронна обстановка (РЕО) може бути описана з допомогою числових характеристик випадкових величин – математичне очікування (МО) і середньоквадратичне відхилення (СКО) рівня перешкод (перешкода + шум).

Передбачається, що вимір характеристик радіоканалів здійснюється дискретно:

$$T = Jt_0 \quad (4.4)$$

де:

T – період спостереження;

t_0 – час між відліками;

J – кількість відліків для оцінки характеристик випадкової величини.

Отже, МО рівня шумів і перешкод в i -му каналі може бути визначено як середнє його значення:

$$M_{\text{ш}i} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{\text{ш}pi,j} \quad (4.5)$$

де:

$P_{\text{ш}pi,j}$ – рівень шуму і перешкоди (далі – перешкоди), виміряна в j -й відлік часу в i -му каналі. Значення СКО визначається як:

$$\sigma_{\text{рпш}i} = \sqrt{(M_{p^2\text{ш}i} - (M_{\text{рпш}i})^2)} \quad (4.6)$$

де:

$M_{p^2\text{ш}i}$ – математичне очікування квадрата рівня перешкод в i -му каналі ($P_{\text{ш}i}$).

4.2 Методика формування переліку робочих частот для мережі радіодоступу

1) У процесі функціонування кожна АС і БС здійснюють збір первинних статистичних даних про РЕО в точці прийому на частотах виділеного діапазону $Df = \{f_1 \dots f_l\}$ з циклової періодичністю T .

Первинні статистичні дані для кожної n -ої точки контролю РЕО є матриця $[P_{ij}]$ розмірністю $I \times J$, де I – кількість частотних каналів, J – кількість тимчасових відліків, n – номер точки контролю (АС або БС).

Осередки матриці заповнюються вимірюваними значеннями рівня перешкоди. Моніторинг РЕО здійснюється безперервно за рахунок циклічності перезапису даних в матриці. Тим самим досягається актуальність даних і безперервність аналізу.

- 2) Після першого заповнення всіх осередків матриці первинних даних, виконується розрахунок МО і СКО рівня потужності перешкоди в кожному каналі згідно формул (4.5) і (4.6), на підставі чого кожна АС і БС формують два вектор-рядки:

$$\vec{M}_{pшп^n} = [M_{pшпi}]_n \quad (4.7)$$

$$\sigma_{pшпi} = [\sigma_{пшпi}]_n \quad (4.8)$$

де:

n – номер АС (або БС);

i – номер частотного каналу.

- 3) Сформовані вектор-рядки передаються наприкінці кожного циклу аналізу (по каналу управління) на базову станцію. Після – формується дві матриці даних РЕО розмірністю $N \times I$:

$$M_{pшпi} = [M_{p,nj}], \quad (4.9)$$

$$\sigma_{pшпi} = [\sigma_{пшп,n,i}]. \quad (4.10)$$

- 4) Далі за результатами обробки даних з обох матриць формується матриця рейтингу частотних каналів розмірності $N \times I$:

$$R_f = [R_{f,ni}]. \quad (4.11)$$

де, значення осередків відповідають ваговим коефіцієнтам частотних каналів (їх рейтингу згідно придатності для забезпечення зв'язку).

При цьому, формування коефіцієнтів здійснюється для кожного елемента матриці окремо, на основі застосування апарату нечіткої логіки.

Методика визначення вагових коефіцієнтів розглянута нижче.

5) Над отриманою матрицею вагових коефіцієнтів проводиться операція згортки по рядках (абонентам мережі) виходячи з критерію мінімуму вагового коефіцієнта для кожного частотного каналу (привласнення мінімальних вагових коефіцієнтів частотним каналах по всій мережі).

В результаті чого формується вектор-рядок вагових коефіцієнтів частотних каналів:

$$R'_f = [\min[R_{n,i}]] = [R_{fi}]. \quad (4.12)$$

Сформований вектор-рядок розсилається всім абонентам для формування переліку запасних частот.

6) За результатами аналізу отриманої вектор рядки за критерієм максимуму вагового коефіцієнта визначається найкращий для забезпечення зв'язку частотний канал:

$$f_{iш} = f_i. \quad (4.13)$$

де i – відповідає номеру частотного каналу з максимальним ваговим коефіцієнтом:

$$f_i \sim \max[R_{fi}]. \quad (4.14)$$

7) Автоматично, при погіршенні якості каналу зв'язку або неможливості забезпечення зв'язку із заданою якістю на поточному каналі, по команді базової станції здійснюється перехід на запасний частотний канал.

4.3 Методика формування матриці вагових коефіцієнтів

Для прийняття рішення про присвоєння вагових коефіцієнтів скористаємося найбільш поширеною схемою нечіткого виведення.

Дві вихідні характеристики частотного каналу – МО і СКО приймемо як вхідні змінні. За вихідну змінну буде взято ваговий коефіцієнт (рейтинг) частотного каналу. Таким чином формується схема MISO – Multiply Input – Single Output (множинний вхід – одиничний вихід).

У загальному вигляді структура моделі нечіткої системи прийняття рішення з двома входами і одним виходом представлена таким чином: прийняття рішень здійснюється за кілька послідовних операцій.

Перша операція називається «фазифікації» (обчислення ступенів приналежності) – зіставлення базових (чисельних) значень змінних їх логічним змінним (термам) за допомогою функцій приналежності, що визначають ступінь відповідності базових значень відповідним термам.

Виходячи зі зручності формування правил нечіткого виведення, а також необхідної точності обчислень, визначається кількість термів для вхідних і вихідної змінних.

Збільшення кількості термів призводить до підвищення точності, але разом з тим складність опису правил нечіткого вибору значно зростає. У більшості випадків достатньо 3-7 термів для вхідних змінних.

Кількість термів вихідних змінних вибирається з урахуванням необхідної кількості лінгвістичних змінних для опису всіх сполучень вхідних умов при формуванні правил нечіткого виводу.

У найпростішому випадку функції приналежності задаються як трикутні. Це дозволяє мінімізувати кількість параметрів налаштування системи (для завдання функцій приналежності) і завдяки цьому дає можливість спростити налаштування систем.

Функції приналежності можуть бути описані як графічно, так і аналітично. Області значень для всіх нормованих функцій

приналежності лежать в межах $[0; 1]$, де «0» – повна невідповідність, «1» – повна відповідність базового значення відповідного терму.

В даному випадку для вхідних змінних раціонально використовувати два терми, що відбивають крайні оцінки базової величини. Для формування вихідних даних потрібно три терми, що обумовлені кількістю поєднання вхідних змінних (чотири поєднання), при наявності двох крайніх поєднань і двох проміжних (нейтральних, що мають невизначене значення).

В даному випадку $[M_{p_ni}]$ и $[\sigma_{p_ni}]$ визначаються як матриці вхідних змінних, які переводяться в нечіткий вигляд за таким правилом:

$$B_{M_{pni},i} = \{M_{p_{шпн},i} [\min (M_{p_{шпн},i}); \max (M_{p_{шпн},i})]\}, \quad (4.15)$$

$$F_{M_p} = \{\text{Низьке}, \text{Високе}\}.$$

де:

$B_{M_{pni}}$ – базове значення змінної M_{pni} , що лежить в діапазоні від мінімального до максимального згідно значень елементів вхідної матриці $[M_{p_{шпн},i}]$;

F_{M_p} – нечітке значення (терми) змінної, що має лінгвістичні значення «низьке» (Н), «високе» (В).

Функція приналежності $\mu_{M_p}(B_{M_{pni}}, F_{M_p})$, відображає ступінь відповідності базового значення її термам, описується як:

$$\mu_{M_p}(B_{M_{pni},i}, F_{M_p}) = \begin{cases} \mu_{M_p}(B_{M_{pni},i}, H), & \text{при } F_{M_p} = H; \\ \mu_{M_p}(B_{M_{pni},i}, B), & \text{при } F_{M_p} = B \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\mu_{M_p}(B_{M_{pni},i}, H) = \left(\frac{B_{M_{pni},i} - \max([M_{p_{шпн},i}])}{\min([M_{p_{шпн},i}]) - \max([M_{p_{шпн},i}])} \right), \quad (4.17)$$

$$\mu_{M_p}(B_{M_{pni},i}, B) = \left(\frac{B_{M_{pni},i} - \min([M_{p_{шпн},i}])}{\max([M_{p_{шпн},i}]) - \min([M_{p_{шпн},i}])} \right). \quad (4.18)$$

Графічно функції приналежності представлені на рисунку 4.5.

Аналогічно для $[\sigma_{ршпн,i}]$:

$$B\sigma_{pn,i} = \{\sigma_{ршпн,i}[0; \max([\sigma_{ршпн,i}])]\}. \quad (4.19)$$

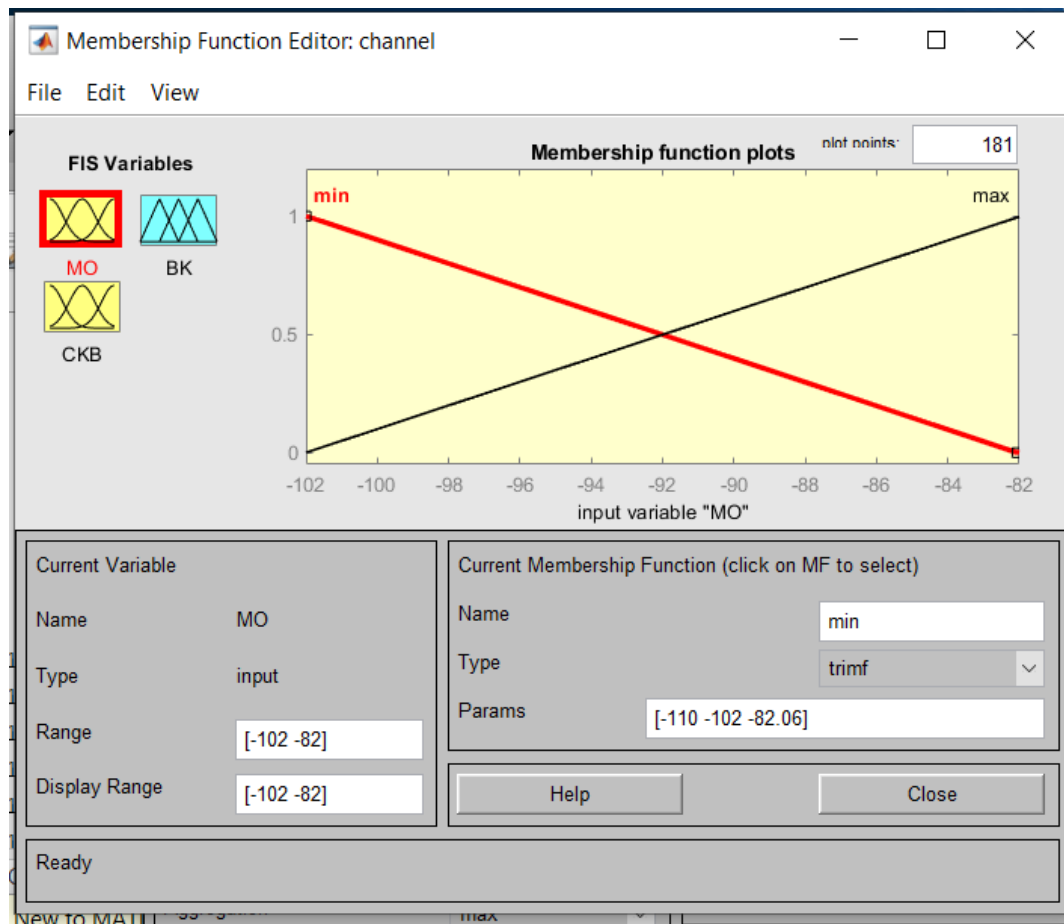


Рисунок 4.2 – Функції приналежності ХМР ($B_{Mpn,i}$, F_{Mp}) в графічному представленні

$$F_{\sigma p} = \{\text{Низьке, Високе}\}, \quad (4.20)$$

де:

$B_{\sigma pn,i}$ – базові значення змінної $\sigma_{ршпн,i}$, що лежать в діапазоні від 0 до максимального згідно значень елементів вхідної матриці $[\sigma_{ршпн,i}]$;

$F_{\sigma p}$ – нечітке значення (терми) змінної, що мають лінгвістичні значення «низьке» (Н), «високе» (В).

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, F_{\sigma_p}) = \begin{cases} \mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, H), & \text{при } F_{\sigma_p} = H; \\ \mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, B) & \text{при } F_{\sigma_p} = B. \end{cases} \quad (4.21)$$

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, H) = \left(\frac{B_{\sigma_p n, i} - \max([\sigma_{P_{\text{ш}} n, i}])}{-\max([\sigma_{P_{\text{ш}} n, i}])} \right). \quad (4.22)$$

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, B) = \left(\frac{B_{\sigma_p n, i}}{\max([\sigma_{P_{\text{ш}} n, i}])} \right) \quad (4.23)$$

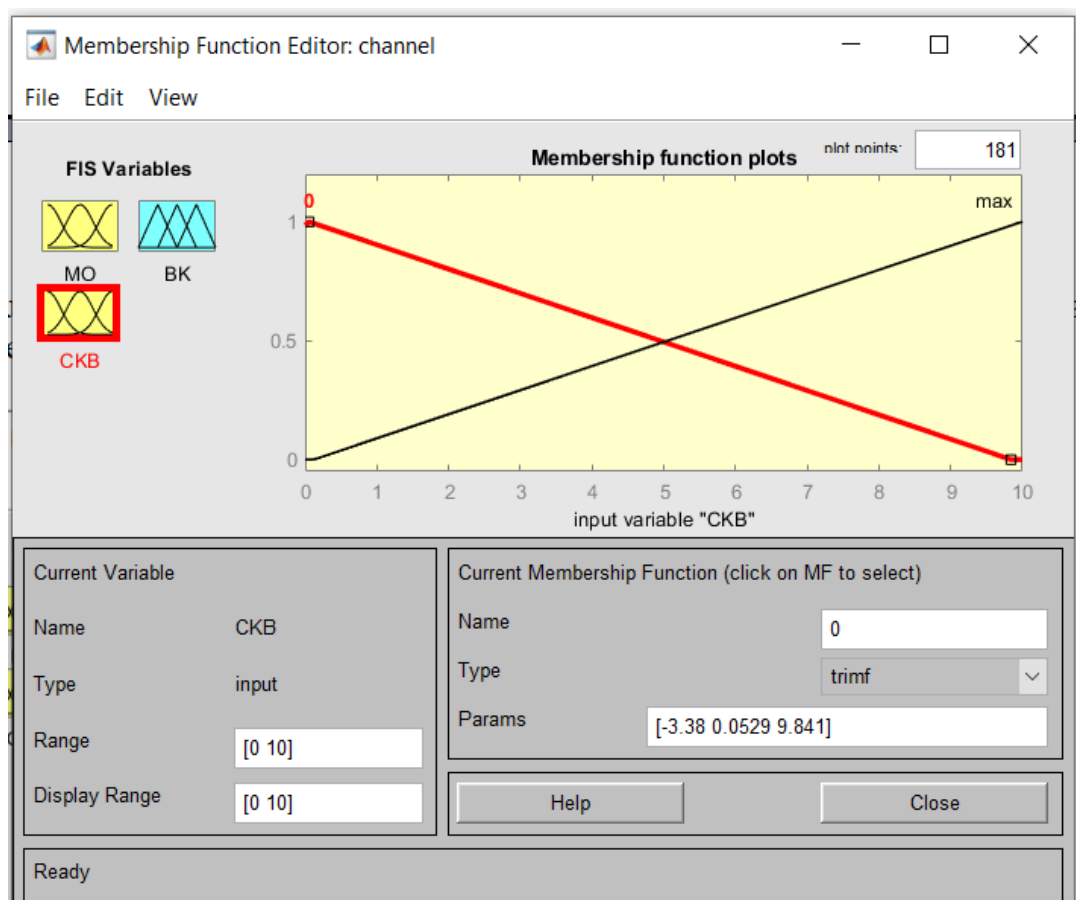


Рисунок 4.3 – Функції приналежності $\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, F_{\sigma_p})$ в графічному поданні

Для матриці вихідних значень $\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_p n, i}, F_{\sigma_p})$ також необхідно визначити базове і нечітке значення і функцію приналежності. Базове значення лежить в діапазоні $[0; 1]$ і відображає ваговий коефіцієнт оцінюваного i -го частотного каналу в n -ой точці контролю:

$$B_{R_f n, i} = \{R_{fn, i}, [0; 1]\}, \quad (4.24)$$

де:

$F_{Rf} = \{\text{Поганий, Середній, Хороший}\}.$

B_{fni} – базові значення вагового коефіцієнта частотного каналу змінної R_{fni} ;

F_{Rf} – нечітке значення (терми) змінної, що має лінгвістичні значення «поганий» (П), «середній» (С), «хороший» (Х).

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, F_{R_f}) = \begin{cases} \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \Pi), & \text{при } F_{R_f} = \Pi; \\ \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, C), & \text{при } F_{R_f} = C; \\ \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, X), & \text{при } F_{R_f} = X. \end{cases} \quad (4.25)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \Pi) = \begin{cases} (1 - 2B_{R_f n, i}), & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 0, & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (4.26)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, C) = \begin{cases} 2B_{R_f n, i}, & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 2(1 - B_{R_f n, i}), & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (4.27)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, X) = \begin{cases} 0, & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 2(B_{R_f n, i} - 0,5), & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (4.28)$$

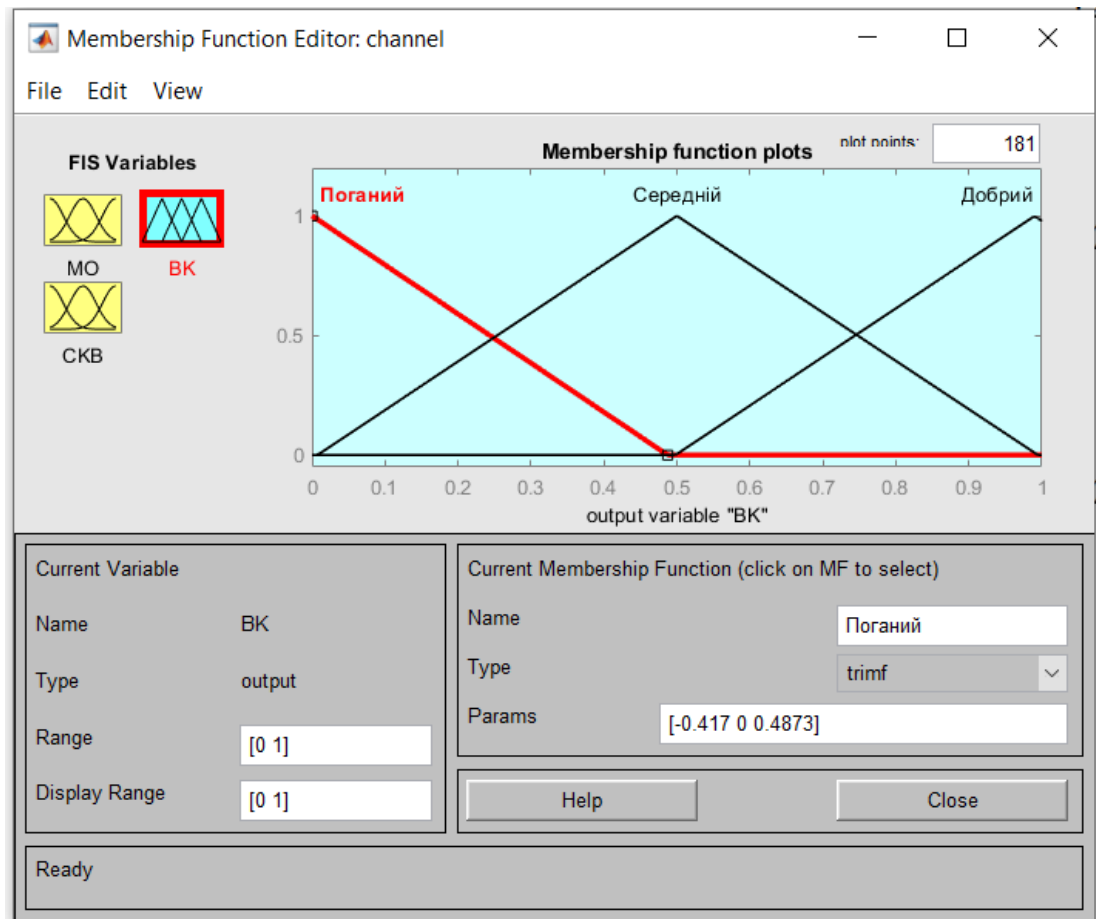


Рисунок 4.4 – Функції приналежності $\mu_{Rf}(B_{Rfi}, F_{Rf})$ в графічному представленні

Друга операція – формування нечіткого виведення. Вона проходить в кілька етапів.

В основі для проведення лежать правила нечіткого виведення. Вони використовуються для зіставлення поєднань функцій належності вхідних змінних та функцій належності вихідної змінної.

Це зручно представляти у вигляді таблиці (таблиця 1) за принципом «умова-слідство» («якщо-щось»), при цьому поєднанні вхідні умови визначаються оператором перетину «I».

Таблиця 4.1 – Правила нечіткого виведення

$\mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, F_{Rf})$		$\mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, F_{\sigma p})$	
		Н	В
$\mu_{Rf}(B_{Mpn,i}, F_{Mp})$	Н	Х	С
	В	С	П

Аналітично в загальному вигляді формування правил нечіткого виведення може бути записано як:

$$\mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, F_{\sigma p}) \cap \mu_{Mf}(B_{Mpn,i}, F_{Mp}) = \mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, F_{Rf}) \quad (4.28)$$

Перший етап – обчислення ступенів належності для кожного правила нечіткого виведення (ступінь виконання умови).

В даному випадку використовується оператор перетину (або t-норма) – одночасне виконання двох вхідних умов.

Використовується маючий середню ступінь оптимізму оператор множення "PROD" (гідністю якого є облік значень всіх ступенів належності термів вхідних змінних):

$$\mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, X) = \mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, H) \cdot \mu_{Mf}(B_{Mpn,i}, H), \quad (4.29)$$

$$\begin{cases} \mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, C)_1 = \mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, H) \cdot \mu_{Mf}(B_{Mpn,i}, B); \\ \mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, C)_2 = \mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, B) \cdot \mu_{Mf}(B_{Mpn,i}, H). \end{cases} \quad (4.30)$$

$$\mu_{Rf}(B_{Rfn,i}, \Pi) = \mu_{\sigma f}(B_{\sigma pn,i}, B) \cdot \mu_{Mf}(B_{Mpn,i}, B). \quad (4.31)$$

Другий етап – знаходження значень функціональної приналежності правила при наявності альтернативних вхідних умов.

Це здійснюється із застосуванням s-норми, в якості якої виступає оператор мах, що відображає невелике правдоподібність умови:

$$\mu_{R_f}(B_{R_{fn},i}, C) = \max(\mu_{R_f}(B_{R_{fn},i}, C)_1, \mu_{R_f}(B_{R_{fn},i}, C)_2) \quad (4.32)$$

Третій етап – знаходження результуючої функції приналежності, виконується за допомогою застосування s-норми узагальнення «або» до усіченим функцій приналежності термів вихідної змінної (обмеженим по осі ординат їх обчисленими значеннями):

$$\mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i}) = \mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i}, X) \cup \mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i}, C) \cup \mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i}, \Pi) \quad (4.33)$$

де $\mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i})$ – узагальнена підсумкова функція приналежності, символом «*» позначена усічена функція.

Третя операція – дефазифікація.

"Дефазифікація" – це процедура приведення з нечіткого виду до чисельних значень вагових коефіцієнтів.

Використовується метод центру тяжіння. Цей метод має недолік – звуження інтервалу дефазифікації. Але в даному випадку немає необхідності його компенсувати, оскільки потрібно отримати відносні оціночні значення рейтингу каналів, які враховують значення всіх активізованих вихідних функцій приналежності (відмінних від нуля). Обчислення проводяться за формулою виду:

$$y^* = \frac{\int y \mu_{рез}(y) dy}{\int \mu_{рез}(y) dy} \quad (4.34)$$

Або, враховуючи область визначення $\mu_{R_f}(B_{R_{fn},i}) [0;1]$:

$$R_{fn,i} = \frac{\int_0^1 (B_{R_{fn},i} \cdot \mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i})) d(B_{R_{fn},i})}{\int_0^1 (\mu_{R_f}^*(B_{R_{fn},i})) d(B_{R_{fn},i})}, \quad (4.35)$$

де $R_{fn,i}$ – чисельне значення вагового коефіцієнта і-го частотного каналу для n-ої точки вимірювання.

Нижче приведено приклад вирішення.

Дано:

Є мережа доступу, що складається з однієї базової і шести абонентських станцій (всього $N = 7$ точок розміщення), які працюють на загальній частоті f_i .

Для забезпечення зв'язку виділена група частот $\{f_i \dots f_7\}$ (всього $I = 7$ частот).

За результатами вимірювання РЕО сформовані узагальнені матриці МО і СКО розмірності $N \times I$:

$$M_P = \begin{bmatrix} -93 & -88 & -102 & -88 & -95 & -99 & -100 \\ -87 & -89 & -100 & -98 & -97 & -98 & -94 \\ -95 & -85 & -89 & -95 & -92 & -99 & -97 \\ -90 & -90 & -93 & -93 & -91 & -97 & -92 \\ -102 & -97 & -97 & -99 & -88 & -102 & -101 \\ -100 & -91 & -90 & -101 & -100 & -88 & -99 \\ -91 & -94 & -98 & -94 & -85 & -82 & -86 \end{bmatrix} \text{ дБм}, \quad (4.36)$$

$$\sigma_P = \begin{bmatrix} 4,9 & 8,4 & 7,7 & 5,4 & 7,8 & 2,5 & 3,9 \\ 5,2 & 3,3 & 6,4 & 5,8 & 9,1 & 4,1 & 4,7 \\ 2,2 & 1,6 & 2,9 & 4,3 & 5,7 & 6,4 & 5,1 \\ 9 & 3,8 & 2,2 & 2,9 & 3,6 & 3,9 & 2,6 \\ 3,1 & 6,1 & 8,4 & 7,7 & 2,8 & 5,7 & 1,9 \\ 6,2 & 4,4 & 9,1 & 2,4 & 7,1 & 8,3 & 9 \\ 2,8 & 5,7 & 5,1 & 6,3 & 6,2 & 7,1 & 4,8 \end{bmatrix} \text{ дБм} \quad (4.37)$$

Необхідно:

Визначити вагові коефіцієнти частотних каналів і вибрати найкращий для забезпечення зв'язку в мережі радіо доступу.

Вирішення:

Для проведення процедури дефазифікації необхідно визначити базові та нечіткі значення змінних. Діапазон базових значень вхідних змінних визначається виходячи з значень елементів матриць вхідних змінних:

$$B_{M_{pn,i}} = \{M_{P_{\text{ш}n,i}}[\min([M_{P_{\text{ш}n,i}}]); \max([M_{P_{\text{ш}n,i}}])]\} \quad (4.38)$$

$$B_{\sigma_{pn,i}} = \{\sigma_{P_{\text{ш}n,i}}[0; \max([\sigma_{P_{\text{ш}n,i}}])]\} \quad (4.39)$$

$$B_{\sigma_{pn,i}} = \{\sigma_{P_{\text{ш}n,i}}[0; 9,1]\} \text{ дБм} \quad (4.40)$$

Відповідно, функції приналежності в області визначення задаються як:

$$\mu_{M_p n, i}(B_{M_p n, i}, F_{M_p n, i}) = \begin{cases} \mu_{M_p n, i}(B_{M_p n, i}, H), & \text{при } F_{M_p n, i} = H \\ \mu_{M_p n, i}(B_{M_p n, i}, B), & \text{при } F_{M_p n, i} = B. \end{cases} \quad (4.41)$$

$$\mu_{M_p \pi, i}(B_{M_p \pi, i}, H) = -(0,05 * B_{M_p \pi, i} + 4,1) \quad (4.42)$$

$$\mu_{M_p \pi, i}(B_{M_p \pi, i}, B) = 0,05 * B_{M_p \pi, i} + 5,1 \quad (4.43)$$

$$\mu_{\sigma_p n, i}(B_{\sigma_p n, i}, F_{\sigma_p n, i}) = \begin{cases} \mu_{\sigma_p n, i}(B_{\sigma_p n, i}, H), & \text{при } F_{\sigma_p n, i} = H; \\ \mu_{\sigma_p n, i}(B_{\sigma_p n, i}, B), & \text{при } F_{\sigma_p n, i} = B. \end{cases} \quad (4.44)$$

$$\mu_{\sigma \pi, i}(B_{\sigma \pi, i}, H) = 1 - 0,11 * B_{\sigma \pi, i} \quad (4.45)$$

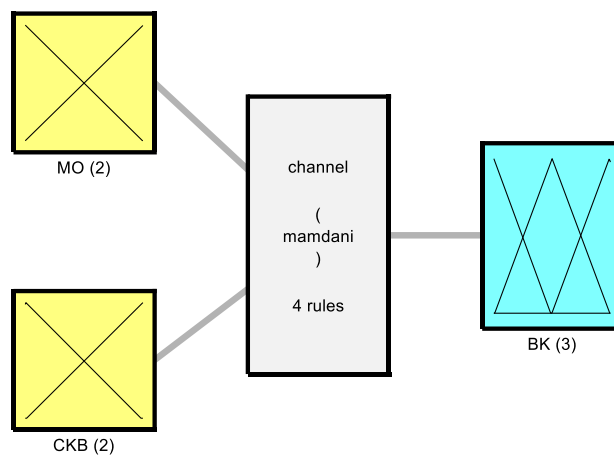
$$\mu_{\sigma \pi, i}(B_{\sigma \pi, i}, B) = 0,11 * B_{\sigma \pi, i} \quad (4.46)$$

Дані для дефазифікації вихідної змінної залишаються без зміни.

Моделювання процесу нечіткого виведення з використанням пакета MatLab FuzzyLogic дозволяє спростити процедуру визначення та присвоєння вагових коефіцієнтів частотним каналам.

База правил прийняття рішення відповідає наведеним в методиці (таблиця 4.1), схема прийняття рішення відображена на рисунку 4.5, а графічне представлення бази правил – на рисунку 4.6.

За результатами проведення загальних обчислень формується поверхня виведення значень вагових коефіцієнтів частотних каналів R_{fi} , представлена на рисунку 4.7.



System channel: 2 inputs, 1 outputs, 4 rules

Рисунок 4.5 – Схема прийняття рішення

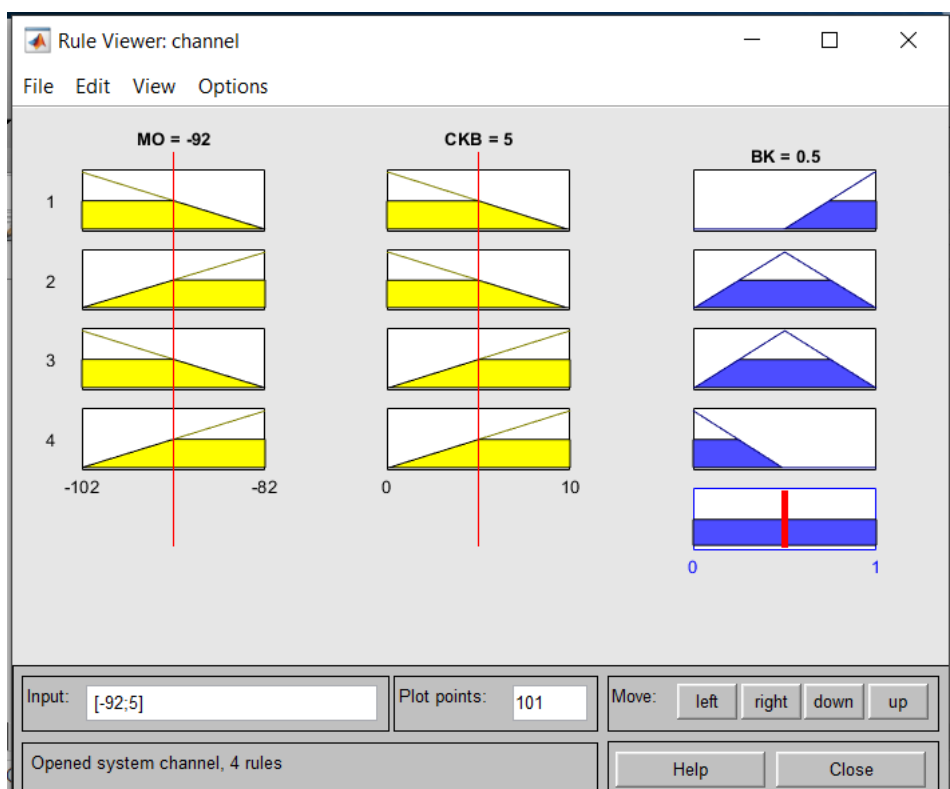


Рисунок 4.6 – Графічне представлення бази правил

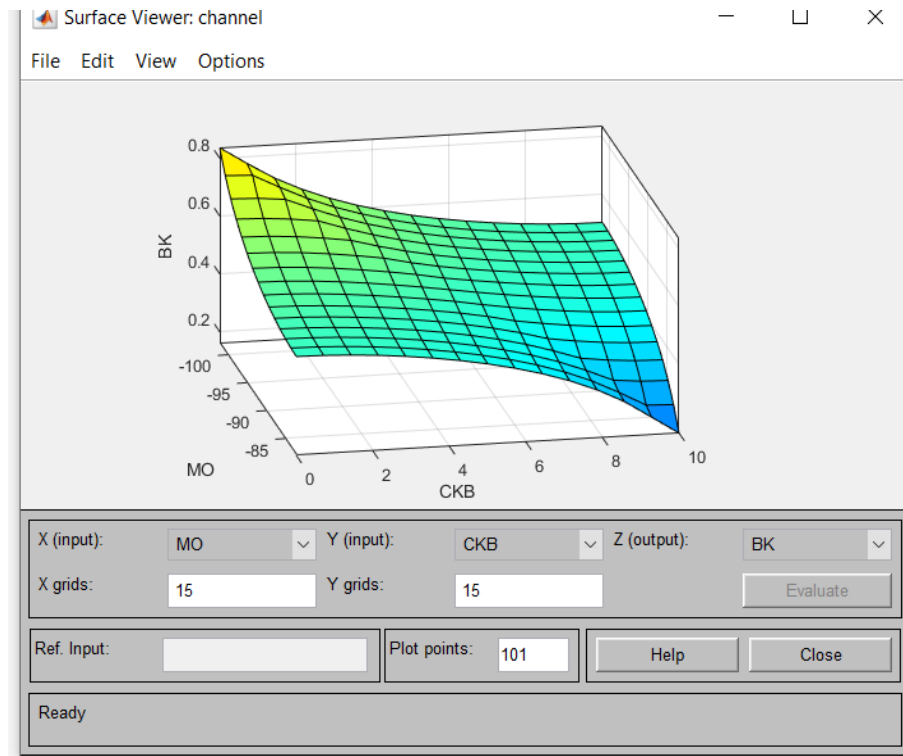


Рисунок 4.7 – Поверхня виведення значень вагових коефіцієнтів частотних каналів R_{fni}

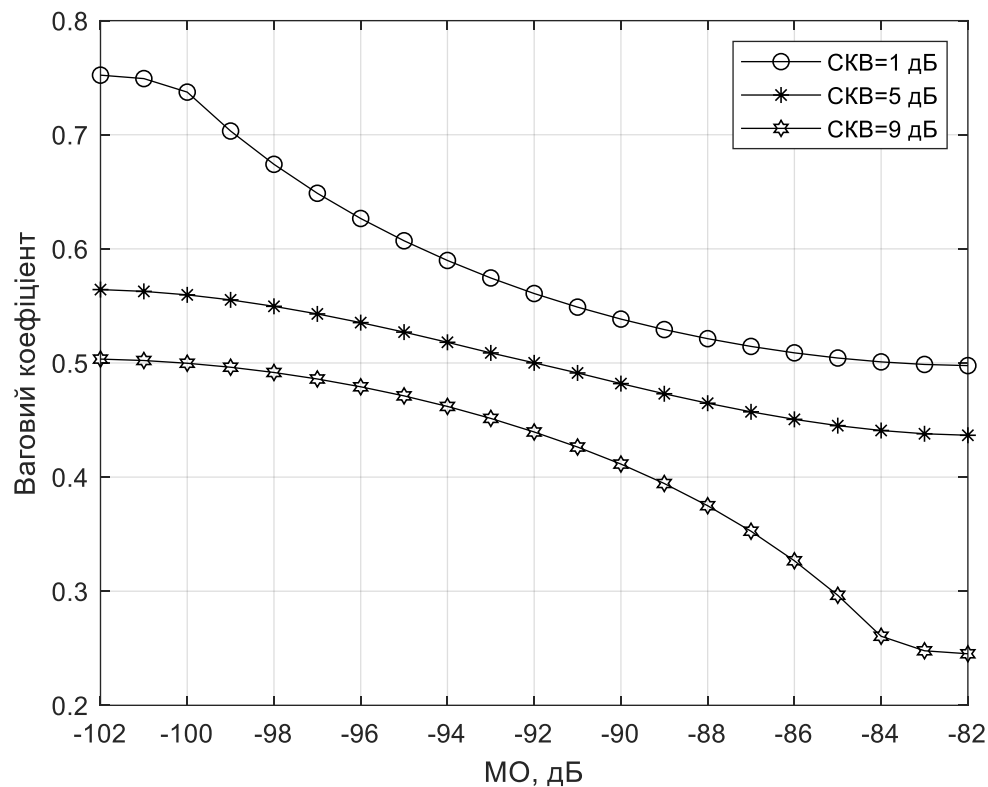


Рис. 4.8 – Графік залежності вагових коефіцієнтів від математичного очікування рівня шумів та перешкод при різних значеннях середньоквадратичного відхилення

Використовуючи дані елементів матриць вхідних змінних в представленій схемі прийняття рішень, сформована матриця вагових коефіцієнтів:

$$R_f = \begin{bmatrix} 0,503 & 0,373 & 0,509 & 0,429 & 0,479 & 0,639 & 0,578 \\ 0,434 & 0,499 & 0,519 & 0,521 & 0,486 & 0,564 & 0,516 \\ 0,601 & 0,5 & 0,505 & 0,539 & 0,476 & 0,516 & 0,529 \\ 0,411 & 0,498 & 0,56 & 0,522 & 0,51 & 0,568 & 0,537 \\ 0,613 & 0,511 & 0,498 & 0,502 & 0,5 & 0,536 & 0,673 \\ 0,522 & 0,493 & 0,41 & 0,645 & 0,511 & 0,374 & 0,496 \\ 0,524 & 0,496 & 0,534 & 0,487 & 0,383 & 0,335 & 0,445 \end{bmatrix}. \quad (4.47)$$

Здійснюється згортка матриці вагових коефіцієнтів до рядка, в результаті чого формується рейтинг частотних каналів по придатності до забезпечення зв'язку:

$$\vec{R}_f = [0,411 \quad 0,373 \quad 0,41 \quad 0,429 \quad 0,383 \quad 0,335 \quad 0,445] \quad (4.48)$$

За результатами аналізу цього рядка, найбільше значення вагового коефіцієнта відповідає сьомому частотному каналу. Отже, зазначений канал найбільш придатний для забезпечення зв'язку в даній мережі доступу.

Здійснюючи сортування елементів вектора, можливо розставити пріоритетність застосування частотних каналів для забезпечення зв'язку.

Перевірка коректності:

Для перевірки коректності присвоєння вагових коефіцієнтів виберемо дві близьких за значенням оцінки з матриці R_f :

$$R_{f\ 6,7} = 0,496, R_{f\ 7,7} = 0,445 \quad (4.49)$$

Більш висока якість сьомого каналу в шостій точці вимірювання на 0,051 вказує на кращі умови прийому (забезпечення зв'язку):

$$M_{рпик6,7} = -99\text{дБм}, \sigma_{рпик6,7} = 9\text{дБм} \quad (4.50)$$

$$M_{рпик7,7} = -86\text{дБм}, \sigma_{рпик7,7} = 4,8\text{дБм} \quad (4.51)$$

Застосовуючи правило трьох сігм, визначимо ймовірні пікові значення рівня потужності перешкоди в точках 6 і 7:

$$P_{пик\ 6,7} = M_{рпик6,7} + 3\sigma_{рпик6,7} \quad (4.52)$$

$$P_{пик\ 6,7} = -99 + 3 * 9 = -72\ \text{дБм} \quad (4.53)$$

$$P_{пик\ 7,7} = M_{рпик7,7} + 3\sigma_{рпик7,7} \quad (4.54)$$

$$P_{пик\ 7,7} = -86 + 3 * 4,8 = -71,6\ \text{дБм} \quad (4.55)$$

Так як $P_{пик\ 67} < P_{пик\ 77}$, то коефіцієнти привласнені коректно.

ВИСНОВОК

У даній роботі розглядаються питання розробки та дослідження моделей когнітивного радіо, технології покликаної більш оптимально використовувати обмежені ресурси, наприклад, такі як радіочастотний спектр.

Проводиться аналіз наукових досліджень, присвячених основним проблемам впровадження CRS. До таких проблем належить інтерференція користувачів, оптимізація використання ресурсів, самонавчання системи і ін. Розглянуто один із перспективних варіантів побудови системи нечіткого управління.

Для максимізації доступу до спектру вторинних користувачів когнітивної радіомережі застосовувались елементи нечіткої логіки. Система, заснована на нечіткій логіці, застосовувалася для контролю доступу до спектру.

Було розглянуто один із варіантів побудови системи нечіткого управління частотними ресурсами в когнітивній мережі радіозв'язку. В даному варіанті всі станції мережі беруть участь у вивченні навколишньої РЕО. Аналогічно, даний варіант може бути використаний в широкомасштабних мережах (з великою кількістю базових та абонентських станцій).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Стенін А.В. Розробка і дослідження моделей когнітивного радіо [Текст] / Новосибірськ/ 2018. – 77 с.
2. Звіт МСЭ-Р SM.2152 «Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)», 2009. – с. 107
3. Трубін І.С. Динамічний розподіл спектру в когнітивних мережах зв'язку. [Текст] / 2017. – 14 с.
4. В. І. Комашінській Когнітивні системи і телекомунікаційні мережі/В. І. Комашінській, Н. А. Соколов // Вісник зв'язку. 2011. No 10. С. 4-8.
5. Ошмаріна Д. В. Динамічний розподіл спектра в бездротових мережах наступного покоління // Вісник Нижегородського університету ім. Н. І. Лобачевського. 2010. No 4 (1). Р. 158-164.
6. Круглов, В. Нечітка логіка и штучні нейронні мережі / В. Круглов, М. Длі, Р. Голунов. - М.: Фізматліт, 2001. - 223 с.
7. Пегат, А. Нечітке моделювання та управління / Пегат; пер. с англ. А.Г. Подвесовский, Ю.В. Тюменцев. -М.: БИНОМ. Лабораторія знань, 2012. - 798 с.
8. Коляденко Ю.Ю. Методи вирішення задач динамічного розподілу спектра в системах когнітивного радіо/ Ю.Ю.Коляденко, А.М.Ткаченко // Матеріали сьомої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку (ЕМС-2021)». Харків, ХНУРЕ, 2021, с. 32-34
9. Коляденко Ю.Ю. Аналіз технології когнітивного радіо в телекомунікаціях/ Ю.Ю.Коляденко, А.М.Ткаченко// Матеріали 26-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» Харків, ХНУРЕ, 2022, с. 25-26
10. Коляденко Ю.Ю. Управління радіочастотним спектром в когнітивних мережах зв'язку/ Ю.Ю.Коляденко, А.М.Ткаченко // Матеріали 24-го міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у ХХІ столітті» Харків, ХНУРЕ , 2020, с. 13-15

11. Галкін В.А. Основи програмно-конфігурованого радіо.- М.: Горяча лінія-Телеком,2015.-372с.
12. Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS) [Електронний ресурс] // ITU (International Telecommunication Union). — [Електронний ресурс] — Режим доступа. — URL: http://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-R.pdf , вільний. - Загл. з екрана (дата звернення: 10.05.2016).
13. Ключова Е. SDR — Програмно-конфігуроване радіо / Е. Ключова // Електронні компоненти журнал. - 2008. № 9 С. 131-132.
14. Пронін К. SDR — Проектування, оптимізація та моделювання SDR / К. Пронін // Електронні компоненти журнал. - 2012. № 2 С. 49-53.
15. Wyglinski, M Nekovee, and T. Hou (Eds.), Cognitive radio communications and networks: principles and practice. Elsevier, Nov. 2009-714 p.
16. M. Wylie-Green, “Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation,” in Proc. IEEE Int. Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, Baltimore, Maryland, USA, Nov. 2005, pp. 619–625.
17. H. Yaghoobi, “Scalable OFDMA physical layer in IEEE 802.16 WirelessMAN,” Intel Technology Journal, vol. 8, no. 3, pp. 201–212, Aug. 2004
18. Коляденко Ю.Ю. OpenFlow-based software-defined networking / Ю.Ю. Коляденко, К.Е Білоусова // Technology audit and production reserves № 2 (28), 2016 г. с. 9-13.
19. Ткаченко А.М. Методи управління радіочастотним спектром в когнітивній радіомережі // Бакалаврська кваліфікаційна робота, 2020 р.
20. Коляденко Ю.Ю. Організація програмно-конфігурованої мережі на базі протокола OpenFlow //Ю.Ю. Коляденко К.Е Білоусова // Технологічний аудит та резерви виробництва № 2 (2), 2016 г. с. 9-13.

21. Коляденко Ю.Ю. Програмно-конфігуровані мережі на базі протокола OpenFlow та їх характеристики //Ю.Ю. Коляденко К.Е Білоусова // ScienceRise № 2 (20), 2016 г. с. 11-16.
22. Коляденко Ю.Ю. Алгоритм розподілення частотно-часового ресурса в мережі когнітивного радіо/ Ю.Ю. Коляденко, Б.П. Муляр//Радіотехніка Всеукр. міжвід. научн.-техн. сб. 2020. Вип. 201, с.171-178. DOI:10.30837/rt.2020.2.201.16
23. Коляденко Ю.Ю. Аналіз електромагнітної сумісності угруповань радіоелектронних засобів в мережах мобільного зв'язку при рефармінгу радіочастотного спектру [Електронний ресурс] / Ю.Ю. Коляденко, Н.А. Чурсанов // Проблеми телекомунікацій. – 2019. – № 2 (25). – С. 56 - 66. – Режим доступу до журн.: http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2020/02/192_kolyadenko_chursanov.pdf.
24. Коляденко Ю.Ю. Методика моніторингу та контролю параметрів сигналів та елементів мережі мобільного зв'язку під час вирішення завдання електромагнітної сумісності [Електронний ресурс] / Ю.Ю. Коляденко, Н.А. Чурсанов, О.В. Коляденко // Проблеми телекомунікацій. – 2020. – № 2 (27). – С. 3 - 15. – Режим доступу до журн.: <http://journals.uran.ua/pt/article/view/244342>.
25. Коляденко Ю.Ю. Метод оптимізації розподілу частотного ресурсу з повторним використанням частот для систем когнітивного радіо/ Ю.Ю. Коляденко, О.В. Коляденко, Б.П. Муляр// Радіотехніка Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб. 2021. Вип. 204, с.73-79. DOI:10.30837/rt.2021.1.204.08
26. Селіванов К.А. Модель взаємодій та фазових станів при розподіленні частотного ресурсу в групі радіоелектронних засобів мережі мобільного зв'язку 5G/ К.А. Селіванов, Б.П. Муляр, Ю.Ю. Коляденко, Москалець Н.В./Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries. № 2(16), с. 89-97
27. Коляденко Ю.Ю. Аналіз показників електромагнітної сумісності мереж зв'язку 5 G/ Ю.Ю. Коляденко, М.О.Чурсанов / Радіоелектроніка, інформатика, управління. ISSN 1607-3274. 2021. № 3 (58) с. 7-16. DOI 10.15588/1607-3274-2021-3-1

28. Коляденко Ю.Ю Принципи роботи мереж когнітивного радіо / Коляденко Ю.Ю., Худяков А.Д. / Матеріали сьомої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку ЕМС-2021» Харків, 25 -26 листопада 2021 р. с. 35-38.