

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

МР. ШМ - 32.00.00.000 ПЗ

Група ШМ-23-1

Братусь Руслан

2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Братусь Руслан Романович

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 004.942
(індекс)

МАГІСТЕРСЬКА РОБОТА

Моделі та методи контекстно-обізнаних систем динамічного доступу

(назва роботи)

Інженерія програмного забезпечення

(назва освітньої програми)

121 - Інженерія програмного забезпечення

(шифр і назва спеціальності)



Братусь Р.Р.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача освітнього ступеня)

Науковий керівник Тимків Дмитро Федорович, д.т.н., професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

доц. Бандура В.В.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль

доц. Вовк Р.Б.

(посада) (підпис) (дата) (ініціали та прізвище)

Робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Івано-Франківськ – 2024

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут інформаційних технологій

Кафедра інженерії програмного забезпечення

Освітній рівень магістр

Спеціальність 121 – Інженерія програмного забезпечення

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою

ІІЗ

доц.

В.В. Бандура

“ 04 ” вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Братусю Руслану Романовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема магістерської роботи “**Моделі та методи контекстно-обізнаних систем динамічного доступу**”

керівник проекту (роботи) Тимків Дмитро Федорович, д.т.н., професор

затверджені наказом закладу вищої освіти від “ 22 ” листопада 2024 р. № 781/7

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 15 грудня 2024 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Теоретичні концепції та формальні моделі побудови та функціонування інформаційних методологій динамічного доступу

4. Зміст розрахунково - пояснювальної записки(перелік питань, які потрібно розробити)

1. Дослідження предметної області застосування систем динамічного доступу

2. Методи та методологія контекстно-обізнаних систем доступу до спектру

3. Методологія модифікованої архітектури системи доступу до спектру із механізмом політики

4. Імплементация методів та методології контекстно-обізнаних систем динамічного доступу

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Архітектура CBRS-SA (рис. 1.1)

2. Схема архітектури Citizens Broadband Radio Service (CBRS) (рис. 1.2)

3. Умовна наскрізна архітектура CBRS (рис. 1.3)

4. Розподіл смуг CBRS між трьома рівнями (рис. 1.4)

5. Загальна архітектура системи доступу до спектру CBRS (рис. 1.5)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Консультант	Підпис, дата
Перевірка на плагіат	доц., к.т.н. Вовк Р.Б.	

7. Дата видачі завдання 04 вересня 2024 р.

Керівник

_____ (підпис)


Завдання прийняв до виконання


_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назви етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Підбір і вивчення літератури по темі магістерської роботи	15.09.2024	виконано
2	Аналіз концепцій та алгоритмів предметної області	29.09.2024	виконано
3	Дослідження предметної області застосування систем динамічного доступу	15.10.2024	виконано
4	Методи та методологія контекстно-обізнаних систем доступу до спектру	08.11.2024	виконано
5	Методологія модифікованої архітектури системи доступу до спектру із механізмом політики	20.11.2024	виконано
6	Імплементация методів та методології контекстно-обізнаних систем динамічного доступу	01.12.2024	виконано
7	Затвердження пояснювальної записки роботи завідувачем кафедри	15.12.2024	виконано

Студент – магістр


_____ (підпис)

Керівник роботи

_____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота: 79 с., 33 рис., 3 табл., 51 джерело.

Тема: Моделі та методи контекстно-обізнаних систем динамічного доступу

Об'єкт дослідження: системи динамічного доступу до спектру, що застосовуються у сучасних бездротових мережах.

Мета роботи: розробка та імплементація методів і підходів до управління динамічним доступом до спектру, що враховують контекстну інформацію для оптимізації використання спектральних ресурсів.

Предмет дослідження: методи та технології управління динамічним доступом до спектру із врахуванням контекстної інформації для підвищення ефективності використання спектральних ресурсів.

Результати дослідження

В роботі запропоновано підхід до контекстної класифікації користувачів у системах динамічного доступу, який забезпечує оптимальне розподілення ресурсів та зменшення конфліктів між користувачами..

Висновок

Запропоновано методику пріоритезації доступу до спектру на основі контекстної інформації, що забезпечує адаптивне управління спектральними ресурсам і розроблено модифіковану архітектуру системи доступу до спектру із врахуванням контексту, що підвищує ефективність її роботи.

ДИНАМІЧНИЙ ДОСТУП ДО СПЕКТРУ, КОНТЕКСТНО-ОБІЗНАНІ СИСТЕМИ, ПРІОРИТЕЗАЦІЯ, КОНТЕКСТНА ІНФОРМАЦІЯ, СПІЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ СПЕКТРУ, АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ

ABSTRACT

Master Thesis: 79 pp., 33 fig., 3 tab., 51 sources.

Thesis Subject: Models and methods of context-aware dynamic access systems

The object of research: systems of dynamic access to the spectrum used in modern wireless networks.

The purpose of the work: development and implementation of methods and approaches to the management of dynamic access to the spectrum that take into account contextual information to optimize the use of spectrum resources.

Subject of research: methods and technologies of managing dynamic access to the spectrum, taking into account contextual information to increase the efficiency of the use of spectral resources.

Research results

In the paper, we propose an approach to the contextual classification of users in dynamic access systems, which ensures optimal allocation of resources and reduction of conflicts between users.

Conclusion

A technique for prioritizing access to the spectrum based on contextual information is proposed, which ensures adaptive management of spectral resources, and a modified architectural system of access to the spectrum is developed, taking into account the context, which ensures the efficiency of its operation.

DYNAMIC ACCESS TO SPECTRUM, CONTEXT-AWARE SYSTEMS, PRIORITIZATION, CONTEXTUAL INFORMATION, SPECTRUM SHARING, SYSTEM ARCHITECTURE

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ДИНАМІЧНОГО ДОСТУПУ	13
1.1. Представлення та опис предметної області дослідження	13
1.2. Особливості та архітектура підходу управління динамічним доступом до мережі (CBRS).....	14
1.3. Спільне використання спектру бездротового зв'язку	19
1.4. Особливості спільного використання в діапазоні CBRS	20
1.4.1. Класифікація доступу в CBRS	21
1.4.2. Діючий захист користувачів	22
1.4.3. Система доступу до спектру	24
Висновки до розділу	26
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ КОНТЕКСТНО-ОБІЗНАНИХ СИСТЕМ ДОСТУПУ ДО СПЕКТРУ	28
2.1. Дослідження спектральних характеристик та технічних проблем в системах динамічного доступу	28
2.1.1. Спектральні характеристики та технічні проблеми.....	29
2.1.2. Діючий захист в системі.....	30
2.2. Методологія модифікованої архітектури системи доступу до спектру із механізмом політики	31
2.3. Врахування контексту в системі доступу до спектру	34
2.4. Використання контекстної інформації в системі доступу для CBRS ...	36
2.4.1. Наявність і розподіл спектру.....	37
2.4.2. Відповідність нормативним вимогам і політика.....	37
2.4.3. Динамічні фактори.....	37

2.4.4. Контекстна класифікація	38
Висновки до розділу	42
РОЗДІЛ 3. ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДОЛОГІЇ	
КОНТЕКСТНО-ОБІЗНАНИХ СИСТЕМ ДИНАМІЧНОГО ДОСТУПУ	43
3.1. Методика пріоритезації на основі контексту	43
3.2. Реалізація архітектури контекстно-залежної системи доступу	45
3.3. Представлення системної архітектури контекстно-залежної системи динамічного доступу до спектру.....	46
3.4. Проведення тестування імплементації моделей та методів предметної області.....	48
3.4.1. Використання сервера OpenSAS	49
3.4.2. Багато діапазонна система доступу до спектру	58
3.4.3. Пріоритезація з урахуванням контексту в SAS	61
3.4.4. Контекстно-залежне спільне використання спектру	65
Висновки до розділу	71
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	74

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

CA-DSA - Context-Aware Dynamic Spectrum Access
CA - Context-Awareness
CBRS - Citizens Broadband Radio Service
CBSD - Citizens Broadband Radio Service Device
CORNET - Cognitive Radio Network Testbed
DSA - Dynamic Spectrum Access
DSS - Dynamic Spectrum Sharing
EIRP - Effective Isotropic Radiated Power
ESC - Environment Sensing Capability
FCC - Federal Communications Commission
FSS - Fixed Satellite Service
GAA - General Authorized Access
IA - Incumbent Access
MB-SAS - Multi-Band Spectrum Access System
NSF - National Science Foundation
NTIA - National Telecommunications & Information Administration
OOBE - Out of Band Emissions
PAL - Priority Access License
PE - Policy Engine
PF - Prioritization Framework
PSD - Power Spectral Density
PU - Primary User
SAS - Spectrum Access System
SDR - Software Defined Radio
SINR - Signal to Interference & Noise Ratio
SU - Secondary User
USRP - Universal Software Radio Peripheral
WinnForum - Wireless Innovation Forum

ВСТУП

Актуальність теми.

У сучасному світі зростання кількості пристроїв, що використовують бездротовий зв'язок, призводить до значного навантаження на спектральні ресурси. Збільшення попиту на високошвидкісний доступ до мережі та зростання обсягів переданих даних створюють нові виклики у сфері управління спектром. Традиційні методи статичного розподілу частотних діапазонів стають все менш ефективними, оскільки не дозволяють повністю використовувати наявні ресурси, що може призводити до перевантаження спектру в одних областях і до його невикористання в інших.

На тлі цих змін концепція динамічного доступу до спектру стає ключовим інструментом для підвищення ефективності управління спектральними ресурсами. Особливий інтерес викликають системи на основі Citizens Broadband Radio Service (CBRS), які пропонують інноваційний підхід до спільного використання спектру між різними категоріями користувачів. CBRS забезпечує гнучкий і адаптивний розподіл спектральних ресурсів завдяки трірівневій системі доступу, що включає ліцензованих користувачів, пріоритетних користувачів та користувачів з загальним доступом.

Водночас зростає потреба у впровадженні контекстно-обізнаних рішень, які враховують зовнішні фактори, такі як місцезнаходження, рівень завантаженості, тип користувача, вимоги до якості обслуговування, а також нормативні вимоги. Застосування таких рішень дозволяє динамічно і ефективно управляти спектром, забезпечуючи кращу якість обслуговування та максимізуючи використання обмежених ресурсів. Особливо важливим є впровадження механізмів захисту користувачів та управління конфліктами між різними категоріями користувачів, що є критичним у сучасних системах зв'язку.

Таким чином, дослідження, спрямовані на розробку і впровадження контекстно-обізнаних методів у системах динамічного доступу до спектру, є

актуальними та мають велике практичне значення. Вони відповідають потребам індустрії телекомунікацій та сприяють розвитку бездротових технологій, забезпечуючи надійне, адаптивне та ефективне управління спектральними ресурсами.

Метою дослідження є розробка та імплементація методів і підходів до управління динамічним доступом до спектру, що враховують контекстну інформацію для оптимізації використання спектральних ресурсів.

Об'єктом дослідження є системи динамічного доступу до спектру, що застосовуються у сучасних бездротових мережах.

Предметом дослідження є методи та технології управління динамічним доступом до спектру із врахуванням контекстної інформації для підвищення ефективності використання спектральних ресурсів.

Задачі дослідження:

- Провести аналіз предметної області та вивчити основні підходи до управління динамічним доступом до спектру в системах CBRS.
- Визначити особливості спільного використання спектру та розглянути засоби захисту прав користувачів у діапазоні CBRS.
- Розробити методіку управління доступом до спектру, яка враховує контекстну інформацію, та модифіковану архітектуру системи.
- Реалізувати архітектуру контекстно-залежної системи динамічного доступу до спектру та провести її тестування.
- Оцінити ефективність впроваджених рішень у реальних умовах, використовуючи сервер OpenSAS та інші методи перевірки.

Методи дослідження

У дослідженні використано методи аналізу та моделювання систем доступу до спектру, імітаційне моделювання для оцінки ефективності запропонованих підходів, експериментальне тестування з використанням спеціалізованого програмного забезпечення (наприклад, OpenSAS) для перевірки функціональності системи в реальних умовах.

Наукова новизна отриманих результатів

Запропоновано методику пріоритезації доступу до спектру на основі контекстної інформації, що забезпечує адаптивне управління спектральними ресурсам і розроблено модифіковану архітектуру системи доступу до спектру із врахуванням контексту, що підвищує ефективність її роботи.

Практичне значення результатів

Розроблені методи та підходи можуть бути використані для покращення ефективності роботи сучасних систем динамічного доступу до спектру. Впровадження запропонованих рішень дозволить оптимізувати використання обмежених спектральних ресурсів, знизити рівень конфліктів між користувачами та підвищити якість обслуговування в бездротових мережах.

Структура магістерської роботи. Робота складається зі вступу, трьох розділів та висновків. Загальний обсяг роботи становить 79 сторінок, і містить 33 рисунки, 3 таблиці, список використаних джерел із 51 найменування.

РОЗДІЛ 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ДИНАМІЧНОГО ДОСТУПУ

1.1. Представлення та опис предметної області дослідження

Поява доступного та швидкого Інтернету призвела до розквіту Інтернету речей (IoT), і світ став усе більш бездротовим. За останніми публікаціями кількість активних пристроїв Інтернету речей у всьому світі становить від 13 до 14,3 мільярдів. Очікується, що до 2027-2028 рр. це число досягне 30 мільярдів кінцевих точок [1, 2]. Значне зростання цих цифр стало результатом збільшення доступності спектру протягом багатьох років. У той час як велика частина цього збільшеного доступного спектру була доступна за допомогою «аукціону спектру», що проводився Федеральною комісією зв'язку (FCC) протягом багатьох років, порівняно менша частина спектру також була доступна для спільного використання.

Радіочастоти, що передають бездротові сигнали від мільярдів пристроїв, стають дедалі переповненими. Спільне використання спектру – це можливість відкрити доступ до спектру або бездротових каналів зв'язку в сферах часу, простору та географії. FCC Сполучених Штатів запропонувала комерційне використання діапазону 3,5 ГГц [5] і назвала його смугою широкосмугового радіодоступу громадян (CBRS) (від 3550 МГц до 3700 МГц). Користувачі поділяються на три класи користувачів залежно від пріоритету доступу до ресурсу спектру.

Спільне використання спектру в діапазоні CBRS стало широко популярним, причому 85 % користувачів є опортуністичними користувачами без ліцензії. Однак необхідні подальші дослідження, щоб переконатися, що попит суспільства на доступність спектру відповідає кількості спектру, який можуть надати академічні кола, промисловість і уряд. Це призводить до потреби в інструментах з відкритим вихідним кодом, які академічне та наукове співтовариство могли б використовувати для тестування та

створення прототипів безлічі алгоритмів або політик доступу до спектру в поточному діапазоні CBRS. Як розширення цього, інші діапазони, які можуть запропонувати подібні переваги, як діапазон CBRS, необхідно ідентифікувати та дослідити. Існує не так багато наборів інструментів з відкритим вихідним кодом, які можуть використовувати для вивчення спільного використання спектру в кількох діапазонах.

Поточні рішення CBRS SAS використовують невелику різноманітність контекстних факторів під час прийняття рішення щодо доступу користувача до спектру. Традиційний SAS для діапазону CBRS використовує трирівневу ієрархію користувачів [6] і використовує обмежену кількість контексту (наприклад, членство в класі користувача або групі) під час прийняття рішень щодо спектру. Однак для підвищення ефективності спільного використання спектру можна використовувати безліч первинної та вторинної контекстної інформації. Часто вплив контексту на спільне використання спектру залежить від часу та географії через характеристики смуги, нормативну базу та вимоги користувачів.

Науковцям і політикам може знадобитися спочатку вивчити вплив цих контекстів на ефективність обміну, щоб кодифікувати їх у операційні вимоги. Щоб підтримувати такий вид дослідження та аналізу, інструменти спільного використання спектру повинні враховувати контекст і мати знання про те, як зміна контексту впливає на спільне використання спектру. Крім того, ці набори інструментів повинні дозволяти своїм користувачам визначати власні правила або політики, що регулюють спільне використання спектру, і повинні бути простими у використанні.

1.2. Особливості та архітектура підходу управління динамічним доступом до мережі (CBRS)

Спільне використання спектру в діапазоні CBRS (Citizens Broadband Radio Service) - це інноваційний підхід до управління радіочастотним

спектром, який дозволяє різним користувачам спільно використовувати один і той же діапазон частот (3550-3700 МГц) без взаємних перешкод.

Ось основні принципи роботи CBRS:

- Трирівнева система доступу:

- Інкубенти: Найвищий пріоритет мають військові та супутникові системи, які вже використовують цей діапазон.

- Ліцензовані користувачі: Компанії можуть отримати ліцензію на використання частини спектру CBRS для надання послуг зв'язку.

- Користувачі загального доступу (General Authorized Access - GAA): Цей рівень доступу відкритий для всіх бажаючих, але з найнижчим пріоритетом.

- База даних управління спектром (Spectrum Access System - SAS): SAS - це ключовий компонент CBRS, який відповідає за розподіл спектру між користувачами, моніторинг використання частот та запобігання перешкодам.

- Динамічне розподілення спектру: SAS динамічно розподіляє доступний спектр між користувачами залежно від їх потреб та пріоритетів. Це дозволяє максимально ефективно використовувати радіочастотний ресурс.

Система доступу до спектру (SAS) використовує зовнішні бази даних для зберігання інформації про всіх користувачів, базові станції громадянського ширококутвого радіозв'язку (CBSDS), потужність передачі та інформацію про радіоканали, які зайняті або все ще доступні для розподілу. Виявлення радарів та користувачів важливої інфраструктури (IA) здійснюється за допомогою датчиків системи визначення радіоелектронного середовища (ESC). SAS використовує інформацію, надану датчиками ESC, щоб звільнити радіоканали для використання користувачами IA.

SAS використовує доменний проксі-сервер (DP) для управління агрегацією CBSD та проксі-функціями для управління великомасштабними мережами. DP також може бути інтегрований із системою управління

елементами (EMS) або системою управління мережею (NMS). Це необов'язковий елемент для масштабування великих мереж.

На рисунку 1.1 кінцеві пристрої користувачів (EUD) - це електронні інтелектуальні мобільні пристрої, які підтримують передачу частоти в радіочастотному діапазоні 3,5 ГГц.

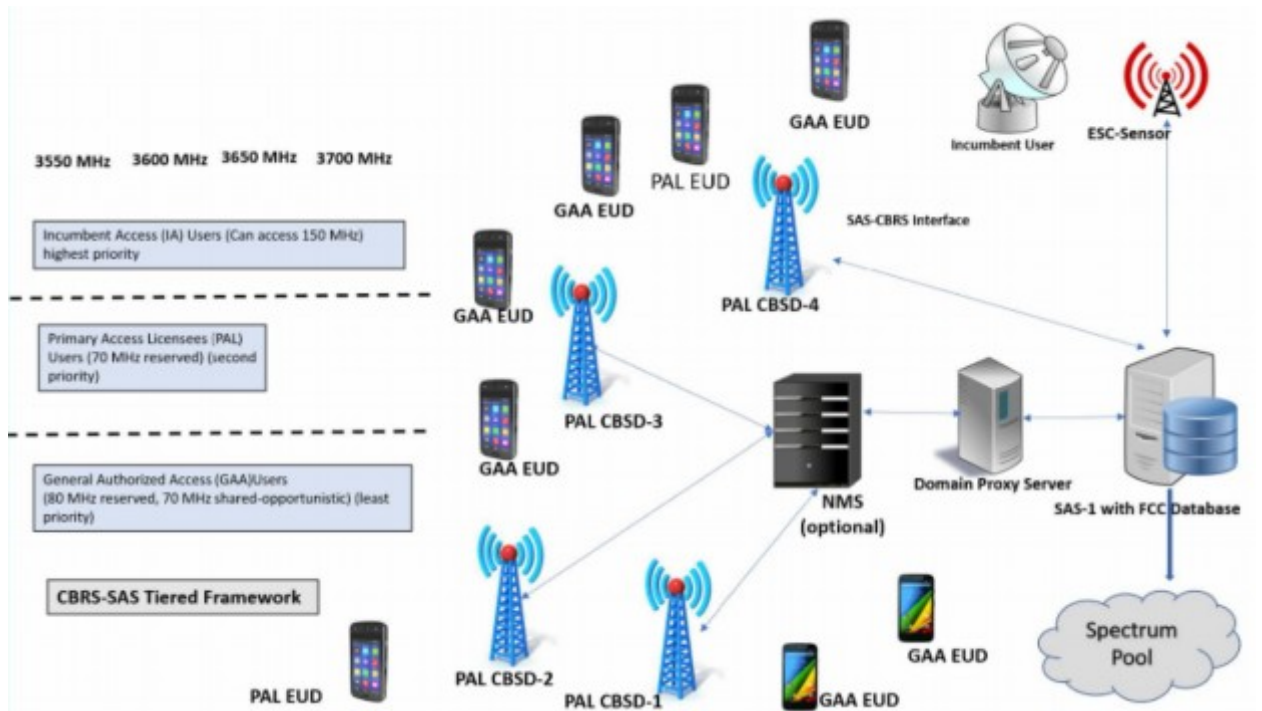


Рис. 1.1. Архітектура CBRS-SA

Переваги спільного використання спектру в діапазоні CBRS:

- Збільшення доступного спектру: CBRS дозволяє більше користувачам отримати доступ до радіочастотного спектру, що особливо важливо в умовах зростаючого попиту на бездротовий зв'язок.
- Підвищення ефективності використання спектру: Динамічний розподіл спектру забезпечує його оптимальне використання.
- Зниження витрат: Спільне використання спектру дозволяє знизити витрати на отримання ліцензій та розгортання мереж зв'язку.
- Сприяння інноваціям: CBRS створює можливості для розвитку нових технологій та послуг зв'язку.

Застосування CBRS:

- Приватні LTE-мережі: CBRS дозволяє компаніям створювати власні приватні LTE-мережі для забезпечення зв'язку на своїх об'єктах.
- Фіксований бездротовий доступ: CBRS може використовуватися для надання широкопasmового доступу до Інтернету в сільській місцевості та інших районах з обмеженою інфраструктурою.
- Інтернет речей (IoT): CBRS підходить для підключення великої кількості пристроїв IoT, завдяки низькому енергоспоживанню та широкому покриттю.
- Розумні міста: CBRS може бути використаний для розгортання мереж зв'язку для "розумних" пристроїв та систем у містах.

В Україні наразі спільне використання спектру в діапазоні CBRS не впроваджено, але регуляторні органи вивчають можливість його використання в майбутньому.



Рис. 1.2. Схема архітектури Citizens Broadband Radio Service (CBRS)

Опис ключових компонентів та рівнів доступу, які відображені на схемі Citizens Broadband Radio Service (CBRS):

1. Рівні доступу до спектра

- Incumbent Access (Пріоритетний доступ)

Цей рівень є найбільш захищеним і надається державним та військовим користувачам, зокрема військовим радарам і супутникам. Вони мають абсолютний пріоритет використання спектра і можуть витіснити інших користувачів, якщо необхідно.

- Priority Access License (PAL)

Ліцензований рівень доступу, який дозволяє комерційним організаціям купувати права на використання спектра через аукціони. Користувачі PAL мають доступ до захищеної частини спектра, яка гарантує мінімальні перешкоди. Їхній доступ регулюється системою SAS, щоб не конфліктувати з Incumbent Access.

- General Authorized Access (GAA)

Відкритий рівень доступу, який дозволяє користувачам без ліцензії використовувати спектр за умови, що він доступний. Цей рівень не має пріоритету і може працювати лише тоді, коли спектр не використовується Incumbent Access або PAL.

2. Ключові компоненти системи CBRS

- CBSD (Citizen's Broadband Service Device)

Це пристрої користувачів, які підключаються до CBRS, наприклад, базові станції та точки доступу. Вони запитують дозвіл на використання спектра у SAS та отримують інструкції щодо діапазонів, які можна використовувати.

- SAS (Spectrum Access System)

Центральна система управління, яка відповідає за динамічний розподіл та управління спектром. SAS приймає запити від CBSD, перевіряє наявність доступного спектра, забезпечує захист Incumbent користувачів та регулює доступ для PAL і GAA.

- ESC (Environmental Sensing Capability)

Система датчиків, розташованих уздовж узбережжя або в інших ключових зонах, які виявляють активність Incumbent Access (наприклад, військові радари). ESC передає інформацію до SAS, щоб уникнути перешкод і захистити користувачів з пріоритетним доступом.

3. Взаємодія компонентів

- Запит від CBSD до SAS

Пристрої CBSD надсилають інформацію про своє місцезнаходження та параметри до SAS, щоб отримати дозвіл на використання певних частот.

- Аналіз спектра SAS

SAS визначає, чи вільний спектр, чи зайнятий Incumbent Access або PAL користувачами, і приймає рішення про надання доступу.

- Моніторинг і управління

Якщо датчики ESC виявляють активність Incumbent Access, SAS оперативного оновлює доступ для CBSD, змінюючи виділені частоти, щоб уникнути перешкод.

Ця схема демонструє взаємодію між компонентами системи CBRS та забезпечує розуміння, як керується доступ до спектра для оптимальної та безпечної роботи всіх користувачів.

1.3. Спільне використання спектру бездротового зв'язку

Постійне зростання індустрії бездротового зв'язку та останні досягнення в ній створили величезне навантаження на доступний спектр, оскільки ми поспішаємо задовольнити все більше користувачів із дедалі зростаючими вимогами. Оператори зв'язку та провайдери мереж повинні задовольняти цей зростаючий попит, забезпечуючи при цьому надання високоякісних і надійних послуг своїм споживачам. Індустрія бездротового зв'язку принесла нову еру комунікацій із збільшенням використання спектру. Разом з цим за останні роки зросло використання державними органами – від

передбачення смертоносних штормів до дослідження космосу. Це призводить до навантаження на ресурс, який є розрідженим і обмеженим.

Традиційні методи розподілу спектру часто займають занадто багато часу або коштують занадто дорого. Виникла потреба в інноваціях у розподілі спектру. Ця потреба була задоволена спільним використанням спектру, який є гнучким способом використання радіохвиль кількома класами користувачів для різноманітних цілей. Спільне використання спектру дозволяє розширити доступ до спектру як для промисловості, так і для уряду та пропонує кілька переваг, таких як:

- Найбільшою перевагою є гнучкість щодо доступу до спектру. Оператори можуть динамічно збільшувати або зменшувати доступний спектр відповідно до попиту.

- Спектральну ефективність можна підвищити, дозволивши ефективно використовувати доступні діапазони частот кількома операторами.

- Пропускна здатність мережі, доступна для використання, може бути збільшена мережевими операторами шляхом використання спільного спектру, що означає, що більшій кількості користувачів можна надати доступ або більшу пропускну здатність (або пропускну здатність) можна виділити кожному користувачеві.

- Капітальні витрати, необхідні для збільшення доступності спектру, зменшуються, оскільки оператори мереж можуть скоротити свої витрати, пов'язані з придбанням спектру через аукціони чи іншим способом, а також розгортанням інфраструктури.

1.4. Особливості спільного використання в діапазоні CBRS

Протягом багатьох років уряди по всьому світу визначили потребу в ліцензованому спільному доступі для комерційних широкосмугових користувачів у федеральному спектрі. У 2012 році Федеральна комісія зв'язків США (FCC) оприлюднила перше повідомлення про запропоновану

норму для діапазону 3,5 ГГц, яка передбачала створення нової смуги спектру в діапазоні частот від 3500 МГц до 3700 МГц і назвала її Широкопосмугова радіослужба громадян (CBRS). Подальші зміни були внесені на основі коментарів як науковців, так і промисловості. У документі FCC Title 47 Part 96 [11] визначаються правила використання радіопристроїв у цьому діапазоні. Умовна наскрізна архітектура для спільного використання показана на рисунку 1.3.

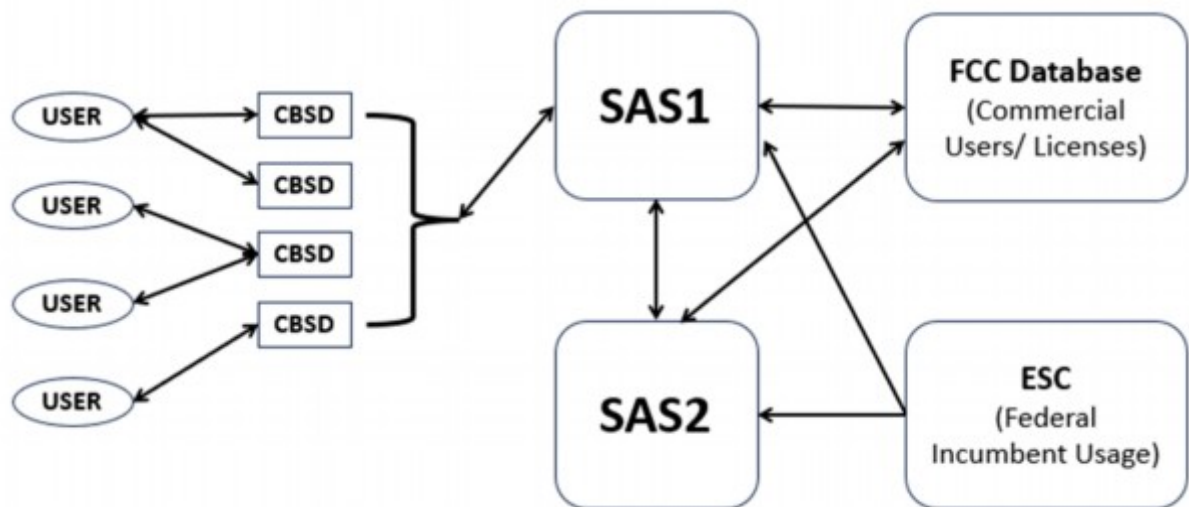


Рис. 1.3. Умовна наскрізна архітектура CBRS

1.4.1. Класифікація доступу в CBRS

Спектр CBRS розділено на три рівні або класи доступу:

- Рівень існуючого доступу (IA): діючі федеральні суб'єкти та старі земні станції фіксованої супутникової служби (FSS) включені до цього рівня. Нікому не дозволяється втручатися в роботу служб, що належать до цього рівня.
- Рівень ліцензії пріоритетного доступу (PAL): на цьому рівні розміщуються ліцензовані комерційні користувачі, які отримують доступ через аукціони CBRS, на кожному пристрої CBRS (CBSD). Ліцензіати PAL мають право на захист від інших ліцензіатів PAL і користувачів нижчого рівня.

- Рівень загального авторизованого доступу (GAA): це третій і останній рівень користувачів і підходить для розгортання приватних підприємств, що складається з мобільних пристроїв або пристроїв Інтернету речей. Ці користувачі не користуються захистом від шкідливих перешкод від спільного використання спектру двома іншими рівнями користувачів.

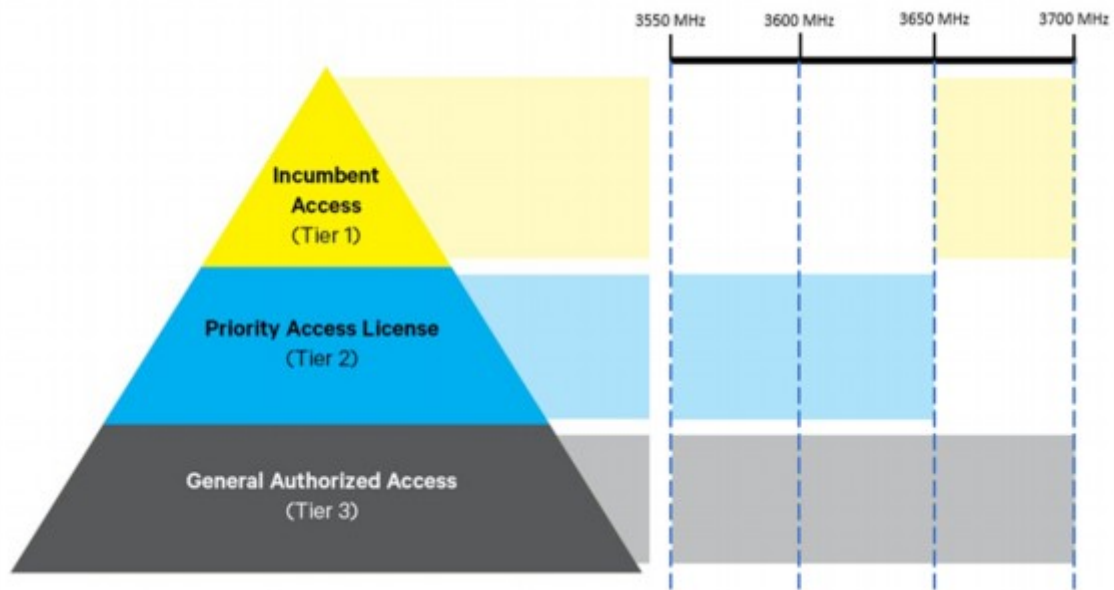


Рис. 1.4. Розподіл смуг CBRS між трьома рівнями

CBSD дозволено працювати в діапазоні частот 3550 МГц - 3700 МГц. Діючим користувачам дозволено працювати в діапазоні 3650 МГц - 3700 МГц, користувачам PAL дозволено працювати в діапазоні 3550 МГц - 3650 МГц, а користувачам GAA – в діапазоні частот 3550 МГц - 3700 МГц.

1.4.2. Діючий захист користувачів

В основі філософії спільного використання спектру в смузі CBRS лежить необхідність захисту поточних користувачів від шкідливих перешкод від інших користувачів з нижчим пріоритетом, які використовують той самий або суміжні канали зв'язку. Кодекс федеральних нормативних актів описує стратегії захисту діючих користувачів, таких як власники ліцензій на бездротовий широкопasmовий доступ до бездротового зв'язку. Цим

користувачам дозволено працювати саме в діапазоні частот 3650–3700 МГц. Постійні користувачі надалі називаються основними користувачами (PU), тоді як інші користувачі надалі згадуються як вторинні користувачі (SU).

Будь-який CBSD або пристрій кінцевого користувача, що працює в цьому діапазоні, не повинен створювати шкідливих перешкод і повинен бути в змозі впоратися з перешкодами від чинних користувачів, що працюють у діапазоні частот 3650–3700 МГц і нижче частоти 3550 МГц. Система доступу до спектру авторизує CBSD, що працює в цьому діапазоні, і гарантує, що використання спектру SU не погіршує зв'язок для PU, відстежуючи використання спектру користувачами IA за допомогою надійної можливості визначення середовища (ESC). Коли ESC повідомляє SAS про те, що він виявив присутність PU в спектрі, CBSD, які, як вважають, спричиняють шкідливі перешкоди, отримують 300 секунд або 5 хвилин, щоб припинити передачу або перейти на інший канал, якщо доступний. Крім того, жодні CBSD не можуть працювати в межах зон відчуження, і будь-яка діяльність має бути негайно припинена.

Таблиця 1.1.

Максимальні обмеження EIRP і PSD

Device	Maximum EIRP (dBm/10 MHz)	Maximum PSD (dBm/MHz)
End User Device	23	N/A
Category A CBSD	30	20
Category B CBSD	47	37

Земні станції FSS, які мають ліцензію на роботу в діапазоні 3600-3700 МГц, також захищені від перешкод CBSD, гарантуючи, що сукупна спектральна щільність потужності смуги пропускання, створена випромінюваннями від усіх CBSD на одному каналі, не перевищує середньоквадратичне значення -129 дБм/МГц для робочого радіусу 150 км у випадку земних станцій, що передають у діапазоні 3650 МГц – 3700 МГц, і

робочого радіусу 40 км у випадку земних станцій, що передають у діапазоні 3700 МГц – 4200 МГц. У таблиці 1.1 наведені обмеження EIRP та PSD, встановлені регуляторними органами та особами, що формують політику, у діапазоні CBRS.

Пріоритет є важливою функцією спільного використання спектру CBRS. Ліцензованим користувачам надається вищий пріоритет в екосистемі CBRS, ніж неліцензованим. У діапазоні 3550–3650 МГц дозволено співіснувати користувачам PAL і GAA. Оскільки PAL отримують ліцензію на пріоритетний доступ [11] від FCC, вони мають вищий пріоритет у цьому діапазоні. FCC також вказав, що максимальна кількість PAL, які можуть існувати одночасно в цьому діапазоні 100 МГц, становить 9 [11].

FCC встановила деякі технічні правила у вигляді загальних вимог CBSD, загальних вимог щодо радіозв'язку та вимог до пристроїв кінцевого користувача. Всі CBSD повинні мати можливість визначати та повідомляти свої географічні координати (± 50 метрів по горизонталі та ± 3 метри з точністю у висоті) до SAS. Про будь-які зміни місцезнаходження, що перевищують ± 50 метрів по горизонталі та ± 3 метри за висотою, слід повідомляти протягом 60 секунд. CBSD також повинні мати можливість двосторонньої роботи на будь-якій частоті, дозволеній SAS, у якій вони зареєстровані. Загальні вимоги до радіо встановлюють обмеження потужності для кінцевих користувачів і CBSD, що працюють у цьому діапазоні. Пристрої кінцевих користувачів повинні обмежити максимальну ефективну ізотропну потужність випромінювання (EIRP) до 23 дБм/10 МГц і 30 дБм/10 МГц для CBSD категорії А. Загальна потужність отриманого сигналу не повинна перевищувати середньоквадратичний рівень потужності - 80 дБм/10 МГц для кожного місця всередині зони захисту PAL [11].

1.4.3. Система доступу до спектру

Обговорення, яке наразі було підкреслено потребою в автономному контролері радіочастотного спектру, який міг би не лише керувати

розподілом частот у спектрі зареєстрованим користувачам, а й мати можливість забезпечити дотримання адміністративних вказівок і гарантувати, що правила дотримуються, а порушення, якщо такі є, негайно повідомляються. Така система доступу до спектру влучно називається системою доступу до спектру (SAS). SAS — це когнітивний механізм, який підтримує базу даних доступності спектру, використання спектру та зареєстрованих користувачів і приймає розумні рішення щодо розподілу доступного спектру для використання зареєстрованими користувачами, не порушуючи норм FCC. Загальна архітектура для CBRS SAS показана на рисунку 1.5.

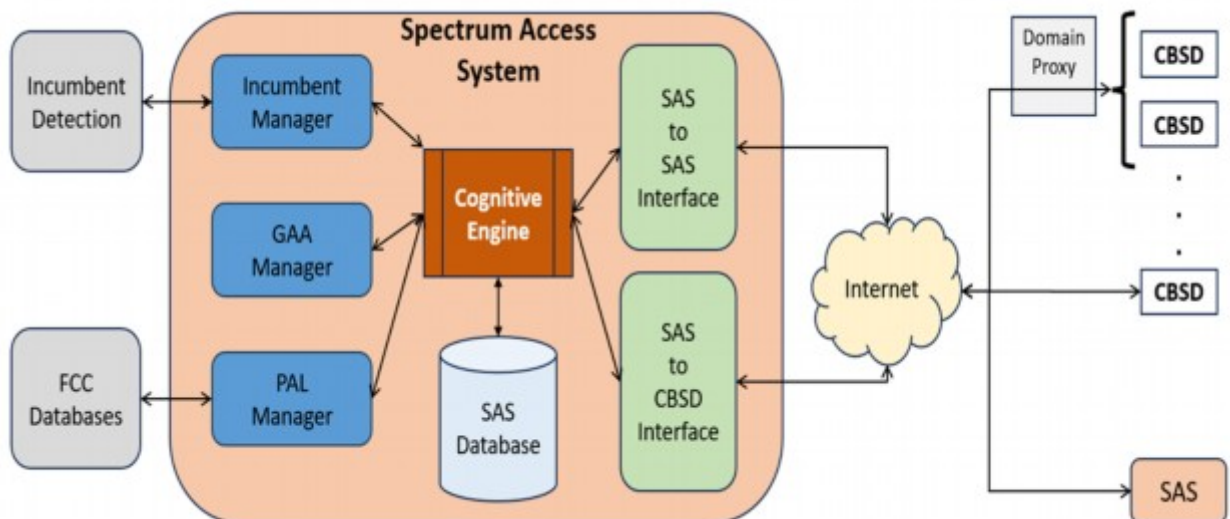


Рис. 1.5. Загальна архітектура системи доступу до спектру CBRS

Типовий SAS працює, діючи як центральна точка контакту для CBSD у своїй мережі. Кожен CBSD реєструється безпосередньо в SAS і надає актуальні дані динамічного розташування. CBSD не можуть автоматично почати передачу через канал. Вони повинні надіслати запит на надання доступу до спектру та запит на відмову від доступу. SAS повинен у будь-який час мати можливість повідомляти про доступність каналу всім підключеним CBSD. Весь зв'язок між CBSD і SAS має відповідати стандартним правилам безпеки. Winn-Forum опублікував кілька документів,

які детально описують впровадження SAS, наприклад [12 - 14] тощо. Типовий потік зв'язку на основі специфікацій WinFogum між сервером SAS і пристроєм CBSD показаний на рисунку 1.6.

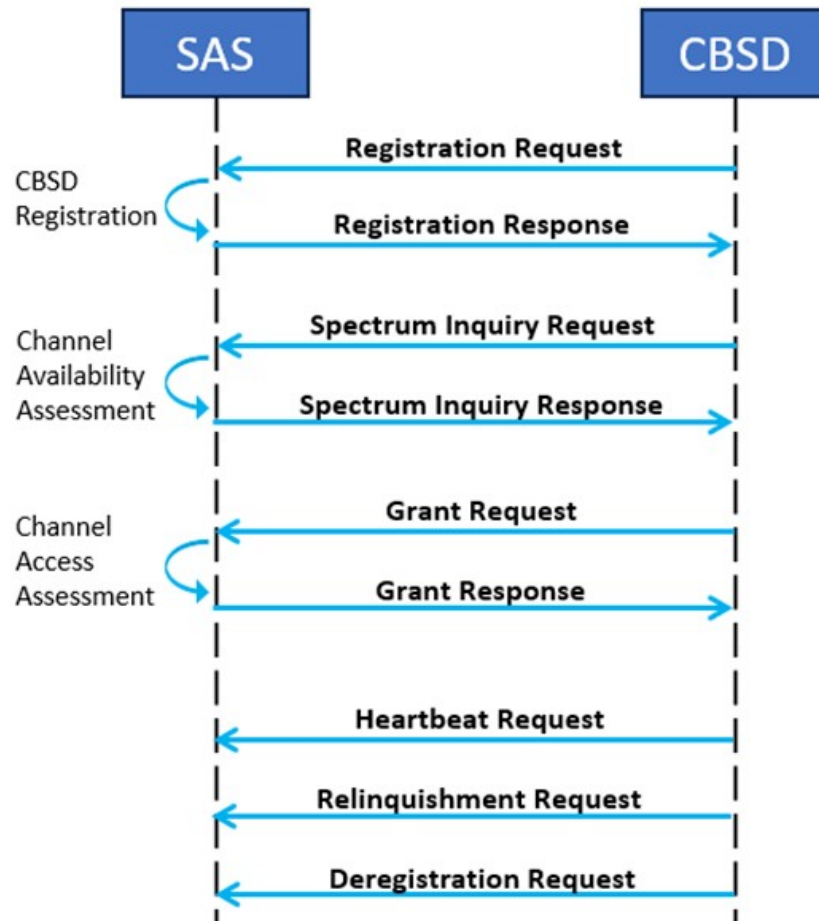


Рис. 1.6. Процедура зв'язку SAS-CBSD

Висновки до розділу

У першому розділі було проведено всебічний аналіз предметної області застосування систем динамічного доступу до спектра, зокрема розглянуто архітектуру та особливості сучасних підходів управління радіочастотним ресурсом. Описано основні концепції, що лежать в основі динамічного доступу до спектра, підкреслюючи важливість ефективного використання

обмежених радіочастотних ресурсів. Системи динамічного доступу стають дедалі актуальнішими через зростання попиту на бездротові комунікації.

Розглянуто архітектурні особливості CBRS як однієї з найбільш перспективних систем управління динамічним доступом до спектра. CBRS реалізує трирівневу модель доступу (Incumbent Access, Priority Access License, General Authorized Access), що дозволяє ефективно координувати використання спектра між різними категоріями користувачів. Проаналізовано функціонування ключових компонентів системи, зокрема Spectrum Access System (SAS) і Environmental Sensing Capability (ESC). Розділ підтвердив актуальність впровадження систем динамічного доступу до спектра для оптимізації використання радіочастотних ресурсів. Описані технології та підходи створюють основу для подальшого розвитку бездротових мереж нового покоління, що забезпечують високу ефективність, захист критичних систем і доступність спектра для широкого кола користувачів.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МЕТОДОЛОГІЯ КОНТЕКСТНО- ОБІЗНАНИХ СИСТЕМ ДОСТУПУ ДО СПЕКТРУ

2.1. Дослідження спектральних характеристик та технічних проблем в системах динамічного доступу

Зростаючий попит на бездротове підключення та обмежена доступність ресурсів спектру призвели до розробки інноваційних рішень у управлінні спектром протягом багатьох років. Уряди в усьому світі намагаються збільшити кількість спектру, доступного для використання, або надаючи прямий, пріоритетний доступ, або дозволяючи новим гравцям співіснувати з діючими операторами. Система доступу до спектру (SAS) Citizens Broadband Radio Service (CBRS) стала ключовою технологією в динамічному управлінні спільним спектром, ефективно вирішуючи проблеми розподілу спектру. Цілі CBRS полягали в тому, щоб сприяти зростанню та заохочувати інновації у сфері бездротового широкосмугового доступу, надавати сільським або ізольованим громадам економічно ефективні бездротові послуги та сприяти створенню нових робочих місць і бізнесу, що, у свою чергу, забезпечить економічний поштовх промисловості та уряду.

Адаптація системи доступу до спектру, яка дуже нагадує ту, яка використовується в діапазоні CBRS, для діапазонів, що не є CBRS, представляє свої власні проблеми. Базове нормативне середовище, технологічні складності та унікальні характеристики різних діапазонів частот посилюють цю складність. У цьому розділі ми спочатку висвітлюємо деякі проблеми, пов'язані зі спільним використанням спектру між кількома діапазонами, а потім описуємо наш підхід до вирішення деяких із цих проблем за допомогою системи доступу до багатодіапазонного спектру.

Регуляторні перешкоди становлять значну проблему під час адаптації системи, подібної до SAS, до діапазонів, відмінних від CBRS, оскільки нормативні рамки, що регулюють використання спектру, відрізняються в

різних діапазонах і регіонах. Діапазон CBRS у Сполучених Штатах є прикладом складнощів, пов'язаних із впровадженням такої системи. Наприклад, FCC у Сполучених Штатах запровадила правила та стандарти, розроблені для діапазону CBRS, визначаючи трирівневий доступ — постійний, пріоритетний доступ і загальний авторизований доступ. Ці правила керували розробкою та розгортанням SAS, забезпечуючи чесне та ефективне спільне використання спектру між різними користувачами. Адаптація подібної системи до інших діапазонів вимагає повного розуміння унікального нормативного середовища в цих конкретних діапазонах або регіонах, оскільки інші діапазони можуть мати зовсім інші правила доступу до спектру. Якщо система, подібна до SAS, хоче перетнути міжнародні кордони, у ній потрібно впровадити відмінності між нормативними рамками між країнами.

Крім того, деякі групи можуть мати різну політику ліцензування, яка сама по собі може бути функцією місця розташування чи мети. У CBRS частина смуги пропускання стала доступною для неліцензованих користувачів, які можуть співіснувати з ліцензованими. Такі сценарії співіснування не можуть бути виведені безпосередньо розробниками, і вони завжди є результатом інтенсивних досліджень багатьох зацікавлених сторін протягом певного періоду часу.

2.1.1. Спектральні характеристики та технічні проблеми

Адаптація системи, подібної до SAS, до діапазонів, відмінних від CBRS, пов'язана зі складністю вирішення унікальних технічних аспектів і варіацій у різних діапазонах частот. Кожна смуга частот має відмінні характеристики розповсюдження, які суттєво впливають на бездротовий зв'язок. Щоб мати можливість адаптувати систему, подібну до SAS, до діапазонів, що не є CBRS, ми повинні включити більш глибокий

розуміння унікальних характеристик, таких як розповсюдження сигналу, схеми перешкод і різноманітні умови навколишнього середовища в

будівлі SAS. Інші фактори, такі як існуючі технології, використання суміжної смуги тощо, також вступають у дію, що означає, що будуть потрібні подальші дослідження та розробки для вирішення проблем, пов'язаних із пом'якшенням перешкод серед різноманітних послуг, з мінімальним або без збоїв. Деякі смуги також можуть мати різні вимоги до ресурсів спектру в різний час і в різних місцях, що може вимагати використання механізмів адаптивного та динамічного розподілу, що далеко виходить за рамки традиційної SAS.

Ще одна проблема пов'язана із зондуванням і моніторингом спектру. Однією з, якщо не найважливішою, частиною SAS-подібної системи є можливість ідентифікувати доступні частотні канали та присутність діючих користувачів. Адаптація цієї можливості для багатодіапазонного використання вимагатиме методів зондування, які спеціально адаптовані до вимог цільових діапазонів для точного виявлення доступного спектру та існуючих операторів.

2.1.2. Діючий захист в системі

У діапазоні CBRS система SAS спеціально розроблена для виявлення та захисту діючих абонентів від шкідливих перешкод. Це необхідно було зробити, оскільки постійні користувачі, такі як федеральні служби та військово-морські радари, використовували цей діапазон для зв'язку задовго до того, як він був відкритий для громадськості. Таким чином, ймовірно, що адаптація такої системи для інших діапазонів включатиме складне завдання точної ідентифікації існуючих користувачів, їхніх прав на використання спектра та їх технологій. У той час як діапазон CBRS містить відносно чітко визначений ландшафт користувачів у діапазоні CBRS, інші діапазони можуть приймати більш різноманітний і складний набір діючих користувачів. Наприклад, цільова група може містити урядові, комерційні, наукові та/або академічні компанії. Ця складність зростає багаторазово, якщо припустити, що кожен із цих класів чинних операторів може мати різний ступінь

чутливості до перешкод. Оскільки CBRS SAS покладається на базу даних для керування інформацією про поточного користувача, адаптація цієї системи до інших діапазонів потребує створення подібних баз даних також для інших діапазонів.

2.2. Методологія модифікованої архітектури системи доступу до спектру із механізмом політики

Попередній розділ висвітлює деякі основні перешкоди, з якими стикаються розробники, намагаючись адаптувати систему, подібну до CBRS-SAS, для діапазонів, які не є CBRS. Усі ці виклики є надзвичайно складними та вимагатимуть багатопрофільної команди з досвідом розробки програмного забезпечення, радіотехніки та формування політики для їх вирішення. Однак метою цього дослідження є не створення повністю функціональної багатодіапазонної системи доступу до спектру, а радше створення прототипу інструменту, який сприятиме дослідженню спільного використання спектру в інших діапазонах. Очікується, що кінцевий продукт буде використовуватися науковою та академічною спільнотою для тестування та оцінки нових алгоритмів і технологій, які допоможуть у вирішенні вищезгаданих проблем.

З цією метою ми пропонуємо включити новий когнітивний інструмент під назвою механізм політики (PE) для визначення операційної політики для системи доступу до спектру. Оскільки нормативні проблеми є основною перешкодою для спільного використання багатодіапазонного спектру, PE дозволяє користувачам SAS визначати нормативні та робочі налаштування для роботи SAS. За допомогою цієї функції ми можемо не лише вказати CBRS SAS працювати в діапазоні, відмінному від CBRS, але також можемо описати, як робочі налаштування SAS можуть змінюватися в різних діапазонах. Подібним чином, деякі аспекти спектральних характеристик (такі як втрати на трасі, характерні для смуги) можна моделювати на основі кожної смуги. У цій роботі ми не розглядаємо проблеми, пов'язані зі

зондуванням і моніторингом спектру, і залишаємо решті академічної спільноти розробку кращих рішень для зондування. РЕ також можна використовувати для поточного захисту за допомогою зон динамічного захисту або ексклюзивних радіозон. Ця інформація може бути надана безпосередньо або їх можна отримати з SAS. В обох випадках межі перешкод між несучою та шумом будуть визначені РЕ.

Враховуючи вищезазначене, беручи уроки з моделі CBRS-SAS і спираючись на існуючу SAS з відкритим вихідним кодом [16], була створена багатодіапазонна система доступу до спектру (MB-SAS) з такими функціями:

- повністю функціональний і з відкритим кодом для досліджень і розробок, оскільки використовує стандарти зв'язку CBRS,
- внутрішній механізм політики, який слугує автоматизованим адміністратором для прийняття рішень про робочі діапазони та правила роботи для окремих діапазонів,
- можна виконати багаторівневу класифікацію користувачів і радіопристроїв, а самі правила класифікації можна налаштувати відповідно до спектру та нормативних вимог.

Уявна архітектура багатодіапазонної системи доступу до спектру з механізмом політики показана на рисунку 2.1.

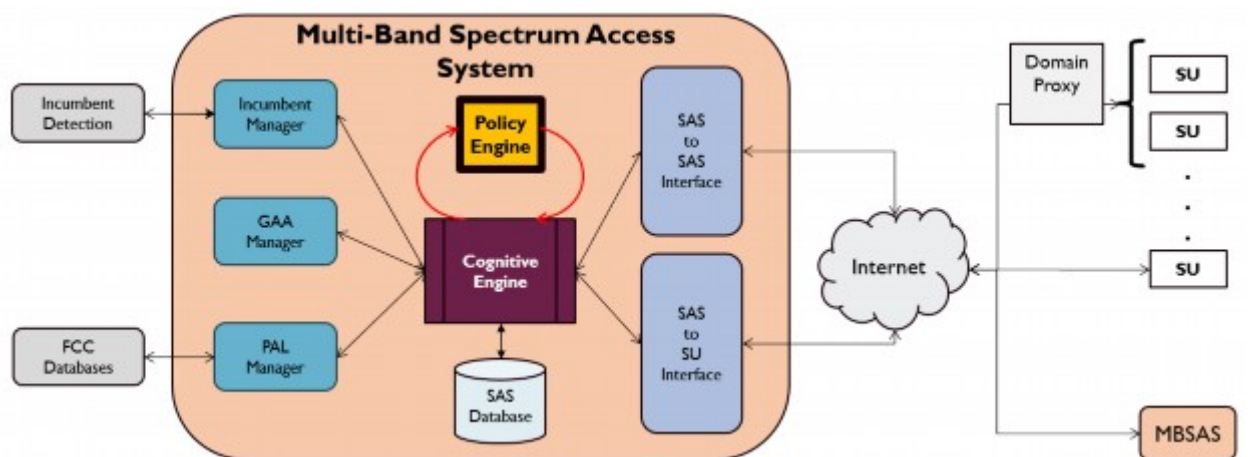


Рис. 2.1. Модифікована архітектура SAS із механізмом політики

Усі компоненти цього багатодіапазонного SAS поведуться точно так само, як типовий CBRS SAS за відсутності будь-якого введення з боку адміністратора. Щоб він поведився як багатодіапазонний SAS, адміністратор має змінити конфігурацію ЛИШЕ CBRS SAS їхнім вимогам.

Адміністратор також може надати робочі параметри для певного спектру, такі як мінімальна та максимальна робочі частоти, розмір каналу, правила пріоритетного доступу тощо. Ці параметри надаються PE у форматі JSON, який читається людиною, який потім обробляє та зберігає цю інформацію для використання в майбутньому. Когнітивний механізм системи доступу до спектру використовує цю збережену інформацію для визначення правил роботи для спільного використання спектру. Ми показуємо цю функціональність на рисунку 2.2.

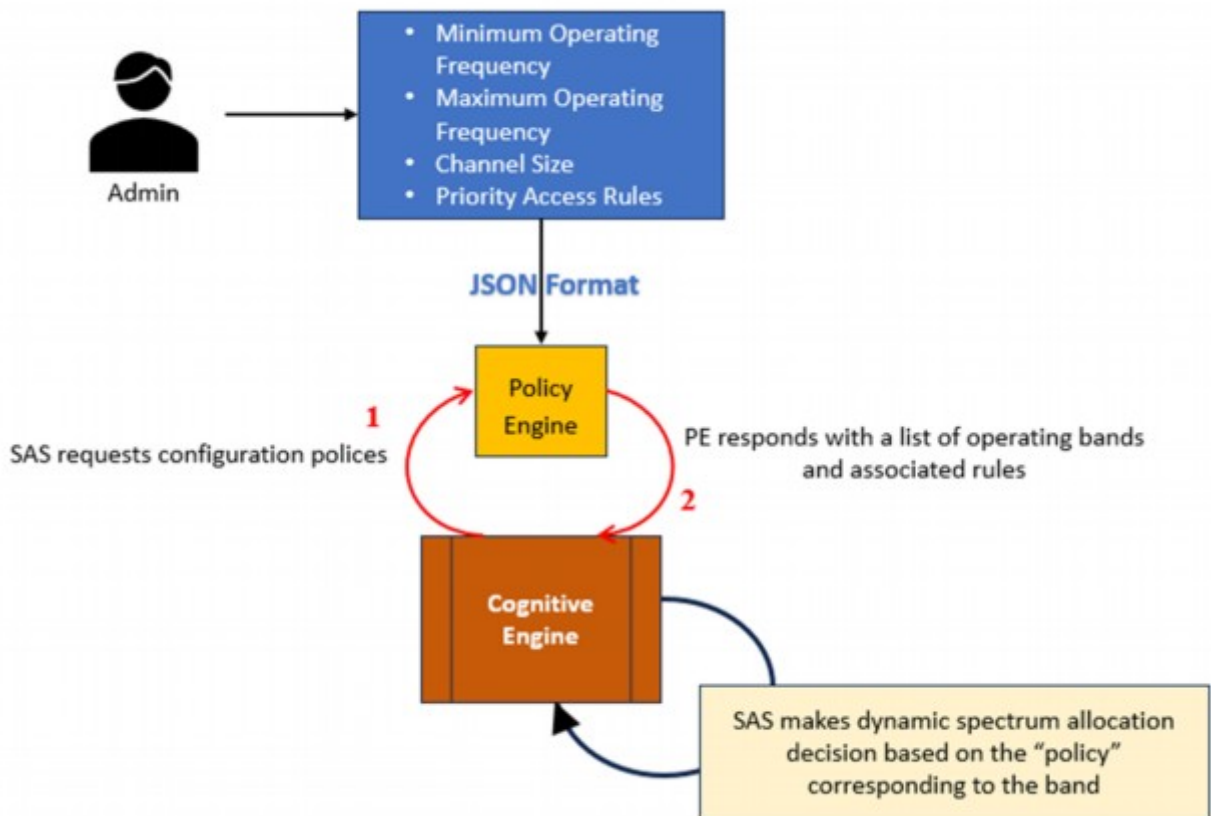


Рис. 2.2. Функціональні можливості SAS із заданими адміністратором налаштуваннями

Додавання механізму політики до архітектури SAS дозволило нам працювати зі змодельованою версією SAS з відкритим кодом у діапазонах, суміжних із діапазоном CBRS. Через академічний характер цього дослідження більшість традиційних функцій SAS залишилися без змін. Основна увага була зосереджена на перевірці можливості динамічно конфігурованого SAS, який може працювати в більш ніж одному діапазоні.

Механізм політики, є цікавим відкриттям цих спроб. Початкова мета полягала в тому, щоб SAS міг працювати в більш ніж одному діапазоні без зміни будь-яких вимог SAS (таких як класи користувачів). Однак за допомогою спеціального механізму політики ми змогли скинути певні вимоги SAS без значних змін коду. Наприклад, під час дослідження ми додали правило, яке змінило розмір каналу PAL з 10 МГц до 5 МГц, таким чином збільшивши кількість каналів, доступних у діапазоні 3550–3650 МГц, з 10 до 20 без змін коду.

2.3. Врахування контексту в системі доступу до спектру

Спільне використання спектру в складній сфері бездротового зв'язку діє в багатогранному контексті, що охоплює безліч факторів, які впливають на справедливий і ефективний розподіл радіочастотного спектру між різними користувачами та послугами. Хоча цей контекст може здатися простим, він переплітає низку складних факторів, які суттєво впливають на спільне використання спектру, представляючи власні проблеми та можливості рівною мірою. За своєю суттю контекст спільного використання спектру є комбінацією кількох критичних елементів, пов'язаних із радіозв'язком. Серед них — детальне розуміння конкретних частотних вимог для кожного діапазону. Цей аспект окреслює індивідуальні потреби в різноманітних бездротових службах і технологіях, кожна з яких вимагає певних частотних діапазонів, керуючись відмінними характеристиками та передумовами продуктивності. Для забезпечення справедливого розподілу та оптимального

використання спільно використовуюваного спектру необхідний ретельний розгляд цих умов. Крім того, географічні міркування додають ще один рівень складності до парадигми спільного використання спектру. Просторові розміри, що охоплюють регіональні потреби, локальні моделі перешкод і наслідки безпосередніх користувачів або систем, глибоко впливають на стратегії надання грантів. Розуміння зв'язків між цими географічними змінними має важливе значення для гармонізації співіснування та мінімізації втручання.

Динамічний характер моделей використання ще більше підсилює складність цього контексту. Спектр підлягає різним вимогам, коливаючись між піками та затишсями у використанні, залежить від таких факторів, як час, щільність користувачів і різноманітність програм. Адаптація до цих динамічних моделей потребує гнучких механізмів розподілу, які можуть швидко реагувати на зміну вимог. Очікування щодо якості обслуговування є ще одним вирішальним фактором у цьому складному середовищі. Різноманітні програми та користувачі мають різні стандарти продуктивності та надійності. Збалансування цих розбіжних очікувань у спільному спектрі потребує виваженого підходу до розподілу та регулювання. Управління перешкодами, яке є ключовим моментом, передбачає застосування складних методів для пом'якшення конфліктів між співіснуючими користувачами. Ці методи спрямовані на мінімізацію збоїв і оптимізацію продуктивності, що має вирішальне значення для забезпечення гармонійного співжиття в обмеженому просторі спектру. Регуляторний і політичний ландшафт ще більше ускладнює спільне використання спектру. Законодавчі рамки, правила ліцензування та політики, що регулюють справедливе та ефективне використання спектру, мають глибокий вплив на механізми розподілу та спільного використання. Технологічні можливості складають важливу частину цього багатогранного контексту. Технічні можливості та обмеження систем і пристроїв впливають на ефективність механізмів і протоколів спільного використання, вимагаючи тонкого балансу між технологічним

прогресом і нормативними обмеженнями. Розуміння та навігація в цьому складному контексті мають першорядне значення для розробки ефективних стратегій спільного використання спектру, таких як динамічний доступ до спектру або когнітивні радіосистеми. Ці інноваційні підходи сприяють ефективному та рівноправному співіснуванню, визнаючи та реагуючи на різноманітні потреби та виклики, інкапсульовані в динамічній екосистемі спільного використання спектру. Щоб підкреслити актуальність контекстної інформації, у таблиці 3.1 висвітлено деяку інформацію про радіоконтекст, яка зараз використовується в бездротових системах, таких як стільникові мережі та інші локальні та персональні мережі [18].

Таблиця 2.1.

Інформація про радіоконтекст, яка зараз використовується в бездротових системах

Name	Description
ARP	Allocation and Retention Priority
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number
CQI	Channel Quality Indicator
CSO	Cell Selection Offset
MCS	Modulation and Coding Scheme
RI	Rank Indicator
RSS	Received Signal Strength
SNR	Signal-to-Noise Ratio
QCI	Quality-of-Service Class Identifier

2.4. Використання контекстної інформації в системі доступу для CBRS

Громадянська широкопasmовою радіослужба (CBRS) є новаторською ареною в області спільного використання спектру, де система доступу до спектру (SAS) діє як стрижень, організовуючи тонкий баланс між постійними

користувачами, власниками ліцензії на пріоритетний доступ (PAL) і користувачам загального авторизованого доступу (GAA). У цій складній системі використання «контексту» служить основою для ефективного та справедливого розподілу спільних ресурсів спектру, стратегічно переплітаючись через мережу різноманітних факторів, що впливають на управління спектром. Типовий SAS використовує обмежену контекстну інформацію, деякі з яких описано в наступних підрозділах.

2.4.1. Наявність і розподіл спектру

SAS завдяки вмiлому використанню контексту орієнтується в лабіринті доступності та розподілу спектру. Аналіз спектру в режимі реального часу, що охоплює діючу діяльність, розташування користувачів PAL і GAA, а також поточний сценарій використання, є наріжним каменем для динамічних процесів прийняття рішень SAS. Це складне розуміння дає змогу SAS розумно розподіляти доступний спектр, забезпечуючи мінімальні перешкоди, сприяючи оптимальному використанню.

2.4.2. Відповідність нормативним вимогам і політика

Діючи в нормативно-правовій базі, SAS ретельно інтегрує контекстуальне розуміння політик і правил у свої процеси прийняття рішень. Ця продумана інтеграція забезпечує відповідність встановленим інструкціям і правилам, зберігаючи справедливість у розподілі спектру між різними групами користувачів. Найбільш очевидним прикладом є управління спектром у межах трьох класів користувачів – діючих користувачів, пріоритетного доступу та загального доступу.

2.4.3. Динамічні фактори

SAS також включає інші динамічні фактори, пов'язані з навколишнім середовищем та робочими налаштуваннями. Міркування, що охоплюють погодні зміни, топографічні впливи та інші зовнішні змінні, враховуються в

процесі управління спектром. Ця здатність до адаптації дозволяє SAS адаптувати доступ до спектру відповідно до переважаючих умов навколишнього середовища, забезпечуючи оптимальний досвід користувача.

Традиційне використання контексту в системі доступу до спектру залишає бажати кращого. З досвіду та використання ми знаємо, що кілька важливих контекстних відомостей можна використовувати в рішеннях щодо розподілу спектру, щоб можна було покращити ефективність розподілу, одночасно задовольняючи вимоги до якості обслуговування (QoS) для багатьох типів користувачів і використання. Додавання механізму політики дозволяє нам експериментувати з новими, додатковими контекстами, які ще не були враховані під час прийняття рішень щодо доступу до спектру. У цьому розділі ми заглибимося в деякі з цих нових, додаткових контекстів і як їх можна інтегрувати в систему доступу до спектру.

У радіозв'язку ми можемо розглядати контекст як будь-яку інформацію, що характеризує ситуацію спілкування в мережі. Таким чином, у сценарії спільного використання спектру адміністратори SAS можуть використовувати додаткову інформацію або дані, такі як геопросторовий розподіл існуючих операторів і користувачів, тип даних, що передаються через них, доступний спектр, умови каналу та специфічні властивості розповсюдження смуги, поточні умови роботи та продуктивність системи. Цей контекст часто стає доступним для користувача (або системи доступу до спектру) як чутлива до часу послідовність подій, які не лише описують, як функціонує користувач, мережа чи серія взаємопов'язаних мереж, але й передають інформацію про всю мережу.

2.4.4. Контекстна класифікація

Класифікацію контексту можна здійснити багатьма способами, і з часом вчені використовували кілька різних схем для категоризації контексту. Однією з перших спроб в [17] зосереджується на класифікації контекстної інформації на дві категорії – первинний і вторинний типи. Основна

контекстна інформація включала місцезнаходження, особу та діяльність як основний контекст. Будь-яка інформація, яка може бути отримана, виведена або обчислена з однієї або кількох первинних контекстних відомостей, називається вторинною контекстною інформацією. Таким чином, первинним контекстом може бути будь-яка інформація, яку можна отримати без будь-якої форми маніпулювання даними або злиття. Як приклад, географічні координати радіокористувача є формою первинного контексту. Використовуючи цю інформацію від кількості радіокористувачів у географічному регіоні, можна визначити щільність або розподіл таких користувачів у регіоні. Такий похідний контекст є прикладом вторинного контексту. Іншим прикладом є виділення спектру для радіо, яке можна розглядати як основну форму контексту, оскільки радіо може безпосередньо передавати цю інформацію. Коли ми збираємо таку інформацію від кількох радіостанцій, включно з постійними операторами певного діапазону, ми отримуємо загальну інформацію про розподіл спектру, яка є похідним або вторинним контекстом. Таким чином, та сама інформація, яка може бути первинним контекстом в одному випадку, може бути вторинним контекстом в іншому сценарії.

Іншим способом категоризації контексту було б класифікувати їх як статичну або динамічну контекстну інформацію. Статичну контекстну інформацію можна розглядати як інформацію, яка не змінюється взагалі або змінюється мінімально протягом певного періоду часу та простору. Деякі з прикладів можуть включати географічне розташування немобільного користувача, нормативну політику, таку як державні постанови та правові обмеження, а також доступний спектр для спільного використання. І навпаки, ми можемо мати контекстну інформацію, яка може постійно змінюватися в часі та просторі. Ці контексти зазнають швидких варіацій або флуктуацій через фактори, керовані користувачем, середовищем або впровадженням. Географічне розташування немобільного радіо може бути статичним, однак для мобільного користувача воно стає динамічним

контекстом. Подібним чином доступність каналу та умови розповсюдження можуть змінюватись у часі та просторі, що робить їх динамічними за своєю природою.

Опитування в [17] висвітлює деякі інші схеми категоризації контексту та їхні відповідні сфери. Вони представляють дослідження схем категоризації з 1994 по 2011 рік у 18 публікаціях.

Незалежно від того, як ми класифікуємо контекст, важливо максимально використовувати контекст у радіозв'язку. У цьому розділі ми зосереджуємося на кількох контекстних відомостях, які ми можемо використовувати для спільного використання спектру.

- Класифікація користувачів і трафіку: типовий SAS використовує трирівневу класифікацію користувачів, яка визначає пріоритет доступу до спектру. Він не докладає зусиль для врахування типу даних, які передаються різними користувачами. Однак ми повинні мати можливість класифікувати користувачів і те, що вони передають, з більшою деталізацією. Ця категоризація сама по собі може бути статичною або динамічною. Наприклад, користувачів PAL і GAA можна додатково класифікувати за кількома пріоритетами на основі їхнього типу послуг, права власності, афільюваності або статусу ліцензії. Цей відносний пріоритет, у межах або поза класом, сам по собі може бути не статичним, а радше регулюватися політикою регуляторів спектру. Наприклад, загальні авторизовані користувачі можуть бути далі розділені на підкласи, що представляють наукових, академічних, урядових, надзвичайних і звичайних повсякденних користувачів.

- Погода та умови каналу: погода значно впливає на радіозв'язок . Під час ясної погоди радіохвилі чутливі до мінімальних втрат на шляху, пов'язаних із завмиранням, тоді як під час нетипової погоди, як-от сніг або дощ, радіохвилі зазнають значних втрат на шляху, пов'язаних із завмиранням. Цей вплив погоди на зв'язок різниться від діапазону до діапазону, оскільки кожен діапазон має різні електромагнітні

характеристики, включаючи залежні від часу умови розповсюдження, коефіцієнти ослаблення тощо.

- Оперативні налаштування: типовий SAS керує спектром, відстежуючи зайнятість спектру, заплановане використання діючими та непостійними операторами та вимоги до якості обслуговування для користувачів і класів. На додаток до цього, ми можемо також включити кілька операційних налаштувань. Наприклад, під час типової або рутинної роботи, система доступу до спектру може вести себе типовим чином. Однак особливі події можуть змінити цю монотонність. Під час нетипової події, спричиненої погодою (наприклад, торнадо, повінь), ми можемо спостерігати міграцію (тимчасову чи постійну) користувачів у безпечніші райони, що означає збільшення звичайного використання в деяких областях і збільшення екстреного використання в постраждалих районах. Подібним чином, якщо ми візьмемо приклад футбольного матчу, зміна розподілу користувачів і збільшення попиту на спектр спостерігатиметься протягом коротшого періоду часу.

- Динамічні зони захисту: CBRS SAS використовує концепцію зон відчуження для захисту діючих операторів від шкідливих перешкод. Розвиваючи цю концепцію, ми можемо застосувати використання динамічно обчислюваних захищених зон, у яких діяльність вторинного користувача може бути зупинена на кінцевий час через поточну активність на або кількох каналах. Ці зони можна динамічно створювати за допомогою передових методів аналізу та даних геоінформаційної системи.

Наведені вище приклади представляють лише частину доступної контекстної інформації. Системи доступу до спектру також можуть використовувати інші форми контексту, такі як активність або присутність основних користувачів і їхні вимоги до перешкоди, допустимі кути повороту променя для вторинних користувачів, необхідний час евакуації каналу за діапазоном і типом основного користувача тощо.

Висновки до розділу

В даному розділі розглянуто методи та методологію, що стосуються контекстно-обізнаних систем доступу до спектру. Описано ключові спектральні характеристики, які впливають на ефективність роботи систем динамічного доступу до спектру. Виявлено основні технічні проблеми, що виникають під час управління спектром, такі як перешкоди, обмеженість доступних ресурсів і необхідність забезпечення надійного захисту даних.

Розроблено підхід, який інтегрує політики управління для підвищення адаптивності та ефективності системи доступу. Модифікована архітектура забезпечує динамічне врахування змінних умов і забезпечує оптимізацію розподілу спектральних ресурсів.

Підкреслено важливість інтеграції контекстної інформації, яка дозволяє краще адаптувати управління доступом до спектру залежно від поточних умов. Описано методи, які враховують місцезнаходження, тип користувачів і поточні потреби, що сприяє ефективному розподілу спектру.

Детально розглянуто вплив таких факторів, як наявність і розподіл спектру, відповідність нормативним вимогам, а також динамічні умови використання. Запропоновано підхід до контекстної класифікації, що дозволяє більш ефективно використовувати спектральні ресурси та дотримуватися правил регуляторних органів.

У результаті дослідження сформовано комплексну методологію, яка інтегрує контекстну інформацію для покращення управління доступом до спектру в сучасних комунікаційних системах, зокрема для застосування у рамках CBRS.

РОЗДІЛ 3. ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ МЕТОДІВ ТА МЕТОДОЛОГІЇ КОНТЕКСТНО-ОБІЗНАНИХ СИСТЕМ ДИНАМІЧНОГО ДОСТУПУ

3.1. Методика пріоритезації на основі контексту

Додавання великої кількості контекстної інформації до управління спектром не принесе жодних результатів, якщо ця інформація не буде використана для прийняття рішень щодо розподілу. Типові рішення SAS використовують деяку контекстну інформацію під час прийняття рішень про розподіл. Ми маємо намір розвивати це далі та досліджувати можливості, які виникають під час розробки такої системи. У наступних параграфах ми опишемо, як може відбуватися пріоритетність користувачів на основі контексту.

Під час ясної погоди відеотрафік громадської безпеки та трафік нижчого пріоритету можуть передаватися з однаковим пріоритетом. Однак, якщо погода змінюється з ясної на дощову або снігову, тоді трафік нижчого пріоритету може передаватися зі зниженою потужністю або якістю обслуговування або навіть зовсім в іншому діапазоні, щоб сукупні перешкоди основним користувачам не погіршувалися через дощ або сніг пов'язане згасання.

У типовій або звичайній роботі розподіл спектру може здійснюватися для всіх класів вторинних користувачів з однаковим пріоритетом. Однак, якщо зареєстровано нетипову подію, ці пріоритети можна динамічно коригувати. Наприклад, якщо природне лихо, таке як торнадо або повінь, вдарить по географічному регіону, тоді цей регіон зіткнеться зі збільшенням передачі аварійного трафіку. У цьому регіоні цей екстрений трафік матиме вищий пріоритет, ніж звичайний відео чи голосовий трафік. Подібним чином особлива подія, як-от святкова подія, також призведе до переміщення щільності користувачів до певних кишень у географічному регіоні. У таких регіонах через збільшення кількості активних користувачів і передач

вторинним користувачам знову може бути запропоновано працювати на знижених рівнях потужності, щоб можна було зменшити їхні сукупні перешкоди основним користувачам.

Діючий захист є найважливішою особливістю або можливістю будь-якої системи доступу до спектру. Користувачі PAL отримують другий пріоритет, і будь-який залишковий спектр стає доступним для користувачів GAA. Однак адміністратори та регулятори SAS можуть забажати більш точного контролю над розподілом, ніж пропонують ці два класи. Користувачі можуть бути поділені на кілька класів і груп, залежно від їх приналежності та типу даних, що передаються. Як приклад, давайте розглянемо географічний регіон, у якому ми маємо поєднання наукових, академічних, комерційних і урядових організацій, що використовують спільний спектр. Тут державним установам, які передають конфіденційну інформацію, можна надати вищий пріоритет, ніж іншим комерційним користувачам.

Так само комерційним користувачам, економічна незалежність яких залежить від використання спільного спектру для надання комерційних послуг своїм користувачам, можна надати вищий пріоритет, ніж звичайним користувачам, які збираються використовувати спільний спектр для розваг, особистого використання чи хобі.

Тепер, коли очевидно, що контекстно-залежні пріоритети мають численні переваги та застосування, їхнє включення в систему доступу до спектру є досить важливим і є вагомим аргументом для себе. З цією метою ми запроваджуємо контекстну структуру пріоритезації (PF) , яка генерує та зберігає записи про користувачів, клас користувачів і пріоритети трафіку користувачів.

Ці пріоритети можуть бути оновлені, коли спостерігаються зміни в контексті, безпосередньо або за допомогою зовнішніх засобів. Система доступу до спектру повинна мати можливість посилатися на ці пріоритети перед прийняттям рішень щодо доступу до спектру.

3.2. Реалізація архітектури контекстно-залежної системи доступу

Умовна архітектура багатодіапазонної контекстно-залежної системи доступу до спектру з механізмом визначення пріоритетів показана на рисунку 3.1. Усі компоненти цього контекстно-залежного SAS можуть вести себе точно так само, як типовий CBRS SAS за відсутності будь-якого введення з боку адміністратора.

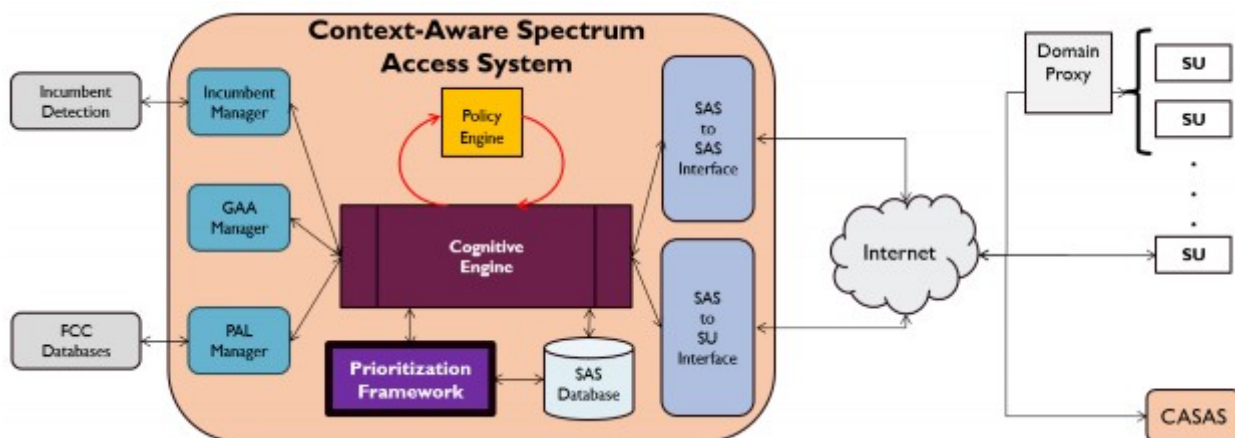


Рис. 3.1. Модифікована архітектура SAS із системою визначення пріоритетів

Як у попередньому розділі, механізм політики використовується для встановлення операційних політик, специфічних для діапазону спектру, для системи доступу до спектру. Ці політики містять правила для визначення пріоритету користувача для доступу до спільного спектру в різних контекстах або для визначення того, як контекстні змінні впливають на показники пріоритету в різних діапазонах. Структура пріоритезації отримує доступний контекст і політику, засновану на контексті, від когнітивного механізму SAS і обчислює оцінки пріоритетів для користувача/послуги. Ці оцінки зберігаються в базі даних SAS і перераховуються щоразу, коли SAS спостерігає зміну контексту. Ми показуємо весь робочий процес на рисунку 3.2.

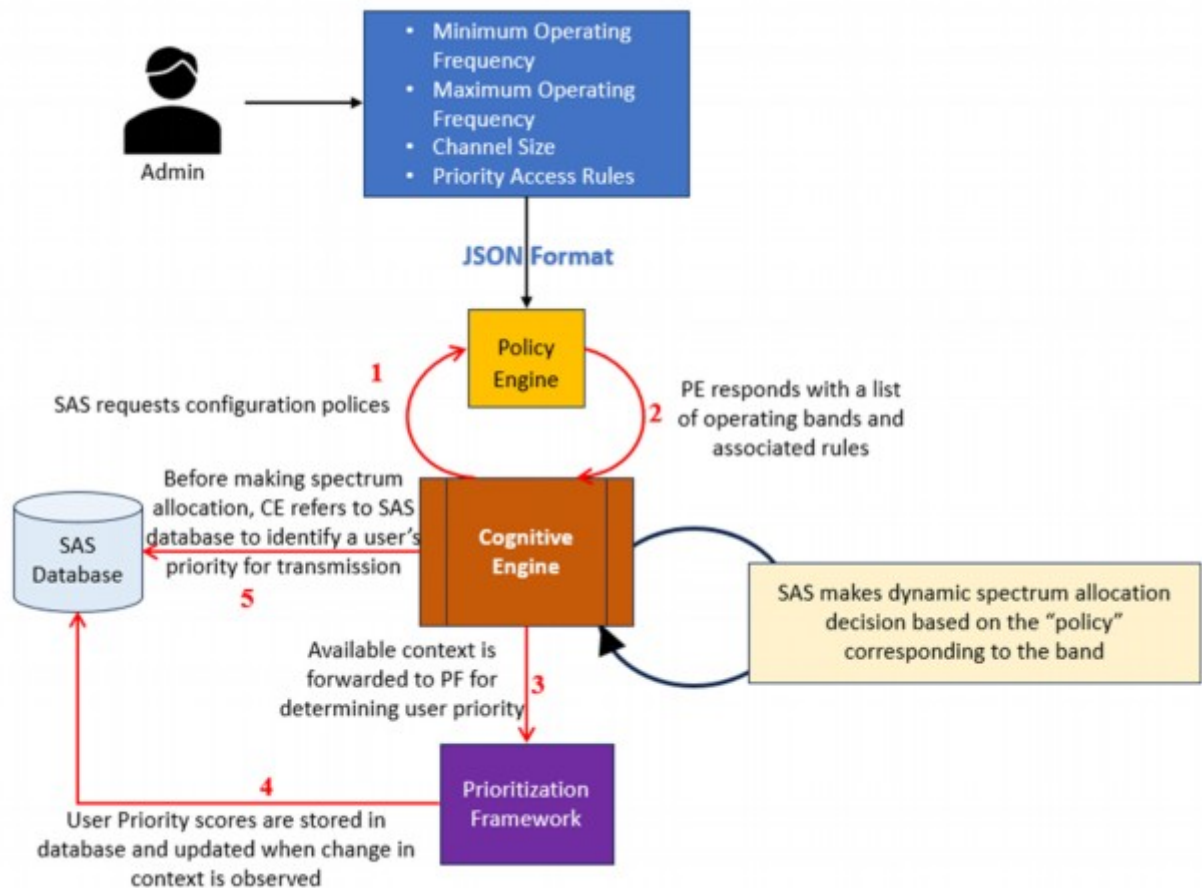


Рис. 3.2. Пріоритезація на основі контексту функціональності SAS

3.3. Представлення системної архітектури контекстно-залежної системи динамічного доступу до спектру

На рисунку 3.1 ми показали умовну архітектуру нашої багатодіапазонної, контекстно-залежної системи доступу до спектру з механізмом політики та системою визначення пріоритетів. Ми називаємо цю систему системою контекстно-залежного динамічного доступу до спектру (CA-DSA). Архітектура системи CA-DSA показана на рисунку 3.3. Наша реалізація відповідає традиційному шаблону архітектури MVC. Щоб забезпечити відповідність специфікаціям WinnForum, ми створили об'єктні моделі WinnForum на Python. Разом з цим, моделі об'єктів CA-DSA, що стосуються операцій (наприклад, для користувачів, грантів, пристроїв тощо), утворюють компонент Model архітектури MVC. Компонент View реалізовано

в адміністративній графіці інтерфейсу користувача (GUI), створений за допомогою Angular Framework. Контроль у нашому програмному забезпеченні здійснюється через спеціальні контролери для керування користувачами, пристроями, грантами, налаштуваннями та базою даних. Щоб уможливити швидке тестування та дослідження, ми надаємо розфасовану базу даних SQL із нашою кодовою базою, яка служить базою даних SAS.

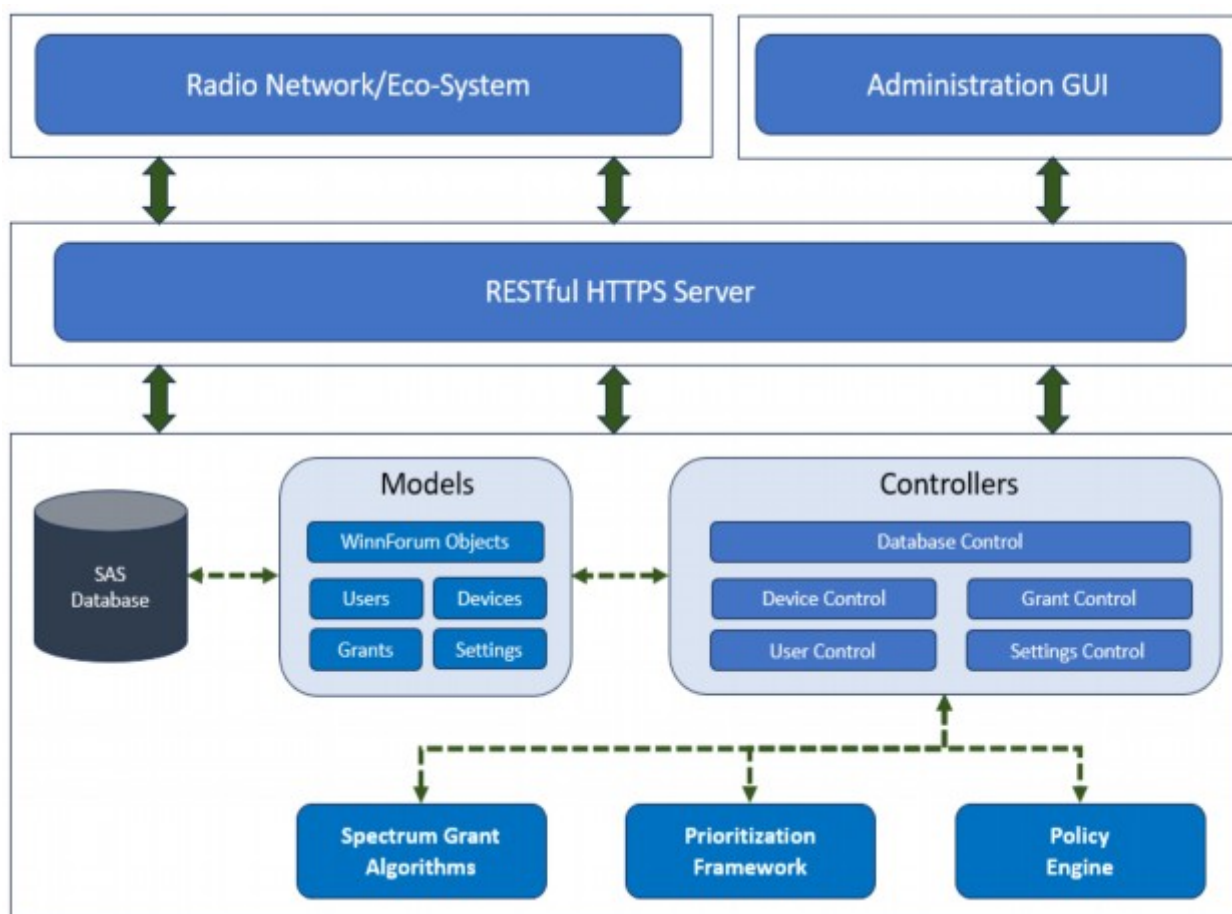


Рис. 3.3. Системна архітектура контекстно-залежної системи динамічного доступу до спектру (CA-DSA)

CA-DSA можна підключати до зовнішніх радіомереж (таких як бездротові випробувальні стенди VT) або мережевих імітаторів. Зв'язок із зовнішнім світом, будь то радіомережа чи адміністративний графічний інтерфейс у браузері користувача, відбувається через Flask сервера через

протокол HTTPS. Через академічний характер цього програмного забезпечення ми обрали Flask для швидкої розробки та тестування. На виробничому рівні нам доведеться використовувати більш потужні сервери.

Платформа пріоритезації є основним компонентом системи CA-DSA і забезпечує контекстне визначення пріоритетів користувачів у радімережі. PF генерує та призначає динамічну оцінку пріоритету кожному користувачеві, яка пізніше використовується для розриву зв'язків, пов'язаних із запитами на надання спектру.

Використання Policy Engine з PF дозволяє нам точно налаштувати пріоритети користувачів за допомогою контекстно-залежних політик. Сьогодні ми використовуємо зважені агрегації на основі політики для обчислення показників пріоритету. Однак цей процес можна додатково вдосконалити за допомогою інтеграції ML/AI для визначення пріоритету користувача.

3.4. Проведення тестування імплементації моделей та методів предметної області

У цій роботі ми прагнемо досягти таких цілей дослідження:

- RQ1: Створити програмний інструмент доступу до спектру з відкритим вихідним кодом, який буде функціонально ідентичним CBRS SAS, але дозволить дослідникам налаштовувати та експериментувати з діапазонами, відмінними від CBRS.
- RQ2: влити контекстну обізнаність і контекстну пріоритезацію в таку систему доступу до спектру та використовувати її для підтримки контекстної пріоритезації для конкретного діапазону.
- RQ3: експериментально перевірити покращення статистики розподілу грантів у радіоекосистемі з різними користувачами/радіостанціями, які спільно використовують один або більше діапазонів спектру.

Ця робота забезпечує контекстно-залежну динамічну систему доступу до спектру з відкритим кодом, яка підтримує багатодіапазонну роботу та контекстно-залежну пріоритезацію своїх користувачів. Ми досягли RQ1, створивши механізм політики, за допомогою якого дослідники могли б вручну налаштувати частотні діапазони, на яких працює система.

RQ2 забезпечується шляхом додавання контекстно-залежної системи визначення пріоритетів, яка закладає основу для контекстної обізнаності в CA-DSA. Разом із механізмом політики це дає змогу застосовувати правила пріоритезації в CA-DSA для певного діапазону.

Ми досягли RQ3 завдяки численним експериментам у змодельованому радіосередовищі та продемонстрували вплив контекстно-залежного пріоритету на підвищення ефективності розподілу грантів CA-DSA порівняно з традиційним CBRS SAS. У наступних розділах ми детально описуємо експерименти з нашою багатовимірною системою CA-DSA для досягнення наших цілей.

3.4.1. Використання сервера OpenSAS

Сервер OpenSAS - це реалізація з відкритим вихідним кодом Системи Доступу до Спектру (SAS), яка є ключовим компонентом для спільного використання спектру в діапазоні CBRS (Citizens Broadband Radio Service).

Основні функції сервера OpenSAS:

- Управління доступом до спектру: Сервер OpenSAS відповідає за розподіл доступного спектру CBRS між різними користувачами, враховуючи їх пріоритети та потреби.

- Запобігання перешкодам: OpenSAS гарантує, що різні користувачі CBRS не створюють перешкод один одному, динамічно розподіляючи частоти та контролюючи потужність передачі.

- Підтримка різних типів користувачів: OpenSAS підтримує три рівні доступу до CBRS: інкубенти (військові та супутникові системи), ліцензовані користувачі та користувачі загального доступу (GAA).

- Інтеграція з базами даних: OpenSAS використовує бази даних для зберігання інформації про користувачів, пристрої, канали та інші параметри системи.

- Взаємодія з датчиками ESC: OpenSAS отримує дані від датчиків ESC (Environmental Sensing Capability) для виявлення радарів та інших систем, які потребують пріоритетного доступу до спектру.

- Масштабованість: OpenSAS може бути масштабований для управління великими мережами CBRS за допомогою доменних проксі-серверів (DP).

- Відкритий вихідний код: OpenSAS - це проект з відкритим вихідним кодом, що дозволяє дослідникам та розробникам вивчати, модифікувати та покращувати його функціональність.

На першому етапі дослідження ми використали SAS з відкритим кодом, щоб продемонструвати основні можливості SAS. Важливість нашої роботи полягає в міграції від примітивних API WebSocket до визначеного WinnForum протоколу HTTPS для зв'язку SAS-CBSD і створення нової, більш сумісної версії відкритого SAS. Протягом цього часу ми також активно працювали над тим, щоб зв'язок між SAS і CBSD був якомога ближчим до процедур, визначених WinnForum. Проте, заради свободи експериментів, ми адаптували кілька нових параметрів, як це зробили автори відкритого SAS Virginia Tech. У наступних підрозділах ми показуємо роботу SAS і CBSD.

Сервер openSAS має працювати у своєму віртуальному середовищі. Це необхідно, оскільки наш код використовує кілька відкритих бібліотек python для реалізації важливих функцій. Після налаштування віртуального середовища, дотримуючись інструкцій у попередньому розділі реалізації, ми можемо активувати його за допомогою `source lib/Scripts/activate`. Це сервер HTTPS потім можна запустити, запустивши скрипт `Python rest_server.py`. Цей сценарій створює сервер HTTPS, який прослуховує порт 8000 замість традиційних портів 443/8443.

CBSD (базова станція громадянського широкосмугового радіозв'язку) надсилає HTTPS POST-запит для реєстрації в SAS (системі доступу до спектру). Цей запит на реєстрацію містить таку інформацію, як IP-адреса пристрою, ідентифікатор FCC, параметри його встановлення (наприклад, географічне розташування, висота антени, коефіцієнт посилення антени тощо) та інші показники, що забезпечує його відповідність специфікаціям WinnForum.

Для досліджень ми використовуємо vtParams як додатковий параметр, який було додано для сприяння нашим симуляціям та експериментам. Слід зазначити, що цей параметр сам по собі є комбінацією кількох фрагментів інформації, таких як мінімальна та максимальна робоча частота CBSD та частота дискретизації, тип вузла та його мобільність.

```
$ source ../lib/Scripts/activate
(lib) (base)
Saurav@ghost MINGW64 /d/USB/workspace/research/SAS/mdsas (develop_mdsas)
$ python rest_server.py
* Serving Flask app 'OpenSAS'
* Debug mode: on
WARNING: This is a development server. Do not use it in a production deployment. Use a production WSGI server instead.
* Running on all addresses (0.0.0.0)
* Running on https://127.0.0.1:8000
* Running on https://10.0.0.214:8000
Press CTRL+C to quit
```

Рис. 3.4. Запуск сервера OpenSAS у режимі розробки

```
1 {
2     "nodeIp": "192.168.40.205",
3     "userId": "sasuser",
4     "fccId": "FCCIDEXAMPLE123",
5     "callSign": "RANDOMCS",
6     "cbsdCategory": "A",
7     "cbsdInfo": { ... },
8     "airInterface": {"radioTechnology": "E_UTRA"},
9     "installationParam": {
10        "latitude": "12.345678", "longitude": "98.7654321", "height": "
        23", "heightType": "AGL", "horizontalAccuracy": "1", "
        verticalAccuracy": "0.98", "indoorDeployment": "0", "antennaAzimuth"
        : "3", "antennaDowntilt": "4", "antennaGain": "5", "eirpCapability":
```

```

11     "6", "antennaBeamwidth": "7", "antennaModel": "ASXE11"
12   },
13   "measCapability": ["RECEIVED_POWER_WITH_GRANT", "
RECEIVED_POWER_WITHOUT_GRANT"],
14   "groupingParam": [ ... ],
15   "cp1SignatureData": { ... },
16   "vtParams": {
17     "minFrequency": 3560e6, "maxFrequency": 3670e6, "minSampleRate"
: 5e6, "maxSampleRate": 6e6, "nodeType": "VT-Wireless-Registered
Radar", "isMobile": "false"
18   }
}

```

Лістинг 3.1. Запит на реєстрацію

```

1 {
2   "message": "Nodes have been added.",
3   "registrationResponse": [{
4     "cbsdId": 1,
5     "response": { "responseCode": "0", "responseMessage": "SUCCESS"
6   }
7 },
8   "status": 1
9 }

```

Лістинг 3.2. Відповідь реєстрації

Після успішної реєстрації SAS надсилає пристрою відповідь про реєстрацію, повідомляючи йому його ідентифікатор (ID) в екосистемі SAS. У відповіді також надаються код відповіді (responseCode) та повідомлення про відповідь (responseMessage), причому код відповіді 0 вказує на успішну реєстрацію. Деякі з інших поширених кодів помилок: 102 (вказує на відсутній параметр у запиті), 104 (вказує на помилку під час перевірки TLS-сертифіката), 300 (вказує на непідтримуваний спектр у запиті) тощо.

Перш ніж CBSД зможе розпочати передачу в діапазоні CBRS, він може вирішити отримати інформацію про доступність каналу від SAS. Для цього він може передати запит на доступ до спектру (Spectrum Inquiry Request)

через HTTPS. Цей запит спрощений за своєю метою та функціонуванням. CBSD надає діапазон частот для запиту, а SAS виконує пошук спектру та відповідає відповіддю на запит доступу до спектру (Spectrum Inquiry Response). Відповідь повідомляє CBSD про тип каналу, активні гранти на канал (якщо такі є), максимально допустиму еквівалентну ізотропно випромінювану потужність (EIRP) та правило, яке застосовується до каналу. Код відповіді 0 означає успішну комунікацію між SAS та CBSD.

```
1 {
2   "spectrumInquiryRequest": [{
3     "cbsdId": 1,
4     "inquiredSpectrum": [{
5       "lowFrequency": 3560000000, "highFrequency": 3570000000
6     }]
7   }]
8 }
```

Лістинг 3.3. Запит на спектр

```
1 {
2   "spectrumInquiryResponse": [{
3     "availableChannel": [
4       {
5         "channelType": "PAL", "frequencyRange": { "
6         highFrequency": 3570000000.0, "lowFrequency": 3560000000.0 }, "
7         grantRequest": [], "maxEirp": 30, "ruleApplied": "FCC_PART_96"
8       }
9     ],
10    "cbsdId": 1,
11    "response": { "responseCode": "0", "responseMessage": "SUCCESS"
12  }
13  }],
14  "status": 1
15 }
```

Лістинг 3.4. Відповідь на запит спектру

CBSD може запросити дозвіл на передачу в каналі, надіславши запит на надання до SAS. Використовуючи це повідомлення HTTPS, CBSД інформує SAS про діапазон робочих частот і максимальну EIRP. SAS використовує цю інформацію та перевіряє свою базу даних, щоб підтвердити, що жоден інший пристрій або діючий оператор наразі не використовує запитуваний канал. Визначивши, що канал вільний, SAS резервує запитаний канал для використання та надсилає успішну відповідь. Ця відповідь не лише містить робочі параметри для CBSД, але також надає інформацію про інтервал серцевих скорочень і час закінчення дозволу.

```
{
  2  "grantRequest": [{
  3    "cbsdId": "1",
  4    "operationParam": {
  5      "maxEirp": "20", "operationFrequencyRange": { "minFrequency":
3560e6, "maxFrequency": 3570e6 }
  6    },
  7    "vtGrantParams":{
  8      "startTime" : "2023-10-26T00:00", "endTime": "2023-10-26T00
:30", "approximateByteSize" : "1024", "dataType" : "audio"
  9    }
 10  }]
11 }
```

Лістинг 3.5. Запит на надання гранту

```
1  {
  2  "grantResponse": [{
  3    "cbsdId": "1",
  4    "channelType": "PAL",
  5    "grantExpireTime": "2023-10-26T00:05",
  6    "heartbeatInterval": 60,
  7    "measReportConfig": [ "RECEIVED_POWER_WITH_GRANT", "
```

```

RECEIVED_POWER_WITHOUT_GRANT" ],
8     "operationParam": {
9         "maxEirp": "20", "operationFrequencyRange": { "
highFrequency": 3570000000.0, "lowFrequency": 3560000000.0 }
10     },
11     "response": { "responseCode": "0", "responseMessage": "SUCCESS"
}
12 }],
13 "message": "Grants have been processed",
14 "status": 1
15 }

```

Лістинг 3.6. Відповідь на надання гранту

Як і у випадку із запитом на реєстрацію, ми модифікували запит на надання для підтримки додаткових «vtGrantParams», за допомогою яких CBSD інформує SAS про тривалість часу, протягом якого він запитує дозволи, а також про тип і приблизний розмір пакетів, які будуть надіслані. Цей додатковий параметр дозволяє спростити операції SAS і забезпечити вищий рівень контролю.

CBSD, якому надано дозвіл на спектр, не може розпочати передачу інформації безпосередньо після надання. Натомість йому потрібно надіслати запит Heartbeat до SAS і дочекатися відповіді від SAS, перш ніж він зможе почати передачу інформації. Запит Heartbeat (дослівно "серцебиття") - це періодичний сигнал, який надсилається одним пристроєм (наприклад, CBSD в мережі CBRS) до іншого (наприклад, SAS), щоб підтвердити свою присутність та працездатність. Він також повинен повторно надсилати цей запит через регулярний проміжок часу, який називається інтервалом серцевих скорочень, щоб зберегти авторизацію для передачі. SAS відповідає на запит Heartbeat, надсилаючи інформацію, таку як transmitExpireTime і робочі параметри CBSD. Крім того, з кожним ударом CBSD може надіслати запит на поновлення надання спектру. Якщо цей параметр присутній у

запиті, CBSD вказав на свій намір продовжувати доступ, і SAS може відповісти, схваливши цей запит або відхиливши його.

```
1 {
2   "heartbeatRequest": [{
3     "cbsdId": 1,
4     "grantId": 1,
5     "grantRenew": false,
6     "operationState": "GRANTED",
7     "measReport": {}
8   }]
9 }
```

Лістинг 3.7. Запит Heartbeat

```
1 {
2   "heartbeatResponse": [{
3     "cbsdId": "sasuser",
4     "grantExpireTime": "2023-10-26T00:30",
5     "grantId": 1,
6     "heartbeatInterval": 60,
7     "operationParam": {
8       "maxEirp": 30,
9       "operationFrequencyRange": { "highFrequency": 3570000000.0,
10      "lowFrequency": 3560000000.0 }
11     },
12     "response": { "responseCode": "0", "responseMessage": "SUCCESS"
13     },
14     "transmitExpireTime": "2023-10-26T00:05"
15   }],
16   "status": 0
17 }
```

Лістинг 3.8. Відповідь Heartbeat

CBSD, який більше не бажає використовувати спільний спектр для зв'язку, може повернути свій спектр, надіславши запит на відмову до SAS.

Цей запит містить інформацію про саму CBSD (у формі ідентифікатора CBSD) та грант, від якого відмовляються (у формі ідентифікатора гранту). SAS відповідає повідомленням про успіх після успішної відмови.

```
1 {
2   "relinquishmentRequest": [{
3     "cbsdId": 1,
4     "grantId": 1
5   }]
6 }
```

Лістинг 3.9. Запит на відмову від надання

```
1 {
2   "relinquishmentResponse": [{
3     "cbsdId": 1,
4     "grantId": 1,
5     "response": { "responseCode": "0", "responseMessage": "SUCCESS"
6   }
7   }],
8   "status": 1
9 }
```

Лістинг 3.10. Відповідь на відмову від надання

CBSD може відкликати свою реєстрацію в SAS, якщо він має намір припинити використання спільного спектру або якщо він переміщується в географічну зону, яка не обслуговується поточною SAS. У випадку останнього, CBSD може скасувати реєстрацію в поточній SAS, а потім зареєструватися в новій SAS. Запит на скасування реєстрації містить ідентифікатор CBSD як тіло запиту HTTPS POST, і SAS відповідає, надсилаючи відповідь SUCCESS. Усі активні дозволи, пов'язані з пристроєм, негайно скасовуються після скасування реєстрації.

```

1  {
2  .."grantRequest": [
3  ....{
4  ..... "cbsdId": "1",
5  ..... "operationParam": {
6  .....   "maxEirp": "20",
7  .....   "operationFrequencyRange": {
8  .....     "minFrequency": 4560e6,
9  .....     "maxFrequency": 4570e6
10 .....   }
11 ..... },
12 ..... "vtGrantParams": {
13 .....   "startTime": "2024-10-26T00:00",
14 .....   "endTime": "2024-10-26T00:30",
15 .....   "approximateByteSize": "1024",
16 .....   "dataType": "audio"
17 ..... }
18 ..... }
19 ..]
20 }
21

```

a) Grant запит

```

1  {
2  .."grantResponse": [
3  ....{
4  ..... "response": {
5  .....   "responseCode": "103",
6  .....   "responseData": "Frequency range outside of license",
7  .....   "responseMessage": "INVALID_VALUE"
8  ..... }
9  ....},
10 ..],
11 .."message": "Grants have been processed",
12 .."status": 1
13 }

```

a) Grant відповідь

Рис. 3.5. Помилковий запит на надання, який намагається подати запит на надання спектру для діапазону 4560–4570 МГц

3.4.2. Багато діапазонна система доступу до спектру

У цьому розділі ми розглядаємо RQ1. У попередньому розділі ми продемонстрували можливості SAS та навели приклади, що показують

зв'язок між CBSD та SAS. Слід зазначити, що у всіх таких прикладах ми навмисно використовуємо діапазон CBRS (3550 МГц - 3750 МГц) як робочий діапазон. Якщо ми спробуємо використати будь-які інші діапазони в нашому зв'язку, SAS негайно відповідає, що запитуваний діапазон частот знаходиться поза межами ліцензованого спільного спектру.

Щоб перевірити цю функцію, ми можемо надіслати запит на грант до SAS із зазначеними робочими частотами поза діапазоном CBRS. У нашій симуляції ми змусили CBSD запитувати доступ до каналу 4560 МГц - 4570 МГц. SAS виявляє це як поза межами свого робочого діапазону та надсилає відповідь з кодом відповіді 103 та повідомленням про відповідь INVALID_VALUE. Він також надає дещо детальнішу інформацію як дані відповіді, які читаються як "Діапазон частот поза ліцензією". Ми бачимо цю поведінку в дії на рисунку 3.5, де 3.5 а показує помилковий запит на грант, а 3.5 , показує відповідну відповідь.

Щоб увімкнути симуляції SAS в діапазонах, відмінних від CBRS, нам потрібно вказати SAS працювати в цих діапазонах. Це можна зробити за допомогою двох модифікацій:

- Додавання параметра CBRS_ONLY до налаштувань SAS. Під час звичайних операцій CBRS цей параметр встановлено як логічне значення TRUE. Однак адміністратор SAS може змінити це налаштування на FALSE, що змушує SAS припинити покладатися на жорстко закодовані робочі діапазони частот. Замість цього когнітивний механізм тепер шукає політики всередині механізму політик.

- Використання механізму політик (PE) для надання SAS робочих меж та прийнятних правил або політик в межах цих меж.

Налаштування SAS CBRS_ONLY встановлено як False, а потім ми налаштовуємо механізм політик, як показано в лістингу 3.11. У цьому прикладі ми налаштували SAS для роботи як в діапазоні CBRS, так і в діапазоні, відмінному від CBRS. Частоти, обрані для нашої демонстрації, взяті з нашого попереднього прикладу, де запит на грант з тими ж частотами

було відхилено. Межі робочого діапазону SAS передаються за допомогою параметрів min-op-fr та max-op-fr, які означають мінімальну та максимальну робочі частоти відповідно для SAS.

```
1 BANDS = {
2   "CBRS": {
3     "min-op-fr": 3550, "max-op-fr": 3700, # in MHz
4   },
5   "Non-CBRS": {
6     "min-op-fr": 4550, "max-op-fr": 4700, # in MHz
7   }
8 }
```

Лістинг 3.11. Приклад конфігурації Policy Engine

```
1 {
2   "grantResponse": [
3     {
4       "cbsdId": "1",
5       "channelType": "PAL",
6       "grantExpireTime": "2024-11-13T00:25",
7       "heartbeatInterval": 60,
8       "measReportConfig": [
9         "RECEIVED_POWER_WITH_GRANT",
10        "RECEIVED_POWER_WITHOUT_GRANT"
11      ],
12      "operationParam": {
13        "maxEirp": "20",
14        "operationFrequencyRange": {
15          "highFrequency": 4570000000.0,
16          "lowFrequency": 4560000000.0
17        }
18      },
19      "response": {
20        "responseCode": "0",
21        "responseMessage": "SUCCESS"
22      }
23    }
24  ],
25  "message": "Grants have been processed",
26  "status": 1
27 }
```

Рис. 3.6. Успішна відповідь на запит на надання спектру для 4560–4570

МГц

Цього разу SAS реагує на наш запит по-іншому завдяки залученню механізму політик. На рисунку 3.6 ми показуємо відповідь від SAS після того, як обидві вищезгадані конфігурації були зроблені, і SAS працює з підтримкою кількох діапазонів. Як ми бачимо, цього разу надсилається відповідь SUCCESS (УСПІХ).

Слід зазначити, що SAS не змінив жодної іншої частини своєї відповіді, оскільки його форма роботи подібна до такої в діапазоні CBRS. Якщо, наприклад, до підключеного пристрою потрібно передати іншу встановлену максимальну EIRP, адміністратору або науковцям доведеться внести додаткові зміни в конфігурацію.

3.4.3. Пріоритезація з урахуванням контексту в SAS

У цьому розділі ми розглядаємо RQ2, який стосується введення контекстної обізнаності в систему доступу до спектру та використання цієї обізнаності для визначення пріоритетів користувачів для розподілу дозволу на спектр у різних контекстах. У попередньому розділі ми представили механізм політики для вирішення нашої проблеми. Подібним чином у цьому розділі ми представляємо ще один новий компонент під назвою Структура пріоритетів. Цей фреймворк працює в парі з когнітивним механізмом SAS і генерує пріоритетні бали для всіх зареєстрованих користувачів. Оцінка пріоритету – це зважена сума всіх контекстних факторів, які наразі впливають на роботу користувачів у радіочастотному діапазоні.

Щоб перевірити функціонування системи доступу до спектру з включенням структури пріоритезації, ми моделюємо мережу користувачів, що працюють у різних контекстах, і генеруємо їхні оцінки пріоритетів із SAS. Ми також показуємо, як ця оцінка пріоритету використовується для розірвання зв'язків, коли користувачі з одного класу чи групи запитують дозвіл на використання того самого набору частот. Експерименти проводились у два етапи. Перший етап демонструє підтвердження концепції визначення пріоритетів на основі контексту та закладає основу для другого

етапу. На другому етапі експерименту ми використаємо налаштування з першого етапу, а потім покажемо, як контекстний пріоритет використовується для визначення рішень про розподіл гранту.

Оцінки пріоритету – це числові значення, які представляють динамічну ієрархію для користувачів у мережі. Це дозволяє нам класифікувати користувачів (як діючих, так і другорядних) у межах їхніх класів і членства в групах із вищим рівнем деталізації. Ці оцінки є цілими за замовчуванням і на даний момент не приймають значення з плаваючою комою. Щоб проілюструвати цю функцію, ми використовуємо приклад «погода» як контекст.

Погода є важливим прикладом контексту. Під час дощової погоди супутниковий зв'язок погіршується через значну втрату шляху та завмирання. Це означає, що базові приймачі матимуть нижчий поріг для перешкод, тобто сукупні перешкоди вторинних користувачів для основного приймача повинні бути значно нижчими. І навпаки, під час ясної погоди супутниковий зв'язок не зазнає такого сильного завмирання, що передбачає вищий поріг перешкод. За відсутності діючих операторів ми можемо змодельовати той самий сценарій, хоча й дещо інший. Ми розглядаємо приклад двох користувачів, які зараз працюють у двох різних географічних зонах, але під керуванням однієї системи доступу до спектру. Перший користувач перебуває в регіоні з ясною погодою, а другий користувач – у районі з дощовою погодою. Традиційно SAS працює за принципом «першим прийшов – першим обслужено», тобто якщо два користувачі з однаковим пріоритетом SAS запитують один і той же ресурс, то користувач, який першим запитав SAS, отримує можливість використовувати ресурс першим. У нашому випадку, оскільки наша мета — розірвати цю монотонну поведінку та запровадити динамічні рішення, ми використовуємо контекстно-залежні оцінки пріоритету, які відображають, хто першим скористається ресурсом.

Щоб виконати цю операцію, ми імітуємо двох подібних користувачів PAL і розміщуємо їх у двох гіпотетичних географічних місцях. Перший користувач знаходиться на 12,345678 градусів на північ і 98,7654321 градусів на схід. Другий користувач також присутній на тій самій довготі, але на іншій широті 13,345678 градусів на північ. Зауважте, що в цьому моделюванні ми не використовуємо фактичні дані про погоду для перевірки стану погоди в цих місцях. Натомість погода жорстко закодована в симуляції шляхом зміни коду системи пріоритетів таким чином, що перший користувач завжди перебуває в ясну погоду, а другий користувач завжди в дощову погоду.

У попередньому підрозділі ми використовували контекстно-залежну структуру пріоритетів, щоб визначити відносні пріоритети радіостанцій у мережі. Цей вид схеми пріоритезації можна використовувати для прийняття рішень щодо розподілу спектру. Системи доступу до спектру працюють за принципом «перший прийшов, перший обслужений», що означає, що якщо два пристрої мережі з однаковою позицією в ієрархії користувачів (наприклад, два користувачі PAL або два користувачі GAA в CBRS) надсилають конфліктні запити на надання, той, хто запитує спектр першим, отримує доступ. У нашій реалізації SAS ми додатково розрізняємо цих користувачів на основі їхніх пріоритетних балів. Коли система отримує запити на надання гранту від кількох пристроїв, які намагаються отримати доступ до одного каналу одночасно, ми використовуємо оцінку пріоритету пристрою, щоб визначити, хто переможе на аукціоні грантів. Пристрій з найвищим PS виграє аукціон. У попередньому розділі ми змодельовали 2 користувачів з різними оцінками пріоритету. У цьому розділі ми покажемо, як суперечливі запити на гранти можна вирішити за допомогою балів пріоритету.

```
1 {  
2   "grantRequest": [{  
3     "cbsdId": "1",
```

```

4     "operationParam": {
5         "operationFrequencyRange": {"minFrequency": 4560e6, "
maxFrequency": 4570e6 }
6         ...
7     },
8     ...
9 },
10 {
11     "cbsdId": "2",
12     "operationParam": {
13         "operationFrequencyRange": { "minFrequency": 4560e6, "
maxFrequency": 4570e6 }
14         ...
15     },
16     ...
17 }
18 }

```

Лістинг 3.12. Надання запитів від пристроїв

У наведеному вище випадку пристрій із cbsdId 2 має оцінку пріоритету 4, а пристрій із cbsdId 1 має оцінку 1. Через це, коли запити на надання надсилаються обома пристроями одночасно, другий пристрій виграє раунд аукціону. У наведеному вище списку визначення кількох запитів на надання в одному HTTP-виклику є нашим способом показати паралельність запитів.

У відповідь SAS надсилає повідомлення GRANT_CONFLICT до першого пристрою та як SUCCESS на другий пристрій, як показано на рисунку 3.7.

На рисунку показано, що перший запит на грант був успішно виконаний (код відповіді "0"), а другий запит був відхилений через конфлікт грантів (код відповіді "401").

Ймовірно, конфлікт виник через те, що другий CBSD запросив доступ до частотного діапазону, який вже був наданий іншому CBSD або недоступний з інших причин.

```
1  [
2  "grantResponse": [
3    {
4      "cbsdId": "2",
5      "channelType": "PAL",
6      "grantExpireTime": "2024-10-26T00:05",
7      "heartbeatInterval": 60,
8  > "measReportConfig": [...
11  ],
12  "operationParam": {
13    "maxEirp": "20",
14    "operationFrequencyRange": {
15      "highFrequency": 4570000000.0,
16      "lowFrequency": 4560000000.0
17    }
18  },
19  "response": {
20    "responseCode": "0",
21    "responseMessage": "SUCCESS"
22  }
23  },
24  {
25    "cbsdId": "1",
26    "channelType": "PAL",
27    "grantExpireTime": "2024-10-26T00:30",
28    "heartbeatInterval": 60,
29  > "measReportConfig": [...
32  ],
33  "response": {
34    "responseCode": "401",
35    "responseMessage": "GRANT_CONFLICT"
36  }
37  }
38  ],
39  "message": "Grants have been processed",
40  "status": 1
41  ]
```

Рис. 3.7. Відповідь на надання для обох пристроїв із показом пріоритетів на основі контексту

3.4.4. Контекстно-залежне спільне використання спектру

Ми розширюємо приклад багатодіапазонної, контекстно-залежної пріоритизації в системі доступу до спектру цей експеримент за допомогою зовнішнього програмного симулятора для моделювання радіоекосистеми. У нашому експерименті ми моделюємо два набори користувачів/радіостанцій,

які відчують різні погодні умови в симульованому місті Блексбург, штат Вірджинія, як показано на рисунку 3.8. Перший набір (ζ_1) користувачів знаходиться на півночі Блексбурга і стикається з дощовою погодою, тоді як другий набір (ζ_2) користувачів на півдні Блексбурга стикається з ясною погодою. Крім того, ми припускаємо, що всі користувачі в нашому експерименті мають ліцензії PAL, і в будь-який момент часу в діапазоні може співіснувати максимум 7 користувачів PAL. Для наших експериментів ми встановлюємо максимально допустимі пороги перешкод для користувачів на основі контексту: -80 дБм/10 МГц за ясної погоди та -96 дБм/10 МГц за дощової погоди.



Рис. 3.8. Налаштування симуляції

Спочатку ми розглянемо випадок роботи, подібної до традиційної CBRS SAS, тобто розподіл спектру без контекстно-залежної пріоритизації. На рисунку 3.9 показано розподіл обох наборів користувачів у Блексбурзі, а їхній внесок перешкоди в призначених їм каналах показано за допомогою

кольорових кіл. Вважається, що всі користувачі/радіостанції працюють на рівні -30 дБм/10 МГц.

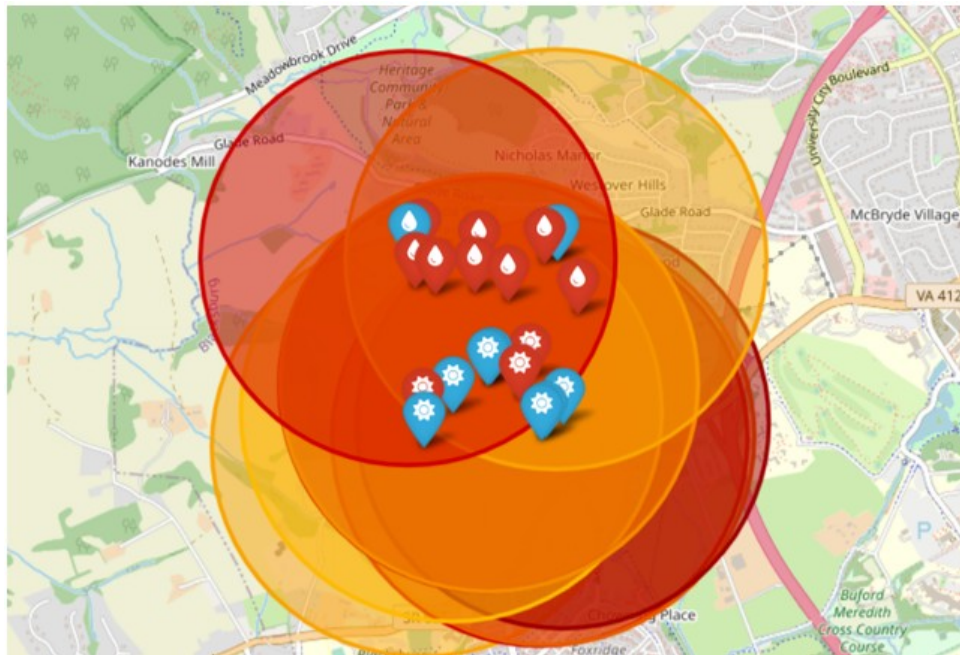
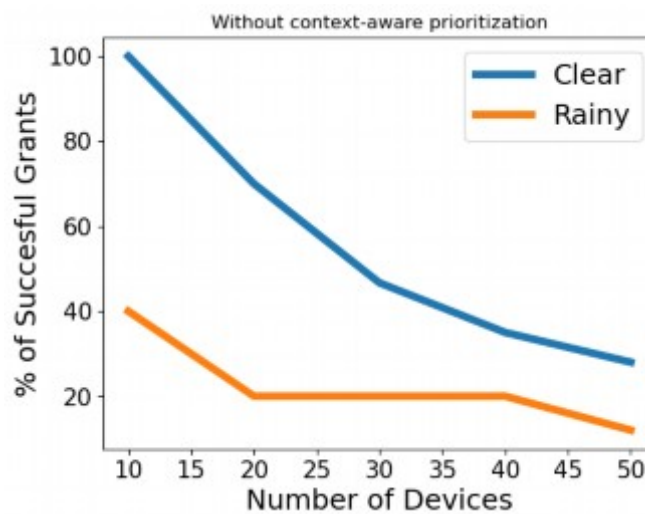


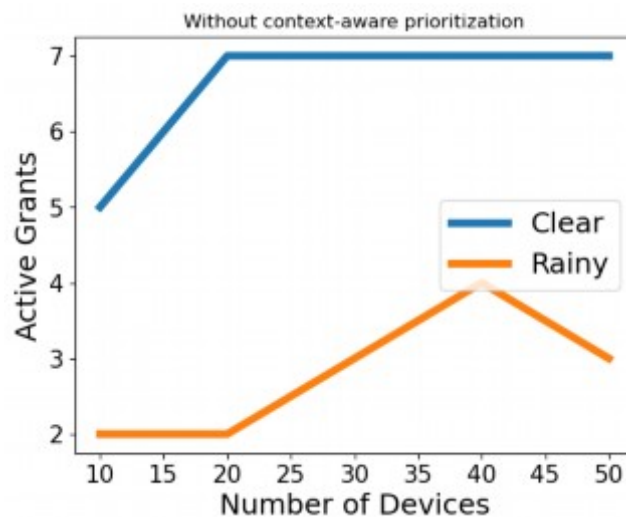
Рис. 3.9. Розподіл грантів без визначення пріоритетів з урахуванням контексту, як у традиційному CBRS SAS

Без контекстно-залежної пріоритизації типова CBRS SAS розподіляє гранти на спектр, як правило, за принципом "хто перший прийшов, той перший отримав". У нашій симуляції запити на гранти спочатку надсилаються користувачами з ζ_1 , а потім користувачами з ζ_2 . Через це ми можемо бачити з рисунка 5.6, що користувачі з ζ_1 мають меншу ймовірність отримати грант на спектр, ніж ті, що знаходяться в ζ_2 , оскільки запити на гранти від користувачів з ζ_1 отримуються після того, як отримано запити на гранти від ζ_2 . Ми бачимо, що деякі користувачі з ζ_1 все ще можуть передавати, тоді як деякі з ζ_2 - ні. Це відбувається через випадковість наших експериментів. Пристрої запитують доступ до спектру до одного з 7 каналів PAL, і сам канал визначається випадковим чином. 3 пристрої в ζ_2 неактивні через конфлікти грантів (тобто канал використовується іншим користувачем) з іншими пристроями.

Ми повторюємо цей експеримент багато разів, змінюючи розподіл та кількість робочих радіопристроїв у симульованій радіоекосистемі. Це робиться для того, щоб вивчити вплив збільшення кількості пристроїв на обмеженій території. З підписунків на рисунку 3.10 ми помічаємо, що зі збільшенням кількості пристроїв відсоток успішних грантів зменшується, а кількість активних грантів збільшується. Оскільки все більше і більше пристроїв починають працювати поблизу один одного, негативний вплив шкідливих перешкод стає більш вираженим.



а)



б)

Рис. 3.10. Вплив розподілу радіопристроїв на успішні та активні гранти за різних погодних умов у типовому CBRS SAS

Враховуючи пороги перешкод, CA-DSA відхиляє запити на гранти з подібними параметрами, що й у активного гранту, якщо обидва запити надходять близько один до одного. Тому, зі збільшенням скупченості в будь-якому наборі кількість успішних грантів монотонно зменшується, і ми спостерігаємо те саме за обох типів погодних умов. Пристрої, що працюють за ясної погоди, мають кращий показник успішності завдяки правилу "хто перший прийшов, той перший отримав". На рисунку 3.10 а показано відсоток успішних грантів від кількості пристроїв у кожному наборі за різних погодних умов. Ми бачимо, що користувачам, які наразі насолоджуються ясною погодою, надається більше грантів, ніж користувачам, які стикаються з дощовою погодою (що означає погіршення зв'язку). Оскільки ми моделюємо користувачів PAL, максимальна кількість активних грантів у кожному наборі не перевищує 7 у будь-який момент часу.

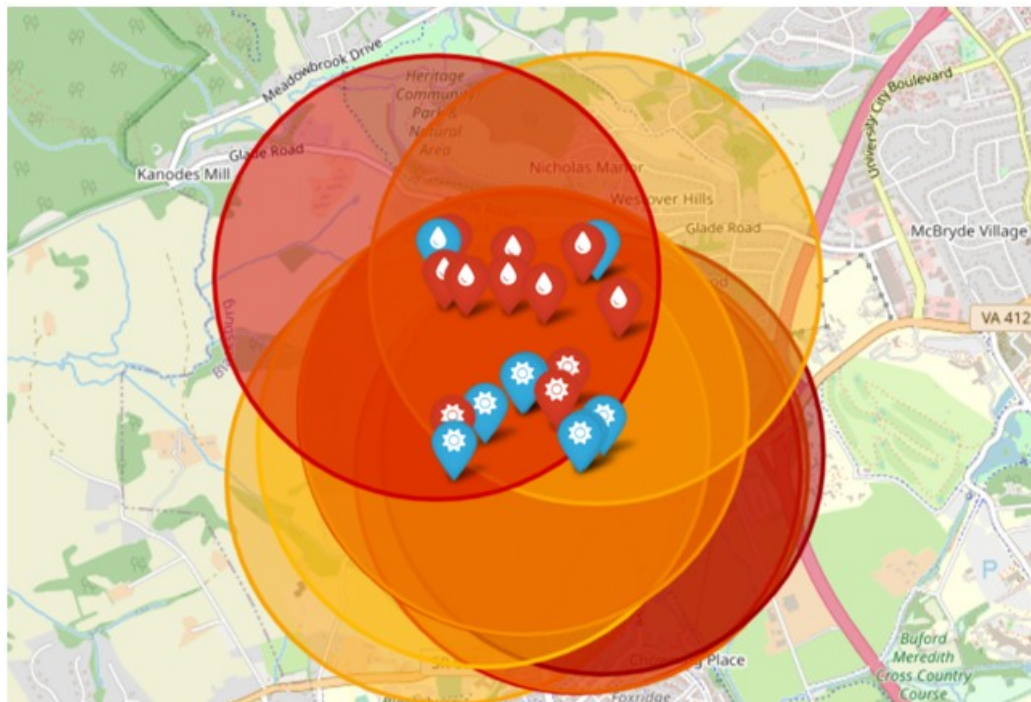
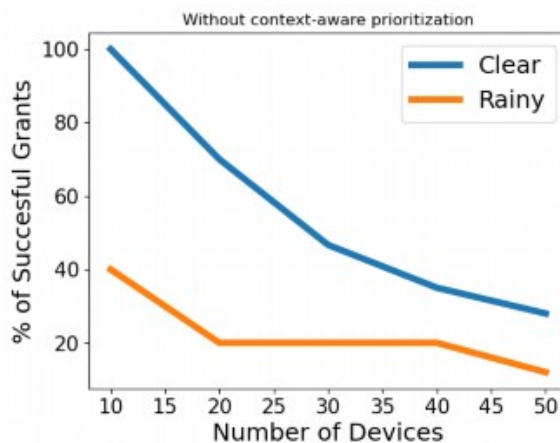


Рис. 3.11. Розподіл гранту з контекстно-залежним пріоритетом у CA-DSA

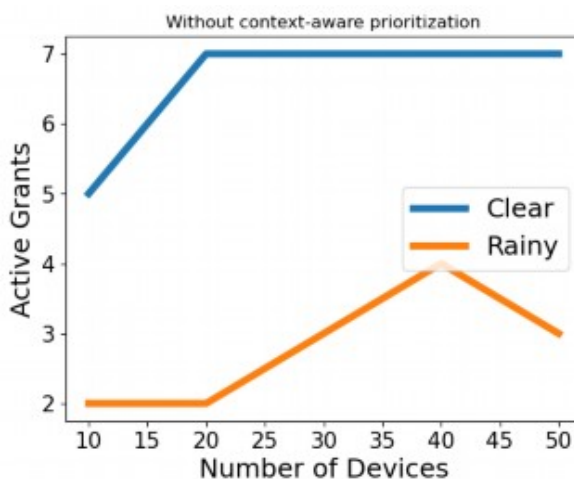
Система CA-DSA використовує обізнаність про контекст для пріоритизації користувачів на основі доступної контекстної інформації. Як і раніше, ми будемо оперувати двома наборами користувачів за різних

погодних умов (ясна та дощова). На рисунку 3.11 показано геопросторовий розподіл користувачів у симуляції. Крім того, як і раніше, передбачається, що користувачі $\zeta 2$ надсилають запити на гранти перед користувачами $\zeta 1$.

Ми помічаємо різну різницю в розподіленіх грантах порівняно з минулим разом. Цього разу більшість грантів на спектр (наприклад, всі гранти на рис. 3.11) були надані користувачам у $\zeta 1$, а не тим, що в $\zeta 2$. Це пояснюється тим, що пристрої $\zeta 1$ мають вищий пріоритет у радіоекосистемі, оскільки вони стикаються з дощовою погодою (затухання, пов'язане з дощем, погіршує зв'язок). Графіки залежності кількості пристроїв від успішних/активних грантів показано на рисунку 3.12.



а)



б)

Рис. 3.12. Вплив розподілу радіопристроїв на успішні та активні гранти за різних погодних умов, за CA-DSA

Як і у випадку управління спектром на основі CBRS SAS, кількість успішних грантів зменшується зі збільшенням кількості пристроїв, а кількість активних грантів збільшується зі збільшенням кількості пристроїв. Однак є кілька відмінностей. У випадку контекстно-залежної пріоритизації ми бачимо, що CA-DSA намагається покращити QoS зв'язку в дощову погоду, призначаючи вищі бали пріоритету. Завдяки цьому графік для дощової погоди лежить нижче графіка для ясної погоди на рисунку 3.12.

Висновки до розділу

У третьому розділі розглянуто практичні аспекти імплементації методів та методології контекстно-обізнаних систем динамічного доступу до спектру. Розроблено методику, яка дозволяє визначати пріоритети доступу до спектру залежно від контексту використання, що підвищує ефективність управління ресурсами. Запропонована методика враховує ключові параметри контексту, такі як тип користувача, вимоги до якості обслуговування та рівень завантаженості спектру.

Виконано практичну реалізацію архітектури системи, яка використовує контекстну інформацію для адаптивного розподілу спектральних ресурсів. Впроваджено механізми, що дозволяють динамічно змінювати конфігурацію системи залежно від змін у навколишньому середовищі. Описано основні компоненти архітектури, включаючи модулі збору та обробки контекстної інформації, а також механізми прийняття рішень на основі отриманих даних. Показано, як архітектура забезпечує гнучке та ефективне управління спектром у реальному часі.

Тестування підтвердило ефективність запропонованих рішень, продемонструвавши їхню здатність покращувати продуктивність і надійність системи доступу до спектру. Використання сервера OpenSAS дозволило перевірити функціонування системи в реальних умовах, оцінити її здатність адаптуватися до різних сценаріїв.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі виконано комплексне дослідження та імплементацію підходів, які забезпечують ефективне управління спектральними ресурсами в системах динамічного доступу до спектру, зокрема у контексті використання в рамках Citizens Broadband Radio Service (CBRS).

Проведено детальний аналіз предметної області, яка охоплює системи динамічного доступу до спектру. Розглянуто особливості архітектури CBRS, що базується на трирівневій системі доступу та забезпечує гнучкість використання спектру. Розглянуто концепцію спільного використання спектру, де проаналізовано основні механізми взаємодії між різними категоріями користувачів. Описано підхід до класифікації доступу в діапазоні CBRS та засоби захисту прав користувачів. Визначено основні аспекти захисту та організації системи доступу до спектру, що мають критичне значення для надійного управління ресурсами.

Розроблено методологію модифікованої архітектури системи доступу до спектру, що використовує механізми політики для ефективного управління спектральними ресурсами. Впроваджено підходи, які враховують контекстну інформацію, зокрема місцезнаходження, динамічні фактори та вимоги регуляторних органів, для оптимізації розподілу спектру.

Запропоновано підхід до контекстної класифікації та динамічного управління доступом, що враховує наявність та розподіл спектру, а також нормативні вимоги та динамічні умови середовища.

Розроблено методику пріоритезації доступу до спектру на основі контекстної інформації, що дозволяє оптимізувати розподіл ресурсів для користувачів із різними вимогами. Реалізовано архітектуру контекстно-залежної системи доступу до спектру та виконано тестування її компонентів. У ході випробувань використано сервер OpenSAS для перевірки функціональності системи в реальних умовах.

Впроваджено багатодіапазонну систему доступу до спектру та механізми пріоритезації з урахуванням контексту, які забезпечують ефективне використання спектру та зменшують конфлікти між користувачами. Продемонстровано контекстно-залежне спільне використання спектру, що сприяє підвищенню гнучкості та адаптивності системи.

Результати дослідження підтверджують, що інтеграція контекстної інформації у системи динамічного доступу до спектру дозволяє значно покращити ефективність використання спектральних ресурсів. Запропоновані методи та підходи забезпечують гнучке та адаптивне управління спектром, відповідно до сучасних вимог бездротових комунікаційних систем.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. FCC, Auction of flexible-use licenses in the 2.5 GHz band for next generation wireless services, July, 2022, Federal Communications Commission Public Notice DA 22-736, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DA-22-736A1.pdf>.
2. FCC, “FNPRM: Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band,” vol. Docket 12-354, ed. Washington D.C., 2014.
3. M. M. Sohal, M. Yao, T. Yang and J. H. Reed, ”Spectrum access system for the citizen broadband radio service,” in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 7, pp. 18-25, July 2015, doi: 10.1109/MCOM.2015.7158261.
4. FCC, “Notice of Proposed Rulemaking, In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands (ET Docket No. 04-186) and Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band (ET Docket No. 02-380), FCC 04-113,” ed: May, 2004
5. FCC, “FCC NPRM In the Matter of Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550–3650 MHz Band,” FCC, Ed., ed. Washington, D.C. 20554, 2012.
6. Shem Kikamaze, Vuk Marojevic, and Carl Dietrich, “Spectrum access system on cognitive radio network testbed”, In Proceedings of the 11th Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental evaluation & Characterization, pages 99–100. ACM, 2017.
7. Abowd, G. D., & Mynatt, E. D. (2000). Charting past, present, and future research in ubiquitous computing. ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 7(1), 29-58.
8. Dey, A. K., Abowd, G. D., & Salber, D. (2001). A conceptual framework and a toolkit for supporting the rapid prototyping of context-aware applications. Human-Computer Interaction, 16(2-4), 97-166.

9. Baldauf, M., Dustdar, S., & Rosenberg, F. (2007). A survey on context-aware systems. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*, 2(4), 263-277.
10. Chen, G., & Kotz, D. (2000). A survey of context-aware mobile computing research. Dartmouth College, Computer Science Technical Report TR2000.
11. Satyanarayanan, M. (2001). Pervasive computing: Vision and challenges. *IEEE Personal Communications*, 8(4), 10-17.
12. Hong, J. I., & Landay, J. A. (2001). An infrastructure approach to context-aware computing. *Human-Computer Interaction*, 16(2-4), 287-303.
13. G. D. Abowd, A. K. Dey, P. J. Brown, N. Davies, M. Smith, and P. Steggles, "Towards a better understanding of context and context-awareness," in Proc. 1st international symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, ser. HUC '99. London, UK: Springer-Verlag, 1999, pp. 304–307. [Online]. Available: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=647985.743843>
14. C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Context Aware Computing for The Internet of Things: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 414-454, First Quarter 2014, DOI: 10.1109/SURV.2013.042313.00197.
15. Khedo, K. K., & Perseedoss, R. (2010). Context-aware ubiquitous computing framework for smart environments. *Proceedings of the International Conference on Ubiquitous Computing*, 304-315.
16. Preuveneers, D., & Berbers, Y. (2008). Context-driven migration and diffusion of pervasive services on the OSGi framework. *Journal of Systems and Software*, 81(5), 707-723.
17. Brown, P. J., Bovey, J. D., & Chen, X. (1997). Context-aware applications: From the laboratory to the marketplace. *IEEE Personal Communications*, 4(5), 58-64.
18. Schilit, B., Adams, N., & Want, R. (1994). Context-aware computing applications. *Proceedings of the IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 85-90.

- 19.M. Wasilewska et al., "Artificial Intelligence for Radio Communication Context-Awareness," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 144820-144856, 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3119524.
- 20.Ranganathan, A., & Campbell, R. H. (2003). A middleware for context-aware agents in ubiquitous computing environments. *Middleware*, 143-161.
- 21.Loke, S. W. (2007). *Context-aware pervasive systems: Architectures for a new breed of applications*. CRC Press.
- 22.Bettini, C., et al. (2010). A survey of context modelling and reasoning techniques. *Pervasive and Mobile Computing*, 6(2), 161-180.
- 23.Barkhuus, L., & Dey, A. K. (2003). Is context-aware computing taking control away from the user? Three levels of interactivity examined. *Proceedings of the International Conference on UbiComp*, 149-156.
- 24.Strang, T., & Linnhoff-Popien, C. (2004). A context modeling survey. *Proceedings of the First International Workshop on Advanced Context Modelling, Reasoning, and Management*, 1-8.
- 25.FCC, "Citizens Broadband Radio Service", Title 47, Chapter 1, Part 96, FCC , Ed., ed. Washington, D.C 20554, 2017, <https://www.ecfr.gov/current/title-47/chapter-I/subchapter-D/part-96>.
26. WinnForum, "Signaling Protocols and Procedures for Citizens Broadband Radio Service (CBRS)", WINNF-TS-0016, WinnForum, 2016, <https://winnf.memberclicks.net/assets/CBRS/WINNF-TS-0016.pdf>.
- 27.WinnForum, "Requirements for Commercial Operation in the U.S. 3550-3700 MHz Citizens Broadband Radio Service Band", WINNF-TS-0112, WinnForum, 2016, <https://winnf.memberclicks.net/assets/CBRS/WINNF-TS-0112.pdf> WinnForum, "CBRS Communications Security Technical Specification", WINNF-15-S-0065, WinnForum, 2015, <https://www.wirelessinnovation.org/assets/technical/specification.pdf>.
- 28.Capra, L., Emmerich, W., & Mascolo, C. (2003). CARISMA: Context-aware reflective middleware system for mobile applications. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 29(10), 929-945.

29. Henricksen, K., & Indulska, J. (2006). Developing context-aware pervasive computing applications: Models and approach. *Pervasive and Mobile Computing*, 2(1), 37-64.
30. D. Boulware, et al., "An Analysis of Aggregate CBRS SAS Data from April 2021 to January 2023", Technical Report, NTIA, US Department of Commerce, 2023, <https://its.ntia.gov/umbraco/surface/download/publication?reportNumber=TR-23-567.pdf>.
31. Vieira, M., et al. (2007). An aspect-oriented approach for context-aware user interfaces. *Proceedings of the International Conference on Aspect-Oriented Software Development*, 247-258.
32. Perera, C., et al. (2014). Context-aware computing for the Internet of Things: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 414-454.
33. Coutaz, J., et al. (2005). Context is key. *Communications of the ACM*, 48(3), 49-53.
34. Gandon, F. L., & Sadeh, N. (2004). Semantic web technologies to reconcile privacy and context awareness. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 1(3), 241-260.
35. Goyal, S., & Carter, J. (2004). A lightweight secure context-aware access control framework for ubiquitous environments. *Proceedings of the IEEE International Conference on Ubiquitous Intelligence and Computing*, 186-195.
36. Costanza, E., et al. (2005). Experimental evaluation of context-aware systems. *Proceedings of the International Conference on UbiComp*, 130-147.
37. Mohamed, N., & Al-Jaroodi, J. (2004). Middleware for ubiquitous computing: A survey. *Proceedings of the International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, 297-302.

38. IOT Connections Outlook, Mobility Report, 4G/5G IoT connections rising as 2G/3G declines, Ericsson, <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobilityreport/dataforecasts/iot-connections-outlook>.
39. Satyajit Sinha, State of IoT 2023: Number of connected IoT devices growing 16% to 16.7 billion globally, IoT Analytics, May 2023, <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>.
40. Zhou, Marrian (November 14, 2018). "FCC kicks off 5G spectrum auction to help make hype reality". <https://www.cnet.com/tech/mobile/5g-craze-continues-the-5g-spectrum-auction-is-starting/>.
41. Bauer, M., et al. (2003). Context-aware, personalized web search. Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence, 321-324.
42. Poslad, S., et al. (2001). A user context-aware interface system for smart home applications. Mobile Networks and Applications, 6(4), 362-378.
43. Chen, H., Finin, T., & Joshi, A. (2004). An ontology for context-aware pervasive computing environments. The Knowledge Engineering Review, 18(3), 197-207.
44. Mehta, M., et al. (2004). Context-aware computing: A study of emerging applications and challenges. Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, 14-18.
45. Korpipää, P., & Mäntyjärvi, J. (2003). An ontology for mobile device sensor-based context awareness. Proceedings of the International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems, 451-456.
46. Bellavista, P., et al. (2013). Convergence of context-aware computing and the Internet of Things. Future Internet, 5(1), 2-21.
47. Kolomvatsos, K., & Anagnostopoulos, C. (2018). A framework for building context-aware, self-adaptive IoT-enabled systems. Internet of Things Journal, 5(4), 2339-2347.

48. Abowd, G. D., et al. (1999). Towards a better understanding of context and context-awareness. Proceedings of the International Symposium on Handheld and Ubiquitous Computing, 304-307.
49. Manzoor, A., et al. (2008). Context-aware access control in pervasive computing environments. Proceedings of the IEEE International Conference on Pervasive Services, 1-9.
50. Guo, B., et al. (2015). Enhancing context-aware computing in sensor-rich environments: A survey and outlook. Journal of Systems and Software, 1999, 1-15.
51. Lee, D. J., et al. (2016). Secure and context-aware access control in distributed healthcare applications. IEEE Access, 4, 8972-8984.