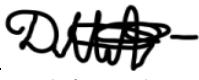



Не містить відомостей заборонених до відкритого опублікування.

Студент _____  _____
(підпис)

М.О. Дробяз
(ініціали, прізвище)

Керівник роботи _____  _____
(підпис)

Ю.Ю. Коляденко
(ініціали, прізвище)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Інфокомунікацій
(повна назва)
Кафедра Інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського
(повна назва)
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і повна назва)
Тип програми освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Інфокомунікаційна інженерія
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри _____
(підпис)


« _____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студент Дробяз Михайло Олександрович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Дослідження ефективності методу розподілу ресурсів каналу в когнітивній мережі зв'язку.
затверджена наказом по університету від «19» жовтня 2023 р. №1212 Ст.
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 23.01.2024 р.
3. Вихідні дані до роботи: стандарти IEEE 802.22, стандарти та технології розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах, протоколи доступу до каналних ресурсів у когнітивних мережах, математичний апарат теорії ймовірностей.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
 - 1) Методи та технології розподілу каналного ресурсу у когнітивних мережах зв'язку.
 - 2) Розробка методу розподілу каналного ресурсу між користувачами у когнітивних мережах зв'язку.
 - 3) Розробка алгоритмів з використанням каналів передачі при розподілі ресурсів у когнітивних комунікаційних мережах
 - 4) Оцінка ефективності методів та алгоритмів розподілу ресурсів каналу в когнітивних мережах зв'язку
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		05.01.24

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	01.08.23	Виконано
2	Збір матеріалів для дослідження	30.08.23	Виконано
3	Розробка 1 розділу	13.09.23	Виконано
4	Розробка 2 розділу	27.10.23	Виконано
5	Розробка 3 розділу	11.12.23	Виконано
6	Розробка 4 розділу	31.12.23	Виконано
5	Оформлення атестаційної роботи	04.01.24	Виконано

Дата видачі завдання _____ 1 серпня 2023 р _____

Студент _____  _____ Дробяз М.О.
(підпис) (прізвище, ініціали)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 84 с., 36 рис., 3 табл., 24 джерел.

КОГНІТИВНЕ РАДІО, ПЕРВИННИЙ КОРИСТУВАЧ, ВТОРИННИЙ КОРИСТУВАЧ, БАЗА ДАНИХ, РАДІОЧАСТОТНИЙ СПЕКТР, РАДІОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЗАСІБ, РОЗПОДІЛ РАДІОЧАСТОТНИХ РЕСУРСІВ

Об'єктом є процес розподілу каналного ресурсу в когнітивних комунікаційних мережах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах радіозв'язку з урахуванням впливу первинних користувачів в радіочастотному діапазоні.

Метою роботи є розробка та вдосконалення принципів управління диференційованим доступом користувачів до каналного ресурсу в когнітивних мережах.

Методи дослідження включають аналіз, порівняння, імітаційне та статистичне моделювання та методи теорії ймовірностей.

Для підвищення ефективності використання радіочастотного спектра, особливо при організації каналів обміну інформацією, в сучасних телекомунікаційних засобах широко застосовують програмне забезпечення для управління, сучасні засоби й методи обробки інформації. Значне зростання мультимедійного трафіку, розвиток мобільного інтернету, активне використання сенсорних мереж закономірно призводять до дефіциту вільних смуг радіочастот цивільного призначення.

У кваліфікаційній роботі проведено дослідження з розробки методів розподілу каналного ресурсу безпроводових мереж, заснованих на принципі динамічного управління доступом до РЧС, включаючи рішення відповідних завдань дослідження, розробку методу та алгоритмів призначених для пошуку, заняття та ефективного використання каналів радіоелектричних засобів вторинними користувачами радіочастотного спектра у рамках побудови та розвитку когнітивних мереж зв'язку.

ABSTRACT

The report contains: 84 pages, 36 p., 3 table., 24 sources.

COGNITIVE RADIO, PRIMARY USER, SECONDARY USER, DATA BASE,
RADIO FREQUENCY SPECTRUM, RADIO ELECTRICAL DEVICE,
DISTRIBUTION OF RADIO FREQUENCY RESOURCES

The object is the process of channel resource allocation in cognitive communication networks.

The subject of the study is the methods and algorithms of channel resource distribution in cognitive radio communication networks, taking into account the influence of primary users in the radio frequency range.

The method of work is the development and improvement of the principles of managing the differentiated access of users to the channel resource in cognitive networks.

Research methods include analysis, statistical modeling, and probability theory methods to determine modeling parameters, conditions, and limitations.

In order to increase the efficiency of the use of the radio frequency spectrum, especially in the organization of information exchange channels, management software, modern means and methods of information processing are widely used in modern telecommunication means. Significant growth of multimedia traffic, development of mobile Internet, active use of sensor networks naturally lead to a shortage of free civilian radio frequency bands.

In the master's thesis, a study was conducted on the development of methods for distributing the channel resource of wireless networks based on the principle of dynamic control of access to RFS, including the solution of relevant research tasks, the development of methods and algorithms designed for the search, concepts and effective use of radio channels by secondary users of the radio frequency spectrum in within the framework of the construction and development of cognitive communication networks.

ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень, символів, одиниць і термінів.....	9
Вступ.....	10
1 Методи та технології розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах зв'язку.....	12
1.1 Аналіз розвитку мереж зв'язку із застосуванням когнітивних технологій.....	12
1.2 Аналіз стандартів та технологій розподілу каналів у когнітивних радіомережах.....	19
1.3 Аналіз використання когнітивного радіо, SDR та їх взаємодії.....	22
1.4 Аналіз протоколів доступу та дослідження методів розподілу каналних ресурсів у когнітивних мережах.....	27
2 Розробка методу розподілу каналного ресурсу між користувачами у когнітивних мережах зв'язку.....	34
2.1 Розробка методу зменшення часу доступу до каналу передачі при розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах.....	34
2.2 Розробка способу використання вільних блоків у кадрі управління доступом до середовища передачі при розподілі каналних ресурсів.....	43
2.3 Визначення функціональних компонентів архітектури, порядок зондування та ефективності використання РЧС в когнітивних мережах.....	48
3. Розробка алгоритмів з використанням каналів передачі при розподілі ресурсів у когнітивних комунікаційних мережах.....	55
3.1 Розробка загального алгоритму вибору робочого та резервного каналів когнітивної мережі зв'язку.....	55
3.2 Розробка алгоритмів зондування та послідовностей доступу користувача до мережі когнітивної комунікацій.....	59
4. Оцінка ефективності методів та алгоритмів розподілу ресурсів каналу в когнітивних мережах зв'язку.....	64
4.1 Визначення параметрів та умов моделі вибору каналу для когнітивних мереж.....	64
4.2 Порівняльна оцінка ефективності алгоритмів розподілу ресурсів каналу на основі імітаційного моделювання.....	68

4.3 Дослідження щодо реалізації алгоритму скорочення часу доступу до каналу.....	74
4.4. Вплив розроблених у дослідженні методів та алгоритмів на продуктивність каналу управління.....	78
Висновки.....	81
Перелік джерел посилання.....	83

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ,
ОДИНИЦЬ І ТЕРМІНІВ

БД - База даних
КР – Когнітивне радіо
КСР – Когнітивна система радіозв'язку
МСЕ– Міжнародна спілка електрозв'язку
РЧС – Радіочастотний спектр
РЕЗ - Радіоелектричний засіб (засоби)
ТС – Телевізійні смуги РЧС
Ad-Нос – Безпроводова мережа
CPC – Cognitive Pilot Channel
DSA – Dynamic Spectrum Access
IEEE 802.11af – Стандарт безпроводового зв'язку (мережа Wi-Fi)
IEEE 802.22 – Стандарт безпроводового зв'язку (мережа WRAN)
MAC – Media Access Control
MDP – Markov Decision Processes
NAV – Network Allocation Vector
NS-3 – Network Simulator 3
OSA – Opportunistic Spectrum Access
POMDP – Partially Observed Markov Decision Process
PU – Primary User – первинний користувач
QoS – Quality of Service
RAT – Radio Access Technology
RTS – Request to Send
SB – Spatial Backoff
SDR – Software Defined Radio
SU – Secondary User – вторинний користувач
VCL – Vacant Channel List
WiFi – Wireless Fidelity
WRAN – Wireless Regional Area Networ

ВСТУП

Для підвищення ефективності використання радіочастотного спектра (РЧС), особливо при організації каналів обміну інформацією, в сучасних телекомунікаційних засобах широко застосовують програмне забезпечення для управління, сучасні засоби й методи обробки інформації. Значне зростання мультимедійного трафіку, розвиток мобільного інтернету, активне використання сенсорних мереж закономірно призводять до дефіциту вільних смуг радіочастот цивільного призначення.

Організації, які організують або планують сучасні електронні засоби на основі традиційних методів розповсюдження радіоелектричних засобів та методів спільного використання ліцензованих смуг радіочастот, не можуть адекватно забезпечити ефективне використання радіочастотних ресурсів (РЧР). Скрізь існують періоди часу, коли ліцензовані радіочастотні канали та смуги не використовуються для передачі сигналів або інформації. Об'єктивно існує технічна можливість використовувати тимчасово незайняті частини РЧР за умови, що перешкоди ліцензованим користувачам радіочастотного спектра будуть зведені до мінімуму. Концепція когнітивної системи радіозв'язку (КСР), насамперед передбачає модифікацію наявної моделі управління доступом до радіочастотного спектра. В рамках КСР радіостанції виділяються певним оператором телекомунікацій, які можуть тимчасово займати частину радіочастотного спектра, виділеного за ліцензією для приймання та передачі даних. Когнітивні технології застосовуються телекомунікаційними засобами, в тому числі автономними, для динамічної зміни свої робочих параметрів і телекомунікаційних протоколів, які вони використовують, з метою забезпечення ефективного використання доступного радіочастотного простору.

Об'єктом є процес розподілу каналного ресурсу в когнітивних комунікаційних мережах.

Предметом дослідження є методи та алгоритми розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах радіозв'язку з урахуванням впливу первинних користувачів в радіочастотному діапазоні.

Метою роботи є розробка та вдосконалення принципів управління диференційованим доступом користувачів до каналного ресурсу в когнітивних

мережах.

Для розв'язання поставленої задачі, в першому розділі кваліфікаційної роботи розглянуто основні принципи та особливості розподілу каналного ресурсу в когнітивних мережах зв'язку. Виконано аналіз розвитку мереж зв'язку наступного покоління з використанням когнітивних технологій, а також розглянуто стандарти й методи управління доступом до каналу, включаючи використання «білих плям» в радіочастотному діапазоні. Розглянуто використання програмно-конфігурованих SDR-радіопристроїв у когнітивних мережах та проаналізовано чинні методи управління фізичними та каналними ресурсами КСР. Аналіз показує, що існують невирішені питання щодо доступу до тимчасово вільних каналів в когнітивних радіомережах.

У другому розділі розроблено метод управління доступом до каналу з використанням блоків у рамках технології IEEE 802.11, що дозволяє здійснювати планування передачі лише на рівні управління доступом до середовища передачі. Запропоновано функцію зондування для зваженої оцінки ефективності використання радіочастотного діапазону для надання послуг зв'язку.

У розділі 3 наводиться опис розробленого алгоритму доступу PE3 SU до РЧС з враховуючи інтеграцію з архітектурою мереж згідно з специфікаціями 3GPP, алгоритму пошуку резервних каналів для перемикання SU у разі появи PU та перемикання SU з робочого каналу на резервний. Запропоновано алгоритм спільного використання когнітивного контролера та PE3 SU для зондування РЧС, включаючи алгоритм передачі відомостей про час заняття каналу за допомогою блоків у кадрах технології IEEE 802.x. Як стандарт передачі даних про конфігурацію PE3 SDR запропоновано використовувати мову XML.

У четвертому розділі досліджено ефективність запропонованого методу шляхом порівняння результатів імітаційного моделювання з результатами попередніх досліджень, а також використано ряд методів досліджень, таких як аналіз, статистичне моделювання та методи теорії ймовірностей для визначення параметрів, умов та обмежень моделювання.

У висновках наведено основні результати досліджень, що свідчать про ефективність розробленого методу, надано рекомендації щодо використання результатів досліджень та визначено напрямки подальших досліджень.

За результатами кваліфікаційної роботи було опубліковано 2 студентські наукові роботи та 3 доповіді у збірці матеріалів конференцій.

1 МЕТОДИ ТА ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПОДІЛУ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСУ В КОГНІТИВНИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Аналіз розвитку мереж у зв'язку із застосуванням когнітивних технологій

Використання сучасних технологій радіопередачі визначається політикою ліцензування радіочастот, згідно з якою національні адміністрації зв'язку надають користувачам радіочастот право на використання радіочастотного спектру в рамках існуючих правил і положень щодо розподілу смуг між радіослужбами в Україні. Форма ліцензій на використання радіочастотних каналів регулює довгостроковий розподіл частот.

У кваліфікаційній роботі розглядається ліцензований радіочастотний спектр, який вимагає наявності ліцензії, та неліцензований, який вимагає лише використання радіообладнання з параметрами та характеристиками, що мінімізують потенційні завади для роботи ліцензованого радіоелектричного засобу користувачів РЧС [1]. У зв'язку зі стрімким зростанням трафіку передачі даних користувачі та оператори безпроводових мереж зв'язку стикаються з дефіцитом смуг частот у ліцензованому спектру для використання споживачем. При цьому деякі ділянки РЧС використовуються лише частково, що призводить до неефективного використання. Таке використання РЧС об'єктивно створює необхідність розробки нової парадигми, в якій пропонується використання ліцензованих і неліцензованих смуги частот для обміну інформацією [2].

Розглянута парадигма включає в себе принцип динамічного розподілу та доступу до каналів передавання. Динамічний розподіл та доступ означає, що засоби зв'язку у вигляді радіоелектронного засобів можуть тимчасово використовувати канали передачі для служб зв'язку, які не включені в ліцензію [3]. При використанні такого РЕЗ у вас спочатку немає ліцензії на використання ділянки РЧС. Обов'язковою умовою використання динамічного доступу до РЧС є запобігання створенню перешкод для роботи РЕЗ, які використовують РЧС відповідно до ліцензії та дозволу на користування радіочастотними каналами. Для динамічного розподілу доступу до радіоканалів та смуг РЧС використовується технологія когнітивного радіо, яка дозволяє забезпечити доступ до радіоканалів як первинним, так і вторинним користувачам [4].

Когнітивна система радіозв'язку - це радіосистема, у роботі якої

враховуються відомості про навколишнє робоче та географічне середовище, про встановлені правила використання РЧС та внутрішньому стані системи. В даній роботі мережею когнітивного зв'язку розуміється сукупність взаємодійних засобів та технологій зв'язку, включаючи бази даних і системи зондування спектра, що використовуються в існуючих службах передачі радіоданих в рамках системи когнітивного радіозв'язку [6].

Когнітивна мережа зв'язку не є новим типом мереж зв'язку, а за аналогією з інтелектуальними мережами зв'язку, є сукупністю засобів зв'язку та спеціального обладнання, що реалізують функції когнітивних систем радіозв'язку, які не підтримуються мережами та службами радіозв'язку. Таким чином, когнітивні РЕЗ - це засіб зв'язку, який підтримує функції систем когнітивного радіо (КР)[5].

Когнітивне РЕЗ в динамічному режимі самостійно підлаштовує свої робочі параметри під характеристики та умови зовнішнього радіосередовища з метою забезпечення прийому та передачі в необхідній якості, не заважати роботі первинних користувачів РЧС, і в той час отримувати знання про факти використання РЧС. Таким чином, когнітивне РЕЗ адаптується не тільки в плані зміни потужності випромінювання для окремих частин РЧС, а й в плані автономного навчання та вживання необхідних заходів для уникнення перешкод іншим користувачам. Іншою ключовою властивістю є реконфігурування або самоконфігурування, коли характеристики когнітивного РЕЗ програмним чином перебудовуються для передачі та прийому інформації у широкому діапазоні частот та з використанням різних радіотехнологій.

У широкому сенсі когнітивні мережі можна розглядати як інтелектуальні віртуальні мережі, які використовують існуючі ресурси радіомереж, що використовують ліцензовані та менш ліцензовані смуг радіочастот з точки зору процедур розподілу та авторизації.

Узагальнену схему функціональності КСР, реалізовану на основі принципів когнітивності та реконфігурації наведено на рисунку 1.1. Тут когнітивне радіо отримує інформацію з навколишнього радіосередовища за допомогою процесів зондування, моніторинг та навчання і, відповідно до отриманої інформації та раніше набутих знань, що дозволяє приймати рішення з переналаштування робочих характеристик відповідно до отриманої інформації та раніше отриманими знаннями.

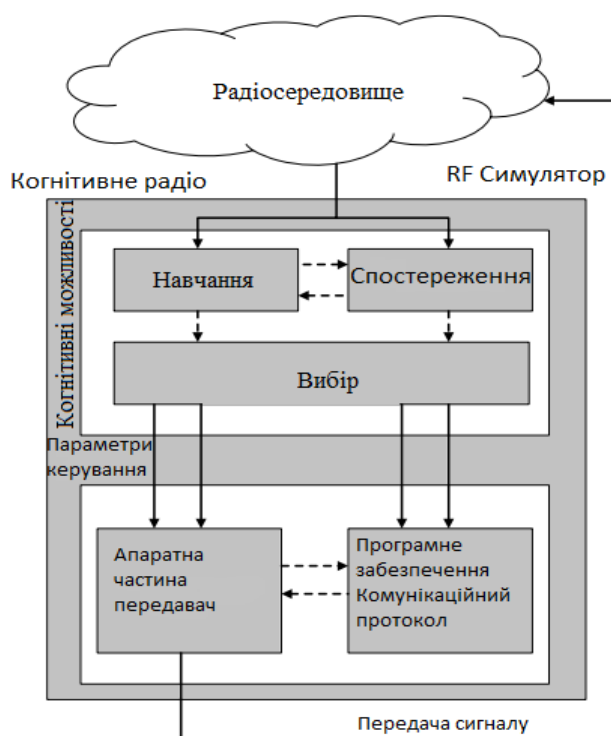


Рисунок 1.1 – Узагальнена схема функціонування КСР

На основі цих рішень когнітивне радіо використовує нові протоколи зв'язку за допомогою керуючого програмного забезпечення і застосовує відповідне обладнання, наприклад, широкодіапазонні антени. За своїми властивостями когнітивні системи радіозв'язку можна розділити на КСР з пасивними та активними методами аналізу навколишнього радіосередовища. У КСР з пасивними методами аналізу, первинні користувачі самостійно надають КСР інформацію про звільнення вільних частот або інформацію про тимчасове невикористання таких частот. Обмін інформацією може включати технологічні параметри потужності передавача, геолокацію, модуляцію, частоту помилкових біт тощо.

Перевага пасивного підходу полягає в тому, що ці ресурси контролюються з мережі, а втручання несанкціонованих користувачів запобігається завдяки функціям спеціально організованих вузлів КСР. Однак пасивний підхід збільшує обсяг службового та управлінського трафіку, підвищує навантаження на трансивер та ускладнює поєднання цього підходу з існуючими правилами розподілу РЧС. Цей підхід, безсумнівно, корисний у майбутній інтеграції з традиційними методами використання РЧС. Ефективний метод аналізу РЧС передбачає безперервний радіомоніторинг у вигляді зондування вторинними користувачами РЧС для отримання інформації про поточне використання РЧС та створення бази даних геолокації, що містить інформацію про використання РЧС на їх місці, при цьому

потрібне постійне оновлення інформації та відстеження розташування вільних радіоканалів.

Під час моніторингу можуть виникати ситуації, коли канали РЕЗ PU не звільняються вчасно, і в цьому випадку точність вимірювання координат і радіометричних параметрів потребує підвищенню, що призводить до зменшення часу, доступного для передачі трафіку корисного навантаження РЕЗ SU. Загалом, проблему дублювання роботи SU на PU можна подолати шляхом обміну інформацією спектрального зондування між вторинними користувачами з використанням комбінації активних і пасивних методів. Як зазначалося вище, первинними користувачами РЧС в концепції когнітивного радіо є існуючі користувачі певної ліцензованої смуги, тоді як PU вважаються авторизовані абоненти оператора зв'язку, який має ліцензію на право використання певного діапазону РЧС надання послуг електрозв'язку. Через безумовний пріоритет користувача PU, пристрій SU не повинен перешкоджати роботі PU. У той час, це віртуальна когнітивна мережа, що складається з кінцевої множини взаємодій, розподілених на певній території терміналів РЕЗ КР.

Кожен РЕЗ КР має можливість обмінюватися інформацією про початок роботи PU з сусідніми терміналами SU. Аналізуючи інформацію про поведінку PU, вторинні користувачі РЧС можуть прогнозувати поведінку PU і здійснювати скоординований доступ до каналу. Для використання PU з РЧС, когнітивні радіоелектричні засоби повинні мати відповідні політики щодо доступу до каналів.

Когнітивні системи мають право використовувати радіочастотний спектр, але вторинні системи можуть заважати роботі первинних радіосистем і служб, тому когнітивні мережі та радіорелейні станції повинні враховувати обмеження на використання РЧС. Тому використанням спектру вторинними користувачами, включаючи розподіл каналних ресурсів, має бути керованим. При цьому, з метою збереження безперервності зв'язку бажаним підходом є самостійне визначення факт початку роботи на зайнятому каналі PU, а потім відключення від працюючого каналу на мінімальний проміжок часу і перемикання на інший доступний канал для продовження сеансу зв'язку.

Завдяки своїй когнітивній природі та здатності реконфігурації, когнітивний радіоприймач може використовувати «білі плями» або «пробіли» в РЧС, а можлива схема перемикання в цьому випадку показана на рисунку 1.2. Знову ж таки, при виявленні роботи РЕЗ основного користувача, когнітивне радіо відключається від

каналу і починає пошук іншого «білої плями», щоб уникнути перешкод або зіткнень під час роботи PU [8].

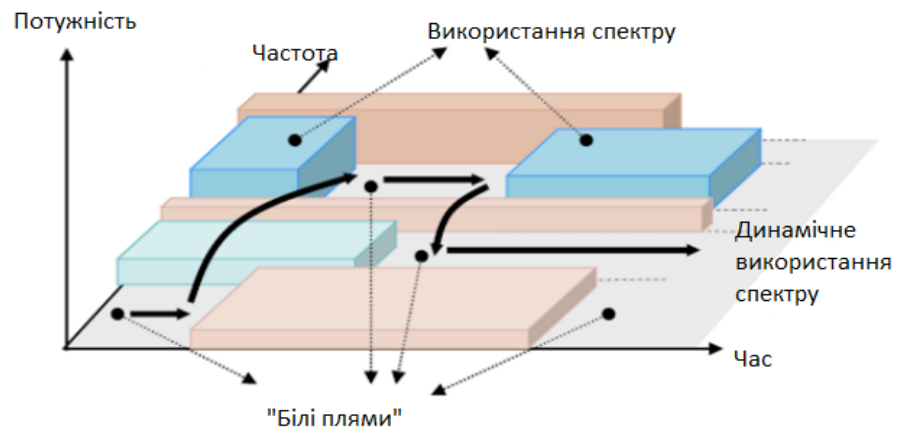


Рисунок 1.2 – «Білі плями» та динамічний доступ до РЧС [8]

Враховуючи розвиток когнітивних мереж для подальшого підвищення ефективності використання РЧС, компоненти мережевої архітектури КР показані на рисунку 1.3, можна розділити на дві групи: основні або первинні радіомережі та мережі когнітивного зв'язку [8].

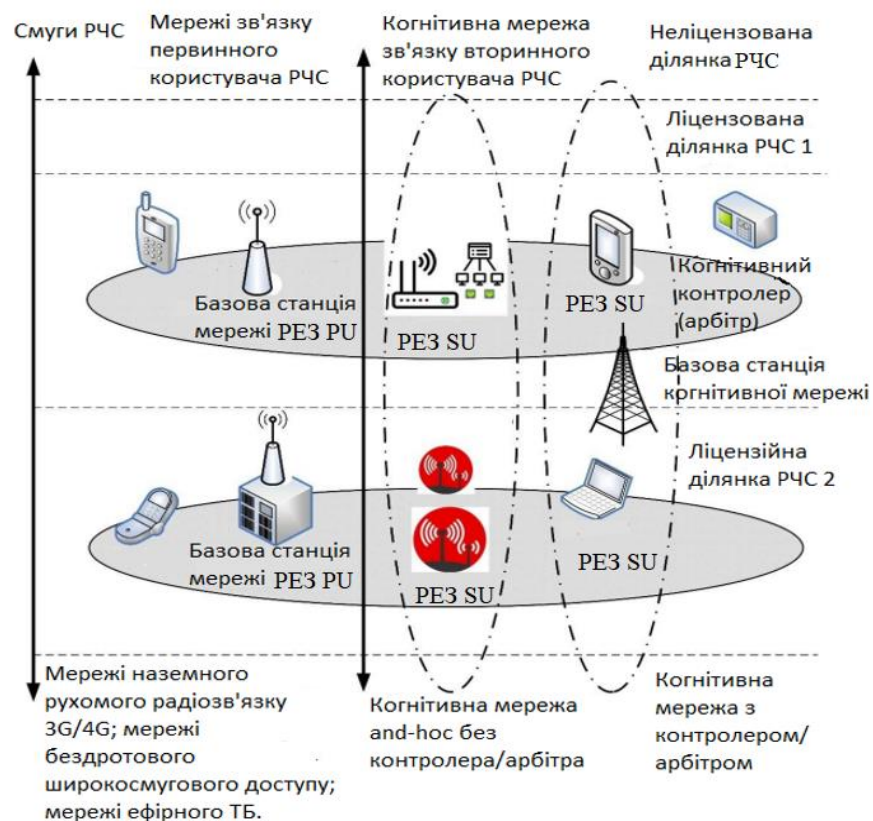


Рисунок 1.3 – Архітектура когнітивної радіомережі [8]

Додатковою функціональністю, необхідною для користувачів когнітивної РЕЗ є розгортання когнітивних мереж, як однорангових мереж peer-to-peer. В одноранговій мережі немає центрального мережевого елемента, і всі учасники є рівними. На відміну від архітектури з центральним мережевим елементом, така організація підвищує надійність і живучість, але має обмежену кількість пристроїв.

В одноранговій когнітивній мережі користувачі SU можуть обмінюватися інформацією з іншими учасниками мережі, використовуючи спеціальні з'єднання в ліцензованих та неліцензованих радіочастотних діапазонах. Крім того, когнітивна мережа може включати вузли-арбітри, які слугують як об'єктивізації розподілу ресурсів РЧС між різними користувачами КР [19].

Інфраструктура когнітивної мережі є ієрархічною і може бути оснащена центральним елементом мережі, наприклад, базовою станцією або когнітивним контролером, який забезпечує зв'язок з одним приймачем через центральний вузол для користувачів КР у своїй зоні дії. Когнітивні мережі є вторинними по відношенню до «традиційних» радіомереж з точки зору каналних ресурсів, що створює проблеми і нові обмеження, наприклад, необхідність швидкого звільнення радіоканалу на початку роботи первинного користувача на такому каналі.

Одночасно для пристроїв КР набагато складніше забезпечувати якість послуг зв'язку QoS, оскільки об'єктивно існує конфлікт за мережеві ресурси з PU; когнітивні мережі свого мережного ресурсу не мають, оскільки є самостійною службою радіозв'язку. Інший проблемою співіснування когнітивної мережі зв'язку та традиційних радіомереж, що використовують ліцензійну ділянку РЧС, є запобігання перешкод та забезпечення електромагнітної сумісності.

Когнітивні радіостанції використовують тимчасово невикористовувані діапазони РЧС у своєму програмному забезпеченні для коригування параметрів роботи на основі технологій, яка накопичує знання про навколишнє радіосередовище. При цьому визначаються межі/рівні перешкод для роботи існуючих засобів і встановлюються межі доступу до РЧС, що використовуються сусідніми РЕЗ. Межі перешкод, які також називають рівнями перешкод, використовуються для ієрархічного розподілу доступу до мережевих радіоресурсів. Цей підхід вимагає знання можливостей кожного РЕЗ і залежить від багатьох параметрів, таких як місце розташування, модуляція, кодування сигналу і технічне обслуговування [4].

Тому, для ефективного використання радіоелектричного засобу в ресурсі

радіочастотного спектру та підтримки сучасних послуг зв'язку, засоби зв'язку повинні мати такі характеристики:

- контролювати використання РЧС за рахунок швидкого виявлення та здатності розуміти параметри і характеристики радіосередовища;
- адаптувати свій режим роботи до зовнішніх умов і конкретних RAT шляхом динамічної зміни програмно-апаратної конфігурації або робочих параметрів відповідно до отриманих знань і на основі певних критеріїв з метою ефективного використання РЧС;
- самостійно або під контролем мережі зовнішньої системи керування визначати та ідентифікувати свій поточний стан, автономно приймати рішення у відповідь на фактично сформовану мережеву ситуацію для більш ефективного використання ресурсів РЧС [8].

Для реалізації цих характеристик у КСР широко використовуються пристрої SDR, які є програмованими системами радіозв'язку і радіотерміналами, що використовують технологію, яка дозволяє програмно конфігурувати і модифікувати робочі радіочастотні параметри, такі як частотний діапазон, схема модуляції і вихідна потужність. Винятком є модифікація робочих параметрів, які використовуються в процесі попередньо визначеної роботи радіопристроїв на основі системних специфікації і стандартів.

На практиці SDR - пристрій – це радіообладнання, компоненти якого, реалізовані у вигляді апаратних засобів, в основному реалізуються програмно-апаратними засобами на базі вбудованих обчислювальних пристроїв або програмованих логічних інтегральних схем. Основні характеристики SDR полягають у тому, що програмне забезпечення може використовуватися для виявлення радіосигналів, виконання модуляції та демодуляції. Це можна порівняти з функціональністю звичайного радіообладнання, де обробка здійснюється аналоговими схемами або аналоговими схемами з цифровими мікросхемами. SDR - пристрої мають особливості, які створюють нові можливості для користувачів. Ці пристрої мають значно гнучкіші конфігурації програмного забезпечення, що дає операторам широкі можливості для створення і використання додаткових функцій, які звичайні радіосистеми не можуть виконувати через апаратні обмеження.

При розподілі каналних ресурсів необхідно враховувати, що в безпроводових мережах склад каналів, доступних кожному вузлу доступу, є постійний, тоді як в мережах когнітивного зв'язку доступність каналів є змінним

параметром. Тому протоколи MAC-рівня в багатоканальних безпроводових мережах не можуть бути безпосередньо застосовані до мереж когнітивного радіозв'язку, а функції MAC-рівня в когнітивних мережах потребують детального вивчення.

1.2 Аналіз стандартів та технологій розподілу каналів у когнітивних радіомережах

Технологія когнітивного радіо дозволяє ідентифікувати тимчасово вільні ділянки радіочастотного спектра та тимчасово займати ці «білі плями» або «пробіли» для прийому та передачі інформації без створення перешкод для інших засобів у вибраній смузі [8]. Впровадження технологій радіозв'язку з програмованими параметрами з використанням механізмів когнітивного управління може забезпечити більш ефективне використання радіочастотного спектру за рахунок динамічного та гнучкого управління. Як зазначила робоча група 1В MCE-R у 2008 році, когнітивні радіосистеми не є частиною послуг радіозв'язку, і тому для КСР не виділяються смуги радіочастот. З іншого боку, при обговоренні питання систем когнітивного радіо стандарти вважають за необхідне перейти від статичного управління радіочастотним ресурсом до динамічної моделі частотного доступу, DSA і нового режиму управління радіочастотним ресурсом.

Стандарт IEEE 802.11af визначає адаптацію сімейства стандартів WiFi IEE 802.11 для використання тимчасово вільних смуг радіочастотного спектру. Специфікація має на меті описати, як розширити існуючий протокол WiFi, протокол HTTP, протоколом шифрування, який забезпечує надійний захист даних під час передачі між вузлами в Інтернеті за допомогою протоколу Transport Layer Security (TLS). Після того, як канал зв'язку захищено, пристрій КР може отримати доступ до бази даних геолокації. База даних геолокації - це масив даних, який містить інформацію про РЧС, доступний у певному місці ті в певний час, із зазначенням того, які частини РЧС вже використовуються обладнанням КР. Однак питання, пов'язані з тим, які обладнання реалізує механізми геолокації в поєднанні з базою даних, виходять за рамки стандарту. Особливістю стандарту 802.11af є використання векторів розподілу мережі, програмної реалізації функції опорного контролю, яка є особливістю протоколів IEEE 802.11 і IEEE 802.16 та інших протоколів безпроводових мереж, що являє собою програмний лічильник часу,

витраченого на передачу попереднього кадру.

Опорний контроль - це функція, яка обмежує необхідність фізичного контролю на радіоінтерфейсі з метою економії енергії передавача. Якщо параметр NAV дорівнює нулю, РЕЗ SU може передавати кадр, але перед тим, як присвоїти значення 0, SU повинен розрахувати швидкість передачі даних і для розрахунку часу, необхідного для передачі кадру, необхідно враховувати розмір самого кадру. Заголовок кадру MAC-рівня містить поле «Тривалість», в якому вказується час передачі кадру, протягом якого канал буде зайнятий.

Існує також проект стандарту IEEE 802.11af, який призначений для роботи в ліцензованому РЧС з використанням «білих плям». Для роботи в ліцензованих смугах був розроблений стандарт IEEE 802.22, заснований на стандарті 802.16d, і спрямований на реалізацію КР в телевізійному діапазоні частот. Стандарт IEEE 802.22 включає в себе стандарти IEEE 802.22.1-2010 і IEEE 802.22.2-2012, які є регіональними безпроводових широкосмугових мереж доступу, розроблені спеціально для забезпечення високошвидкісним зв'язком районів, віддалених від менш густонаселених міст, де існує висока ймовірність наявності вільних наземних телеканалів. У специфікації IEEE 802.22 зазначено, що стандарт застосовується до географічних районів, які класифікуються як сільські, віддалені і важкодоступні [8].

Регіональна мережа WRAN на базі IEEE 802.22 працює в діапазоні ТС-частот 54–862 МГц з можливістю розширення до 41–910 МГц, а IEEE 802.22 РЕЗ може працювати з різними комбінаціями типів модуляції і кодування, максимізуючи коефіцієнт передачі і досягаючи радіусу дії 100 км. Стандарт IEEE 802.22 є одним з перших, хто застосовував когнітивні технології в неліцензійному безпроводовому зв'язку. Результати випробувань показують, що швидкість передачі 22 Мбіт/с може бути досягнута при використанні смуги пропускання 6 МГц. Враховуються зміни на фізичному та MAC-рівнях для забезпечення захисту існуючих РЕЗ первинних користувачів РЧС, включаючи безпроводові мікрофони. Стандарт IEEE 802.16h розроблений для адаптації до діапазону частот 3650-3700 МГц, триває адаптація до частотного діапазону ТС.

Розглянуті технології КР уможливають появу наступного покоління адаптивних радіомереж, а завдяки вибору відповідних фізичних і логічних параметрів багаторежимні радіостанції зможуть працювати в різних розподілах радіочастотного спектра і незалежно від умов радіозв'язку. Крім того, що технологія когнітивного радіо буде використовуватися для широкого розгортання

розподілених радіомереж, оскільки широкий діапазон частот від 433 МГц до 5 ГГц може виявитися недостатнім для когнітивних мереж з діапазоном до 60 ГГц.

Однією з головних проблем є те, що перешкоди від вторинних користувачів РЧС не повинні погіршувати якість обслуговування користувачів цифрового телебачення, додатків доповненої реальності, мереж 5G, сенсорних мереж та інших первинних користувачів РЧС. Враховуючи значні відмінності в конкретних методах і технологіях розподілу та використання радіочастотного спектра, процедура розподілу каналних ресурсів під час динамічного доступу РЧС є основною проблемою в додатках КСР, можливо, навіть більшою, ніж фізична недоступність і електромагнітна сумісність радіочастотних діапазонів. В активних зразках КСР проблема доступу вирішується шляхом «білих плям» РЧС або інших невикористовуваних ділянок РЧС, наприклад, ТС - спектру, тобто в дециметрового метрового діапазонів хвиль.

Телевізійні «білі плями» привертають найбільшу увагу дослідників завдяки широкому діапазону розповсюдження сигналів ТС, оскільки в ТС-діапазоні РЕЗ можуть передавати інформацію на більші відстані, ніж в інших радіочастотних діапазонах. Водночас, користувачі та власники РЕЗ SU не мають ліцензії на мовлення в ТС діапазоні, тому їм необхідно забезпечити, щоб вони не створювали перешкод обраних фрагментів РЧС [4]. При використанні «білих плям» у діапазоні ТС-радіочастот існує декілька алгоритмів вибору вільних радіочастот. Найпростішим алгоритмом є алгоритм динамічного вибору частоти, де радіостанція випадковим чином вибирає вільний радіоканал в кожному часовому інтервалі прийому і передачі, середня затримка випадкового вибору частоти досить велика і основним рішенням на цей час є алгоритм зменшення випромінюваної потужності в просторі.

Алгоритм SB дозволяє регулювати рівні чутливості приймача і пороги виявлення сигналу для оптимізації пропускної здатності в мережах IEEE 802.11, а також має метод виявлення повної втрати передачі. Недоліком SB є те, що цей метод є досить повільний і виявляє кінець передачі сигналу лише тоді, коли немає повного доступу до середовища [8]. Крім того, алгоритм SB виявляє лише колізії, що не є позитивним фактором для збільшення пропускної здатності мережі. Колізії виникають, коли поведінка РЕЗ PU непередбачувана і канал потрібно звільнити, щоб уникнути перекриття між радіостанціями SU і PU. В результаті виникає задача дослідження щодо підвищення оперативності обміну інформацією між

когнітивними РЕЗ при доступі до тимчасово вільних каналів РЧС в області «білої плями». Ілюстративна схема розташування користувачів когнітивної мережі відносно ліцензованих користувачів для випадку, аналогічно до стандарту IEEE 802.22, що використовується для організації мереж WRAN, показана на рис. 1.4.

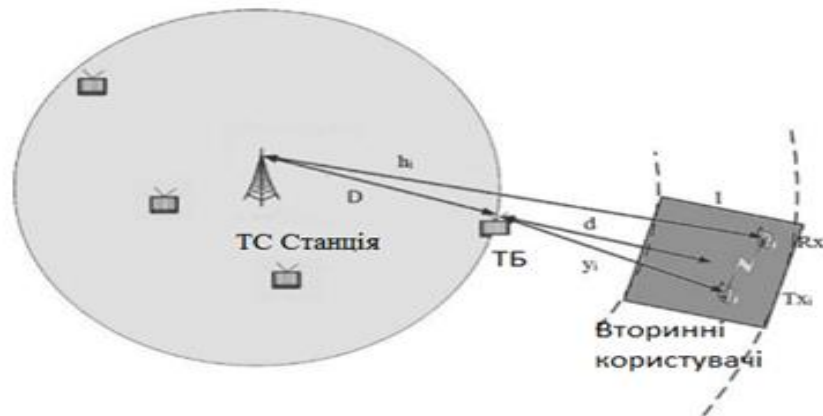


Рисунок 1.4 – Приклад розподілу ресурсів у когнітивній мережі WRAN з використанням телевізійних радіоканалів

Дальність передачі на рисунку 1.4 визначається за допомогою серії кроків, що включає нормальне зондування сигналів ТС, виявлення «білих плям» і визначення роботи РЕЗ PU [18]. Дані в ТС діапазоні можуть бути доступні для КСР за допомогою методу єдиної бази даних, але цей метод вимагає додаткового часу на обробку запитів до такої бази даних і пошуку нових каналів для безперервного обміну інформацією в мережі когнітивного зв'язку. Тому наступним кроком слід розглянути можливість розробки алгоритму перемикання на резервний канал, коли активний канал починає передавати радіостанції PU.

1.3 Аналіз використання когнітивного радіо, SDR та їх взаємодії

При використанні адаптивного доступу когнітивне РЕЗ автономно зондує навколишнє середовище, визначає невикористану ліцензовану частину спектра та використовує отримані знання таким чином, щоб не впливати негативно на РЕЗ первинного ліцензованого користувача РЧС. Тому важливо розробити такий метод розподілу каналного ресурсу, який може бути використаний як для OSA, так і для підходу, заснованого на отриманні незалежної інформації від РЕЗ про стан РЧС та роботу обладнання первинного користувача [8]. Дане дослідження присвячене

розподілу каналних ресурсів між первинними та вторинними користувачами РЧС з точки зору доступу до каналу передачі та скорочення часу цього доступу з урахуванням безумовного пріоритету доступу первинного користувача.

У цьому дослідженні РЕЗ SU буде використовувати результати аналізу існуючих РЧС і попередньо витягнуті знання на початку створення когнітивної мережі. Результатом може бути ранжований список доступних мереж або каналів з різними RAT, їхніми характеристиками та доступними каналами для потенційних з'єднань. Зазначений список надсилається до РЕЗ SU, за запитом або на циклічній основі, після чого може бути ініційована процедура обміну сигнальними повідомленнями між РЕЗ SU та когнітивною мережею зв'язку для отримання доступу до каналів прийому передачі інформації. Ця процедура безпосередньо впливає на ефективність підключення до каналу з обраною радіотехнологією та в подальшому впливає на затримку прийому та передачі пакетів при перемиканні на резервний канал [22].

Переважно програмне управління під час створення SDR зробили доступними використання сценаріїв роботи пристроїв із застосуванням типових параметрів конфігурації, де для адаптації до середовища передачі, що змінюється, необхідно застосовувати заздалегідь підготовлені стеки протоколів моделі BBC та апаратне забезпечення для забезпечення відповідності вимогам конкретної RAT. Функціональність SDR відкриває широкий спектр застосувань в системах громадської безпеки. Поширеним методом взаємодії між когнітивними мережевими комунікаціями є використання когнітивних каналів управління в у вигляді пілотних каналів. Канал управління може бути постійно виділений в тому ж радіочастотному діапазоні, що використовується радіообладнанням PU або може бути організований як позасмуговий канал управління.

Обмін сигнальною інформацією здійснюється на внутрішньосмугових або позасмугових когнітивних пілотних каналах для забезпечення взаємодії між мережею і користувацьким терміналом. СРС включає інформацію про максимальну випромінювану потужність, методи кодованого доступу до радіочастотної мережі і вартість її використання. Когнітивні пілотні канали можуть бути реалізовані на основі різних технологій радіодоступу (таблиця 1.1).

Аналіз даних таблиці 1.1 показує, що, крім методів адресації, пов'язаних зі специфікаціями 3GPP, більшість методів організації каналів управління пов'язані з каналним або MAC-рівнем моделі взаємодії відкритих систем, що додатково

ілюструє корисність вивчення інформаційного обміну в когнітивних мережах на каналному рівні.

Таблиця 1.1 – Аналіз стандартів безпроводових мереж для реалізації CPC

Стандарти для CPC	Підтримувані стики	Модель розсилки повідомлень	Необхідність з'єднання	Протоколи	ВОС
Незалежно від технології радіодоступу безпроводової мережі					
3GPP ANDSF	Термінал - мережа	Одноадресна	Ні	OMA-DM	IP, MCЭ - T E.164
IEE 802.21	Термінал - мережа, мережа-мережа	Одноадресна, багатоадресна	Ні	MIN	IP,L2
Залежно від технології радіодоступу безпроводової мережі					
3GPP RRC	Термінал-мережа	Одноадресна, широкомовна	Ні	RRC	3GPP
IEEE 802.11	Термінал-термінал термінал - мережа	Одноадресна, широкомовна	Ні	802.11	L2
Direct WiFi	Термінал-термінал (базовий)	Одноадресна, широкомовна	Ні	802.11	L2
Bluetooth	Термінал-термінал (базовий)	Одноадресна, широкомовна	Ні	Bluetooth 2.1, 4.1	L2

Існують централізовані та децентралізовані методи, за допомогою яких SU можуть отримувати інформацію для переходу до цільової мережі. При централізованому методі (рис. 1.5), SU отримує потрібну інформацію від центрального мережного контролера.

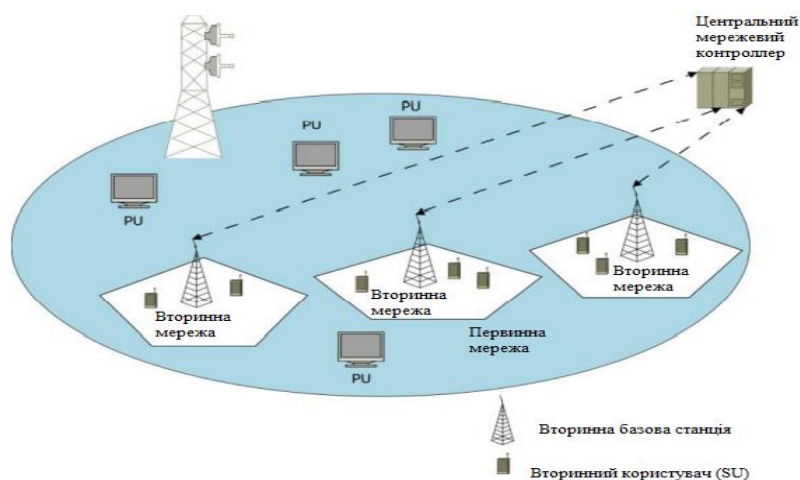


Рисунок 1.5 – Когнітивна мережа зв'язку з централізованим збором інформації

Основною функцією центрального мережевого або когнітивного контролера є збір, обробка, зберігання, надання та оновлення необхідної інформації про перелік доступних каналів і технологій радіодоступу (RAT). При децентралізованому методі, зображеній на рисунку 1.6 SU отримує потрібну інформацію шляхом автономного збору та обробки даних про характеристики мереж, в якій вони знаходяться в даний момент [8].

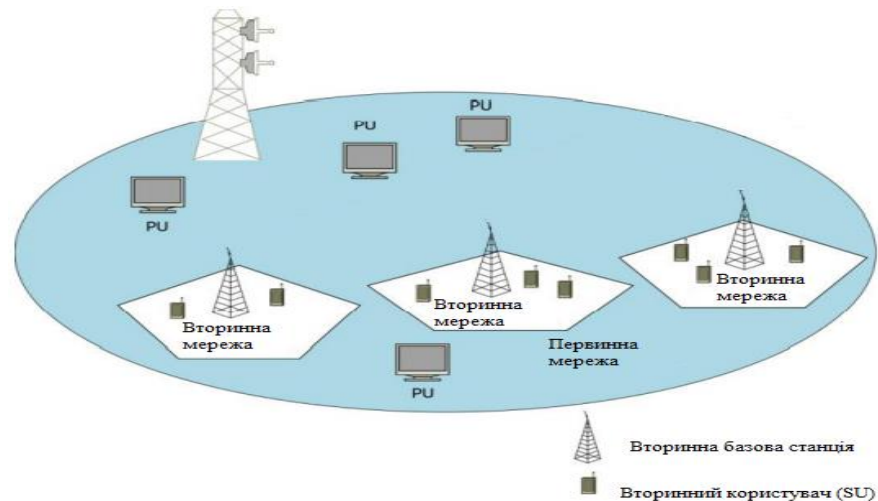


Рисунок 1.6 – Когнітивна мережа зв'язку з децентралізованим збором інформації

Після цього SU може самостійно надіслати запит до контролера для ініціювання процедури доступу до КР. Недоліками цього методу є підвищене навантаження на пристрій користувача, складність програмної логіки взаємодії з мережею та складність апаратної частини РЕЗ SU. Цей метод призводить до обмеження обчислювальних ресурсів, необхідних для програмних додатків РЕЗ SU, які не задіяні в зборі, обробці та визначенні доступних каналів. Іншим недоліком є можливість занадто частого перемикання РЕЗ SU з однієї мережі на іншу через відсутність інформації про витрати на таке перемикання. Найбільш прийнятною є комбінація вищезазначених методів, коли послідовно застосовується централізовані та децентралізовані схеми, з використанням переважно централізованого збору [2].

На першому етапі центральний або когнітивний контролер передає інформацію про вільні канали. Якщо доступ до центрального контролера обмежений, пристрій починає самостійно збирати інформацію незалежно від РЧС. На другому етапі пристрій підключається до обраних каналів або реєструє самостійно виявлені вільні канали за допомогою когнітивного контролера, після

чого відбувається навчання. Такий комбінований метод скорочує час, необхідний для динамічного доступу до РЧС і процедури використання «білих плям».

Влаштування PE3 SU розглядається як SDR, що підтримує технічні можливості одночасного зв'язку з різними мережами доступу за допомогою двох радіомодулів або декількох радіомодулів, як багаторежимної станції. Ця станція використовується для автоматичного або автоматизованого прийому, передачі та обробки даних насамперед у складі сенсорних мереж, мереж «Інтернету речей», систем міжмашинної взаємодії.

Для актуалізації інформації в базі даних геолокації PE3 SU може автономно застосовувати програмно-керовані методи виявлення тимчасово вільних радіочастот та розпізнавання радіочастот, що використовуються. Оскільки технології виявлення та зондування радіочастотних діапазонів у когнітивних мережах активно розвивається, обладнання та програмне забезпечення бази даних геолокації на ранніх етапах впровадження має базуватися на централізованому джерелі інформації. Таке рішення є компромісом між задоволенням потреб в оперативній обробці інформації з використанням РЧС та вимогами, зумовленими обмеженістю радіоресурсу, що в сукупності збільшує ефективність використання радіочастотного діапазону [8].

Користувачі КСР можуть використовувати кілька доступних радіочастотних діапазонів з різними характеристиками. Для роботи з кількома радіочастотними діапазонами можна використовувати два типи стратегій зондування: широкосмугове зондування та багатоканальне зондування [3].

При широкосмуговому зондуванні високочутливий приймач сприймає кілька діапазонів у широкому діапазоні частот. У схемах широкосмугового зондування потрібен лише один приймач, і він зазвичай використовує однаковий час спостереження і час, виділений на передачу в декількох радіочастотних діапазонах, без урахування відмінностей у характеристиках.

У разі багатоканального зондування приймач PE3 із необхідною чутливістю контролює тільки один радіочастотний діапазон за один раз, що дає змогу PE3 SU адаптуватися до характеристик даної смуги РЧС. Однак, PE3 SU не завжди мають достатню кількість приймачів-передавачів для всіх доступних радіочастотних діапазонів, саме багатоканальне зондування визначає вибір конкретних радіоканалів для приймання та передавання інформації в когнітивній мережі. Інший шлях розвитку технології радіочастотного зондування – почати

використовувати технологію КСР у діапазоні радіочастот фіксованих супутників між 3,4 і 3,8 ГГц. Перевагою тут є те, що використання пристроїв когнітивного радіо може повністю керуватися і контролюватися операторами зв'язку, які мають ліцензію в цьому частотному діапазоні.

1.4 Аналіз протоколів доступу та дослідження методів розподілу каналних ресурсів у когнітивних мережах

Технологія когнітивного радіо дозволяє спільно використовувати радіочастотні канали як для PU, так і для SU. Існує два типи схем спільного використання радіочастотного спектра: спільний та розподілений. У режимі спільного використання SU ділить радіочастотний спектр з PU, але на радіопристрої SU накладаються жорсткі обмеження, щоб запобігти створенню перешкод для пристроїв PU. У режимі розподіленого використання радіочастотного спектра радіопристрої SU умовно поділяють спектр на тимчасово вільні ділянки, поки не стане активним PU [19].

При спільному використанні радіочастот необхідно постійно контролювати середовище передачі на наявність активності PU та перелаштовувати режим роботи, щоб звільнити канал для роботи PU. При цьому потрібно вирішувати проблеми, пов'язані із забезпеченням різних програм користувача когнітивної мережі зв'язку. Як наслідок, у межах управління використанням РЧС при використанні когнітивних комунікаційних мереж виникають наступні задачі:

- визначення доступної пропускну здатності радіочастотного діапазону і вільних каналів;
- вибір доступних каналів для прийому і передачі;
- узгодження доступу до каналів з іншими користувачами PE3 SU;
- звільнення робочого каналу при виявленні початку роботи радіозасобів первинного користувача.

Ці завдання на практиці вирішуються в рамках комплексного підходу до побудови систем когнітивного зв'язку (від реалізації принципу DSA, використання широкосмугових когнітивних антен, до протоколів зв'язку, що використовуються для управління і координації використання радіочастотного спектра). Розробка систем управління спектром включає в себе такі функціональні області управління,

як функції вибору РЧС і функції підтримки спільного використання спектра PU і SU.

Рівні та функції на рисунку 1.7 охоплюють декілька протоколів управління, які постійно взаємодіють один з одним, оскільки кількість доступних каналів змінюється в часі і просторі, РЕЗ SU повинні перемикатися на новий канал, коли з'являються працюючі РЕЗ PU на каналі [1]. Ця функція визначається як функція мобільності спектра і через гетерогенні та динамічні властивості радіосередовища цей перехід є складним завданням, з урахуванням забезпечення надійності каналу зв'язки для мобільних користувачів КР.

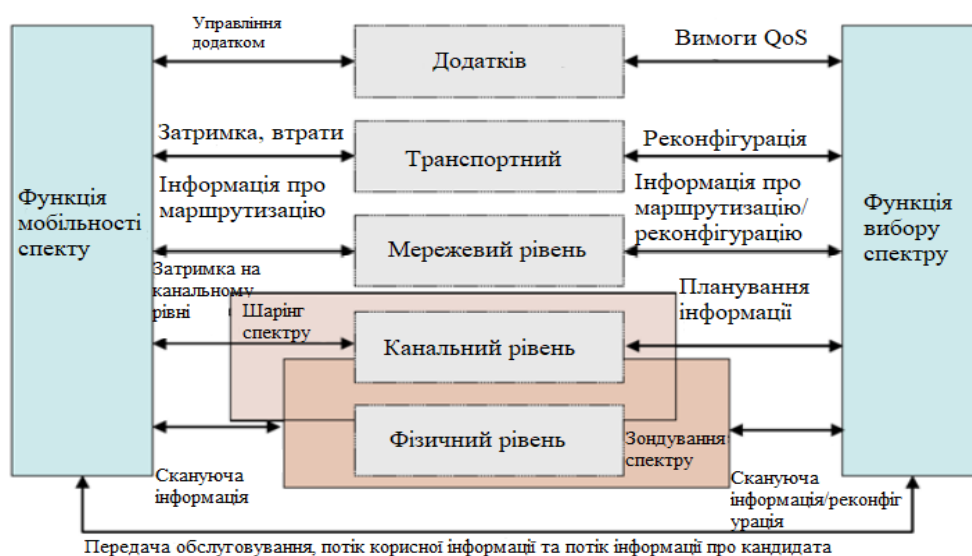


Рисунок 1.7 – Рівні та функції управління використанням РЧС для когнітивних мереж зв'язку

Багаторівнева схема управління дозволяє реалізувати технологію безперебійного надання послуг за рахунок мінімізації затримки перемикавання радіоелектронного обладнання вторинного користувача. Для обмеження та запобігання негативного впливу на радіоелектронне обладнання PU в когнітивних мереж використовується обмеження потужності неліцензійних випромінювань користувачів [22].

Існує декілька алгоритмів керування потужністю передавання SU з метою зменшення рівня завад для радіочастотного обладнання PU та забезпечення енергоефективності. Одним з відомих є алгоритм динамічного розподілу потужності, який використовує метод вибору з мінімізацією перешкод, де призначається мінімальна потужність передавання PU, а критерієм розподілу

потужності для SU є уникнення перешкод для PU. В той же час, зміна випромінюваної потужності SU не забезпечує необхідного рівня якості передачі. Тому в стек когнітивного протоколу управління радіочастотним ресурсом SDR необхідно інтегрувати нові технічні можливості та функції управління РЧС, такі як зондування спектру, обмін потужностями, підтримка DSA та OSA.

Радіомодуль радіопристроїв SU не може одночасно виконувати зондування, передавати та приймати радіосигнал, бо якість виявлення початку роботи PU погіршується. Процес зондування необхідно оптимізувати, щоб максимально ефективно використовувати радіочастотні ланцюги і антени, збільшити кількість вільних радіочастотних діапазонів і скоротити час заняття антени для процесу зондування. Також необхідно переконатися, що використання РЧС сумісне і узгоджене з оптимізованими параметрами зондування.

З урахуванням кількості взаємодіючих SU, кожна ділянка РЧС аналізується з урахуванням профілю послуг користувача когнітивної мережі та можливостей спектрального зондування. Доцільно, щоб після вибору відповідної смуги РЧС, у даній смузі знаходяться вільні канали та потім знайдені канали розподіляються між радіопристроями вторинних користувачів. Тут важливим дослідним завданням є передбачення поведінки PU, оскільки такий користувач має безумовний пріоритет при активізації на каналі займаному пристроями SU.

Одним із методів дослідження функцій управління на рисунку 1.7 є імітаційно-статистичне моделювання за допомогою симулятора NS3, що дозволяє дослідити поведінку SDR. У схемі SU кілька груп, що не перетинаються, і кожна група використовує метод у рамках аукціонної моделі і отримує вільні канали в тимчасове користування. Кожна група має керуючий вузол, який може динамічно перерозподілятися.

Основна ідея запропонованого алгоритму полягає в тому, щоб збільшити інтенсивність використання вільного радіочастотного ресурсу і максимізувати доходи PU, враховуючи при цьому мінімальні вимоги до пропускну здатності SU.

Користувачі ідентифікуються до початку операції, і вузол-лідер надає ідентифікатор контрольної групи у фазі оголошення. На етапі аукціону кілька вузлів-лідерів отримують доступні діапазони каналів. В результаті аукціону, кожна група отримує певний набір доступних каналів, який задовольняє членів групи.

У когнітивній мережі зв'язку методи і протоколи доступу до каналу когнітивної мережі повинні базуватися на концепції DSA. Для цього можуть

використовуватися алгоритми розвідувального аналізу у стратегії пошуку вільних ділянок радіочастотних ділянок, де передбачається розподіл РЧС між сусідніми SU за двома параметрами: допустимою потужністю передачі в каналі та споживаною потужністю SU.

Алгоритм розвідувального аналізу сприяє швидкому звільненню каналу на початку роботи первинного користувача. Для збільшення швидкості звільнення пропонується описувати два розглянуті параметра в рамках марковської моделі процесу «ON/OFF». Наведені вище дослідження не враховують неоднорідність когнітивної мережі. В даній дипломній роботі гетерогенність виявляється в термінах як «вертикальної» так і «горизонтальної» взаємодії в безпроводових системах зв'язку.

Вертикальна взаємодія означає, що розподіл каналних ресурсів організовано на фізичному рівні, на рівні каналу, на рівні мережі і далі. Наприклад, використання протоколів MAC (каналного рівня), не адаптованих до умов використання когнітивної мережі з DSA, може призвести до проблем доступу між радіостанціями вторинного користувача та колізій передачі на обраних каналах.

При горизонтальній взаємодії обмін інформацією між когнітивними пристроями на кожному рівні розглядається відповідно до семирівневої моделі взаємозв'язку відкритих систем BBC з урахуванням специфіки технології RAT. Оскільки РЕЗ надають різні вимоги до QoS, це призводить до виникнення різних критеріїв вибору каналу користувачів, у тому числі із застосуванням нечіткої логіки, нейронної мережі, тому в цілому необхідно використовувати систему прийняття рішень, представлену на рисунку 1.8.

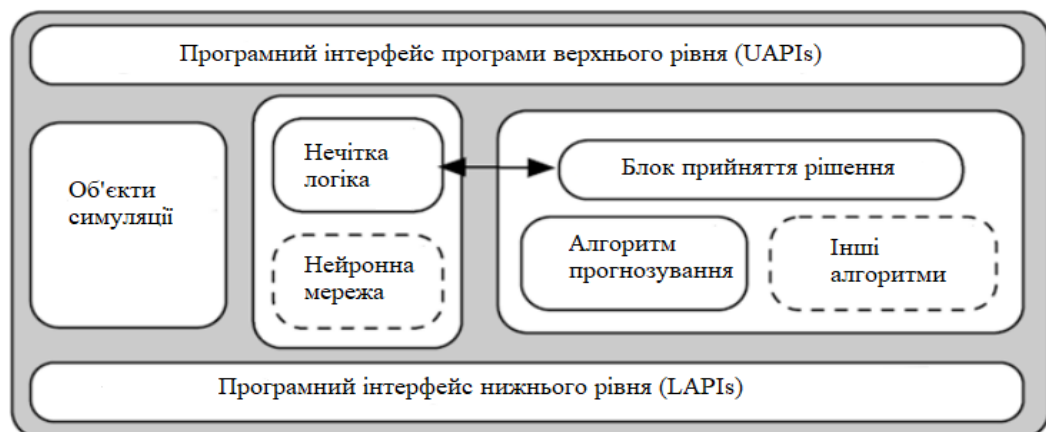


Рисунок 1.8 – Узагальнена схема системи прийняття рішення щодо вибору каналу в когнітивній мережі зв'язку

На рисунку 1.8 програмний інтерфейс програми верхнього рівня необхідний для взаємодії з програмами користувача, а програмний інтерфейс програми нижчого рівня необхідні при взаємодії з нижчими рівнями системи когнітивного радіо. Для цього інтерфейси містять набір процедур, функцій, структур та класів, які можна використовувати для створення програмних програм управління. Загалом блок прийняття рішення обробляє інформацію, що надходить із зовнішніх джерел, і приймає рішення про те, яка дія необхідно виконати: виділення каналу, зондування радіочастотного спектру або звільнення робочого каналу блок нейронної мережі аналізує вхідну інформацію, виробляє патерни поведінки на підставі даних, що надходять від блоку прийняття рішення та за результатами роботи алгоритму прогнозування, який прогнозує початок роботи PU [1].

Надалі детально досліджується алгоритм передбачення початку роботи PU. Оскільки оперативний контроль і координація у когнітивних мережах відбувається переважно на MAC-рівні, розробка ефективних MAC-протоколів залишається важливою вимогою для розгортання когнітивних мереж зв'язку.

Канальний рівень з використанням наборів безкоаліційного доступу для когнітивного циклу SU поділяє процес доступу на чотири фази: спостереження, планування, прийняття рішення та виділення каналу.

На фазі спостереження створюється масив даних про розташування та характеристики точок радіодоступу PU, масив даних про резервні канали для перемикання та масив контрольованих даних у вільних каналах, після чого визначаються смуги та діапазони радіочастотного спектру, що не використовується. На етапі прийняття рішення формується сценарій поведінки SU у частині заняття вільного каналу, завершення використання та звільнення. Тут доцільно ввести в когнітивну мережу додатковий інформаційно-керуючий вузол для моніторингу роботи PU. Недоліком такого підходу є наявність спеціальних вузлів, які не використовуються в даному методі.

Протокол обміну призначеним каналним ресурсом між користувачами когнітивної мережі ґрунтується на механізмі тимчасового поділу каналів, без використання служби керування каналами. У цьому протоколі доступ до каналу поділяється на часові інтервали, користувачі когнітивної мережі обмінюються даними або службовою інформацією в спеціально виділені каналні часові інтервали. Цей протокол враховує всі доступні часові інтервали, що гарантує повне

використання спектра. Перевагою цього протоколу є передача трафіку з найвищим пріоритетом у реальному часі, недоліком – використання лише тимчасового поділу.

Децентралізований когнітивний протокол MAC-рівня використовує багатоканальне резервування та дозволяє динамічно вибрати доступний канал зв'язку шляхом розподіленої схеми вибору вільного каналу під розподіленою схемою розуміється взаємодію SU без центрального координуючого вузла, тобто інформація про вільні канали оновлюється не лише за рахунок спостереження за спектром, а й шляхом обміну між кореспондуючими вузлами. Така взаємодія дозволяє уникнути колізій доступу та взаємних перешкод, хоча збільшується обсяг службового трафіку, що передається, зростає навантаження на пристрої користувача, метод діє для малих груп вузлів тобто мереж малої ємності [19].

Пропонується також адаптивний протокол каналного рівня для розподілу вільних ресурсів радіочастотного каналу, які не зайняті як первинними, так і вторинними користувачами. Канальні ресурси використовуються для збільшення пропускної здатності вже використовуваних каналів в двох режимах: виправлення помилок та дублюючої передачі залежно від стану каналу.

Режим виправлення помилок використовує алгоритм кодування і декодування інформації та виправлення виявлених помилок, у тому числі виявлення помилок із автоматичним запитом повторення.

Режим дублюючої передачі дозволяє створювати сесію з додатковим каналом для перемикання у разі помилки передачі або для розвантаження основного каналу від надмірної інформації. Недоліком такого підходу є те, що для одного сеансу зв'язку потрібно занадто багато каналів. В протоколі багатоканальної агрегації з метою покращення техніки дублювання було запропоновано використовувати технологію багатоканальної агрегації, дозволяючи одному PE3 SU одночасно використовувати кілька каналів та одночасно передавати кілька пакетів, що ускладнює процедуру доступу до каналу.

Протокол розподіленого кооперативного використання для когнітивного радіо передбачає, що радіочастотний спектр ділиться на N каналів, припускаючи, що кожна радіостанція SU може самостійно визначити вільний канал, звертаючись до заздалегідь створеної геолокаційної бази «білих плям», для чого кожна радіостанція SU має один напівдуплексним приймач, таким чином користувач передає або приймає сигнали у необхідному частотному діапазоні [22].

Загалом протоколи MAC-рівня в когнітивних мережах застосовуються для розв'язання задачі розпізнавання тимчасового вільного каналу/каналів РЧС, з обліком інформації щодо виявлення або відсутності сигналу від фізичного рівня.

З іншого боку, MAC-рівень дозволяє мережному рівню визначити оптимальний маршрут передачі, передаючи список доступні канали. У той же час, мережний рівень когнітивної мережі зв'язку може передати на MAC-рівень відомості про те, який канал підходить за якістю обслуговування QoS в конфігурацію сеансу зв'язку. Завдання маршрутизації зазвичай вирішуються на прикладному рівні. Такий підхід дозволяє підвищити якість передачі потокових даних у гетерогенних багатозв'язних когнітивних структурах в мережах зв'язку.

Як наслідок, MAC-рівень когнітивної мережі зв'язку повинен підтримувати такі основні функції:

- контроль заняття та звільнення каналу з боку радіостанції первинного користувача;
- оперативна передача даних на радіобладнання SU про наявність тимчасово вільних каналів.

Модель протоколу MAC-рівня заснована частково на марківських процесах прийняття рішень, дозволяє використовувати весь доступний радіочастотний ресурс, але практична реалізація техніки POMDP складна, оскільки кожне радіобладнання SU має мати декілька датчики-зонди для виявлення вільного каналу спектру. Було запропоновано когнітивний MAC-протокол, де SU може вибрати канал із наявних у списку з найвищим показником ймовірність передачі пакетів [8]. Цей показник визначається на основі статистики надсилання передачі пакетів. Однак складність обчислень для визначення ймовірності успішної передачі швидко зростає зі збільшенням кількості радіобладнань SU. Наприклад, розроблявся порівняно простий за своєю логікою протокол, заснований на випадковому аналізі РЧС, але не був врахований факт взаємодії та агрегації каналів, необхідний для збільшення розмірів когнітивної мережі зв'язку.

В цілому, дослідження можливостей когнітивної мережі зв'язку показує, що основна увага в запропонованих методах приділяється синтезу методів та алгоритмів прийняття рішень відповідно до вимог, вказаних користувачами. Тому існують різні підходи до формування цільової функції в рамках розв'язання задачі оптимізації, використовуються різні методи та алгоритми оптимізації залежно від характеристик радіосистеми та вимоги якості обслуговувань.

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗПОДІЛУ КАНАЛЬНОГО РЕСУРСУ МІЖ КОРИСТУВАЧАМИ У КОГНІТИВНИХ МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

2.1 Розробка методу зменшення часу доступу до каналу передачі при розподіл каналного ресурсу в когнітивних мережах

У когнітивних мережах при розподілі каналних ресурсів в рамках процедури динамічного доступу до каналу передачі необхідно зменшити час доступу до каналу вторинного користувача РЧС [4]. Для вирішення проблеми зменшення часу доступу до каналу на рівні МАС в когнітивних мережах необхідно забезпечити пріоритет доступу первинного радіокористувача. Це означає, що первинний користувач радіочастотного спектра, в якому використовуються каналні ресурси в когнітивних мережах, повинен завжди мати можливість використовувати необхідний канал, незалежно від того, продовжується чи ні інформаційний обмін по даному каналу вторинним користувачем РЧС.

Якщо початок роботи на зайнятому каналі первинного користувача РЧС виявляється будь-яким доступним способом, вторинний користувач РЧС повинен від'єднатися від робочого каналу оперативно. З іншого боку, якщо припинення роботи первинного користувача РЧС виявлено будь-якими засобами, вторинний користувач РЧС може знову зайняти канал, що звільнився, і продовжити процес обміну інформації з відповідним пристроєм.

Враховуючи описані процедури забезпечення пріоритету первинного користувача РЧС, з метою швидкого відновлення інформаційного обміну та ефективності використання наявних каналних ресурсів, важливо розробити метод доступу до середовища передачі на МАС-рівні з урахуванням того, що РЧС вторинного користувача з функціями SDR, мінімізує час доступу до вільних каналів. При цьому інформаційні пакети можуть формувати черги на передачу та прийом на мережевому рівні, але оскільки час, витрачається на аналіз середовища передачі на МАС-рівні значно більше, ніж час, що витрачається на формування черг на мережевому рівні [5].

Припустимо, що кожен первинний користувач містить приймально - передавальний пристрій, який може отримати доступ до позасмугових або внутрішньосмугових каналів управління. SU також мають пристрої передачі та прийому інформації, які можуть бути налаштовані на роботу на будь-якому каналі

в ліцензійній зоні радіочастотного ресурсу, головним чином, для визначення того, які канали звільнилися від роботи радіообладнання первинного користувача.

Для виявлення тимчасово вільних каналів для радіопристроїв SU, пропонується використовувати два можливих методи зондування.

1) Методи, які аналізують випадково вибрані ділянки спектру для визначення наявності вільних робочих каналів;

2) Методи, що використовують геолокаційні бази даних для координації вибору ліцензованих каналів і користувачів в радіочастотному спектрі [6].

При використанні обох цих методів для виявленої мережі аналізується пропускна здатність каналів і затримка QoS. При доступі до неліцензійних радіочастотних об'єктів щодо РЕЗ діють прийняті обмеження за потужністю випромінювання. Окремі радіоелектричні засоби вторинних користувачів обмінюються інформацією з відповідними РЕЗ SU про періодичність використання спектру з боку первинних користувачів. Таким чином, всі SU можуть тимчасово використовувати канали ліцензійних ділянок спектру, за умови, що інформація про доступність каналів, визначена кожним SU, є доступною всім кореспондуючим SU. Для отримання доступу до РЧС нехай кожен вільний ліцензійний канал ділянки визначається зондуванням [24].

У загальному випадку передбачається, що довжина групи запитів на обслуговування є фіксованою величиною, яка відповідає пропускній спроможності сервера і позначається як Y . Для подальшого дослідження, враховуючи можливість обслуговування великої групи користувачів в когнітивній мережі зв'язку, потік запитів на виділення каналу в когнітивній мережі визначено як пуасонівський, інтервал часу між надходженням запитів розподілено експоненціально, а запитувана послуга гіпотеза про функцію розподілу тривалостей не подається, сховище має нескінченну довжину, а дисципліна обслуговування запитів визначається як «перший прийшов – перший обслужений».

Розглянутий сервер не буде простоювати, якщо він має хоча б одну заявку на обслуговування. З урахуванням обґрунтованих припущень і передумов моделі виду $M/G^Y/1$ може бути використана для аналізу часу доступу до каналу когнітивної мережі, яка в подальшому досліджується методом вкладеного ланцюга Маркова. Модель виду $M/G^{[k]}/1/\infty$ раніше була досить добре досліджена стосовно вивчення параметрів моделі протоколу управління передачею. Для вирішення задачі зменшення часу доступу до середовища передачі розглянуто модель каналу КМЗ,

яка є ліцензійною зоною i для доступу до якої використовується мультиплексування з часовим поділом каналів, як показано на рисунку 2.1.

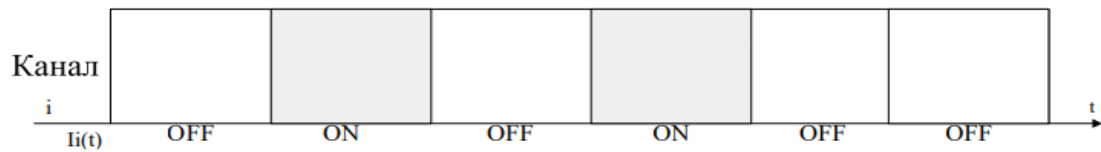


Рисунок 2.1 – Стан каналу для PE3 SU

Канальна модель когнітивної мережі зв'язку описується двома станами, позначеними «ON/OFF», де стан «OFF» означає, що канал зайнятий первинним користувачем, а стан «ON» означає, що канал вільний для використання SU [6].

Модель використання каналу «ON/OFF» описує стан каналу, коли PU займає або звільняє канал, а SU може приймати та передавати інформацію використовуючи канал у стані «ON». Час початку і закінчення кожного стану синхронізовано для всіх SU та n -каналів. Припустимо, що кожен канал змінює свій стан незалежно. Нехай α_i – ймовірність того, що i -й канал когнітивної мережі перейде зі стану «ON» в стан «OFF», β_i – ймовірність переходу зі стану «OFF» у стан «ON», а $1-\beta_i$ – ймовірність того, що i -й канал когнітивної мережі не перейде зі стану «OFF» у стан «ON», $1-\alpha_i$ – ймовірність того, що i -й канал когнітивної мережі не перейде зі стану «ON» у стан «OFF», де $1 \leq i \leq n$. Тоді стан каналного інтервалу для SU може бути описано моделлю переходів станів (рис. 2.2).

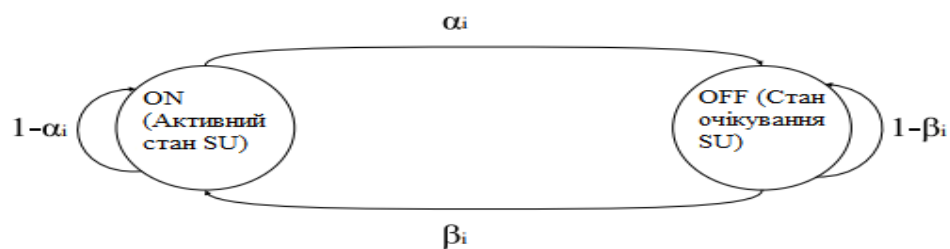


Рисунок 2.2 – Модель використання каналу «ON/OFF» для PE3 SU

Для i -го каналу у часовому інтервалі t , де $t = 1, 2, \dots, T, (T+1), (T+2), \dots, T_n$ загальний час використання каналу у стані «ON/OFF» відображається функцією індикації $I_i(t)$, яка набуває значення, що дорівнює 1, коли радіопристрій SU знаходиться в режимі очікування, та 0, коли SU активний. Таким чином, стан каналу мережі когнітивного зв'язку в інтервалі часу виявлення $(0, t)$ індикаторними функціями $[I_1(t), I_2(t), \dots, I_n(t)]$, які можна описати як послідовність реалізацій.

Визначимо з урахуванням межі інтенсивності заняття i -го каналу РЕЗ PU, яка визначається як Y_i :

$$y_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\sum_{t=1}^T I_i(t)}{T_{0,i}} = \frac{\beta_i}{\alpha_i + \beta_i}, \quad (2.1)$$

де $T_{0,i}$ – час заняття каналу ліцензійним користувачем.

Тривалість перебування i -го каналу у стані «OFF» розподілена за експоненціальним законом, де індекс «0» - специфікація стану каналу, індекс i - специфікація номера каналу, а РЕЗ PU безперервно перебуває у стані «OFF» протягом усього інтервалу часу [8].

Час переходу каналу зі стану «ON» в стан «OFF» позначається як t_{sp} , а час перебування каналу у стані «ON» до зайняття каналу SU, позначається як t_{ls} . Якщо канал перебуває у стані «ON» протягом часу t_{ls} , то такий канал вважається вільним для використання SU на певний період часу, і SU може отримати доступ до цього каналу для прийому-передачі інформації [16]. На рисунку 2.3 показано часову діаграму подій заняття та звільнення каналу в ліцензійній ділянці радіочастотного спектру.

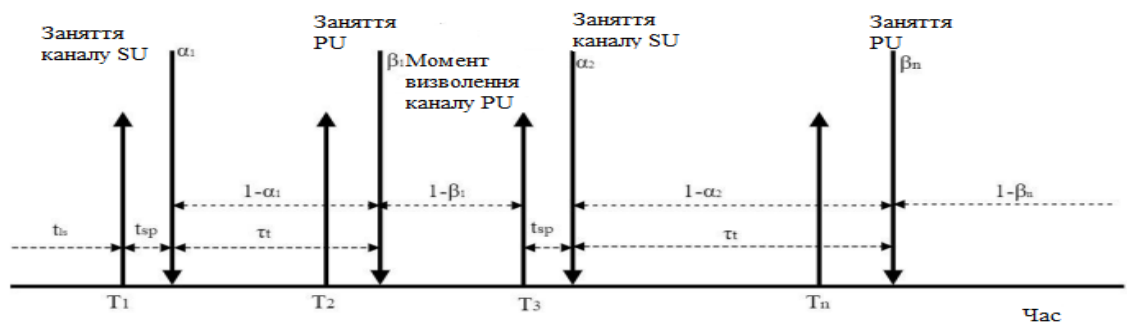


Рисунок 2.3 – Часова діаграма подій заняття та звільнення каналу когнітивної мережі зв'язку

Момент «Заняття PU» відповідає моменту, коли від первинного користувача спектру отримано запит на обслуговування і в результаті обробки цього запиту канал повинен бути звільнений від радіозасобів вторинного користувача. «Момент звільнення каналу PU» означає момент, коли PU завершує свою роботу на каналі.

Нехай, τ_t – тривалість інтервалу часу прийому-передачі інформації РЕЗ SU. Враховуючи, що в момент часу t_{ls} канал знаходиться у вимкненому стані,

ймовірність того, що PU продовжить роботу на одному каналі, який в даний момент використовує SU для прийому-передачі, може бути отримана наступним чином:

$$P_1(\tau_1) = P\{T(0,i) < t_{ls} - t_{sp} + \tau_1 \mid T(0,i) > t_{ls} - t_{sp}\} = 1 - e^{-\frac{\tau_1}{T_{0,i}}}, \quad (2.2)$$

де $T_{0,i}$ - це тривалість вимкненого стану;

$P\{T(0,i) < t_{ls} - t_{sp} + \tau_1 \mid T(0,i) > t_{ls} - t_{sp}\}$ ймовірність того, що PU не займе канал у момент використання каналу SU;

t - тривалість прийому-передачі SU;

$-\frac{\tau_1}{T_{0,i}}$ - порядок експоненціального розподілу;

t_s - час зондування SU для виявлення факту початку роботи PU.

У загальному випадку під прийомі та передачі даних SU дозволяється використання до n -каналів у ліцензійній ділянці радіочастотного ресурсу. Таким чином, ймовірність того, що канал буде зайнятий ліцензованим користувачем у певний проміжок часу ($T_{n,i}$), складає:

$$P_n(\tau_1) = 1 - (1 - P_1)^n = 1 - e^{-\frac{\tau_1}{nT_{0,i}}}. \quad (2.3)$$

Крім того, моделі та методи, що розробляються, повинні враховувати інтерференційні обмеження, які враховують ступінь негативного впливу на процес прийому-передачі інтерферуючого сигналу радіоелектронного обладнання. Ймовірність виникнення перешкоди позначається як P_{th} . Значення ймовірності перешкоди полягає у тому, що це випадкова величина, яка визначає ймовірність виникнення події спотворення сигналу в аналізованому РЕЗ PU під впливом сигналів від інших працюючих РЕЗ (переважно SU). Максимально допустимий час передачі $T_{d,i}^{max}$ для i -го каналу можна визначити наступним чином:

$$T_{d,i}^{max} = \operatorname{argmax}_{\tau_1 > 0} \{P_n(\tau_1) < P_{th}\}. \quad (2.4)$$

Оскільки використання каналу РЕЗ PU є постійним протягом усього періоду зайнятості каналу, можна припустити, що виконується рівність $\overline{T_{0,i}} = \overline{T_{0,j}} \forall i \neq j$, а допустима тривалість прийому-передачі може бути оцінена лише через $T_{d,i}^{max}$.

Тепер розглянемо ймовірність події, коли в момент виявлення початку роботи PU канал вільний. Оскільки когнітивні системи радіозв'язку відчують певні ділянки радіочастотного спектру, то виявлення події відсутності роботи РЕЗ PU означає, що канал вільний для використання РЕЗ SU [8].

Нехай, інтервал часу між моментом, коли PU раніше звільнив канал та моментом заняття каналу SU для поточного сеансу передачі-приймання, позначається як Δt . Тоді момент виявлення наступного вільного каналу позначається як $t = t_0 + \Delta t$, де t_0 - перший момент часу в порядку зайнятості каналу в ліцензійній зоні РЧС, Δt - час між першим і наступним моментом зайняття каналу. У момент часу t_1 канал звільняється від роботи РЕЗ PU в одному з наступних випадків, що позначаються як $C(\cdot)$:

- випадок $C(i)$, коли PU не активний протягом всього інтервалу часу $[t_0:t_1]$;
- випадок $C(j)$, коли PU активний у будь-якому інтервалі часу в період $(t_0:t_1)$, але звільнення каналу, тобто відключення PU відбувається саме в момент часу t_1 .

Тому, при відомому часі зайнятості t_0 , ймовірність того, що канал буде звільнений від роботи PU в момент часу t_1 позначається як $P_{OFF, OFF}([t_0, t_1])$ і визначається як сума ймовірностей несумісних подій, що відповідають $C(i)$ і $C(j)$:

$$P_{OFF, OFF}([t_0, t_1]) = P_{\tau}(C(i)) + P_{\tau}(C(j)), \quad (2.5)$$

де $C(i)$ – подія відсутності роботи PU у часовому інтервалі $[t_0:t_1]$;

$C(j)$ – подія, що PU використовує канал у період $[t_0:t_1]$, але звільняє його у момент t_1 .

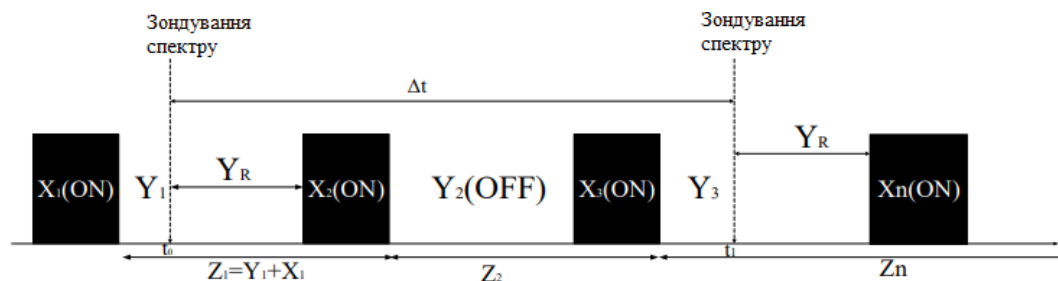


Рисунок 2.4 – Модель циклічності зондування під час використання каналу SU

Сценарій, коли PU не працює в момент часу t_1 , еквівалентний твердженню, що в стані «OFF» час неактивності PU не перевищує час t_1 . Сценарій, коли PU зупиняється в момент часу $[t_0, t_1]$, еквівалентний твердженню, що час зупинки PU

перевищує час t_1 . Нехай тривалість інтервалу часу, протягом якого канал знаходиться у стані «OFF», позначається випадковою величиною Y , канал знаходиться у стані «ON» – величина X , тривалість інтервалу часу зондування каналу – Y_R , а тривалість циклу зондування та використання каналу позначається випадковою величиною Z відповідно до запропонованої схеми на рисунку 2.4.

Загалом, далі використовуються наступні позначення:

t_s – час, коли PU переходить зі стану «ON» у стан «OFF»;

t_{ts} – час підтвердження стану «OFF» для PU;

Z_n – сумарний час тривалості станів «OFF» та «ON»;

Y_n (OFF) – тривалість стану «OFF»;

X_n (ON) – тривалість стану «ON»;

Y_R – час між початком зондування до визначення стану «ON», необхідний для визначення того, що радіостанція SU може використовувати канал;

Δt – різниця в часі на момент початку зондування спектру.

Відповідно до запропонованої схеми на рис. 2.4, в інтервалі часу $[t_0, t_1]$, ймовірність події відсутності роботи PU після завершення чергового циклу зондування і до початку наступного циклу визначається за формулою 2.6:

$$P_\tau(\text{відсутність роботи PU в } [t_0, t_1]) = P_\tau(Y_R \geq t_1 - t_0) = P_\tau(Y_R \geq \Delta t). \quad (2.6)$$

Момент початку зондування, коли канал може бути вимкнений, описується випадковою величиною з функцією щільності відповідно до формули 2.7:

$$f_{Y_R}(\tau) = \frac{1}{E(Y)} P_\tau(Y \geq \tau). \quad (2.7)$$

Таким чином, протягом періоду $[t_0, t_1]$, ймовірність того, що PU не буде виявлено зондуванням i , відповідно, прийом-передача не буде здійснюватися, визначається за формулою 2.8:

$$P_\tau(\text{PU в } [t_0, t_1]) = P_\tau(Y_R \geq \Delta t) = \frac{1}{E(Y)} \int_{\Delta t}^{\infty} P_\tau(Y_R \geq \gamma) d\gamma, \quad (2.8)$$

де γ – інтенсивність заняття i -го каналу.

Далі розглянемо випадок $C(j)$, коли PU використовує канал в інтервалі часу $[t_0, t_1]$ і звільняє його в момент часу t_1 . Нехай випадкова величина S_n відповідає тривалості часу переходу зі стану «OFF» в «ON» з моменту t_0 до моменту виявлення PU під час використання каналу SU [8]. Тоді виконується рівність:

$$S_n = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n, \quad (2.9)$$

де тут Z_n має вигляд $f_Z = f_Y * f_X$, де f_Y та f_X - функції щільності ймовірності випадкових величин, що відповідають часу увімкнення та вимкнення PU.

Слід зазначити, що випадкова величина Z_1 , яка представляє час циклу, має інший розподіл, ніж випадкова величина Z_n , тому ймовірність стану «OFF» повинна бути врахована я при розрахунку f_{Z_1} , в результаті чого Z_1 має щільність розподілу $f_{Z_1} = f_{YR} * f_X$. Оскільки випадкові величини Z_1 і Z_n незалежні одна від одної, щільність розподілу f_{S_n} випадкової величини S_n можна записати як:

$$f_{S_n} = f_{Z_1} * f_Z^{(n-1)}, \quad (2.10)$$

де $f_Z^{(n-1)}$ — $(n-1)$ є кратна функція f_Z .

Імовірність події, що PU використає когнітивний канал мережі зв'язку хоча б один раз у проміжку часу $[t_0; t_1]$, але звільнить до наступного моменту початку зондування, розраховується за наступною формулою:

$$P_\tau([t_0; t_1]) = \sum_{i=1}^{\infty} f_{S_i}(\gamma) P(Y > \Delta t - \gamma) d\gamma. \quad (2.11)$$

Тут індекс вказує на порядковий номер моменту початку роботи PU в інтервалі $[t_0; t_1]$. У цій моделі подія простою каналу також може виникнути, якщо інформація про вимкнений стан не оновлюється вчасно і SU не має інформації про вільний канал. Можливість простою каналу з урахуванням останнього моменту виявлення PU у стані «OFF» визначається за формулою:

$$P_{OFF,OFF}([t_0, t_1]) = \frac{1}{E(Y)} \int_{\Delta t}^{\infty} P_\tau(Y \geq u) du + \sum_{i=1}^{\infty} f_{S_i}(u) P(Y > \Delta t - u) du. \quad (2.12)$$

Значення $P_{OFF,OFF}([t_0, t_1])$ залежить лише від довжини Δt і тому може бути записане як $P_{OFF,OFF}([t_0, t_1])$. Складність, пов'язана з точним обчисленням $f_{S_i} = f_{Z_1} * f_Z$

значно вища через необхідність використання i -кратної. Однак, i -кратну в часовій області можна обчислити (апроксимувати) як i -кратне множення в перетворенні Лапласа f_{Si}^* . У цьому випадку обернене перетворення Лапласа $P_{OFF,OFF}^*(\Delta t)$ записується як:

$$P_{OFF,OFF}^*(S) = \frac{1}{S} - \frac{(1-f_Y^*)(1-f_X^*)}{S^2 E(Y)(1-f_X^* f_Y^*)}, \quad (2.13)$$

де f_X^* та f_Y^* - перетворення Лапласа функцій f_X та f_Y відповідно.

Обернене перетворення Лапласа $P_{OFF,OFF}^*(S)$ після зміни f_X^* і f_Y^* дає шукану ймовірність $P_{OFF,OFF}(\Delta t)$. На рис. 2.5 наведено значення, отримані за допомогою аналітичної моделі, що задає інтервал роботи Δt і різний робочий цикл, показано оціночні значення. Робочий цикл визначається як відсоток часу, протягом якого канал був зайнятий PU [6].

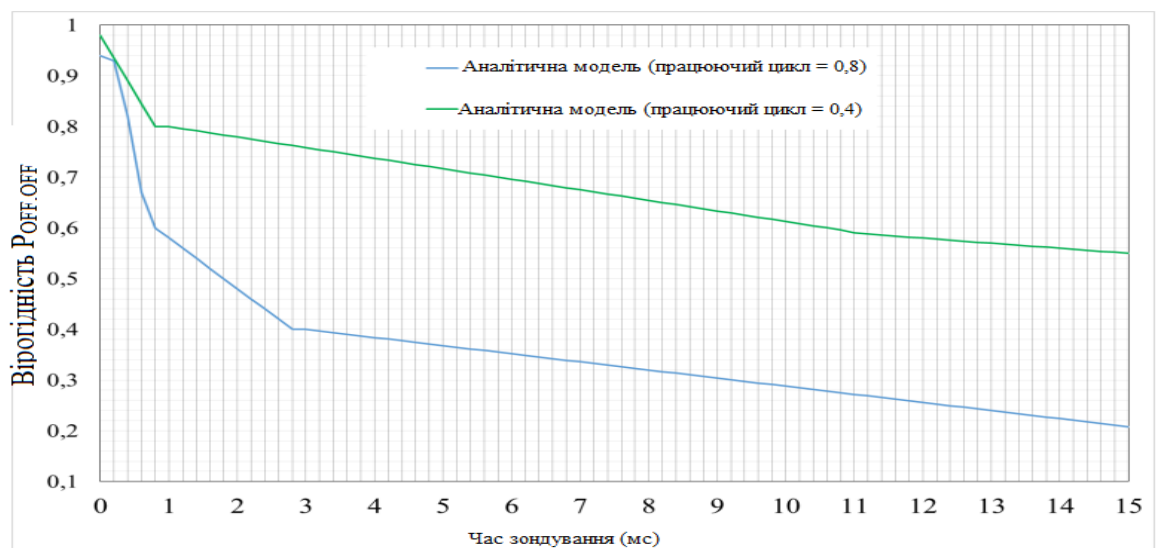


Рисунок 2.5 – Порівняння ймовірностей $P_{OFF,OFF}(\Delta t)$ залежно від тривалості інтервалів між послідовними зондуваннями каналів когнітивної мережі

Застосовуючи розроблену аналітичну модель, можна зменшити час, який витрачається SU на доступ до каналу. Це скорочення досягається за рахунок створення імовірнісної моделі поведінки PU, яка дозволяє заздалегідь ініціювати підготовчі кроки до заняття каналу (наприклад, попереднє конфігурування SDR-пристроїв або завантаження керуючих програм, необхідних на рівні MAC), завдяки чому час ефективного використання каналу з боку SU збільшується.

Визначення ймовірності простою каналу з урахуванням останнього моменту часу, коли було виявлено факт роботи PU, дає можливість спрогнозувати подальшу поведінку PU в наступний момент часу, що дозволяє отримати низький показник вартості доступу до каналу SU. Розроблена оцінка ймовірності $P_{\text{OFF,OFF}}(\Delta t)$ була врахована в імітаційній моделі когнітивної мережі за допомогою мережевого симулятора NS-3. Результати роботи імітаційної моделі наведено на рисунку 2.6.

Як показують результати моделювання, при збільшенні кількості вузлів мережі з 3 до 39 час доступу до одного каналу збільшився з 0,5 с до 1 с. У мережах з низькою пропускнуою здатністю час доступу збільшився лише в два рази, незважаючи на те, що кількість каналів зросла більш ніж у десять разів, що свідчить про ефективність методу. Модель показує момент, коли радіостанція PU звільняє канал, а потім PE3 SU починає процедуру зайняття каналу, тоді як час доступу – це час, коли перше сигнальне повідомлення надходить відповідного вузла, що виступає в ролі базової станції або координатора когнітивної мережі [21]. Отже, з даних на рис. 2.6 можна зробити висновок, що запропонований метод не збільшує час доступу до каналу зі збільшенням кількості вузлів SU на мережі.

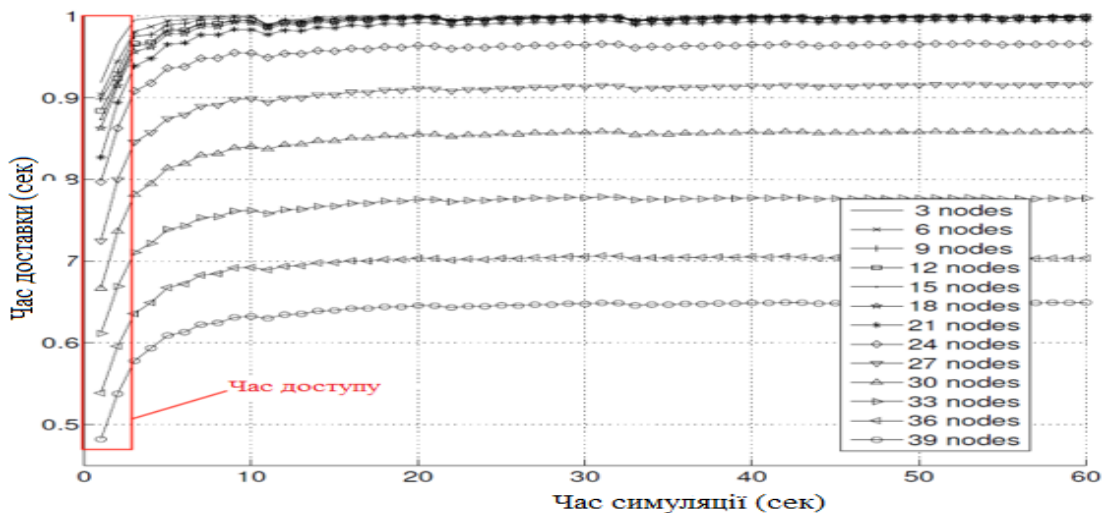


Рисунок 2.6 – Співвідношення часу доступу до каналу та часу доставки пакетів між вузлами когнітивної мережі зв'язку

2.2 Розробка способу використання вільних блоків у кадрі управління доступом до середовища передачі при розподілі каналних ресурсів

Для запобігання перешкод роботі PE3 PU, засоби зв'язку з використанням когнітивних серверів та технології DSA можуть надсилати та отримувати

інформацію лише за умови відсутності явного втручання в роботу РЕЗ PU. Якщо ця умова виконується, немає необхідності жорстко обмежувати потужність передачі для радіопристроїв вторинних користувачів [6].

Припустимо, що кожен вузол радіопристрою SU у вигляді SDR обладнаний одним приймачем і одним радіомодулем для обробки сигналів керування. Приймач працює на програмній платформі і може задавати різні параметри, такі як потужність передачі, частота, тип модуляції, швидкість передачі даних і т.д. Радіоприймачі SU використовують різні частотні канали, що може призвести до проблеми відсутності взаємодії між сусідніми SU. Це створює додаткове навантаження на РЕЗ SU, оскільки вимагає збір та обміну інформацією про стан радіочастотного середовища та досить спеціалізованої маршрутизації. Раніше було запропоновано два підходи до вирішення проблеми КР: перший підхід використовував взаємодію між спеціальними вузлами управління інформацією та РЕЗ SU по окремим каналам, а другий підхід використовував ширококомвні загальні канали управління КР для обміну керуючої інформацією між РЕЗ полягав у використанні спільного каналу управління КР. При цьому доступ до таких каналів мають як вузли управління, так і окремі когнітивні РЕЗ. Аналіз показав, що ширококомвні загальні канали управління є кращим в багатьох схемах реалізації MAC-рівня та маршрутизації між вузлами когнітивного радіозв'язку [8].

Загальний канал управління КР в найбільш складних випадках позасмугової реалізації можуть використовувати низькочастотну смугу РЧС, що може полегшити передачу сигналу на великі відстані, але з меншою швидкістю передачі. Тим не менш, наявність спільного каналу управління усуває проблему взаємодії, яка виникає, коли відповідні РЕЗ SU налаштовані на різні канали.

Далі розглядається загальний канал управління з виділеною радіостанцією управління, що дозволяє вузлам отримувати повідомлення про управління і подальшу маршрутизацію, незважаючи на розбіжності в частотних діапазонах. Крім того, технічно когнітивні РЕЗ повинні надавати інформацію про доступ до спектру через загальний канал управління, реалізуючи схему ретранслятора.

Для підтримки роботи КР пропонується використовувати розширену схему кадрів RTS/CTS на основі протоколу MAC-рівня стандарту IEEE 802.11. Для цього зарезервовану комірку в кадрах RTS/CTS/FC необхідно модифікувати для передачі додаткової інформації, як показано на рисунку 2.7.

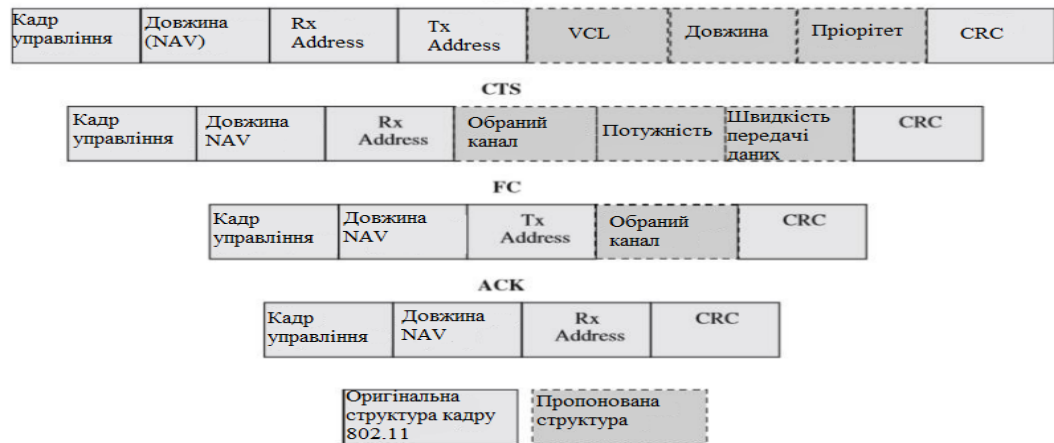


Рисунок 2.7 – Структура кадрів управління 802.11, запропонованих для застосування у каналі управління когнітивних мереж

Кадри запиту надсилається передавачем по каналу управління в широкомовному режимі. У когнітивних мережах пропонується додати до RTS-кадру список вільних каналів, допустиму довжину переданих і прийнятих кадрів та пріоритет трафіку, що передається, які встановлюються прийомо-передавачем (модифікатором RTS). Поле VCL містить список тимчасово невикористовуваних каналів, які можуть бути використані для передачі даних. Це поле заповнюється для того, щоб заздалегідь поінформувати SU про перелік вільних каналів. Крім того, якщо поточний робочий канал передавача вже використовується, це вказується в полі КРС [4].

У полі «Довжина» вказується розмір переданого пакету в байтах, а в полі «Пріоритет» - пріоритет переданого пакету, голосу, даних або відеодзвінка, визначених РЕЗ SU під час передачі цього кадру. Кадр дозволу відправки – надсилається приймачем канал управління після прийому RTS. Пропонується модифікувати поле «Вибраний канал», який має містити ідентифікатор каналу, який повинен використовуватись для подальшої передачі. Пропонується модифікувати поле «Потужність», яке має містити значення потужності, що випромінюється передавачем. Пропонується модифікувати поле «Швидкість передачі даних», яке має містити інформацію про швидкості передачі даних, що підтримується.

Кадр зі списком частот містить дані про зміні частоти виділеного для прийому-передавача SU, і присутній у структурі кадру через зміну частоти після прийому RTS-кадру. Пропонується модифікувати поле «Вибраний канал», який містить ідентифікатор радіоканалу, який використовуватиметься для наступного

етапу передачі даних когнітивним РЕЗ. Кадр підтвердження – кадр відправляється приймачем на канал даних після успішного отримання кадру даних від відправника та не модифікується [9].

Оскільки когнітивні служби можуть використовувати різні стандарти радіозв'язку та безпроводової передачі, слід врахувати, що особливістю стандарту IEEE 802.11af є використання вектора розподілу мережі, який є програмно-реалізованою функцією контролю несучої, і є програмним лічильником часу, необхідного для передачі попереднього кадру, який використовується протоколами безпроводової мережі, такими як IEEE 802.11 та 802.1.

Контроль несучою є функціонал, який обмежує необхідність фізичного контролю, що несе на радіоінтерфейсі з метою економії енергії передавача, що також можна використовувати у КСР. На рисунку 2.8 представлена схема обміну сигнальними повідомленнями між одержувачем та відправником КСР у рамках IEEE 802.11af.

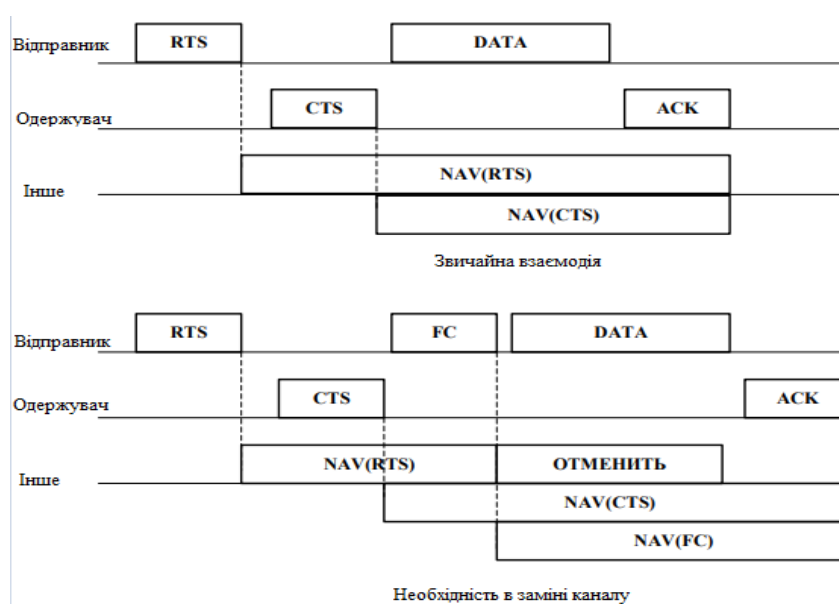


Рисунок 2.8 – Схема обміну сигнальними повідомленнями у штатному стані та при зміні робочих каналів

Тут значення NAV допомагає когнітивній мережі контролювати зайнятість каналу, необхідну для передачі даних. Подана схема передбачає два стани: стан нормальної взаємодії та стан зміни частоти [8]. Стан зміни частоти означає відправлення повідомлення, що містить списком частот FC, який включає, наприклад, запис частот нових несучих, пов'язаних з початком роботи PU. «Інше»

на рисунку 2.8 означає, що повідомлення NAV передаються в обох напрямках, тобто відправнику і одержувачу. Перед початком передачі даних когнітивний РЕЗ перевіряє інформацію про канал і створює список каналів VCL, як показано на рисунку 2.9, що складаються з каналів NAV=0.

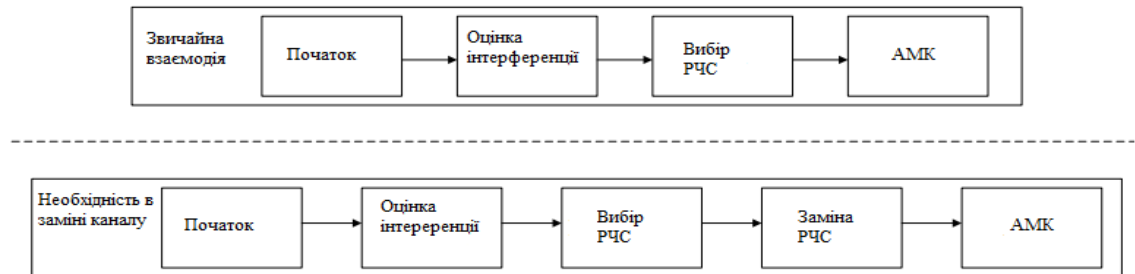


Рисунок 2.9 – Послідовність обміну для створення списку каналів

Потім кадр VCL інкапсулюється в кадр RTS. Всі найближчі вузли (когнітивні РЕЗ) приймають RTS-кадр і зберігають інформацію про широкомовний канал та пов'язаний з ним NAV у кеші каналної інформації. Якщо приймальний вузол успішно приймає RTS-кадр, відбувається відновлення кадру даних та визначається граничне значення сигнал/шум і виконується оцінка інтерференції. Слід використовувати адаптивні схеми модуляції та кодування, оскільки при повторному кодуванні каналу виникають великі затримки.

Метод АМК забезпечує захист інформації за наявності шуму у каналі. Потім когнітивний приймач РЕЗ визначає значення поля NAV кадру CTS з урахуванням затримки під час перемикавання каналу. Потім приймач генерує кадр CTS з обраним каналом необхідної потужності та підтримуваної швидкістю передачі. При отриманні кадру CTS вузол перевіряє поле «Вибраний канал», щоб визначити номер каналу передачі даних. Якщо необхідно виконати перемикавання каналів, передавач надсилає кадр FC у загальний канал управління; кадр містить дані про новий робочий канал. Коли кадр FC отримано, вузол-одержувач оновлює вміст кеш-пам'яті з інформацією про робочий канал, щоб скасувати NAV, згенерований початковим кадром RTC і встановити новий NAV. Після надсилання кадру FC передавач виконує перемикавання поточного каналу і передає кадр даних нового робочого каналу [24].

2.3 Визначення функціональних компонентів архітектури, порядок зондування та ефективності використання РЧС в когнітивних мережах

Загальна структура компонентів функціональної архітектури для розвитку та вдосконалення когнітивних мереж зв'язку та підтримки розроблених методів зменшення часу доступу до каналу передачі зображена на рисунку 2.10. На основі інформації, отриманої за результатами аналізу радіочастотного діапазону фізичного рівня, функціональні компоненти частотно-територіального планування МАС-рівня визначають час зондування SU і час, виділений на передачу. Кожного разу, коли PE3 SU необхідно передати або прийняти дані, доступ до середовища передачі координується функціональним блоком «Доступ до РЧС». PE3 SU використовує блок «Зондування РЧС» для пошуку вільних каналів та підготовки екстреного звільнення зайнятих каналів, створює список каналів-кандидатів [10].

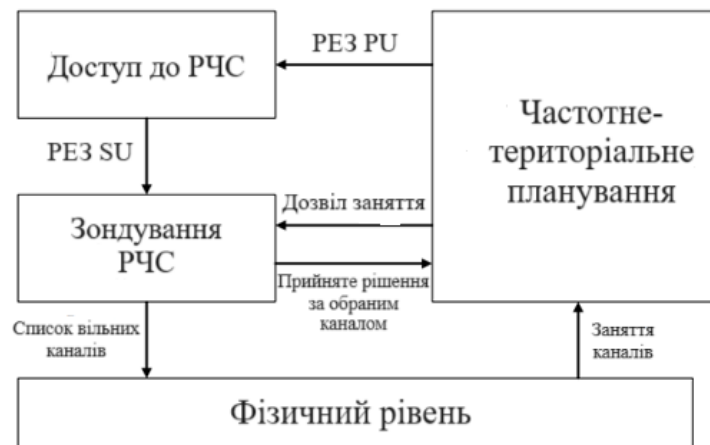


Рисунок 2.10 – Структура взаємодії компонентів функціональної архітектури КМ

Список доступних каналів залежить від чутливості датчика радіочастотного сканування, тому список доступних каналів може відрізнятися на різних радіопристроях SU. Однак, перш ніж розпочати передачу, радіообладнання кожного SU через взаємодію між PE3 SU та базовою станцією (вузлом-координатором) має узгодити обрані канали. Тому необхідна тісна координація між PE3 SU для вибору та доступу до вільних каналів. Така координація може здійснюватися як в централізованій, так в розподіленій архітектурі управління доступом когнітивних мереж зв'язку.

Централізована архітектура управління доступом, включаючи обмін інформацією управління, заснована на використанні базової станції мережі когнітивного зв'язку в якості центру управління, який виконує функції центрального контролера мережі в заданій зоні покриття. Базові станції в мережах когнітивного зв'язку з функцією блоку «Доступ до РЧС» координують і контролюють доступ до мережних ресурсів радіообладнання SU, вказуючи, наприклад, ідентифікатори користувачів та час зайнятості каналів. Як правило, для цього створюється та підтримується база даних геолокації (GLDB). Технічно, підтримувана засобами моніторингу РЧС, GLDB зберігає результати зондування активності РЕЗ PU. Основними недоліками централізованої архітектури управління доступом є додаткові витрати та необхідність у спеціальних технічних рішень для підтримки взаємодії між точками радіодоступу PU та центральним мережним контролером. Крім того, оскільки діяльність РЕЗ PU постійно змінюється, база даних геолокації потребує швидкого оновлення, в тому числі в режимі реального часу.

У децентралізованій (розподіленій) архітектурі управління доступом центральний мережний контролер відсутній. У цьому випадку точки радіодоступу SU повинні постійно обмінюватися інформацією між собою, наприклад, через загальний канал управління, щоб уникнути перешкод для точок радіодоступу PU і отримати доступ до ліцензійної зони РЧС. Тут кожна взаємодіюча РЕЗ SU повинна виконувати зондування РЧС і обмінюватися результатами зондування з сусідніми РЕЗ SU. Крім того, робота всі РЕЗ SU, повинна бути скоординована, щоб уникнути інтерференції між сусідніми РЕЗ SU та уникнути інтерференції з РЕЗ PU. Як наслідок, у випадку розподіленої схеми, кожен РЕЗ SU має підтримувати всю функціональність, показану на рисунку 2.10, тоді як у централізованій архітектурі функції «Частотне територіальне планування» та «Доступ до спектра» в основному підтримуються централізовано. Зокрема, функція «Зондування РЧС», яка виявляє тимчасово вільні канали в межах ліцензійної зони РЧС, є складною для реалізації. Надалі для управління доступом до каналних ресурсів у мережах когнітивного зв'язку буде використовуватися централізована архітектура з урахуванням сучасного стану техніки. У випадку багатосмугового виявлення тимчасово вільних радіоканалів існують різні алгоритми зондування РЧС, а саме:

- широкосмугове (багатосмугове) зондування;
- односмугове зондування РЧС;

– багатоканальне зондування РЧС.

При використанні широкосмугового зондування SU можуть отримувати інформацію про найменш завантажені смуги радіочастот, зменшуючи частоту переходів з однієї смуги радіочастот в іншу. Зондування в межах однієї смуги радіочастот означає, що досліджувана смуга РЧС поділяється на піддіапазони, що не перетинаються, які можуть надавати інформацію про стан сусідніх піддіапазонів, враховуючи розташування території. Якщо піддіапазон не використовується ліцензійним користувачем РЧС PU, то канали, що знаходяться в таких піддіапазонах, можуть бути використані РЕЗ SU [17].

При багатоканальному зондуванні РЕЗ SU може обмінюватися результатами виявлення вільних радіоканалів з відповідним пристроєм та центральним контролером мережі. Якщо кожен SU спектра відстежує певний набір (під)каналів і обмінюється результатами зондування з сусідами, весь радіочастотний діапазон може бути досліджений за короткий час. У мережах когнітивного радіо РЕЗ SU повинні виявляти присутність РЕЗ PU, не створюючи при цьому перешкод, що за своєю суттю є складним завданням. Проблему зондування спектра можна описати класичною бінарною гіпотезою, використовуючи дані:

$$H_0: y=v, \quad (2.14)$$

$$H_1: y=x+v, \quad (2.15)$$

де, $y=[y(1), y(2)\dots y(N)]^T$ – прийнятий сигнал на приймачі РЕЗ SU;

$x=[x(1), x(2)\dots x(N)]^T$ – переданий сигнал РЕЗ PU;

v – адитивний гаусівський шум із нульовим середнім

I – поодинокі матриця;

H_0 і H_1 - вказує на відсутність та присутність РЕЗ PU відповідно.

Зазвичай, щоб вибрати одну із двох гіпотез, порівнюється статистика тесту із заздалегідь визначеним порогом λ . Математично це записується так:

$$T(y) < \lambda \rightarrow H_0, \quad (2.16)$$

$$T(y) \geq \lambda \rightarrow H_1, \quad (2.17)$$

де, $T(y)$ – статистика тесту.

Зондування РЧС має дві функціональні процедури: перша процедура правильно збирає статистику тесту, яка об'єктивно дозволяє зробити висновок чи зайнята зона РЧС та друга функціональна процедура встановлює поріг, який дозволяє розрізнити гіпотези H_0 і H_1 . Розглянемо діаграму на рисунку 2.11, де після широкосмугового зондування виявлені та виділені за певним критерієм частотного діапазону в межах запропонованої послідовності зондування РЧС поділяється на M піддіапазонів з центральною частотою f , що не перетинаються [19].

У цьому випадку вважається, що кожен піддіапазон має однакову ширину. При багатоканальному зондуванні завданням РЕЗ SU є визначення доступних (під)діапазонів і центральних частот, що зондуються. Цей процес сам по собі є складним технічним завданням, оскільки доступні діапазони не обов'язково є безперервними, а активність РЕЗ PU може бути розподілена між цими смугами (наприклад, РЕЗ для безпроводової локальної мережі та телебачення). В рамках цього дослідження розглянуті проблеми вважаються вирішеними.

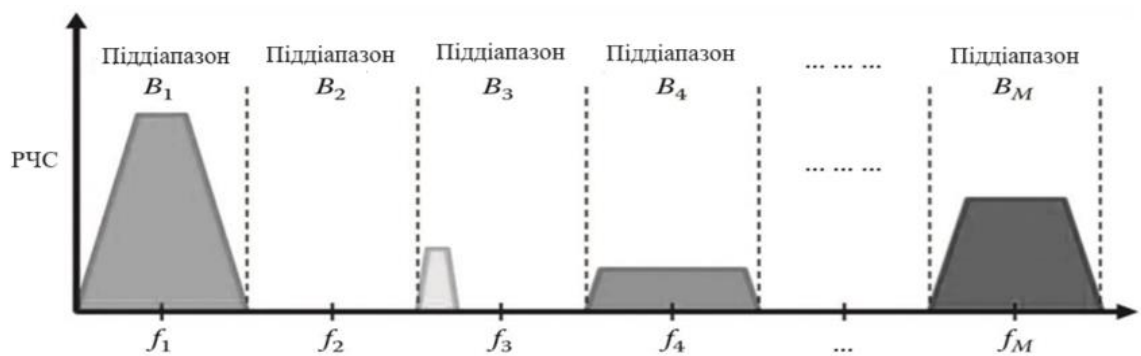


Рисунок 2.11 – Структура заняття смуг частот РЧС з розбиттям на M -піддіапазонів

Крім того, кожен піддіапазон вважається зайнятим/використовуваним, навіть якщо використовується його частина. Наприклад, у стандарті IEEE 802.22 у смузі 54–862 МГц може бути доступним піддіапазон шириною 6 МГц, але не повністю доступний для КРН, оскільки задіяна ділянка шириною 200 кГц [24]. На рисунку 2.11 випромінювання PU займає невелику частину піддіапазону B_3 , тому цей піддіапазон не може бути повністю використований SU.

Ортогональне частотне мультиплексування (OFDM) вважається найбільш відповідним способом мультиплексування для використання на фізичному рівні когнітивної мережі. По суті, це схема багатопозиційної модуляції, яка використовує кілька ортогональних піднесучих для передачі інформації в

широкосмуговому спектрі. Враховуючи амплітуду цих піднесучих, радіосигнал SU можна сформулювати таким чином, щоб він не створював перешкод роботі РЕЗ PU. Наприклад, на рисунку 2.11 показано, що при використанні OFDM РЕЗ SU може придушувати піднесучі f_1 , f_3 і f_4 , щоб уникнути перешкод для користувачів, які їх займають. Припускаючи, що піднесучі є незалежними, проблема широкосмугового зондування зводиться до бінарної гіпотези. Математично це можна виразити наступним чином:

$$H_{0,m} : y_m = v_m, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (2.18)$$

$$H_{1,m} : y_m = x_m + v_m, \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (2.19)$$

де окремий піддіапазон позначений індексом m .

Як результат, етап широкосмугового зондування швидко здійснює пошук доступних частотних смуг у широкій смузі пропускання, тоді як етап багатоканального зондування виконується пошук за конкретних піддіапазонів-кандидатів для прийому-передачі інформації у вибраній смузі частот.

Етап широкосмугового зондування ґрунтується на принципі енергозбереження в пристроях зондування за рахунок недеталізованого аналізу РЧС [17]. Якщо зібрана статистика каналів зондування перевищує заздалегідь визначений поріг зайнятості, то виявлена смуга вважається недоступною і етап широкосмугового зондування продовжується. В іншому випадку виконується багатоканальне зондування. Оскільки ліцензовані канали можуть використовуватися радіостанціями PU з перервами, деякі з цих каналів можуть використовуватися більше, ніж інші, оскільки РЕЗ SU можуть зондувати і використовувати обмежену кількість ліцензованих каналів, ймовірність доступу до ліцензованого каналу є високою, тому РЕЗ SU повинні обрати ліцензовані канали, які рідше використовуються РЕЗ PU. РЕЗ SU можуть оновлювати статистику використання ліцензованих каналів у некооперативний або кооперативний спосіб.

Через технічні обмеження кількості параметрів приймача або програмних налаштувань в РЕЗ SU, вирішувати задачу моніторингу всіх доступних для зондування смуг радіочастот в рамках даного дослідження недоцільно. Більш ефективною, з точки зору використання мережних ресурсів, є політика вибору РЧС зондування, адаптована до потреб мережі когнітивного зв'язку. Оскільки когнітивні комунікаційні мережі в основному використовують передачу даних для Інтернету

речей, міжмашинної взаємодії та сенсорних мереж, бажано розробити методику визначення ефективності використання обраних радіочастотних ділянок. Для вибору оптимальної ділянки РЧС для передачі даних з урахуванням обмежень приймача, пропонується використовувати функцію зондування C_i^{op} , що представляє собою збалансовану оцінку очікуваної пропускну здатності i -ї діапазону, яка може бути використана користувачем когнітивної мережі для оцінки ефективності обраного каналу. Для того, щоб відобразити динамічний характер розподілу радіочастотного діапазону, функція C_i^{op} також враховує спектральну ефективність та ймовірність незайнятих станів. Функція C_i^{op} визначається наступним чином:

$$C_i^{op} = \eta_i p_i W_i P_{OFF,i}, \quad (2.20)$$

де η_i – коефіцієнт чутливості приймально-передавача;

W_i – пропускна спроможність радіоканалу когнітивної мережі;

$P_{OFF,i}$ – ймовірність переходу i -каналу РЧС у стан OFF;

p_i – спектральна ефективність i -ї смуги спектру (біт/сек/Гц) залежно від схем модуляції та каналного кодування;

$p_i W_i$ – швидкість передачі, яку можна підтримувати в i -ї смуги РЧС.

Запропонована методика використання функції зондування включає наступні кроки.

- 1) Отримання даних РЕЗ SU від блоку «Вибір РЧС» у частині p_i .
- 2) Отримання даних РЕЗ SU від блоку «Зондування РЧС» у частині $P_{OFF,i}$.
- 3) Отримання даних від блоку «Частотно-територіальне планування» W_i .
- 4) Використання власних даних РЕЗ про η_i .
- 5) Визначення значення виваженої оцінки за допомогою функції.
- 6) Прийняття рішення про вибір каналу i -ї смугі РЧС, якщо оцінка за п. 5 має значення, необхідне для послуги зв'язку, що надається відповідними РЕЗ.
- 7) Якщо в результаті прийняття рішення за п. 6 вагова оцінка обраного каналу не відповідає необхідному значенню, то здійснюється перехід до наступного за списком каналу.
- 8) Якщо за результатами рішення у п. 7 список каналів вичерпано, то з бази даних геолокації запитується новий список каналів або здійснюється перехід на

нову смугу частот з урахуванням інформації з блоку «Частотно-територіальне планування» та «Вибір РЧС».

За підсумками дослідження можна зробити висновок, що широкосмугове зондування дозволяє охопити широкий спектр радіочастотних каналів і скоротити час, що виділяється на зондування спектру. Однак, слід враховувати пропорційне збільшення обчислювального навантаження та енергоспоживання PE3 SU для випадку автономне зондування. Тому на практиці використання послідовного зондування залежить від ступеня актуальності інформації з бази геолокаційної даних GLDB та частоти її оновлення.

3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ З ВИКОРИСТАННЯМ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ПРИ РОЗПОДІЛІ РЕСУРСІВ У КОГНІТИВНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ

3.1 Розробка загального алгоритму вибору робочого та резервного каналів когнітивної мережі зв'язку

Для того, щоб реалізувати схеми доступу до каналів, ми розглядаємо переважно вибір централізованої архітектури та архітектури управління доступом, необхідно визначити відповідний алгоритм вибору каналу. Вибір та використання каналів в архітектурі когнітивних РЕЗ з функціоналом SDR, а також використання єдиного вузла управління та загального каналу управління в архітектурі доступу. Розроблений алгоритм показано на рисунку 3.1, блок фізичного увімкнення РЕЗ тут не вказано, після увімкнення SU працює лише через спільний канал управління [6].

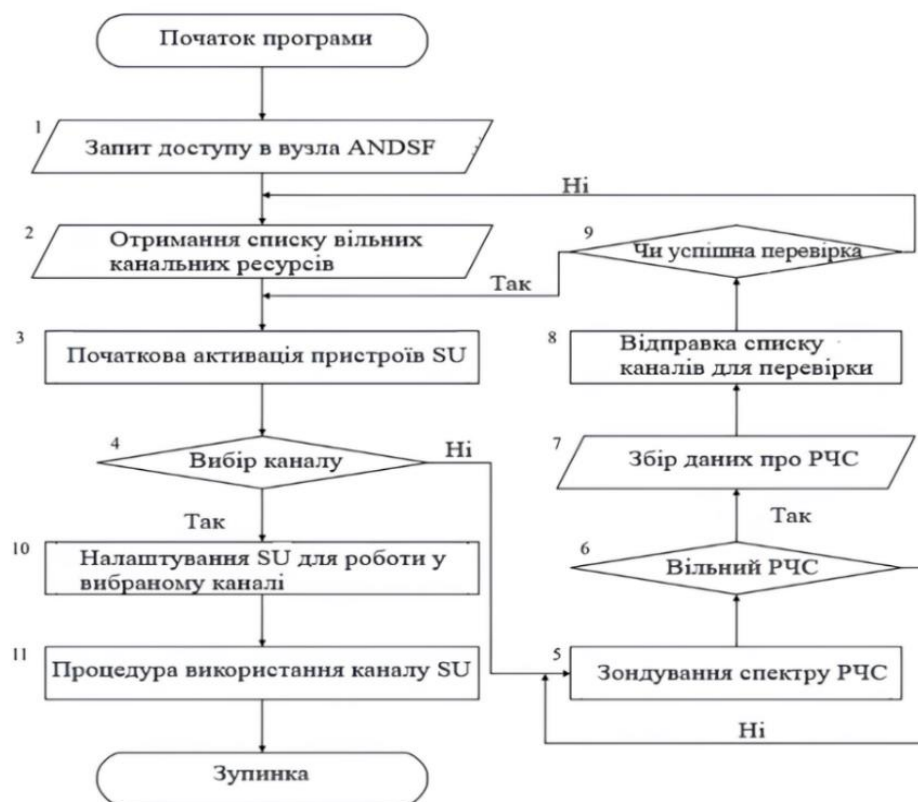


Рисунок 3.1 – Узагальнений алгоритм доступу SU до РЧС

У блоці 1 по загальному каналу управління від базової станції до вузла управління надсилається запит на активацію, тобто пристрій отримує дозвіл на використання сервісу когнітивного радіо. Перелік доступних технологій і

мережних пріоритетів визначається в архітектурі мережі мобільного радіозв'язку згідно рекомендаціями партнерства 3GPP починаючи з версії 15 ANDSF.

У блоці 2 вузол ANDSF отримує запит від SU на отримання списку доступних каналів мережі. ANDSF визначає геодані SU, генерує список доступних каналів з урахуванням розташування PU, параметрів доступу та доступного QoS, а в блоці 3 пристрій SU отримує та обробляє список каналів та ініціює процедуру запуску, щоб розпочати роботу на обраному каналі. Якщо список доступних каналів містить відповідні канали за параметрами пропускної здатності або затримки, виконується процедура у блоці 4 для визначення робочого каналу SU, якщо параметри знайденого каналу відповідають режиму роботи SU, то після вибору робочого каналу процедура переходить до блоку 10. Якщо канали в списку не відповідають вимогам для надання послуг зв'язку, алгоритм переходить до блоку 5, де виконується процедура зондування спектру [6].

У блоці 6 пристрій очікує необхідний вільний канал, і цей крок виконується до тих пір, поки не буде знайдено канал для SU. У блоці 7 відбувається збір даних радіочастотного спектру, а в блоці 8 пристрій SU надсилає інформацію про вільні канали вузлу ANDSF для перевірки та для оновлення бази даних GLDB. У блоці 9 проводиться процедура, яка дозволяє ANDSF схвалити або відхилити канал або канали. Якщо канал або список каналів не пройшов перевірку і жоден з виявлених каналів не дозволений для використання в КМЗ, SU повторно запитує список вільних каналів у блоці 2 і переходить до блоку 3. Якщо перевірка ANDSF успішна, SU відразу переходить до блоку 3 і активує пристрій з оновленим списком каналів, в блоці 4 пристрій вибирає потрібний канал зі знайдених і переходить до блоку 10.

У блоці 10 виконується остаточне налаштування SU для роботи на обраному каналі, а в блоці 11 починається практичне застосування робочого каналу. Після завершення алгоритму доступу до каналу ініціюється сесія прийому-передачі інформації в когнітивній мережі, яка забезпечує циклічне зондування радіочастотного сигналу, і при виявленні початку роботи PU виконується перемикання робочого і резервного каналів для SU. Для підвищення ефективності перемикання пропонується, щоб процес моніторингу та перемикання підтримувався переважно базовою станцією когнітивної мережі, яка також отримує оновлену інформацію про вільні канали від ANDSF. Базова станція в системі функціональних компонентів КМЗ виконує функцію контролю доступу до РЧС шляхом формування та оновлення списку доступних каналів когнітивної мережі.

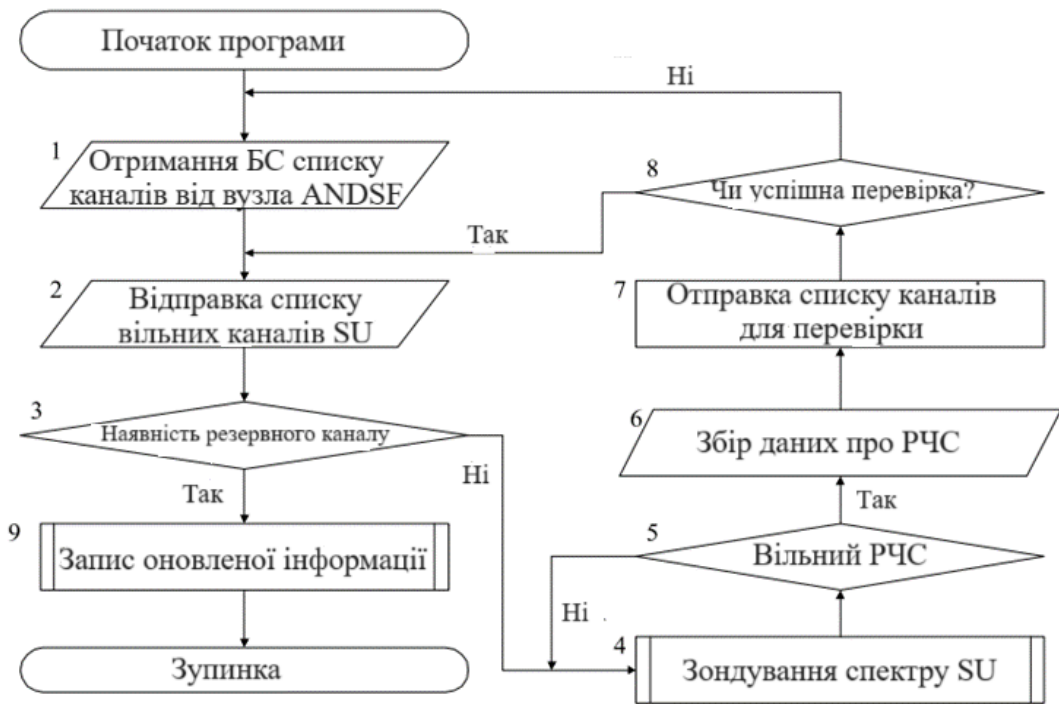


Рисунок 3.2 – Узагальнений алгоритм пошуку резервних каналів для SU

Базові станції когнітивної мережі працюють як вузли доступу з підтримкою функції радіомоніторингу (рис.3.2): після отримання списку каналів від ANDSF базова станція перевіряє отриманий список вільних каналів і оновлює за будь-якими додатковими даними, а номери знову доданих каналів передаються по контрольному каналу для прийому ANDSF. Таким чином виконується одне з найважливіших когнітивних завдань БС - підтримка списку вільних радіоканалів в актуальному стані і, за необхідності, інформувати SU про вимогу звільнити займаний канал у зв'язку з початком роботи в зоні дії базової станції пристрою [24].

У блоках 4 та 5 відбувається зондування та визначення вільних радіоканалів, в блоці 6 – збір та формування даних у вигляді списку каналів, після чого блоці 7 сформований список доступних каналів передається на вузол ANDSF для перевірки каналом управління. Якщо верифікація ANDSF з урахуванням даних радіомоніторингу спеціальними засобами успішна, то перевірений список передається на пристрій РЕЗ, після чого виконується процедура оновлення списку резервних каналів у блоках 2 і 3, в блоці 9 відбувається запис інформації про резервному каналі для застосування SU [6].

Після завершення алгоритму (рис.3.2) БС в когнітивній мережі оновлює список резервних каналів та повідомляє список нових каналів SU через канал управління. Базова станція також визначає, чи потрібне перемикання каналів на

один із резервних каналів для всіх SU або ні. Якщо для певних РЕЗ потрібне перемикання каналів, то SU отримує кадр, що містить інформацією про зміну/перемикання робочого каналу. Слід зазначити, що БС в когнітивних мережах практично можуть бути реалізовані як комплекс апаратних і програмних засобів, що підтримують, наприклад, стандарт IEEE 802.22.

Якщо потрібно змінити канал для всіх радіопристроїв контрольованих БС, базова станція надсилає запит на зміну каналів усім SU. Якщо резервний канал доступний, про це повідомляється SU і запускається таймер для зворотного відліку часу перемикання [16]. Після закінчення таймера розпочинається робота резервного каналу. Якщо SU використовує канал який може бути найближчим часом зайнятий PU, то SU, в тому числі використовуючи зондування, починає активізувати та/або оновлювати список резервних каналів. Після того, як список резервних каналів перевірено та активовано, застосовується алгоритм, представлений на рисунку 3.3.

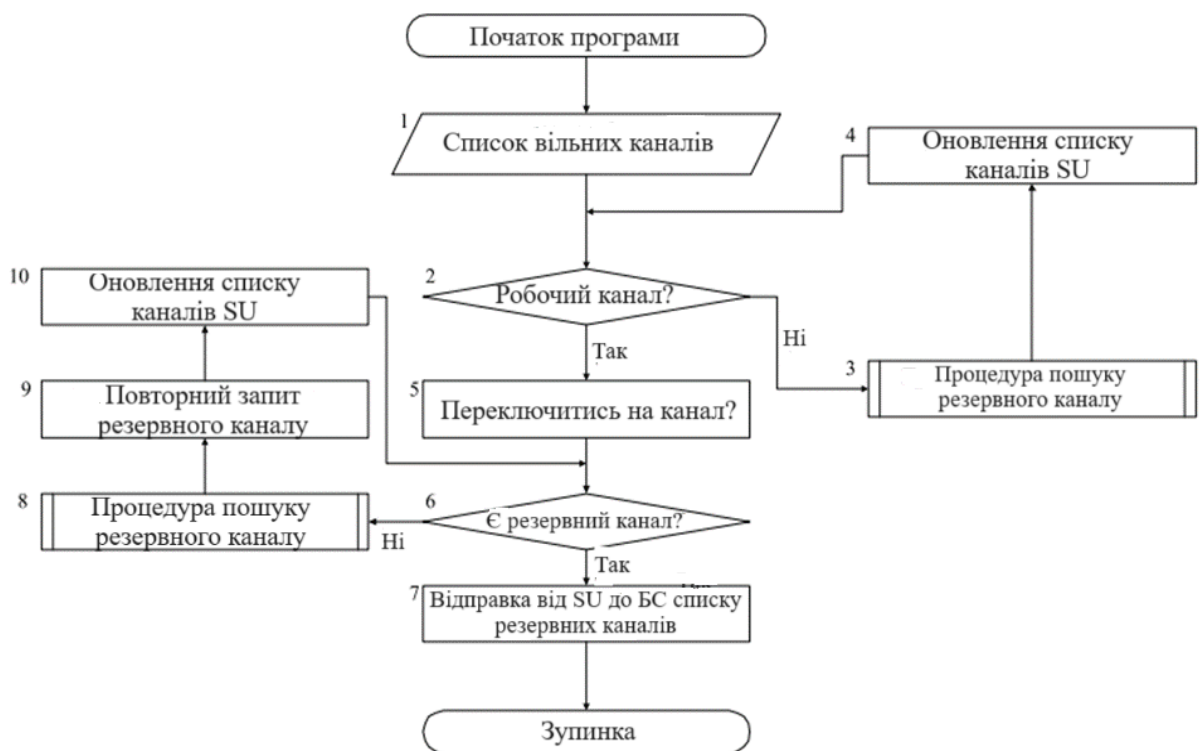


Рисунок 3.3 – Алгоритм перемикання робочих та резервних каналів РЕЗ SU

У блоці 1 резервний канал надається SU у вигляді списку з ідентифікаторами каналів. Якщо список у бік SU не надійшов, то буде активовано таймер часу очікування списку резервних каналів, який також визначає час завершення

процедури чергового зондування. Блок 2 перевіряє наявність резервних каналів, які можуть бути використані як робочі, оскільки підходять за своїми характеристиками для надання послуг за допомогою радіобладнання SU, якщо на роль резервних робочих каналів немає, слід перехід до блоку 3. У блоці 3 функціонує алгоритм завершення процедури пошуку резервного каналу, список каналів оновлено, як зазначено у блоці 4. Далі, в блоці 5 відбувається перемикання на резервний канал.

Блок 6 - відбувається повторна перевірка наявності списку резервних каналів, оскільки в кожен поточний момент часу РЕЗ SU повинен мати актуальний список резервних каналів. Якщо поточний час список порожній, відбувається перехід до блоку 8, де повторно проводиться процедура пошуку резервного каналу (каналів).

Блок 9 включає запит кореспондуючим SU по загальному каналу управління під контролем базової станції про зайняті канали. Оновлення списку каналів з урахуванням даних кореспондуючих вузлів здійснюється у межах блоку 10. Далі знову здійснюється повернення до блоку 6, список резервних каналів заповнений, SU відправляє знайдений список базової станції у блоці 7. Далі заняття резервних каналів, відбувається за сформованим списком, який доступний за запитом до БС.

Базова станція може надіслати у відповідь на запит про виділення резервного каналу для перемикання відповіді у вигляді «так»/«ні». Якщо таймер очікування часу відповіді БС минув, тоді SU вирішує зайняти резервний канал зі свого списку резервних каналів. Після заняття резервного каналу, SU відправляє підтвердження успішного перемикання та номер зайнятого резервного каналу на БС [14].

Запропонований алгоритм адаптується як для централізованого, так і для децентралізованого способу отримання інформації про доступні мережі з різними технологіями радіодоступу RAN. Допущенням вхідних даних алгоритму є фіксована кількість радіопристроїв вторинного користувача та мереж RAN.

3.2 Розробка алгоритмів зондування та послідовностей доступу користувача до мережі когнітивної комунікацій

Одним з найважливіших компонентів мережі зв'язку при взаємодії з радіоприроями вторинного користувача є когнітивний контролер, який полегшує доступ до виділених каналів. Когнітивний контролер фізично розглядається як програмно-апаратний пристрій, який виконує функції зондування радіочастотного

спектру, а також може частково підтримувати функції управління доступом до РЧС і частотно-територіального планування.

Щоб скоротити час доступу до каналу, РЕЗ SU повинен використовувати інформацію про декілька доступних смуг РЧС з різними характеристиками. Ця інформація може надаватися централізовано за алгоритмами, описаними в розділі 3.1, але власне формування, оновлення та аналіз інформації про доступні канали щодо характеристик та оцінок параметрів виконується когнітивним контролером в рамках загального алгоритму, наведеного на рисунку 3.4 [6].

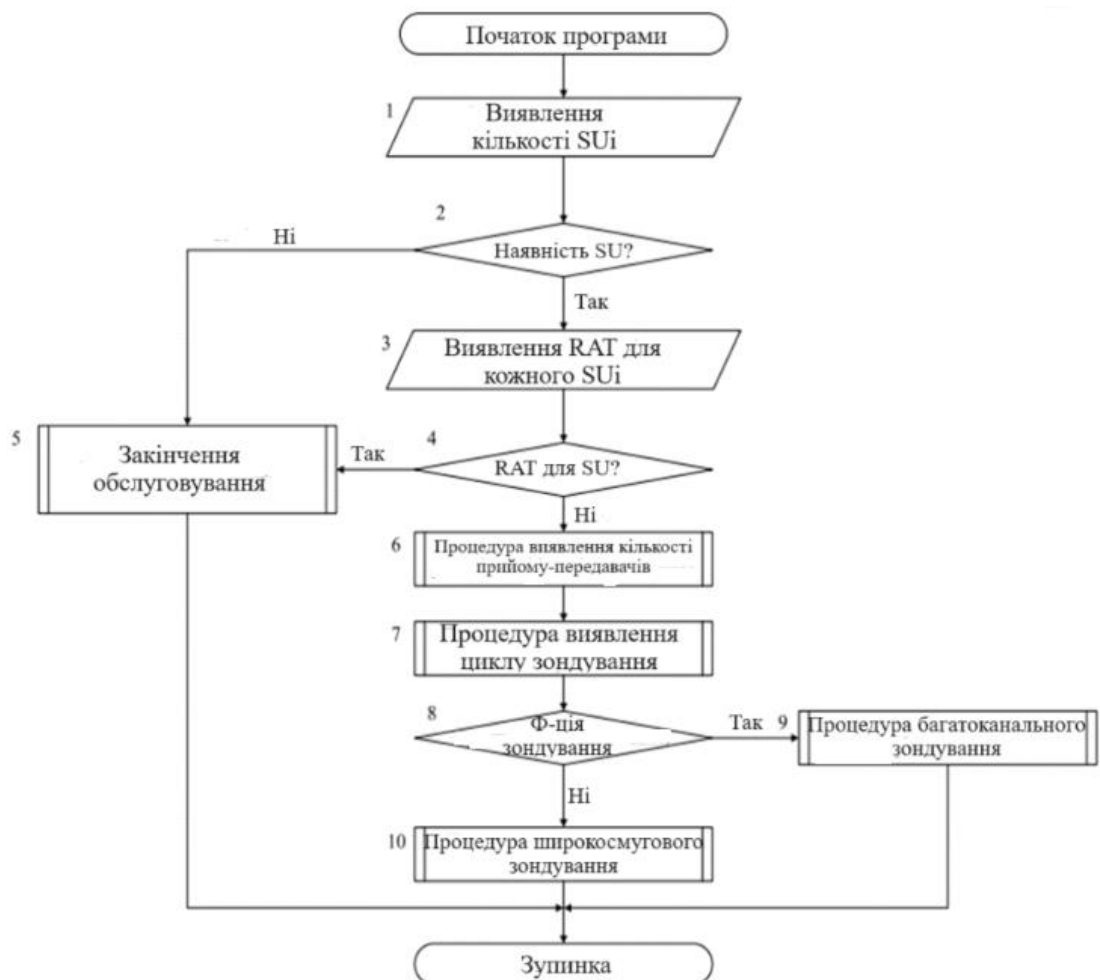


Рисунок 3.4 – Алгоритм визначення РЕЗ SU та зондування середовища передачі

У блоці 1 алгоритму когнітивний контролер загального каналу управління або окремих каналів ініціалізує процедуру виявлення радіообладнання SU в зоні контролю. У блоці 2 за результатами опитування або моніторингу загальним каналом управління або окремими каналами визначається кількість РЕЗ SU, якщо

в зоні контролю немає активних РЕЗ SU, відбувається перехід до блоку 5 для завершення роботи алгоритму, а потім до фінального блоку. На практиці аналізований алгоритм запускається циклічно через певні проміжки часу.

У блоці 4 когнітивний контролер використовує дані частотного територіального планування та інформацію GDLB для визначення наявності або відсутності мереж та радіотехнологій доступу RAT, в тому числі наявності неліцензійних ділянок РЧС, у місці розташування РЕЗ SU. Якщо не виявлено жодної прийнятої технології радіодоступу, алгоритм переходить до блоку 5.

У блоці 6 визначається кількість передавачів та приймачів у зоні контролю з метою встановлення циклу зондування з урахуванням використання можливостей РЕЗ SU щодо виявлення робочих та резервних каналів за алгоритмами, описаними у розділі 3.1.

У блоці 7 визначається тривалість циклу зондування РЧС у зоні контролю з урахуванням кількості приймачів-передавачів у складі РЕЗ SU та з урахуванням результатів розділу 2.1. Якщо необхідно використовувати всі доступні діапазони РЧС, то у блоці 7 алгоритму (рис. 3.4) визначається кількість приемо-передавачів:

$$\sum_{i \in A} \frac{t_{(s,i)}^*}{T_i^* + t_{(s,i)}^*}, \quad (3.1)$$

де A – множина всіх доступних радіочастотних діапазонів;

S – кількість приймально-передавальних пристроїв SU;

$t_{(s,i)}^*$ – час спостереження за смугою спектра i ;

T_i^* – оптимальний час передачі через смугу спектру i .

У блоці 8 ініціюється загальна функція загального зондування. Оскільки ця функція враховує, що кожен діапазон, піддіапазон та смуга радіочастот має різні цикли зондування $T_i^* + t_{(s,i)}^*$ для використання в когнітивній мережі, блок 8 отримує на вхід результати процедури визначення циклу зондування відповідно до діапазону РЧС, обраного в блоці 7 [6]. Це допомагає визначити, в якій ситуації використовувати той чи інший сценарій зондування, наприклад, переключитися на широкосмугове зондування в блоці 10 або на багатоканальне зондування в блоці 9.

Після завершення роботи алгоритму на рисунку 3.5 та отримання списку доступних вільних каналів, РЕЗ SU починає роботу з отримання інформації від когнітивної мережі зв'язку. Тут необхідно швидко визначити приблизний час

зайнятості обраного для прийому каналу для та передати цю інформацію по загальному каналу управління за алгоритмом, наведеним на рисунку 3.5. Розглянемо алгоритм роботи методики передачі інформації про доступні канали.



Рисунок 3.5 – Розроблений алгоритм передачі даних про тривалість заняття вільного каналу когнітивної мережі

У блоці 1 радіопристрій вторинного користувача отримує та обробляє («прослуховує») кадри в каналі управління на наявність ширококомовних кадрів RTS. У блоці 2, після отримання ширококомовного кадру, PE3 SU зчитує та обробляє значення поля «Тривалість» кадру RTS. У блоці 3 PE3 SU зчитує значення поля NAV, значення NAV задається користувачем SU з посиланням на поле «Тривалість». Поле NAV є індикатором можливості зайняття вільного каналу для радіообладнання SU. Якщо значення NAV ненульове, це означає, що поточний канал зайнятий ліцензованим користувачем і алгоритм прослуховування каналу управління повторюється з урахуванням часу закінчення таймера очікування вільного каналу, якщо значення NAV дорівнює нулю, визначається вільний канал і використовується для прийому та передачі даних [14].

У блоці 4 PE3 SU обчислює час, необхідний для передачі інформації на основі швидкості передачі даних та довжини кадру. У блоці 5 розрахований час передачі інформації додається до поля «Тривалість» заголовка кадру IEEE 802.11 для передачі по каналу управління. У блоці 6 йде зайняття робочого каналу. Якщо PE3 SU необхідно збалансувати розподіл ресурсів у реальному часі між користувачами та вимогами QoS, управління мережними ресурсами з боку ANDSF та БС буде періодично перевіряти поточне використання пропускну здатності близькому до реального часу та забезпечення доступної якості обслуговування.

Для того, щоб вирішити проблему нестачі мережного ресурсу для вимогливих користувачів, доцільно вибірково зменшувати доступну швидкість для існуючих користувачів за допомогою ANDSF та БС. При цьому, щоб уникнути різкого погіршення якості радіодоступу SU реального часу, бажано знижувати швидкісні параметри користувачів на один умовний рівень нижче, ніж відбулося різке погіршення якості зв'язку у вигляді доступної швидкості передачі, наприклад, трохи більше 10 Кбіт/с. При організації доступу необхідно розробити універсальну схему програмного інтерфейсу для взаємодії радіообладнання вторинного користувача з можливостями SDR з когнітивною мережею зв'язку. Цей інтерфейс дозволяє конфігурувати SDR для виконання певного набору завдань в заданих межах [23].

Інформація про конфігурацію радіосистеми між платформами передається у форматі розширюваної мови гіпертекстової розмітки (XML). Цей формат має багато переваг, оскільки є загальноприйнятим універсальним стандартом для опису даних, структури та конфігурації різних об'єктів. Зокрема, XML-записи мають простий формат і відповідають потребам поставленого завдання. Крім того, XML є відкритим і гнучким стандартом, розробленим консорціумом W3C, що дозволяє описувати функціональність когнітивної мережі незалежно від специфікацій технічної реалізації, включаючи нові та перспективні платформи для когнітивних мереж. Стандарт дозволяє структурувати інформацію для імпортування та експортування на будь-яку мову програмування, що використовується для опису конфігурації SDR та у форматі, що сприймається SDR [16].

4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ТА АЛГОРИТМІВ РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ КАНАЛУ В КОГНІТИВНИХ МЕРЕЖ ЗВ'ЯЗКУ

4.1 Визначення параметрів та умов моделі вибору каналу для когнітивних мереж

При моделюванні обмежувальним параметром моделі є забезпечення захисту радіообладнання PU від перешкод, спричинених операціями прийому-передачі, що виконуються РЕЗ SU. Також необхідно забезпечити рівень допустимої інтерференції, яка може виникати як між обладнаннями первинних та вторинних користувачів. Всі результати, представлені в цьому розділі, є середнім значенням 106 ітерацій імітаційної моделі.

Моделювання в основному досліджує алгоритми (рис. 3.2) для більш ефективного використання виділених каналних ресурсів. Іншим питанням, яке вивчається в ході моделювання є використання підходів на основі радіолокаційного зондування для виявлення активності РЕЗ PU та перешкодостійкості сусідніх РЕЗ SU, враховуючи можливості використання бази даних геолокації та отримання перелік доступних каналів. Далі розглядається імітаційна модель когнітивної мережі зв'язку для оцінки доступу та використання мережних ресурсів з використанням «білих плям» телевізійного РЧС в рамках стандарту IEEE 802.22. Параметри імітаційної моделі наведено в таблиці 4.1 [6].

Таблиця 4.1 – Параметри імітаційного моделювання

Системні параметри для моделювання КМ	Значення
Кількість доступних каналів	10-20
Кількість РЕЗ SU	10-50
Поріг прийому-передачі файлу РЕЗ SU (мс)	1000
Розмір файлу (bits, біт)	1000000
Тривалість періодів «ON/OFF» для РЕЗ PU (мс)	100,200,300,...1000
Затримка під час перемикання на інший канал (мс)	10

У цій моделі використовується геолокаційна база даних, коли всі базові вузли підключені до центрального координаційного контролера, який відповідає за підтримку інформації про канали та вторинних користувачів. На основі

місцезнаходження РЕЗ здійснюється пошук каналів, на яких немає активності РЕЗ PU. Когнітивний контролер, який виконує функцію координаційного вузла (базової станції) надає РЕЗ SU інформацію про тимчасово доступні канали [11].

Точність визначення місцезнаходження на основі географічних координат є важливим фактором, оскільки вузол-координатор надає канали, які доступні тільки в певній географічній зоні. Як показано в таблиці 4.2, залежно від обраного типу модуляції, існує теоретична оцінка представлення швидкості, яку отримує користувач.

Таблиця 4.2 – Швидкість передачі в каналі і модуляція, що вибирається

Умовне позначення	Модуляція	Вхідне кодування	Вихідне кодування	Швидкість передачі (Мбіт/с)	Спектральна ефективність (біт/с/Гц)
0000(0)	QPSK	1/2	(245,255,5)	4,75	0,79
0001(1)	QPSK	2/3	(245,255,5)	6,33	1,05
0010(2)	16QAM	1/2	(245,255,5)	9,49	1,58
0011(3)	16QAM	7/12	(245,255,5)	11,08	1,85
0100 (4)	16QAM	2/3	(245,255,5)	12,66	2,11
0101(5)	64QAM	1/2	(245,255,5)	14,24	2,37
0110(6)	64QAM	7/12	(245,255,5)	16,62	2,77
0111(7)	64QAM	2/3	(245,255,5)	18,99	3,16
1000(8)	64QAM	3/4	(245,255,5)	21,36	3,56
1001(9)	64QAM	5/6	(245,255,5)	23,74	3,96

У розробленій моделі на одній території співіснують умовна мережа (група) радіообладнання PU та SU у складі когнітивної мережі, як показано на рис. 4.1 [6].

При моделюванні враховується поведінка РЕЗ PU при прийомі передач РЕЗ SU, що необхідно для забезпечення відповідності результатів моделювання реальній поведінці механізму когнітивної мережі. Як тільки РЕЗ PU займає канал, який раніше використовувався РЕЗ SU, центральний когнітивний контролер надає РЕЗ SU список вільних каналів. Сам центральний когнітивний контролер періодично запитує оновлені дані про місцезнаходження РЕЗ PU з геолокаційної бази даних. Крім того, використовуються наступні умови та припущення при моделюванні.

1) Не враховується вплив помилки зондування РЧС на вибір каналу, так як використовується заздалегідь створена модель ліцензійних каналів та вільні канали зумовлені та занесені до геолокаційної бази даних.

2) Після того, як радіопристрій SU займає канал, обов'язково починається процес прийому-передачі інформації. Ці умови вводяться для того, щоб виключити з дослідження імовірнісні оцінки несправності та відмов.

3) Розподіл РЧС між SU та PU здійснюється за принципом перекриття, в рамках створення певної поведінкової техніки PU, максимально наближених до поведінки реальних користувачів мережі. Таким чином, під час моделювання відбувається накладення мережі доступу з SU на PU, що гарантує більш реалістичні результати.

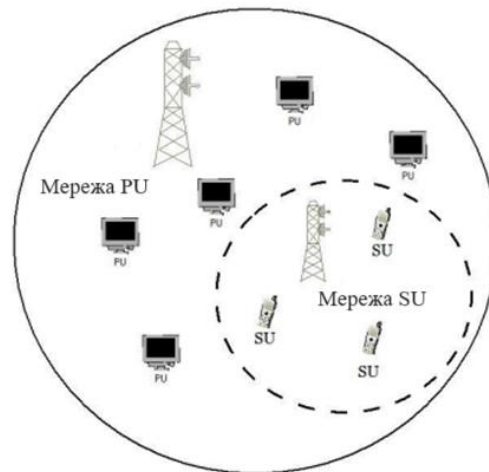


Рисунок 4.1 – Схема загального виду КМ малої ємності для моделювання

Імітаційна модель включає два важливих типи подій, які відбуваються в розробленій системі та описані в розділах 2 та 3.

- 1) Подія зондування радіочастотного спектру.
- 2) Подія вибору режиму спільного використання РРС

Метою даного дослідження є оцінка того, наскільки можна зменшити час доступу до каналу за рахунок модифікації алгоритму зондування та застосування методу спільного використання РЧС, шляхом багаторазової обробки та зміни параметрів, розглянутих вище подій.

Нехай t_s та t_m - це таймера, які обмежують час для моделювання подій зондування та режим спільного використання РЧС. Враховуючи дослідження,

проведені в розділах 2 та 3, схема заняття каналу для моделювання представлена на рисунку 4.2.

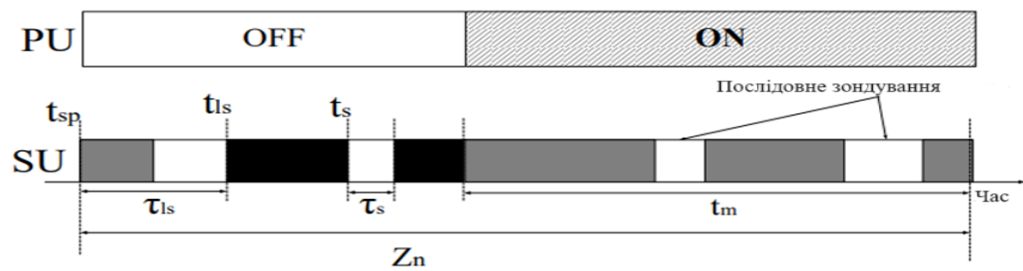


Рисунок 4.2 – Заняття каналу PU та SU при моделюванні

Спочатку останнє значення часу зондування t_{is} та останнє значення часу перемикавання каналів t_{sp} встановлюються на $-\infty$, таймер t_s встановлюється на нуль, а таймер режиму спільного використання спектру t_m встановлюється на $+\infty$. Якщо поточний час моделі дорівнює t_s , відбувається подія радіочастотного зондування, а також SU обирає канал за тривалість τ_s . Якщо канал вже був переключений PU під час події зондування, то SU оновлює значення t_{sp} на час перемикавання каналу, виявлений SU [6].

В іншому випадку, якщо результат вимірювання каналу відрізняється від попереднього результату, когнітивний контролер самостійно надає нове значення t_{sp} . Після цього потужність передавача визначається на основі стану каналу. Якщо канал неактивний, SU передає та приймає інформацію згідно з оптимальним рішенням протягом тривалості τ_t^* , його значення ймовірності розраховується за формулою 2.2. І навпаки, якщо канал зайнятий PU, радіообладнання SU звільняє канал. Після цього PEЗ SU також оновлює таймери t_s та t_m .

Вказана процедура описана за допомогою псевдокоду (рис. 4.3), де подія вибору режиму розподілу спектру спрацьовує, коли час дорівнює t_m . Як вже зазначалося, є два важливі типи подій, що відбуваються в системі: подія зондування та подія спільного використання РЧС. Метою запропонованого програмного забезпечення для моделювання є обробка цих двох подій шляхом ітеративного оновлення параметрів системи [21].

Далі проводиться порівняльна оцінка ефективності розроблених алгоритмів з допомогою результатів імітаційно-статистичного моделювання.

```

00 ініціалізація:  $t_{ls} = -\infty, t_{sp} = -\infty, t_s = 0, t_m = \infty$ 
01 while(1)
02 t: = поточний час
03 if  $t = t_s$  // працює при події зондування
    зондування каналу під час  $t_s$ 
04 if канал займається під час зондування
    оновлюється значення  $t_{sp}$ 
05 if стан каналу відрізняється від останнього результату вимірювань
    розрахувати  $t_{sp}$ 
06 оновити  $t := t + \tau_s, t_{ls} := t$ 
07 розрахувати  $\tau_i$ 
08 if канал простоє
09 оновлення  $\tau_f := t - t_{sp}$ 
10 розрахувати  $\tau_t^*$ 
11 оновити  $t_m := t + \tau_i^*; t_s := t + \tau_i$ 
12 призначити потужність та швидкість передачі в канал
13 SU відправляє пакети на БС CR  $\tau_t^*$ 
14 else
15 оновити  $t_s := t + \tau_i$ 
16 призначити потужність та швидкість передачі каналу
17 SU відправляє пакети на БС CR

```

Рисунок 4.3 – Псевдо-код імітаційної моделі вибору каналу у режимі розподілу спектру з боку SU

4.2 Порівняльна оцінка ефективності алгоритмів розподілу ресурсів каналу на основі імітаційного моделювання

В імітаційній моделі когнітивної мережі зв'язку радіостанції PU та SU використовують широкосмуговий інтерфейс мережі. Нехай існує один канал когнітивної мережі з пропусканною здатністю 50 МГц. Первинна мережа має одну первинну базову станцію та 3 РЕЗ PU, а вторинна когнітивна мережа має один когнітивний контролер та 10 РЕЗ SU, причому пристрої РЕЗ SU утворюють комірчасту топологію навколо когнітивного контролера. Середня відстань між SU та когнітивним контролером – 1 одиниця відстані, що вимірюється в кілометрах. Середня відстань між PU та когнітивним контролером становить 4,3 одиниці відстані [6].

В імітаційній моделі встановлена тривалість зондування РЧС дорівнює 0,5 мс. Кожен РЕЗ SU моделюється як джерело даних з постійною інтенсивністю швидкості передачі, який завжди має дані для передачі з довгою чергою перевищує

часу симуляції, маючи на увазі, що кожен РЕЗ SU завжди вимагає дозволу на відправлення у центрального когнітивного контролера. Початковою безпечною відстанню між SU та PU визнається величина, що дорівнює 1 км.

Розглянемо вплив відстані між основною мережею та РЕЗ SU обчислюючи пропускну здатність, використовуючи розроблені алгоритми взаємодії, а також враховуючи коефіцієнт утилізації каналів γ , що використовуються. Певна пропускну здатність з використанням запропонованого алгоритму, зображена на рисунку 3.1, зокрема блоку 10, відповідальний за визначення швидкісних можливостей каналу, пропорційна відстані між SU та основною мережею з використанням різних ліцензованих каналів, трафік PU розподіляється за законом Пуассона, графік розподілу подано на рисунку 4.4 [6].

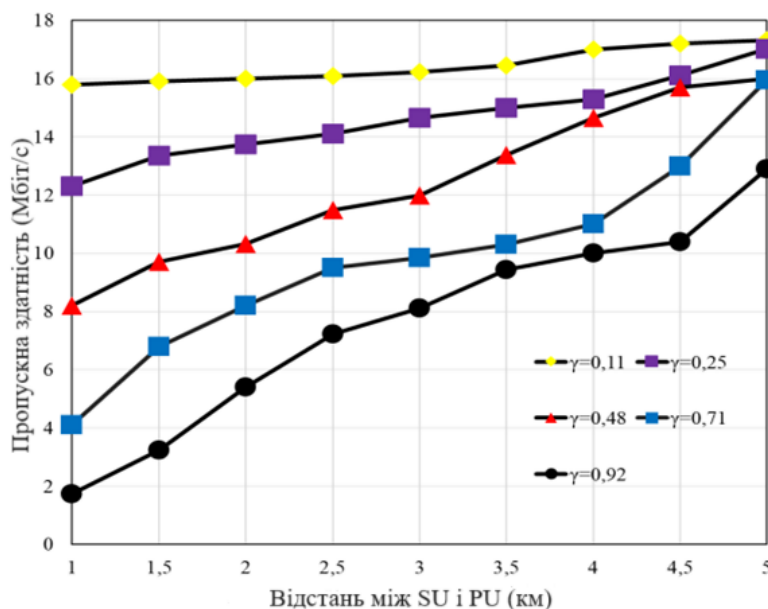


Рисунок 4.4 – Вплив відстані між SU та PU на пропускну здатність розробленої схеми

Загальна пропускну здатність визначається сумарною пропускну здатністю в режимі радіочастотного доступу після застосування зондування РЧС. Відстань між пристроєм SU та PU пропорційна відстані між пристроєм SU та когнітивним контролером. Збільшення сумарної пропускну здатності означає, що відстань між мережею вторинних та первинних користувачів також збільшується, як показано на рисунку 4.4, це пояснюється тим, що чим частіше SU передбачає поведінку PU, тим простіше стає використовувати канал РЧС, розуміючи поведінку PU [13].

Також є залежність між збільшенням пропускну здатності каналів для

пристроїв SU, коли радіобладнання PU зменшує час використання ліцензованого радіочастотного ресурсу, якщо відстань між SU та PU невелика, різниця в пропускній здатності є функцією існуючого вибору для радіопристроїв когнітивної системи зв'язку (використання власного зондування для пошуку вільних каналів або запиту даних з бази даних через базову станцію або когнітивний контролер з можливостями базової станції. Різниця полягає в тому, що при зондуванні та виборі каналу для використання радіостанцією SU, гарантується вища пропускна здатність і, крім того, передбачається подія, що радіостанція PU не займе канал радіостанції SU протягом певного часу.

При використанні списку каналів, отриманих від сусідніх РЕЗ SU, неможливо гарантувати як високу пропускну здатність, так і частоту використання каналів PU. Однак, якщо відстань між SU та PU така, що не впливає на пропускну здатність, то спосіб отримання інформації про вільні канали невідіграє суттєвої ролі. Далі запропонований метод оцінюється за коефіцієнтом справедливості Р. Джейнса стосовно використання каналних ресурсів у когнітивних мережах зв'язку. Коефіцієнт справедливості Джейнса є співвідношенням відстані між мережею SU та PU відповідно до кількості SU, як показано на рисунку 4.5.

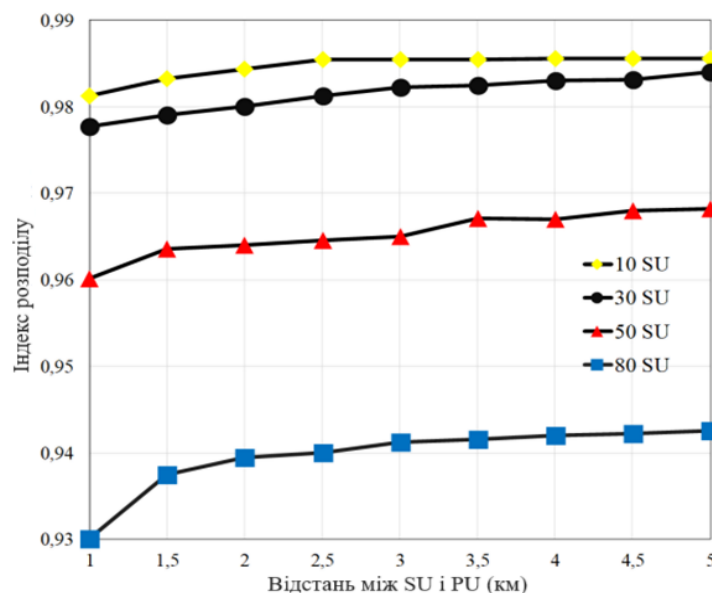


Рисунок 4.5 – Коефіцієнт справедливості в порівнянні з відстанню між пристроями SU та PU

Цей коефіцієнт визначає ефективність використання радіочастотного ресурсу та допомагає уникнути нестійкого обслуговування РЕЗ SU через її

віддаленість від РЕЗ PU, для забезпечення високого рівня QoS для всіх користувачів вторинної мережі.

Для певної кількості SU коефіцієнт справедливості дещо зростає зі збільшенням відстані між SU та PU з наступних причин: коли збільшується дистанція між SU та PU, знижується рівень перешкод. Це означає, що різниця в пропускній здатності каналів, які отриманує SU в режимі зондування з урахуванням сусідства з PU для кожного запиту РЧС стає більшою. Отже, чим більша відстань між радіомережами SU та PU, тим більший коефіцієнт справедливості Джейнса.

Це пов'язано з тим, що через обмеженість радіоресурсів зі збільшенням кількості SU ймовірність того, що кожна SU фактично використовує РЧС, зменшується з кожним новим підключенням SU, що призводить до зниження коефіцієнта справедливості Джейнса.

Адаптивна схема передачі з обмеженням перешкод t_x - ця схема розподілу спектра, модифікована структурою спектрального зондування таким чином, що РЕЗ SU може отримати доступ до каналу тільки тоді, коли РЕЗ PU перебуває у стані очікування, де t_x - це час від початку виявлення РЕЗ PU до моменту створення дозволеного рівня перешкод РЕЗ SU. В адаптивній схемі допускається вплив перешкод на РЕЗ PU. Крім того, на графіках імітаційного моделювання адаптивна схема враховує перешкоду, яка виникає тільки тоді, коли рівень шуму приймача РЕЗ PU дорівнює допустимому рівню перешкод викликаних РЕЗ SU [15].

Фіксована схема передачі показана на рисунку 3.5, але із заданими значеннями часу передачі SU $\tau_t = 0,01$ с. $\tau_t = 0,005$ с. У фіксованій схемі базова станція КСР/вузол ANDSF приймає рішення про виділення каналу після обробки результатів радіолокаційного зондування. Отже, фіксована схема використовує відомий підхід до моделювання когнітивної системи радіозв'язку, але з додаванням запропонованого алгоритму.

Для подальшого дослідження пропонується використовувати структуру активності радіочастотної мережі PU, середній час перебування у стані «ON» становить 0,2 с., тоді як середній час перебування у стані «OFF» коливається від 0,2 с до 2,8 с. Ідеальний випадок - досконалий та достовірний контроль РЧС, мінімальна ймовірність перешкод та відсутність затримок при доступі до каналу SU. Такий варіант можна отримати лише в лабораторних умовах, мінімізувавши коефіцієнти затримок, встановивши точний час заняття PU та обнулюючи час

доступу SU до виділеного каналу, як показано на рисунку 4.6.

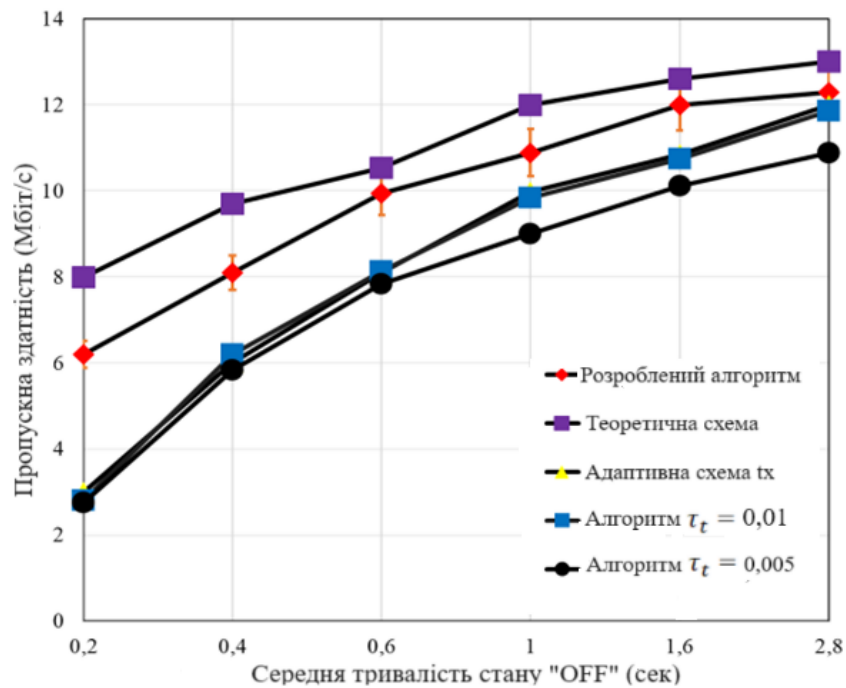


Рисунок 4.6 – Сукупна пропускну здатність каналу порівняно з середньою тривалістю стану «OFF»

Коли тривалість стану «OFF» збільшується, пропускну здатність всіх схем рисунку 4.6 збільшується. Сукупність запропонованих алгоритмів, розглянутих у розділі 3 дозволяє максимально наблизитися до теоретичної схеми моделювання, що забезпечує максимальну пропускну здатність у ідеальних при цьому умовах. При цьому, як можна помітити, адаптивна схема з наявністю перешкод або завдання певного значення часу передачі PEЗ SU, не дозволяють максимально ефективно використовувати виділений канал [6].

У розробленому алгоритмі, принаймі в точці 0,2 с., можна досягти збільшення пропускну здатності до 2 разів. Звичайно, зі збільшенням часу перебування в стані «OFF» значення пропускну здатності розглянутої схеми зростають, але, як видно з графіка в точці 2,8 с, максимальна пропускну здатність є у системи з використанням розроблених алгоритмів, описаних в розділі 3. Враховуючи це, можна зробити висновок, що спільне застосування запропонованих алгоритмів дозволяє максимально ефективно підготувати радіобладнання SU до початку сесії прийомо-передачі, не витрачаючи ресурси на

додаткові операції, пов'язані з постійними перевітками шуму та обробкою сигнального трафіку.

Різниця в коефіцієнтах перешкод між системою КСР з використанням розроблених алгоритмів та адаптивною схемою передачі з перешкодами є значною: зі збільшенням середньої тривалості стану «OFF» коефіцієнт перешкод адаптивної схеми зменшується. Така різниця в перешкодозахищеності пояснюється тим, що запропонована схема на рисунку 4.7 дозволяє РЕЗ PU отримувати доступ до РЧС швидше, ніж при використанні адаптивної схеми.

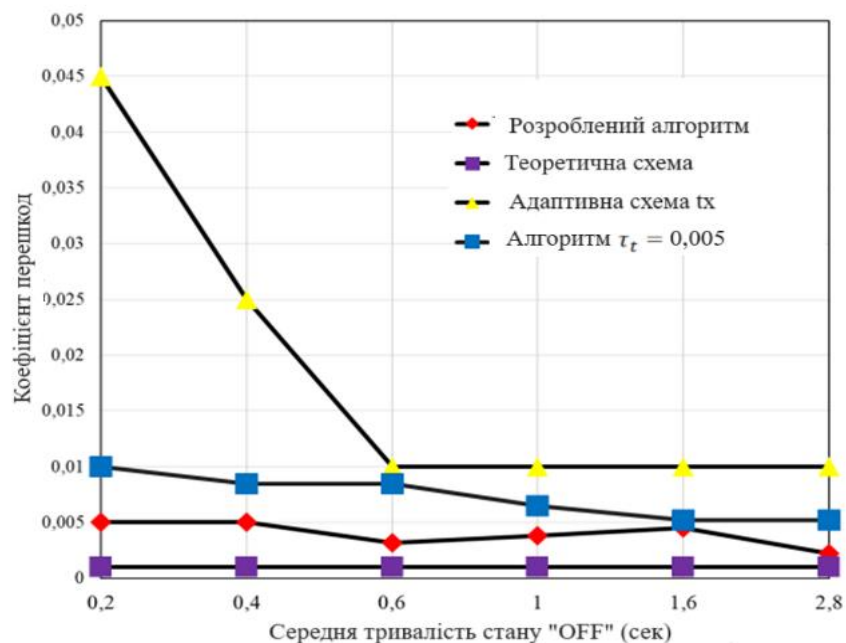


Рисунок 4.7 – Коефіцієнт перешкод щодо тривалості стану «OFF»

У системах когнітивного радізв'язку коефіцієнт перешкод зростає зі збільшенням інтервалу прийомо-передачі τ_t . Із запропонованими покращеннями коефіцієнт перешкод є найнижчим, незалежно від того, який канал використовується РЕЗ PU.

Коефіцієнт перешкод адаптивної когнітивної радіосхеми показує високі значення і лише при збільшенні часу використання каналу з 0,6 с до 2,8 с коефіцієнт перешкод зменшується до 0,01 і залишається на тому ж рівні до закінчення моделювання. Як видно з рисунку 4.7, дуже малі значення 0,0001 можна отримати завдяки ідеальним умовам, створеним теоретичною моделлю, та передбачуваній поведінці ліцензованих користувачів радіочастотного обладнання PU. Розроблені алгоритми дозволяють зменшити коефіцієнт перешкод від РЕЗ SU в діапазоні від

0,002 до 0,005, і протягом усього часу стану «OFF» коефіцієнт перешкод злишається в цих межах. Іншими словами, як видно з рис. 4.7, повністю звести коефіцієнт перешкод до нуля дуже складно, але його можна зменшити до прийняттого значення. В цілому, моделювання за розробленими алгоритмами значно перевершує системи з використанням адаптивних схем та схем із заданим часом передачі τ_t .

4.3 Дослідження щодо реалізації алгоритму скорочення часу доступу до каналу

На рисунках 3.2 та 3.3 було розглянуто ad-hoc з 2-40 доступними каналами в просторі 1 400 м x 1 200 м для оцінки ефективності запропонованих алгоритмів, де кожен з PE3 SU має радіус передачі до 100 м, як показано на рисунку 4.8.

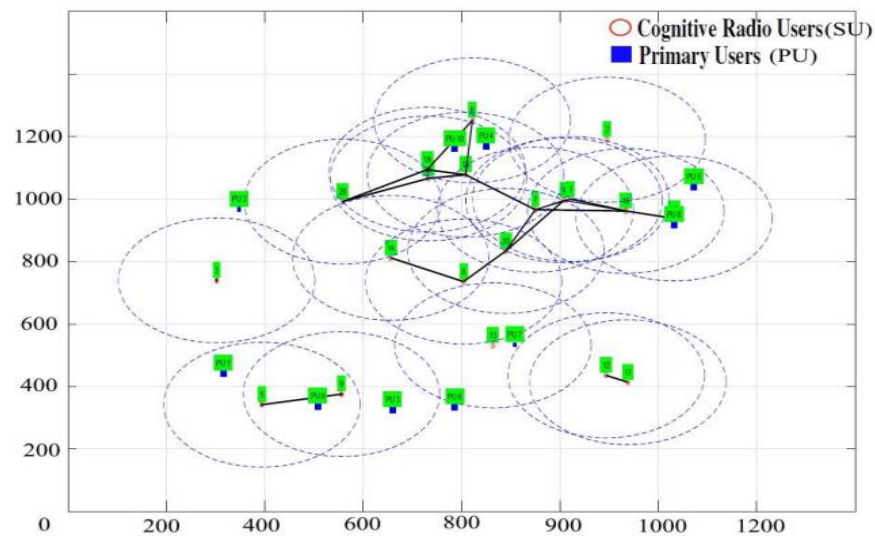


Рисунок 4.8 – Середовище симуляції з 10 PU і 20 SU

Кожен вузол КСР отримує дані про доступні канали одним з наступних методів: зондуванням, отриманням інформації з геолокаційної бази даних або запитом на найближчу базову станцію PE3 SU та ініціюванням сеансу передачі/прийому. У моделюванні використовувався метод зондування РЧС. Час зондування було встановлено 25 мс та 1 мс для широкосмугового та багатоканального зондування відповідно [12].

Широкосмугове зондування виконується шляхом вибору каналу обміну трафіком PE3 PU протягом виділеного періоду часу, а багатоканальне зондування

– шляхом вибору конкретного робочого каналу в заданий момент часу. Крім того, враховується, що існуючі радіомодулі не можуть передавати велику кількість пакетів з ряду причин, головним чином, через непостійність тривалості передачі при заданому рівні точності.

Основні схеми моделювання включають планування вільних періодів каналів, вікна узгодження при перемиканні на резервний канал, планувальники Up-link та Down-link ліній зв'язку та виявлення «білих плям» у доступному телевізійному спектрі [23].

Таблиця пріоритетів, тобто порядок вибору каналів в РЕЗ SU, заповнюється на основі інформації про доступність каналів та активність каналів, що спостерігається когнітивним контролером. Якщо пакет надходить під час процесу зондування або підтвердження виділення каналу, передбачається, що він залишається в черзі на передачу або прийом до тих пір, поки не буде отримано підтвердження того, що канал виділено. Колізії пакетів тут не розглядаються, але якщо користувачий КСР і пакет даних PU зіштовхуються, пакет SU видаляється з черги замість повторної передачі.

По-перше, коли потрібно передати новий пакет, кожному PU випадковим чином виділяється канал, і надходження пакетів відбувається за Пуассонівською моделлю трафіку з експоненціальним розподілом часу між інтервалами надходження. Нехай, система має фіксовану кількість каналів $M = 40$, набір каналів вибирається випадковим чином, але k – це коефіцієнт, який контролює доступність каналів і задається перед моделюванням. Передбачається, що k може змінюватися між 0,1 і 0,3. Це важливий фактор, оскільки доступність каналів безпосередньо пов'язана з активністю PU та швидкістю трафіку.

В імітаційній моделі зроблені наступні припущення.

- 1) Вузли РЕЗ SU можуть обмінюватися службовою інформацією тільки в межах одного сусіднього вузла;
- 2) Припускається, що всі користувачі можуть виявляти та передбачати активність РЕЗ PU;
- 3) Колізії між контрольними та вітальними повідомленнями не розглядаються.

Ефективність алгоритму досліджується з точки зору співвідношення індексу розподілу та відстані між РЕЗ SU та PU, як показано на рисунку 4.9. Це пов'язано з тим, що перед початком передачі SU здійснює пошук виділених і доступних

каналів, поки не визначить потрібний канал з точки зору загальної функції зондування.

Для порівняльного аналізу протоколи були обрані на основі ранжування каналів відповідно до стандартів IEEE 802.22 та IEEE 802.11af. Якщо для ранжування каналів використовується один фактор, то кількість використовуваних каналів зменшується для всіх протоколів передачі. Швидке зростання використання каналів зменшується, коли канал ніколи не використовувався сусідніми радіопристроями SU.

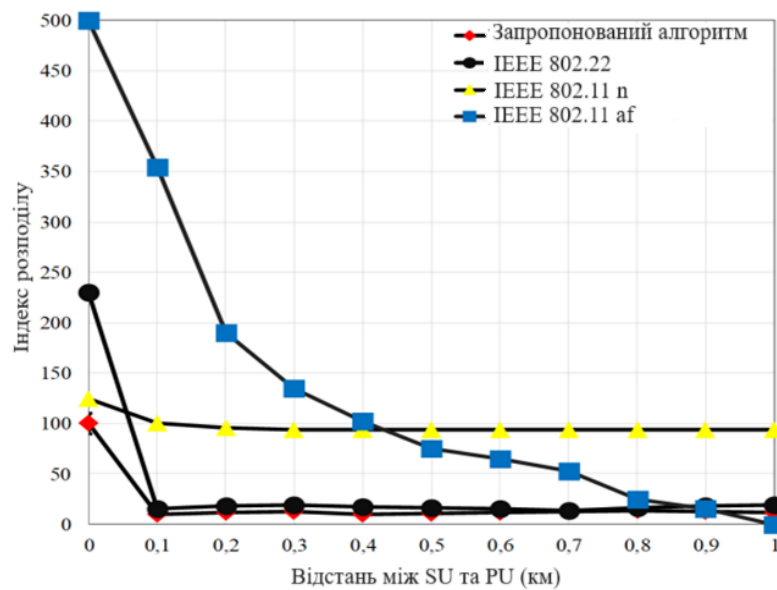


Рисунок 4.9 – Порівняння ступеня перекриття каналів, що використовуються щодо дистанції між SU та PU

Слід також зазначити, що великий вплив мало близьке розташування пристроїв SU до PU. Всі протоколи мали високі показники, коли РЕЗ SU та PU знаходилися в одній точці. Особливо це стосується протоколів IEEE 802.11af та IEEE 802.11n, оскільки ці протоколи мінімізують вплив вторинного користувача щодо створення перешкод первинному користувачеві. З цієї причини необхідно переглянути велику кількість каналів, перш ніж їх можна буде виділити для радіостанції SU [13].

Кількість зайнятих каналів за часовий інтервал залежить від розміру циклу, який визначається характеристиками обраного протоколу каналного рівня. При цьому запропонований алгоритм дозволяє значно скоротити час доступу до вільних каналів, про що свідчить зменшення індексу розподілу. Як показано на рисунку

4.10, коефіцієнт використання вільних каналів з урахуванням часу зондування РЧС, збільшується. Для перевірки ефективності запропонованих алгоритмів по відношенню до існуючих протоколів розглянуто відношення ступеня перекриття до ймовірності заняття каналу.

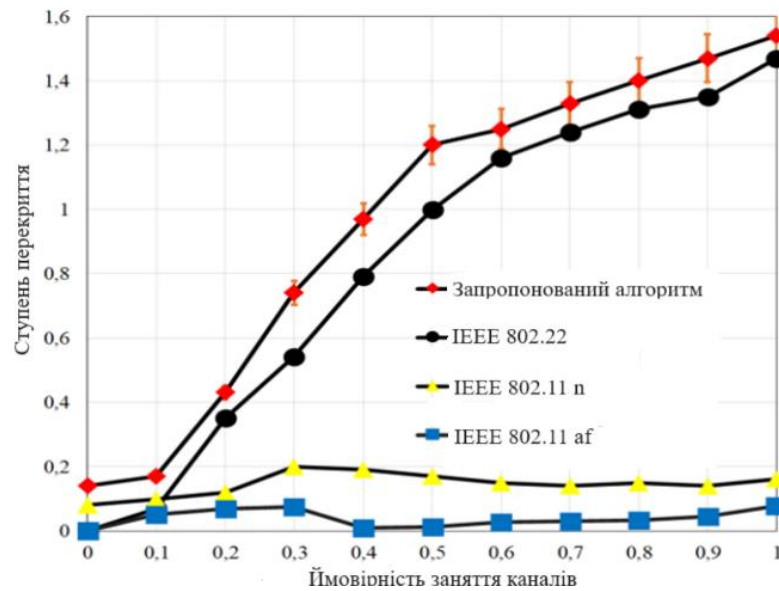


Рисунок 4.10 – Порівняння ймовірності заняття каналів та ступеня перекриття

Ступінь перекриття - величина, що характеризує одночасне використання каналів як радіопристроїв SU, так і PU, починаючи від моментів повного перекриття, коли один і той самий канал зі списку доступних каналів практично недоступний SU, до ситуації, коли один і той самий канал зі списку відносно однаково доступний як SU, так і PU. При цьому, як заведено малі значення перекриття означають, що канал практично не використовується SU, а ймовірність того, що такий канал буде зайнятий вторинним користувачем, прагне до нуля. Тому протоколи і метод передачі є ефективними, якщо вони можуть максимізувати ступінь перекриття, щоб уникнути блокування PU і максимізувати використання вільних ресурсів каналу [12].

Крім того, чим вищий ступінь перекриття, тим менша затримка доступу до каналу, що чітко видно на рисунку 4.10. Однак, можливі також ситуації, коли ймовірність зайнятості каналу дорівнює нулю, а ступінь перекриття для всіх протоколів менший за 0,2. Як тільки ймовірність заняття каналу зростає, ступінь перекриття в алгоритмі і методі, розроблених для протоколу IEEE 802.22, збільшується. Максимальне значення ступеня перекриття змінюється в межах

імітаційної моделі від 1,4 до 1,6.

Як і очікувалося, всі протоколи демонструють високу ефективність використання каналів. Тим не менш, запропонований алгоритм перевершує більшість існуючих алгоритмів з точки зору зменшення часу доступу до виділеного каналу. Зокрема, значне покращення продуктивності спостерігається при рівній ймовірності заняття каналів становить від 0,1 до 0,6 та ступенем перекриття від 0,2 до 1,2 відповідно.

4.4 Вплив розроблених у дослідженні методів та алгоритмів на продуктивність каналу управління

Важливу роль у мінімізації часу доступу до вільних каналів відіграє кількість спільних каналів управління доступом користувачів КСР до каналних ресурсів та спосіб передачі інформації. Два вузли КСР повинні мати принаймі один спільний канал управління для встановлення зв'язку з метою передачі інформації про заняття каналів та результати зондування. Можливі два типи каналів управління: умовно симетричні та умовно асиметричні [23].

Симетричні бо двосторонні (дуплексні) канали управління працюють для прийому та передачі інформації від РЕЗ SU. У випадку асиметричних або односторонніх (симплексних) каналів управління виділяється два канали, один для передачі, а інший для прийому інформації управління. Для того, щоб зробити зв'язок та служби зв'язку більш стійкими до переривань, викликаних появою пристроїв PU, РЕЗ SU повинен забезпечити оперативну заміну існуючих каналів на один з резервних каналів, згідно з алгоритмом, наведеним на рисунку 3.3. Загалом, будь-який існуючий канал може розглядатися як резервний. Тому, якщо РЕЗ PU повертається до каналу, яким користується РЕЗ SU, РЕЗ SU повинен отримати вільний канал протягом 2 мс. Це вимагає щонайменше двох приймачів на кожному вузлі для обслуговування та оновлення каналу у випадку при асиметричних каналах управління [14].

Оцінка часу доступу до симетричного каналу управління наведено на рисунку 4.11, з якого видно, що ефективність розробленого в роботі алгоритму вища, ніж у стандартах IEEE 802.22 та 802.11af, які використовують когнітивний підхід до розподілу каналного ресурсу. На рисунку 4.11 показано часовий інтервал та відсоток заняття каналу для управління обміном сигнальним трафіком. Часовий

інтервал визначається як час між початком пошуку каналу управління та його знаходженням. Тобто. чим менший часовий інтервал, тим швидше SU розпочинає сеанс прийому-передачі.

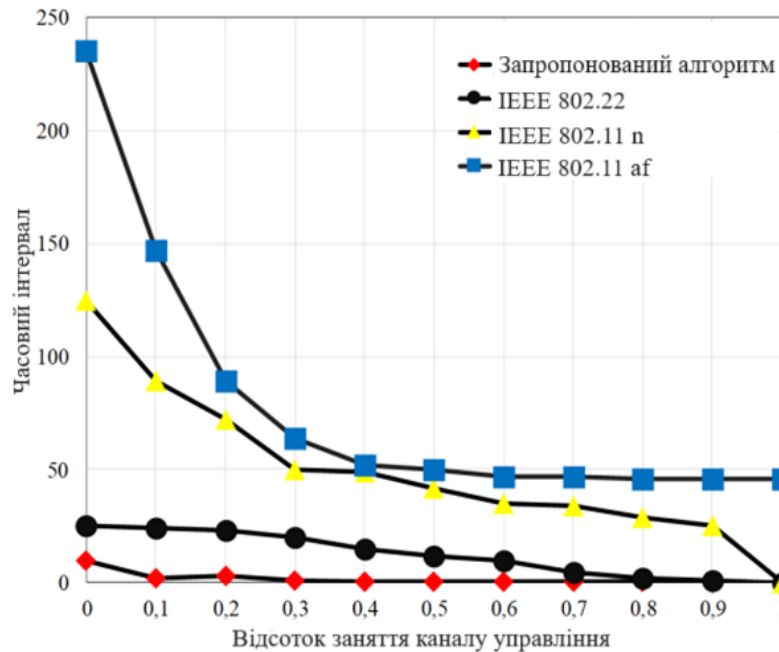


Рисунок 4.11 – Порівняння часу доступу та ступеня використання симетричного каналу управління

Розроблений алгоритм показує чітку тенденцію до зменшення часу доступу до каналів управління. Такий самий ефект спостерігається на рисунку 4.12 для інтенсивності використання каналу управління. Оцінка часу доступу для асиметричного каналу управління, показана на рисунку 4.12 показує роботу запропонованого алгоритму за нових умов моделювання з асиметричним каналом управління. У цьому випадку для отримання порівняльної оцінки також використовувалося відношення часового інтервалу до зайняття каналу управління. Найнижчий показник часового інтервалу використовувався в системі за розробленими алгоритмами, який був аналогічним і для протоколу PAWS IEEE 802.22.

Для асиметричних каналів всі протоколи когнітивного доступу до мережі показують високу ефективність доступу до каналу, порівняно з симетричними каналами управління [12].

Наприклад, припустимо, що два користувачі когнітивної мережі зв'язку мають загалом 20 доступних каналів і що 50% каналів між ними є спільними, тобто

обидва користувача мають 10 спільних каналів або каналів, що перекриваються. Припустимо, що необхідний QoS гарантується на 5 з цих 10 спільних каналів. Час доступу до виділених каналів зменшувався зі збільшенням кількості спільних каналів. Також система з розробленим алгоритмом показала найвищий показник продуктивності, коли кількість вільних каналів була не більшою за 20%, як показано на рисунку 4.12.

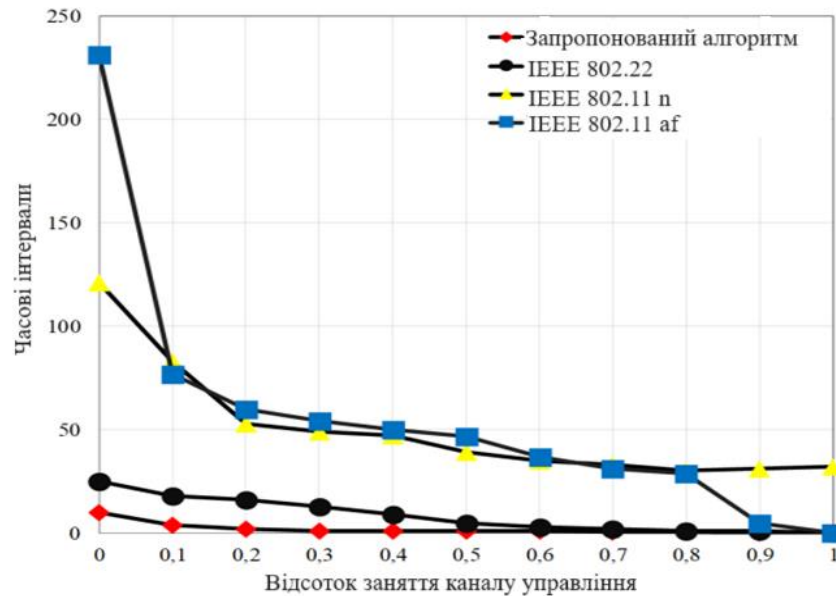


Рисунок 4.12 – Порівняння часу доступу та рівня використання асиметричного каналу управління

Найгірший час становив 57,5 мс, порівняно з 320 мс та 299 мс для стандартів IEEE 802.22 та IEEE 802.11 af відповідно. Завдяки імітаційному моделюванню, продемонструвало ефективність запропонованих алгоритмів, представлених на рисунках 3.2 - 3.4, щодо вже існуючих стандартів IEEE 802.22 та 802.11 af, які вже реалізовані в реальні умови, але не враховують запропоновану модель розглянуту у розділі 2.1. Таким чином, у кваліфікаційній роботі було використано імітаційне моделювання для порівняння запропонованих алгоритмів з існуючими стандартами IEEE для мереж малої пропускної здатності. Як видно з рис. 4.11 та 4.12 у розробленій моделі спостерігається висока ефективність, що дає змогу припустити, що в реальних умовах розроблені алгоритми будуть ефективними з урахуванням наведених обмежень та припущень [13].

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі шляхом розробки методів зменшення часу доступу до каналу вторинних або когнітивних радіочастотних користувачів, при збереженні безумовного пріоритетного доступу первинного радіочастотного користувача та з урахуванням мінімізації перешкод роботі радіообладнання первинного користувача, метою роботи було подальше вдосконалення принципів диференційованого доступу користувачів до каналних ресурсів в когнітивних мережах, що передбачає досягнення наступних основних результатів.

Проведено аналіз стандартів, методів та технологій на основі доступних джерел, який показав, що використання когнітивних мереж зв'язку вимагає нового підходу до розподілу каналних ресурсів. Це пов'язано з тим, когнітивні системи радіозв'язку використовують динамічний доступ до тимчасово незайнятих смуг радіочастот. Тому, актуальна розробка методу зменшення часу динамічного доступу до каналу вторинних чи когнітивних користувачів радіочастотного спектру з урахуванням результатів циклічного зондування для виявлення початку роботи первинних користувачів та можливої активності первинних користувачів між моментами зондування.

Встановлено, що конфігурація когнітивної мережі зв'язку не потребує спеціального виділення смуг радіочастот або радіоканалів і використовує існуючі каналні ресурси. Для цього використовуються системи радіозв'язку з програмованими параметрами SDR, які дозволяють використовувати широкий спектр конфігурацій та гнучку адаптацію робочих параметрів РЕЗ для використання різних діапазонів частот та технологій радіодоступу.

Для досягнення мети дослідження було розроблено метод розподілу каналних ресурсів в когнітивній мережі. Цей метод передбачає використання моделі «ON/OFF» каналу для зменшення часу доступу вторинного користувача РЧС до робочого каналу. Метод враховує можливість того, що первинний користувач спектру може зайняти або звільнити канал, в той час як вторинний

користувач РЧС виконує безперервне радіолокаційне зондування. Для забезпечення оперативного обміну інформацією між користувачами когнітивної мережі запропоновано використовувати модифікований заголовок «RTS/CTS» кадру управління доступом до середовища передачі для обміну відомостями про доступні канали та періоди передачі.

Для розвитку когнітивної мережі розроблено функціональну архітектуру, що включає компоненти частотно-територіального планування, доступу до радіочастотного середовища та зондування. Запропоновано послідовне використання широкосмугового та багатоканального зондування радіочастотного спектру для підвищення точності виявлення тимчасово вільних ділянок спектру та зменшення часу доступу до каналу для вторинних користувачів РЧС. За допомогою засобів імітаційного моделювання досліджено розроблений метод та доведено, що в мережах з низькою пропускнуою здатністю при використанні циклічного послідовного зондування час доступу РЕЗ вторинного користувача до каналу зростає в два рази, а кількість вузлів збільшується до 10 разів, що свідчить про ефективність запропонованого методу та його практичну придатність.

Розроблено методику оцінки обраного каналу на основі використання функції зондування, яка дозволяє вторинним користувачам формувати виважену оцінку очікуваної пропускнуої здатності обраної радіочастотної ділянки з урахуванням набору доступних їм параметрів передачі. Запропонована методика дозволяє визначити ефективність використання обраної ділянки РЧС для надання послуг зв'язку, передусім передачі даних для інтернету речей, міжмашинної взаємодії та сенсорних мереж.

Для реалізації запропонованого методу розподілу каналного ресурсу розроблено узагальнені алгоритми пошуку резервних каналів для вторинного користувачького радіообладнання, алгоритм перемикання між робочим та резервним каналами для забезпечення безперервності зв'язку для вторинного користувача спектру. Ефективність розроблених алгоритмів була доведена шляхом порівняння з результатами інших імітаційних моделей для різних діючих стандартів когнітивних радіосистем.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бузов Ф.Л. Управління радіочастотним спектром та електромагнітна сумісність радіосистем: навч. посіб. ЕКОТРЕНДЗ, 2006. 432с.
2. Галкін В.О. Основи програмно-конфігурованого радіо. МІЕТ, 2010. 224 с.
3. Гур'янов І.О. Когнітивне радіо: нові підходи до забезпечення радіочастотним ресурсом перспективних радіотехнологій. Електровз'язок. №8. 8с.
4. Дмитрієв А.С. Теорія та методи обробки сигналів: надширокосмуговий безпроводовий зв'язок та сенсорні мережі. Радіотехніка та електроніка, 2018. 1289с.
5. Дробяз М.О., Коляденко Ю.Ю. Аналіз розвитку мереж зв'язку з застосуванням когнітивних технологій. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку*: зб. тез доп. міжнар. наук. – практ. конф.. Харків, 2023. С.13-15.
6. Дробяз М.О., Коляденко Ю.Ю. Ефективність методів та алгоритмів розподілу ресурсів каналу в когнітивних мереж зв'язку. Харків: ХНУРЕ, 2023.
7. Дробяз М.О., Коляденко Ю.Ю. Метод зменшення часу доступу до каналу передачі в когнітивній мережі. *Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті*: зб. матеріалів форуму ХХVII Міжнар. молод. форум Т.4. Харків: ХНУРЕ, 2023. 192 с.
8. Дробяз М.О., Коляденко Ю.Ю. Розробка автоматичного розподілу каналного ресурсу між користувачами у когнітивних мережах зв'язку. Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт зі штучного інтелекту, 2023.
9. Дробяз М.О., Коляденко Ю.Ю. Способи використання вільних блоків у кадрі управління доступом до середовища передачі при розподілі каналних ресурсів. *Інформаційно-комунікаційні технології та кібербезпека (ІКТК-2023)*: зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф. Харків, 2023.
10. Захарченко С.М., Бойко О.В. Основи побудови захищених мереж на базі обладнання компанії Cisco: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2017.136 с.
11. Кирик М.І. Дослідження ефективності кооперативного сканування в когнітивних радіомережах. *Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій*: зб. матеріалів Всеукр. наук.- практ. конф. Львів, 2014. С. 153-154.

12. Кирик М.І. Модель оцінки ефективності методів спектральної мобільності для когнітивних радіомереж. *Радіоелектроніка та телекомунікації*. Львів, 2016. №849. С. 194-202
13. Кирик М.І. Модель оцінки пропускну здатності когнітивної радіомережі на основі OFDM. *Радіоелектроніка та телекомунікації*. Львів, 2014. №796. С. 110.
14. Климаш М. М. Оцінка ефективності алгоритмів перемикання радіочастотних каналів для вибору спектра у когнітивних радіомережах. *Радіоелектроніка та телекомунікації*. Львів, 2017. №874. С. 87-94.
15. Николин О.І., Оцінювання ефективності роботи мультисервісної мережі зв'язку засобами імітаційного моделювання. *Сучасні комп'ютерні системи та мережі в управлінні*: зб. матеріалів наук. – практ. конф. Херсон, 2020. С. 137
16. Пашков С.І. Застосування генетичного алгоритму для удосконалення топології когнітивних радіомереж. - магістерська дисертація, НТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». Київ, 2018р. С. 16–20.
17. Перепеліцин С.О., Лесько О.В. Використання технології надширокопосмугових сигналів та самоналагоджуваної мережі в управлінні. *Вісник інженерної академії України*. Київ: НАУ. № 4. 2019, С. 28–34.
18. Поповський В.В., Сабурова С.О., Олійник В.Ф., Лосєв Ю.І., Лемешко О.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем. Харків: СМІТ, 2006. 365 с.
19. Радіочастотний спектр та його використання. URL: uk.wikipedia.org/wiki/Радіочастотний_спектр
20. Романов О., Глоба Л. Метод реконфігурації мережі зв'язку з віртуальними ресурсами. *Система управління, навігації та зв'язку*: зб. наук. праць. 2019. №53. С. 137-141.
21. Салієва О.В., Яремчук Я.Є. Розробка когнітивної моделі для аналізу впливу загроз на рівень захищеності комп'ютерної мережі. Реєстрація, зберігання і обробка даних. 2019. № 4. С. 28-39
22. Ткачук О.І. Забезпечення раціонального використання радіочастотного ресурсу на основі когнітивного радіо. Київ: НТУУ «КПІ», 2017.129 с.
23. Янишин В.Б. Дослідження ефективності сканування спектру в когнітивних радіомережах. *Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології*: матеріали I Міжнар. наук. конф. Харків, 2013. С. 185-187.
24. Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах. НУ «Львівська Політехніка». Львів, 2018. 158 с.