

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Інститут телекомунікаційних систем

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра телекомунікацій

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва спеціальності)

спеціалізація Мобільні телекомунікації

на тему: Дослідження особливостей побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікаційних систем 4 та 5 поколінь

Виконав: студент 2 курсу, групи ТМ-71мп

(шифр групи)

_____ Носенко Антон Дмитрович _____

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник старший викладач Кайденко Микола Миколайович _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(назва розділу)

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інститут телекомунікаційних систем
(повна назва)

Кафедра телекомунікацій
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною (освітньо-науковою) програмою

Спеціальність 172 Телекомунікації та радіотехніка
(код і назва)

Спеціалізація Мобільні телекомунікації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Явіся В.С.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« » 2018 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Носенку Антону Дмитровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження особливостей побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікаційних систем 4 та 5 поколінь
науковий керівник дисертації старший викладач Кайденко Микола Миколайович,

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

затверджені наказом по університету від «06» «11» 2018 р. №4095-с

2. Строк подання студентом дисертації 01.12.2018

3. Об'єкт дослідження - мережі 4 та 5 поколінь (4G, 5G)

4. Предмет дослідження - когнітивне радіо на основі програмно-визначуваної радіосистеми

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- дослідження особливостей мереж 4 та 5 поколінь (4G, 5G);
- аналіз створення систем когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем

- планування та створення моделі, яка буде побудована по принципу когнітивного радіо, використовуючи програмно-визначувані радіо-модулі, для використання цієї системи у мобільних мережах 4 та 5 поколінь (4G, 5G).

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу 23

7. Орієнтовний перелік публікацій: немає

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 18.10.2017

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Анотація

Обсяг магістерської дисертації складає: 100 сторінок, 23 рисунків, 2 таблиці, 49 джерел використаної літератури.

Мета роботи – аналіз принципів побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для подальшого їх застосування у телекомунікаційних системах 4 та 5 поколінь.

Зараз великого розповсюдження набувають телекомунікаційні системи четвертого покоління, а невдовзі прагнуть ввести стандарт мобільного зв'язку п'ятого покоління. Для таких систем доцільно використовувати систему, так званого, когнітивного радіо. Це телекомунікаційна радіосистема, яка здатна отримувати інформацію про власну експлуатацію і на основі цих даних корегувати свою роботу.

Програмно визначувані радіосистеми (software-defined radio, SDR) представляють собою радіоплатформу, що може реконфігуруватися, яка складається з трансивера, що здійснює перетворення радіочастотного сигналу в смугу модулюючих частот, і цифрового процесора. Системи SDR мають безліч переваг, до яких відносяться можливість програмного конфігурації і управління, поліпшення характеристик системи, скорочення її розмірів, а також мінімізація ризиків проектування та часу від розробки концепції до випуску готового продукту на ринок.

Ключові слова: 4G, 5G, програмно-визначувані радіосистеми, когнітивне радіо.

Abstract

Paper includes 100 pages, 23 images, 2 tables, 49 sources of used literature.

The purpose of the work is to analyze the principles of constructing a cognitive radio based on software-defined radio systems for their further application in telecommunication systems of 4 and 5 generations.

Today the fourth generation telecommunication systems are becoming widespread, and soon seek to introduce the fifth-generation mobile communications standard. For such systems, it is advisable to use a system of so-called cognitive radio. This is a telecommunication radio system that can receive information about its own operation and based on these data to correct its work.

Software-defined radio (SDR) is a reconfigurable radio platform consisting of a transceiver that converts a radio frequency signal into a modulation band and a digital processor. SDR systems have many advantages, which include the ability to program configuration and management, improve system characteristics, reduce its size, and minimize project design risks and time from conceptual design to the release of a finished product to the market.

Key words: 4G, 5G, software defined radio (SDR), cognitive radio.

**Пояснювальна записка
до магістерської дисертації**

на тему: Дослідження особливостей побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікаційних систем 4 та 5 поколінь

Зміст

1. Когнітивне радіо, особливості застосування в радіосистемах 4 та 5 поколінь.....	15
1.1. Когнітивне радіо.....	15
1.2. Когнітивні функції мережі	17
1.2.1. Мобільність спектру	17
1.2.2. Сприйняття спектру.....	19
1.2.2.1. Кооперативне відстеження.....	20
1.2.2.2. Циклостационарне виявлення невизначених вторинних користувачів	20
1.2.3. Гнучкість та адаптивність	21
1.2.4. Навчання та адаптація	22
1.2.4.1. Нейронні мережі для когнітивних радіосистем	23
1.2.4.2. Багатошарівнева нейронна система (MFNN)	24
1.2.5. Динамічний доступ до спектру.....	26
1.3. Планування мережі	28
1.4. Розподілена мережева архітектура.....	29
1.4.1. Сценарій керування мережею.....	30
1.4.2. Сценарій гетерогенної мережі	31
1.4.3. Модель системи	33
1.5. Централізоване керування мережею	34
1.5.1. Спільний розподіл спектру	34
1.5.2. Модель системи	36
1.6. Гібридне керування мережею	37
1.6.1. Огляд.....	37
1.6.2. Модель системи	38
1.6.3. Проблема мульти-хопу(Multi-hop).....	39
1.7. Кооперативний та некооперативний спільний доступ до спектра.....	41
1.8. Висновок	43

					КПІ ім. Ігоря Сікорського 4095-с .ТМ-71мп.2018.ПЗ			
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження особливостей побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікаційних системи 4 та 5 поколінь	Літ.	Арк.	Акрушів
Розроб.		Носенко А.Д.						
Перевіс.							7	100
Реценз.								
Н. Контр.		Петрова В.М.						
Затверд.		Явіся В.С.			Пояснювальна записка			

2. Програмно-визначувані системи, особливості застосування та роботи	44
2.1. Програмно-визначуавна система (SDR)	44
2.2. Використання архітектури SDR в мобільній телефонії.....	48
2.3. Архітектура стільникового телефону SDR.....	49
2.4. Приклади апаратних платформ для систем з архітектурою SDR.....	54
2.5. Висновок	58
3. Структура програмно визначуваної системи когнітивного радіо для радіосистем 4 та 5 поколінь	59
3.1. Попередня оцінка роботи NFV, SDR, SDN та інтегрованої мережевої архітектури 4G / 5G	63
3.1.1. Попередня оцінка роботи NFV, SDR, SDN	63
3.1.2. Вимоги 4G / 5G NFV, SDR та SDN	65
3.2. Існуючі стандарти та необхідні розширення для NFV та SDR / SDN.....	67
3.2.1. Поточний прогрес стандартизації на NFV, SDN та SDR	67
3.2.2. Необхідні стандартні розширення для майбутніх 4G / 5G мереж	69
3.3. Відкриті проблеми для майбутніх досліджень.....	72
3.3.1. Міліметрові хвилі.....	73
3.3.2. Масовий MIMO	73
3.3.3. Гетерогенні мережі	74
3.3.4. C-RAN	75
3.4. Висновок	76
4. Моделювання каналу зв'язку програмно визначуваної системи LTE.....	77
4.1. Модель каналу зв'язку програмно визначуваної системи LTE.....	77
4.2. Висновок	93
Висновок	94
Список використаної літератури	95

Перелік скорочень

АЦП – Аналого цифровий перетворювач

ВЧ – Високочастотний зв'язок

КР – когнітивне радіо

МСЕ – Міжнародний союз електрозв'язку

ПЛІС - Програмована логічна інтегральна схема

ПЧ – Проміжна частота

ЦАП – Цифро аналоговий перетворювач

ЦСП – Цифровий сигнальний процесор

ШПФ Швидке перетворення Фур'є

AGC – Automatic Gain Control

AMPS - Advanced Mobile Phone Service

AP – Access Point

API – Application Programming Interface

ASIC - application-specific integrated circuit

BBU – Baseband Unit

BER – Bit Error Rate

BW – Bandwidth

CAN – Campus Area Network

CAPEX – Capital Expenditure

CFI – Control Format Indicator

CR – Cognitive radio

CRN – Cognitive Radio Network

CSCC – Common Spectrum Control Channel

DL-SCH – Downlink Shared Channel

DSA – Dynamic Spectrum Access

DSP - Digital signal processor

EDGE - Enhanced Data rates for GSM Evolution

ETSI - European Telecommunications Standards Institute

EVM – Error Vector Magnitude

FCC – Federal Communications Commission

FDD - Frequency-division Duplexing

FIR – Finite impulse response

FPGA - Field-programmable gate array

GSM – Global System for Mobile Communications

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IF – Intermediate Frequency

IL – Interruption Loss

IP - Internet Protocol

ISG – Industry Specification Group

ITU – International Telecommunication Union

ITU-T - ITU Telecommunication Standardization Sector

LTE – Long-Term Evolution

MFNN – Multilayer Feedforward Neural Network

MIB - Master Information Block

MIMO - Multiple Input Multiple Output

MIP – Mobile IP

MPLS - multiprotocol label switching

NFV - Network Functions Virtualization

NTIA - National Telecommunications and Information Administration

OFCOM – Office of Communications

OFDM - Orthogonal frequency-division multiplexing

ONF - Open Networking Foundation

OPEX – Operating expenses

OTA – over-the-air

PBCH – Physical Broadcast Channel
PCFICH – Physical Control Format Indicator Channel
PD-SCH – Physical Downlink Shared Channel
PHY – Physical Layer
PR – Primary user
PSD - Power Spectral Density
QoS – Quality of Service
RAT – Radio Access Technologies
RB – Resource Block
RF – Radio Frequency
RRH – Remote Radio Head
RX – Receive
SB – Spectrum Broker
SCD - Spectrum Correlation Density
SDN - software-defined networking
SDR – Software defined radio
SFF – Small Form-Factor
SM – Service manager
SNR – Signal to Noise Ratio
SP – Spectrum server
SR – Software radio
TX - Transmit
VCO – Voltage Controlled Oscillator
WINNF - Wireless Innovation Forum
WLAN – Wireless Local Area Network

Вступ

Актуальність теми

На сьогодні спостерігається швидкий розвиток високошвидкісного мобільного зв'язку, збільшення трафіку, технології мобільного зв'язку все більш і більш інтегруються у повсякденне життя. Існує велика кількість стандартів та технологій і береться напрямом на взаємодію цих стандартів та технологій. Тому виникає необхідність розробки мереж, які матимуть змогу підтримувати різні стандарти та будуть спроможні обробляти та транспортувати велику кількість даних. У роботі пропонується використання системи когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікаційних системи 4 та 5 поколінь. Такий підхід може вирішити проблему сумісності різних стандартів.

Предметом дослідження є когнітивне радіо на основі програмно-визначуваної радіосистеми.

Об'єктом дослідження є мережі 4 та 5 поколінь (4G, 5G).

Мета дипломної роботи полягає в створенні системи когнітивного радіо на основі програмно-визначуваної радіосистеми для мереж 4 та 5 поколінь (4G, 5G).

Завданнями дипломної роботи є:

- дослідження особливостей мереж 4 та 5 поколінь (4G, 5G);
- аналіз створення систем когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем;
- планування та створення моделі, яка буде побудована по принципу когнітивного радіо, використовуючи програмно-визначувані радіо-модулі, для використання цієї системи у мобільних мережах 4 та 5 поколінь (4G, 5G).

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі основні задачі:

1. Проаналізувати існуючі методи побудови когнітивного радіо;
2. Проаналізувати існуючі програмно-визначувані радіосистеми;
3. Провести аналіз особливостей побудови когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікацій 4 та 5 поколінь;
4. Провести імітаційне моделювання когнітивного радіо на основі програмно-визначуваних радіосистем для телекомунікацій 4 та 5 поколінь;
5. Провести аналітичну оцінку моделі.

Сучасний стан проблеми

Зараз великого розповсюдження набувають телекомунікаційні системи четвертого покоління, а невдовзі прагнуть ввести стандарт мобільного зв'язку п'ятого покоління. Для таких систем доцільно використовувати систему, так званого, когнітивного радіо. Це телекомунікаційна радіосистема, яка здатна отримувати інформацію про власну експлуатацію і на основі цих даних корегувати свою роботу.

Програмно визначувані радіосистеми (software-defined radio, SDR) представляють собою радіоплатформу, що може реконфігуруватися, яка складається з трансивера, що здійснює перетворення радіочастотного сигналу в смугу модулюючих частот, і цифрового процесора. Системи SDR мають безліч переваг, до яких відносяться можливість програмного конфігурації і управління, поліпшення характеристик системи, скорочення її розмірів, а також мінімізація ризиків проектування та часу від розробки концепції до випуску готового продукту на ринок.

Відомими на сьогоднішній день прикладами реалізації концепції SDR є пристрої для мереж GSM, UMTS, Wi-Fi, WiMAX тощо.

Тому для побудови такої радіосистеми зручно використовувати програмно-визначувані радіо-модулі (SDR – software-defined radio). Це дуже зручно, оскільки функції модуляції та демодуляції сигналів виконує програмне забезпечення, яке у будь-який момент можна швидко переналаштувати. Оскільки весь обсяг робіт із обробки сигналу перекладається на програмне забезпечення, це дозволяє створити систему, яка може приймати і передавати практично будь-які сигнали, що є гнучким і адаптивним рішенням.

У режимі прийому SDR може забезпечити вищу ефективність, ніж при використанні традиційних аналогових методів, оскільки при цифровій обробці сигналів їх фільтрація близька до ідеальної. Крім того, за допомогою програмних алгоритмів можуть бути реалізовані такі функції, які дуже складно отримати при аналоговій обробці.

Оскільки мобільний радіозв'язок передбачає зміну положень пристроїв у просторі, відносно передавачів, то доцільно використовувати радіосистеми, які будуть адаптуватися до зміни умов роботи без розриву зв'язку. А завдяки високій ефективності систем SDR, для побудови когнітивного радіо для телекомунікаційних систем 4, а в майбутньому і 5 поколінь, можна використовувати саме систему SDR.

Очікуване використання отриманих результатів

Розроблена модель когнітивного радіо на основі програмно-визначуваної радіосистеми може бути використана у навчальному процесі:

- 1) при підготовці 1 магістра;
- 2) при підготовці публікацій;
- 3) при розробці та впровадженні нових лабораторних робіт;
- 4) при розробці та впровадженні нових лекцій.

1. Когнітивне радіо, особливості застосування в радіосистемах 4 та 5 поколінь

1.1. Когнітивне радіо

Когнітивне радіо (КР) сприймається як можливе рішення майбутнього за низької доступності радіочастотного спектра. Це ключова технологія, яка могла б забезпечити надійний, гнучкий та ефективний доступ до спектра шляхом адаптації функцій мобільного зв'язку відповідно до навколишнього середовища. КР сприяють швидкому та значному розвитку радіотехніки (наприклад, Software Defined Radio (SDR), керування частотою та потужністю), і можуть характеризуватися використанням таких методів, як розподіл спектрів в режимі реального часу, широкосмугове зондування та вимірювання в режимі реального часу. Ця революційна технологія являє собою парадигму зміни конструкції бездротових систем, оскільки це дозволить оперативно та ефективно використовувати радіочастотний спектр, пропонуючи розподіленням терміналам можливість радіозв'язку, саморегулювання та динамічного розподілу спектра. Використання спектра може бути значно покращено, дозволяючи вторинному користувачеві використовувати ліцензовану смугу, коли основний користувач відсутній. Когнітивний радіоприймач, обладнаний зондуванням та адаптацією до навколишнього середовища, здатний заповнити отвори в спектрі та обслуговувати своїх користувачів, не створюючи шкідливих перешкод ліцензованому користувачеві. Для цього радіоприймач повинен постійно відчувати спектр, який він використовує, щоб виявити основного користувача. Після виявлення основного користувача, радіоприймач повинен відмовитися від спектра, щоб мінімізувати перешкоди, які він може викликати [1].

Деякі визначення для когнітивного радіо можна знайти в дослідницькій області. Офіційне визначення когнітивних радіосистем в МСЕ, розроблені ITURWP1B у 2009 році та опубліковані в (ITU-R 2009), свідчать, що когнітивна радіосистема [2]:

«Радіосистема, що використовує технологію, яка дозволяє системі отримувати знання про її операційно-географічне середовище, встановлену політику та її внутрішній стан; динамічно і автономно коригувати свої експлуатаційні параметри та протоколи відповідно до отриманих знань для того, щоб досягти заздалегідь визначених цілей; і вчитися з отриманих результатів».

Іншими словами, коли когнітивні радіоприймачі можуть знайти можливості використання «спектральних отворів» для комунікацій, доцільно використовувати когнітивний радіозв'язок для транспортування пакетів для полегшення використання програм та послуг. Мобільний термінал з функціями когнітивного радіозв'язку може збирати інформацію про середовища зв'язку (наприклад, отвори спектру, географічне положення, доступу дротових/бездротових зв'язків, доступні послуги), аналізувати та вивчати інформацію з середовища з налаштуваннями та вимогами користувача та переналаштовувати себе корегуючи параметри системи, щоб відповідати певній політиці та нормам. Наприклад, коли когнітивний термінал відчув, що в районі присутні Wi-Fi та глобальна система мобільних комунікацій (GSM), в той час як в діапазоні частот існують отвори спектру, він може вирішити завантажувати файли з певної точки доступу WiFi, здійснити телефонний дзвінок через систему GSM і спілкуватися з іншими користувачами пізнавального радіо, використовуючи ці отвори для спектру. Когнітивний термінал також може взаємодіяти з іншими користувачами спектру та/або мережами, щоб забезпечити більш ефективне використання мережі. Процедура взаємодії може бути полегшено за підтримки мережі/інфраструктури або просто розпочатись спеціальним способом [3]. Всі ці дії відбуваються в гетерогенному бездротовому середовищі, як показано на малюнку 1.1.

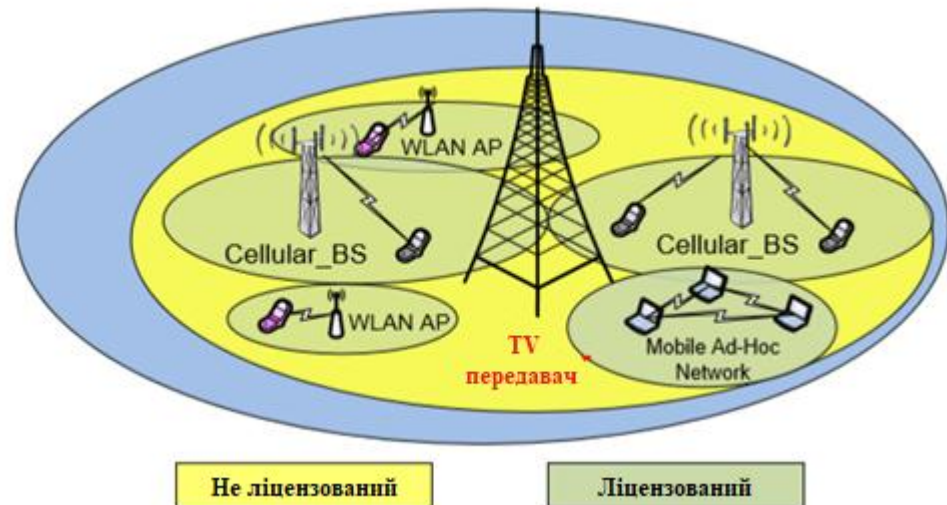


Рис. 1.1. Спектральні розподіли між різними бездротовими доменами

1.2. Когнітивні функції мережі

1.2.1. Мобільність спектру

Під терміном мобільність спектру мається на увазі можливість когнітивних радіосистем динамічно перемикались між різними каналами. Вторинні користувачі не мають жодних гарантій щодо безперервного доступу до спектру в будь-якій з ліцензованих смуг через динамічні зміни. Тому мобільність спектру стає важливим фактором при розробці когнітивних систем. Одним з основних факторів, що впливають на мобільність спектра, є затримка, під час зміни(хендоверу) спектру. Ця затримка негативно впливає на протоколи, що працюють на різних рівнях стека протоколу зв'язку. Іншим важливим фактором, який слід враховувати в мобільності спектра, є різниця у часі між вторинною мережею, яка виявляє первинну передачу, і вторинних користувачів, які покидають спектральну смугу. Передача від вторинних користувачів в цей період призведе до шкідливих перешкод для основних користувачів. OFCOM запропонував встановити верхню межу для тривалості передачі спектру, щоб уникнути тривалих перешкод для основних користувачів [4].

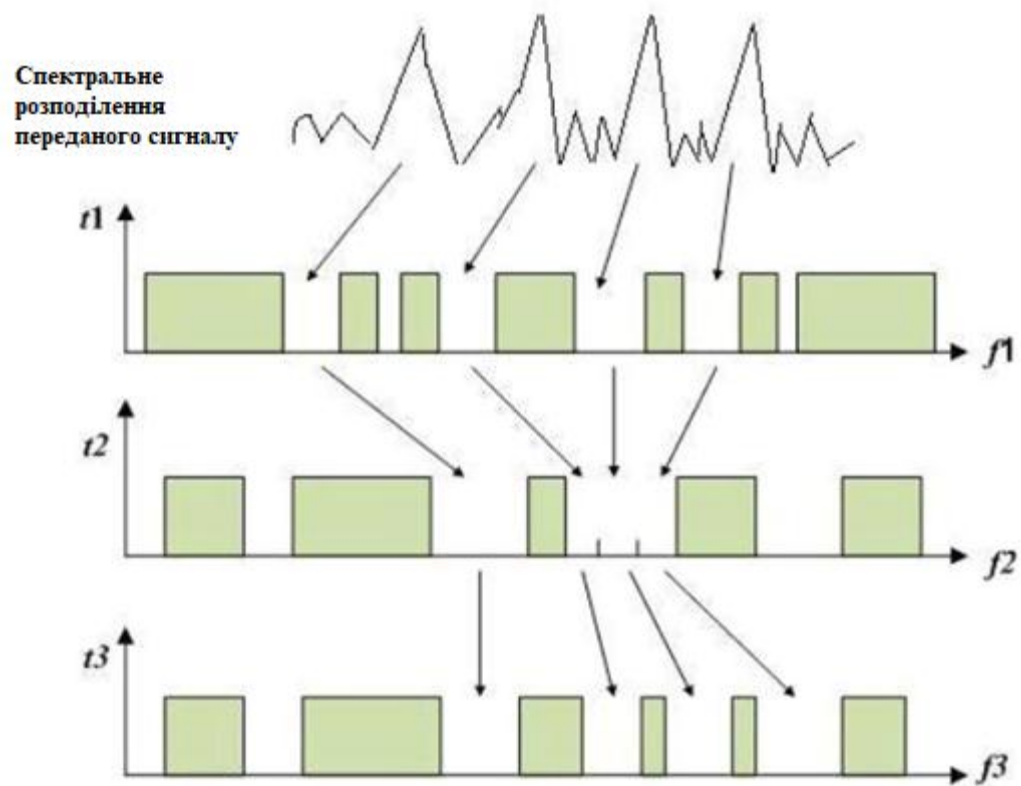


Рис. 1.2. Мобільність спектру та процес хендоверу

Через гнучкість модуляції та ефективність підрахунку, OFDM є переважною модуляцією для когнітивного радіоприймача. Наприклад, наведено положення 4 піднесучих: на рисунку 1.2 показано процес передачі піднесучих OFDM, коли отвори спектра змінюються з часом ($t1 < t2 < t3$). Мобільність спектру - це процес при якому когнітивний користувач змінює власні робочі частоти, і ключовим питанням є передача спектру. На рисунку 1.2 зелені квадрати позначають спектр, який займають ліцензовані користувачі, а порожні слоти позначають отвори в спектрі, які використовуються когнітивними користувачами [5].

1.2.2. Сприйняття спектру

Однією з основних вимог до когнітивних мереж є їх здатність сканувати спектральну смугу та визначити вільні канали, доступні для можливої передачі. Оскільки основна користувальницька мережа фізично відокремлена від вторинної користувацької мережі, вторинні користувачі не отримують прямих відгуків від основних користувачів щодо їх передачі. Додаткові користувачі повинні залежати від власних індивідуальних або кооперативних здібностей чутливості для виявлення передач первинних користувачів [6]. Традиційно існує два методи, які використовуються для відстеження спектру: виявлення енергії та виявлення циклостационарних функцій. Детектор енергії вимірює енергію у кожному вузькосмуговому каналі та визначає наявність основного користувача, якщо енергія, виявлена у вузькосмуговому каналі, перевищує певну порогову величину. Однак, щоб досягти високої чутливості приймача, потрібно використовувати низький поріг. У деяких випадках порогове значення повинно бути нижчим, ніж рівень шуму, в цьому випадку виявлення неможливе. Проблема ще більш ускладнена через те, що шум, швидше за все, не гауссовий через наявність втручання когнітивного користувача. Інша методика вимірювання спектру - виявлення циклостационарних функцій. Більшість сигналів, що виникають при бездротовому зв'язку, є циклостационарними, тоді як шум стаціонарний. У результаті циклостационарність первинних сигналів може бути використана для виявлення їх присутності. Циклостационарність сигналу не відображається в спектральній щільності потужності (PSD), однак відображається в функції спектральної кореляційної щільності (SCD), яка отримується шляхом прийняття перетворення Фур'є циклічної автокореляційної функції. Тому спектральний кореляційний аналіз отриманих даних може бути використаний для ідентифікації джерела сигналу та його виникнення [7].

1.2.2.1. Кооперативне відстеження

У середовищі із втратами, сприйняття спектру викликає невизначеність, що виникає внаслідок втрат в каналі. Вторинний користувач тепер повинен розрізняти сигнал між пустим місцем в спектрі, де немає основного сигналу та глибоким затуханням, де важко виявити первинний сигнал. Таким чином, при затуханні каналу один користувач, який покладається винятково на локальну обробку, може виявитися не в змозі отримати точні результати виявлення, необхідні регулятору. Щоб вирішити цю проблему, різні вторинні користувачі можуть поділитися своїми вимірами і спільно визначити, чи присутній основний користувач.

Завдяки такому співробітництву можливо ефективно боротися з проблемами загасання сигналу. Це породжує природне запитання: наскільки потрібна обробка та співпраця, щоб досягти певного рівня продуктивності? Це можна охарактеризувати як компроміс між локальною обробкою та кооперацією користувачів [8].

1.2.2.2. Циклостаціонарне виявлення невизначених вторинних користувачів

Можливість що певний когнітивний прийомопередавач може працювати нелегально виходить за рамки поточних визначень когнітивних мереж. Ці когнітивні радіостанції можуть використовувати свої передові радіотехнології, щоб адаптувати свої несучі частоти для передачі на певному ліцензованому SB каналі, коли основний користувач вимкнений. Проте, вони все ще повинні передавати, використовуючи різні параметри сигналу, щоб тримати свою трансляцію в доступності їх кінцевим користувачам. Ця дія може статися в будь-який час і може трапитися рідко або навіть постійно. Нова система моніторингу потрібна для забезпечення компетенції негайно виявляти таку поведінку на базових базових станціях. Метод накопичення швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) представлений як алгоритм аналізу циклічного спектра.

Цей метод впливає з циклостационарного методу, який широко визнається як найефективніша процедура зондування когнітивних радіоприймачів [9, 10].

1.2.3. Гнучкість та адаптивність

Гнучкість та адаптивність - це здатність когнітивного радіо змінювати форму сигналу та інші параметри роботи на льоту. Цей параметр має обмеження. Повна гнучкість стає можливою, коли когнітивне радіо створюється на основі програмно визначуваної радіосистеми (SDR – Software-defined radio). Ще однією важливою вимогою досягнення гнучкості, є використання реконфігуруємих або широкосмугових антен. Таким чином, з'являється нова парадигма бездротового зв'язку з адаптивними рівнями фізичного доступу та доступу до середовища. Це дозволяє адаптивному радіоприймачу змінювати свої функції передачі, щоб реагувати на зміни у зовнішній радіосистемі та політику динамічного доступу радіочастот. Внутрішня архітектура окремої адаптивної радіосистеми зображена на малюнку 1.3.

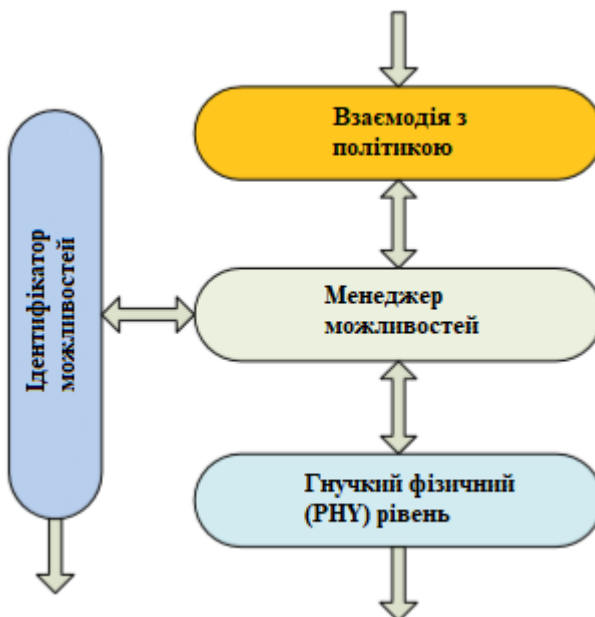


Рис. 1.3. Архітектура адаптивної радіосистеми

Важливими модулями цієї архітектури є: ідентифікатор можливостей, взаємодія з політикою, менеджер можливостей та гнучкий фізичний (PHY) рівень. Ідентифікатор можливостей відповідає за визначення потенціально вільної смуги частот. Це робиться шляхом відстеження середовища на наявність просторів та оцінювання їх тривалості у цих спектральних смугах. Результати процесу ідентифікації передаються менеджеру можливостей. Політика взаємодії відповідає за розуміння політики, встановленої регулюючим органом (наприклад, OFCOM) для цільових смуг, а результати її інтерпретації передаються менеджеру можливостей. Гнучкий фізичний рівень відіграє вирішальну роль і відповідає за вхідні дані від менеджера можливостей та формування сигналів, щоб вони відповідали політиці передачі, встановленій регулюючим органом. Менеджер можливостей є основою цієї архітектури, яка керує функціонуванням різних операцій [11].

1.2.4. Навчання та адаптація

Можливість аналізувати, розпізнавати шаблони та змінювати внутрішню операційну поведінку ґрунтується на аналізі будь-якої нової ситуації, що базується не тільки на існуючих алгоритмах, але також і на результатах механізму навчання. Рівень MAC IEEE 802.11 дозволяє пристрою адаптувати свою передачу, щоб визначити доступність каналу. Однак це досягається використанням заздалегідь визначеного алгоритму *listen-before-talk* та експоненціального зворотного виклику замість когнітивного циклу. Можливо, їх необхідно покращити, використовуючи додаткові методи та схеми для підвищення розпізнавання когнітивних систем у бездротовому середовищі та досягнення кращого контролю за радіотехнічними характеристиками, що забезпечить високий рівень конфігуруємості та сумісності. Це можна зробити, інтегруючи нейронні мережі з майбутньою системою когнітивного радіо, щоб забезпечити радіостанції здатністю розпізнавати різні перехідні стани.

1.2.4.1. Нейронні мережі для когнітивних радіосистем

Нейромережі були використані у багатьох дослідженнях для пізнавальних радіопристроїв для покращення інтелектуальних можливостей. Чжан [12] запропонував чотиришарову нейронну мережу зворотнього розповсюдження, яка може використовуватися для різних потреб, включаючи когнітивні радіосистеми. Кожен шар складається з ряду нейронів, які отримують вхідні дані від інших нейронів у попередньому шарі. Якщо зважена сума вхідних значень перевищує порогове значення, то нейрон виведе вихідне значення і розподілить його на нейрони у наступному шарі. Багатошарова нейронна мережа (Feed Forwarding Neural Networks - MFNN) використовувалась [13] як ефективна методика для характеристики когнітивної радіосистеми в режимі реального часу. Вона базується на вимірах, проведених радіостанцією і тому пропонує деякі цікаві можливості навчання. Симуляції використовувались для отримання набору даних, що характеризують продуктивність. Підмножина цих даних використовувалася для навчання MFNN; після цього решта даних використовувалась для порівняння результатів прогнозування, наданих навченим MFNN, з фактично відпрацьованою продуктивністю. Потенційне рішення, представлене у [14], стверджує, що допомагає когнітивним радіостанціям у виведенні та впровадженні рішень щодо вибору бажаної конфігурації, яка оптимізує його якість обслуговування QoS (quality of service). Запропоноване рішення базується на нейронних мережах, які мотивовані тим фактом, що нейронні мережі значно відрізняються від традиційної обробки інформації, оскільки вони мають можливість вчитися на наведених прикладах, таким чином, вони також здатні виконувати кращі функції пізнавальної роботи. Схема навчання повинна бути розширюваною, тобто гнучкою у введенні додаткових інформаційних даних у навчальний процес, з огляду на те, що це може принести об'єктивну користь.

1.2.4.2. Багатошарівнева нейронна система (MFNN)

MFNN складається з деякої кількості нейронів, сполучених у формі feed forward та складена з L-шарів. Основним елементом MFNN є єдиний нейрон або персептрон, який реалізує співвідношення між входами та виходом. Необхідно визначити значення коефіцієнтів і зміщення для кожного вводу, який забезпечує бажане наближення; ця операція називається тренуванням [13]. Відомі схеми навчання когнітивного радіо використовують дані датчиків спостереження та випадки самонавчання як єдині вхідні дані для оцінки. Це передбачає, що пізнавальний алгоритм когнітивного радіо зможе приймати правильні рішення, використовуючи власний досвід. За наявності багатьох обставин, дані, отримані когнітивним радіо, недостатні для прийняття необхідних рішень, що запобігають втручанню в інші радіостанції або для ефективного використання спектру. Це може відбутися внаслідок включення когнітивної радіосистеми вперше без попереднього досвіду роботи. Один і той же сценарій очікується для вторинних радіостанцій, коли вони переналаштовуються до роботи в нових районах. Крім того, окремі автономні та самонавідні вторинні користувачі можуть не мати змоги проводити відповідний перегляд навколишнього бездротового середовища та самостійно вирішувати питання передачі. У цьому випадку доцільно буде поділитися досвідом та оцінками між когнітивними радіостанціями, які ідентифікуються однією і тією ж мережею. Це дає можливість ефективного та спільного доступу до спектру та уникнення будь-яких можливих перешкод. Нова розроблена схема навчання показана на малюнку 2.4.

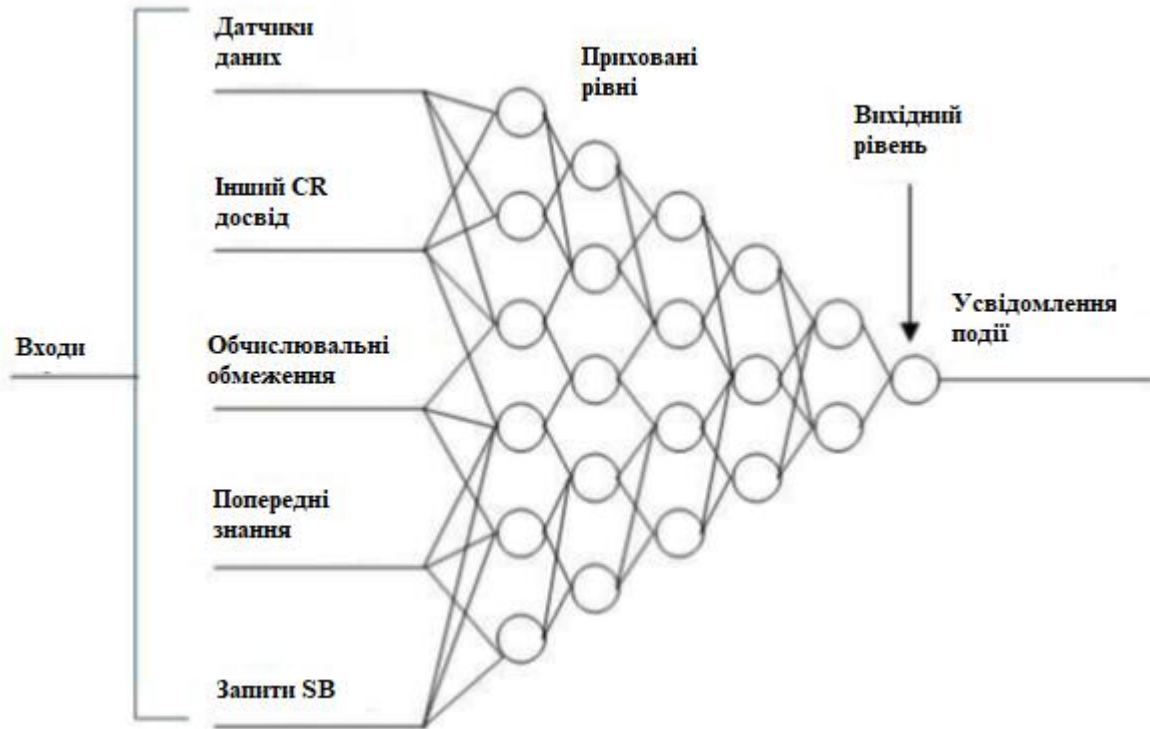


Рис. 1.4. Модель навчання MFNN для залежних когнітивних радіосистем

Запропонований дизайн дозволяє ділитися попереднім досвідом безпосередньо між навчальними системами вторинних радіостанцій. Інформація далі оцінюється на подібність для кожного вводу. Ця модель досить гнучка, щоб когнітивна радіосистема могла працювати незалежно та залежно від інших пізнавальних пристроїв мережі. Рішення індивідуальності роботи має бути зроблено органами управління спектром, які регулюють активність користувачів у спектрі [15]. Дані датчиків можна оцінити за допомогою інших параметрів, використовуючи методи порівняння кожного фактора. Методи порівняння можуть бути встановлені динамічно відповідно до важливості вхідних даних. Ці дані є фізичними факторами, такими як пропускна спроможність (BW - Bandwidth), частота помилок прикусу (BER – Bite error rate), співвідношення сигнал / шум (SNR – Signal-to-Noise-Ratio), швидкість передачі даних та час затримки. Отримані показники потім обробляються іншими входами використовуючи такі ж методи порівняння. Надати додаткові дані також може брокер спектру (SB – Spectrum Broker). Це розширення в алгоритмі пізнання когнітивних радіосистем забезпечить

вторинних користувачів необхідним досвідом при першому старті, завантаживши дані з інших радіосистем. Це можна досягти за допомогою певних протоколів та апаратних портів для групи пристроїв когнітивного радіо. Це надасть змогу забезпечити потрібною інформацією вторинних користувачів у спільній мережі. Остаточними оцінками є функції від всіх вхідних даних та найкращих висновків системи базованих на попередньому досвіді. Нераціонально дозволити когнітивним користувачам в майбутньому діяти без будь-якого нагляду від суб'єктів управління спектром, наприклад, СВ. Такий моніторинг забезпечить надійність системи вторинних користувачів та буде запобігати незаконному використанню спектра. Рішення, прийняті цими органами, також подаються для оцінки в запропонованій моделі навчання. Остаточні висновки потім надсилаються модулям, що приймають рішення. Ці модулі відповідають за управління когнітивним радіо та вирішення наступних дій передач та адаптації.

1.2.5. Динамічний доступ до спектру

Динамічний доступ до спектру - це процес підвищення ефективності використання спектру за допомогою налаштування радіоресурсів у режимі реального часу; це робиться за допомогою процесу локального спектрального зондування та автономного встановлення локальних бездротових з'єднань між когнітивними вузлами та мережами, як показано на малюнку 2.5. Як було запропоновано спочатку, пізнавальний радіоприймач передбачає проведення доступу в режимі реального часу для різних округів, що використовуються для одних цілей, таких як сотовий зв'язок, розподіл спектру та публічна безпека. Це дозволяє покращити використання ресурсів та збільшувати доходи від торгівлі спектром в пікові періоди. Хоча цей початковий приклад ще не був повністю реалізований, федеральна комісія зв'язку (FCC – Federal Communications Commission) закликала застосування цієї технології до вторинного використання невикористаного спектру, наприклад, як в в ad-hoc-мережах, мережах

WLAN(Wireless Local Area Network – бездротова локальна мережа) короткої відстані в спектрі, призначеному для інших основних цілей, таких як трансляція телебачення. Крім того, принципи когнітивного радіоприймача для доступу до динамічного спектра також застосовуються для підвищення ефективності використання в кожній смузі, наприклад, шляхом розумного вибору з декількох альтернативних шарів РНУ-МАС (альтернативних смуг у спектрі) через пізнання мережі, транспортування та прикладні рівні стеку протоколів [16].

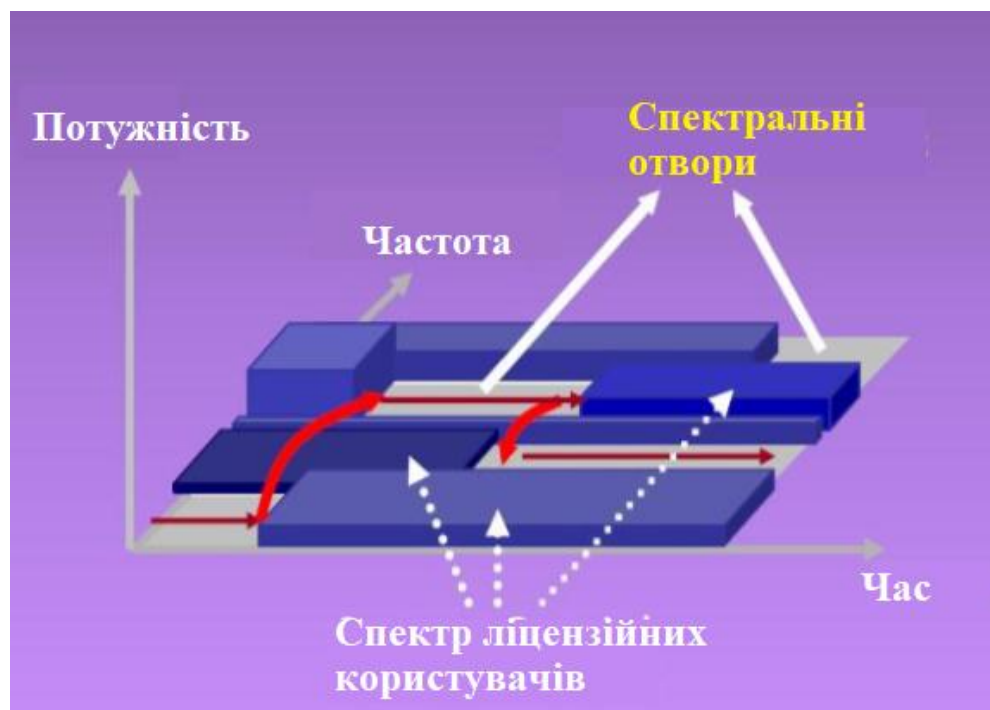


Рис. 1.5. Адаптація когнітивної радіосистеми між різними можливостями передачі

Бездротова реалізація динамічного спектрального доступу (DSA - Dynamic Spectrum Access) у пізнавальних мережах вимагає:

- Знання наявного спектру за допомогою широкосмугового вимірювання спектру, політик, змін у доступності спектру.
- Управління спектром в режимі реального часу, забезпечення та звільнення радіочастот.

- Мережевої інфраструктури та / або кінцевих точок, які підтримують ці технології та дії.

Таким чином, бездротові мережі DSA можуть вимагати нових архітектур та відповідних протоколів сигналізації та керування для компонента керування спектрами в режимі реального часу [17].

1.3. Планування мережі

Для того, щоб характеризувати межу продуктивності когнітивних систем, критерій повинен бути безпосередньо залежним від вимог застосування. Тому для розробки відповідної мережевої інфраструктури для сервісу в реальному часі необхідно визначити зв'язок мережі як функцію основної діяльності користувача [18]. Хоча більшість дослідницьких робіт зосереджені на методах вимірювання спектру та методів доступу, аналіз потужності мережі також є важливою темою дослідження когнітивних мереж. Наприклад, величина оптимальної ємності - це верхня межа пропускної здатності мережі, яка забезпечує ідеальне порівняльне значення для різних алгоритмів розподілу каналів. Ще однією важливою мотивацією є планування мережі, коли враховується потреба у різних вузлах та потребах в трафіку. Навіть на мережевому рівні, потужність конкретного маршруту має вирішальне значення для забезпечення ідеального індексу для розробки алгоритму маршрутизації. У пізнавальній мережі більш важливою є мережева ємність. Перш за все, первинні користувачі строго не турбуються вторинними користувачами, тому що вторинні користувачі мають доступ до тимчасових каналів, які вони мають встановити. Тоді алгоритм розподілу спектру матиме верхню оцінку для порівняння [19]. Розглянемо телевізійну станцію, яка транслюється в ліцензованій та ексклюзивній смузі. Незважаючи на високі ціни за ці ексклюзивні смуги, вимірювання показують, що незаняті смуги, або тимчасово невикористовувані часові або частотні слоти, є досить поширеними. Зверніть увагу, що телевізійні смуги витрачаються нерационально в

географічних місцях, які покриті лише телевізійним сигналом. Це спонукало різні регулятивні та законодавчі органи висунути процедури, які б відкривали телеканали 2-51 (54 МГц - 698 МГц) для використання вторинними пристроями. Ці пристрої, часто пізнавальні радіостанції, можуть динамічно отримувати доступ до спектра, якщо будь-яка завада, яку вони викликають ліцензованим передавачам, в межах прийняттого рівня [20]. Проте основні переривання в пізнавальних службах очікуються, коли смуга використовується основними користувачами. Це являє собою найгірший випадок ймовірності переривання для когнітивних радіосистем [21]. Найбільш вірогідною ситуацією є значне збільшення часу, необхідного для доставки пакетів через динамічно доступний спектр при співіснуванні з основним користувачем [22]. Виокремлюють три схеми, що використовують різні рівні ієрархії, представлені наступним чином:

1. Розповсюджені, де пізнавальні користувачі автономно отримують доступ до основного каналу користувача.
2. Централізовані, де пізнавальні користувачі отримують доступ до спектру на основі узгоджених схем управління.
3. Гібрид, де є поєднання двох вищезгаданих методів для організації доступу когнітивних користувачів до спектру.

1.4. Розподілена мережева архітектура

Управління мережею має важливе значення для контролю та оптимізації операцій мережі у відповідь на динамічні зміни потреб кінцевих користувачів. Керування включає ініціалізацію, моніторинг та модифікацію мережевих функцій. Таким чином, архітектури керування мережею дозволяють керувати та поширювати апаратні та програмні модулі, які реалізують необхідні функції над різними системами в мережі [23].

1.4.1. Сценарій керування мережею

Давайте спочатку розглянемо сценарій одного каналу, в якому один основний та два пізнавальні користувачі намагаються встановити зв'язок через цей канал, використовуючи різні базові станції в тій самій області, без перешкод (див. рис. 1.6). Якщо основний користувач припинив радіодіяльність на певний час $T_{pr\ off}$, то CR1 і CR2 розпочнуть «змагання» на утримання доступу до і-смути. Обидва CR сприймають наявність каналу індивідуально і починають передавати, коли можливо отримати доступ. Сервер спектру (SP – Spectrum server), який належить кожному оператору, стане основним джерелом інформації для визначення оточуючих операторів. Очікується, що сигнал основних користувачів відомий, а будь-який сигнал вторинних користувачів буде розпізнано усіма іншими CR. У таких системах мульти-доступу кількість отриманих підтверджень пропорційна кількості пізнавальних користувачів, це означає, що накладні втрати на зворотній зв'язок можуть бути занадто великими, і тому потенціал зворотнього каналу може бути втраченим. Для зменшення інформації про зворотний зв'язок у таких випадках система зв'язку може бути використана для

зменшення впливу тривалих затримок у зв'язку з очікуванням відповідей підтвердження.

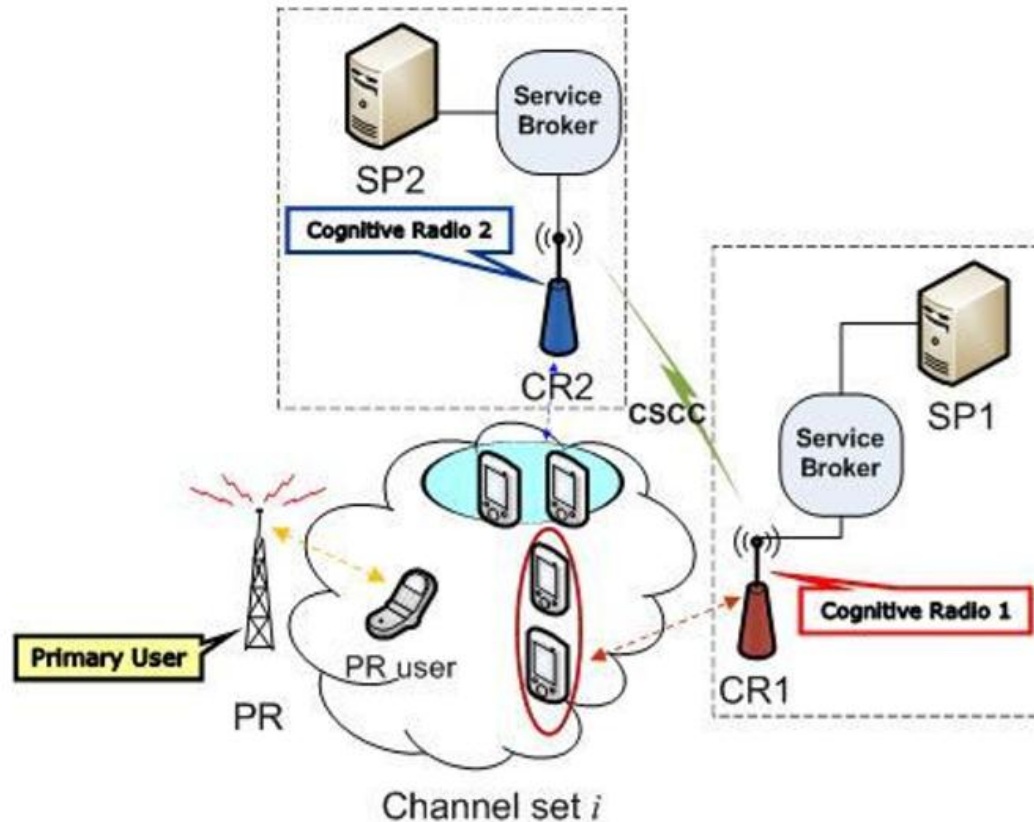


Рис. 1.6. Рішення для управління розподілим спектром

1.4.2. Сценарій гетерогенної мережі

Як згадувалося раніше, існує значна кількість невикористовуваних отворів спектру, доступних тимчасово в ліцензованій смузі спектру. Тому мережі когнітивних радіосистем розгортаються для використання цих можливостей передачі використовуючи методи когнітивної комунікації. Як загальна схема, малюнок 1.7 являє собою гетерогенну архітектуру, в якій когнітивна мережа співіснує з основною мережею з однієї сторони та доступом до одного і того ж діапазону спектру для мікросотових доменів (microcellular domains).

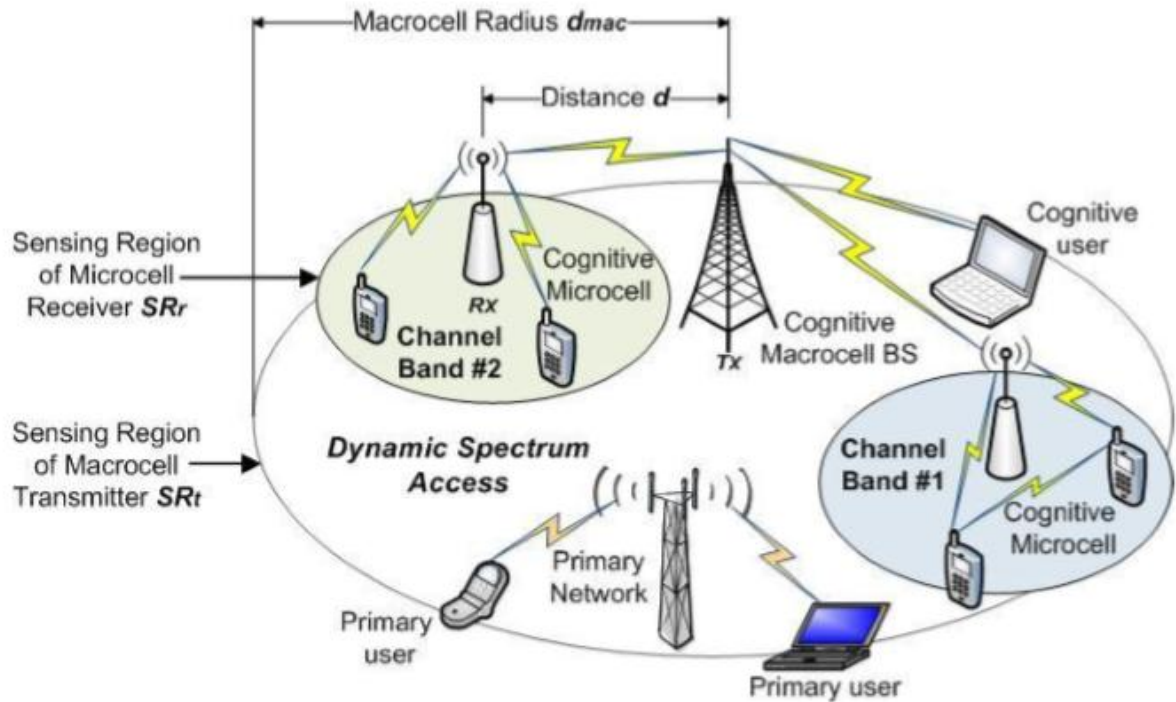


Рис. 1.7. Основна архітектура в пізнавальній мережі, що використовує розподілені мікро-
соти

Критерієм успіху в CRN є визначення найкращого наявного спектру шляхом виявлення присутності первинних користувачів. Це ускладнюється в динамічно змінюваній бездротовому середовищі, де використовуються різні технології, різні оператори та користувачі. Ємність вільних просторів у спектрі може змінюватися також як функція місця доступності та найближчих основних користувачів. Як вторинний користувач, пізнавальні мережі повинні постійно уникати перешкод для основних користувачів. Крім того, когнітивні користувачі повинні звільнити поточний канал і перейти до нового каналу негайно, коли основні користувачі повертаються для передачі; це називається передачею спектру (spectrum handover). У наведеній вище архітектурі доступні діапазони спектру розділені шляхом створення невеликих передавальних областей пізнавальних мереж. Ця система багаторівневого доступу забезпечує краще співіснування та розподіл спектру між основними та пізнавальними користувачами. Таке точне моделювання інфраструктури пізнавальної мережі є ключем до розуміння фактичних переваг вторинних користувачів. Можна

помітити, що модель системи, представлена в цьому розділі, пов'язана з однією операторною моделлю; однак моделювання також застосовується і до гетерогенної моделі. Завдання полягає в тому, щоб встановити ієрархічне моделювання аутентифікації доступу до спектру та необхідних адаптаційних потужностей між різними бездротовими доменами. Метою є запобігання кількох точок доступу перешкоджати один одному та основній базовій станції макро-соти LTE.

1.4.3. Модель системи

Ключовим фактором для мережі когнітивних радіосистем є встановлення зв'язку між багатьма базовими станціями. Це вимагає наявності вільних каналів спектру на всьому шляху передачі який проходить посилення. Недоступність спектру на одному або декількох ділянках може спричинити серйозні переривання у вторинних мережевих сервісах. Ця недоступність може бути спричинена [25]:

- Відсутністю деяких когнітивних вузлів вздовж траєкторії між двома точками, коли основні користувачі займають весь спектр. Це блокує когнітивні станції протягом непередбачених періодів часу, доки у спектрі не з'являться простори.
- Когнітивні базові станції можуть ігнорувати запити щодо формування зв'язків з іншими сусідніми станціями. Ця поведінка викликає значне зниження продуктивності пізнавальної мережі, особливо якщо ця дія була розповсюджена на багатьох мережевих ділянках.

Тому алгоритми розподілу каналів, що використовуються в сотових мережах, не застосовуються для когнітивних радіо мереж. Оскільки проблема оптимального розподілу каналів в когнітивних радіо мережах враховує нові фактори, такі як динамічний розподіл спектру, необхідні нові алгоритми, що дозволяють забезпечити гнучкість доступу до спектру і співіснувати з користувачами без будь-яких перешкод. Розглядаючи обмеження якості каналу, проблема збільшується. Обмеження якості зв'язку відносяться до співвідношення сигнал-шум або співвідношення дальності

використання каналу, тоді як привильним буде рівномірний розподіл доступних каналів користувачами.

1.5. Централізоване керування мережею

1.5.1. Спільний розподіл спектру

У реалістичних системах централізовану мережеву систему важко реалізувати. Всі основні та вторинні оператори повинні бути підключені до SB(Spectrum Broker). Отже, він обов'язково має надати схвалення для будь-якого CR, який має намір передавати на будь-якому каналі. Цей процес виконується за допомогою ієрархічних рівнів, показаних на рисунку 2.8. Запит на передачу спочатку передається від CR до диспетчера послуг (SM – Service manager) оператора, а потім до SB. Брокер виступає в ролі головної складової постачальника інформації, отриманої від мережевих датчиків та службових менеджерів операторів. Після цього SB вживає необхідні заходи для розподілу часу використання для декількох користувачів. SB створює зворотну лінію зв'язку, необхідну для проміжного розподілу доступного часу серед вторинних користувачів. Хоча це, здається, легким способом поділитися одним каналом, але час, задіяний для обробки запиту CR, є значним та може спричинити витрати часу під час обробки на будь-яких рівнях системи. Однак така система, здається, найкращою для уникнення перешкод між самими користувачами CR або CR та основними користувачами.

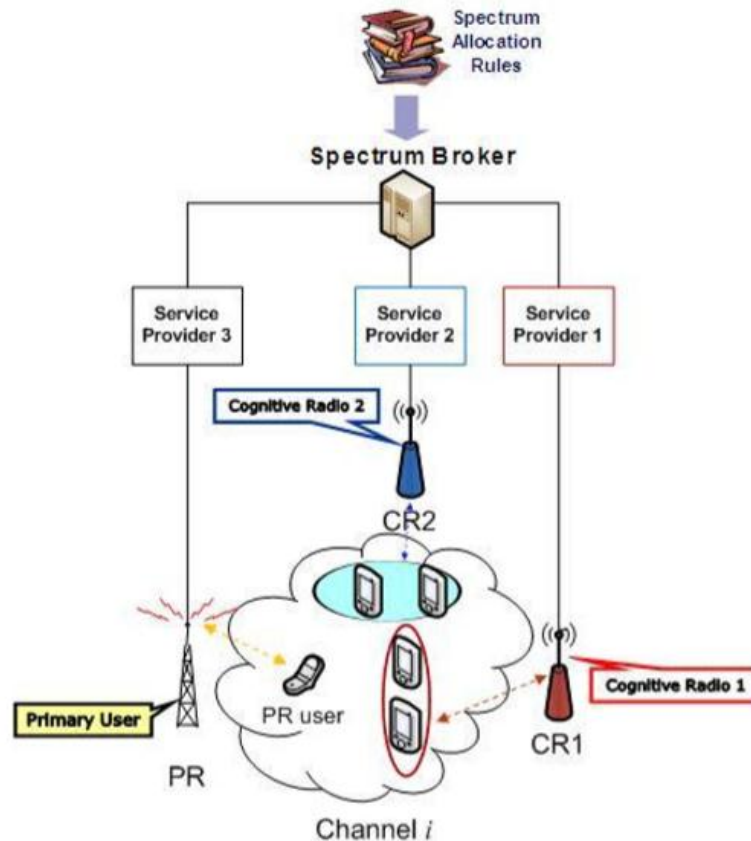


Рис. 1.8. Рішення централізованого регулювання спектром

Перш ніж почати будь-яку передачу, CR повинен завантажувати параметри PR (модуляція, кодування, потужність передачі, маршрути та область покриття) з SB. Ця інформація допомагає CR адаптуватися до відповідних параметрів передачі та уникати завад для PR якщо він раптово починає передачу. Ця модель застосування передбачає високий рівень взаємодії між різними радіостанціями та основними організаціями, що керують спектром.

1.5.2. Модель системи

У підході із SB, сервер може бути використаний для забезпечення співіснування первинної та вторинної радіостанцій у спільному середовищі в централізованому режимі. Централізований сервер розподілу спектру отримує інформацію про оточення та перешкоди через локальні вимірювання з різних терміналів, а потім пропонує можливості щодо ефективного використання спектру. Постачальники послуг та користувачі мереж, апріорно, не володіють жодним спектром; замість цього вони отримують права, пов'язані з тимчасовими правами, від регіонального брокера спектру до частини спектру та налаштовують його на надання послуг мережі [26]. Основною метою SB є досягнення мінімальної імовірності блокування з'єднання за допомогою оптимально керованого доступу до динамічного спектра. Тому розумно мати користувачів з низьким та високим пріоритетом спектру. Найвищий пріоритет завжди привласнюється ліцензованим користувачам. Пріоритетність між двома неліцензійними користувачами повинна включати мінімальний захист смугу. Отже, кількість прийомів-передач, прийнятих від неліцензованих користувачів, не повинна перевищувати кількість вільних каналів за певний період часу. Це значне завдання для успіху когнітивних мереж, які використовують централізовані моделі з поділом спектра. Зростаюча кількість дзвінків проти меншої кількості можливостей передачі призведе до неймовірної кількості відхилених дзвінків та заблокованих з'єднань. Така ситуація може стати ще гіршою, коли так багато систем звернуться до SB одночасно. Час, який витрачається на зв'язок із SB, отримання ліцензії на тимчасовий доступ, а потім виконання адаптації для доступу до певного каналу, може спричинити відсутність таких обмежених можливостей передачі. Тому необхідно зрозуміти, який тип послуг очікується від SB як функцію від розміру мережі та незанятих проміжків у спектрі для зменшення такої складності або перешкод. Це може бути зроблено під час розгортання нових мереж або планування будь-яких модифікацій для функціонування управління мережею. Також дуже важливо зрозуміти тип повноважень, наданих різним SB для місцевого, регіонального чи навіть міжнародного характеру. Крім того,

важливо зрозуміти які з'єднання SB використовуються, і чи з'єднані вони з основними та вторинними мережами або тільки із когнітивною мережею.

1.6. Гібридне керування мережею

1.6.1. Огляд

Обидва ці сценарії, централізовані та розподілені, об'єднуються разом для створення нового гібридного управління спектрами. У цій моделі, якщо CR2 має намір передавати певними каналами, він надсилає запит до SB. SB, як показано на малюнку 1.9, оцінює зручність користування. Тримаючи в увазі загальні правила передачі та правила співіснування, SB має повноваження призначати різну кількість CR, які мають намір співіснувати на наборі каналів.

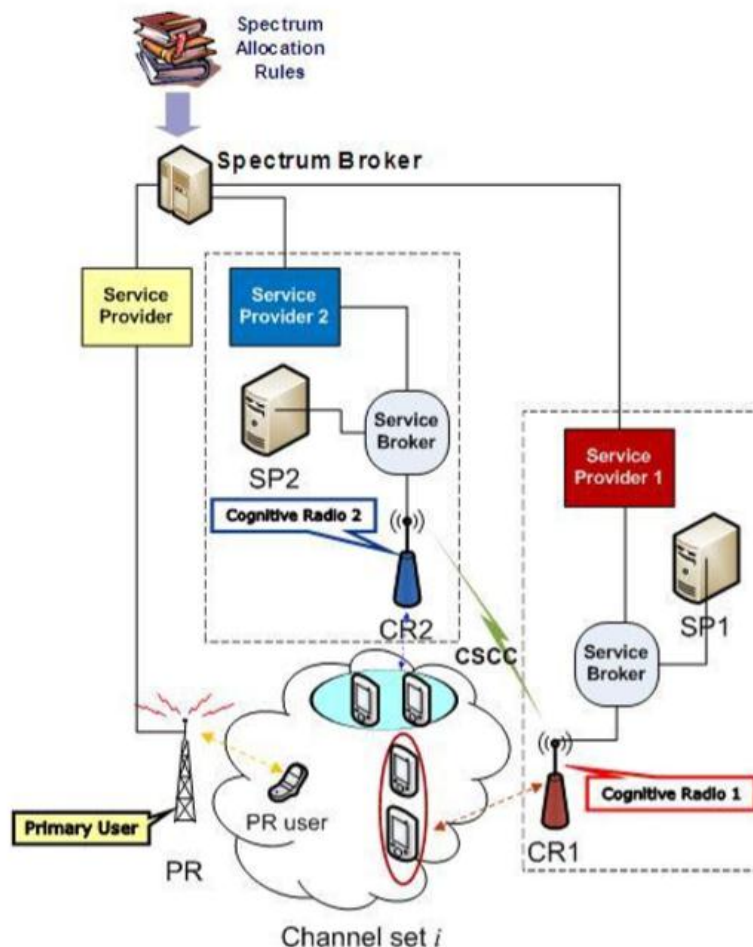


Рис. 1.9. Гібридне рішення для управління спектром

CR1 і CR2 діляться наявною смугою відповідно до вимог кінцевих користувачів. Обидві CR можуть спілкуватися один з одним, використовуючи CSCC (Common Spectrum Control Channel), і обмінюватися досвідом та знаннями на додаток до інформації, яку отримують від SB. Після того, як користувач був встановлений SB, один з цих CR буде головним (master), а інший – підлеглим (slave). Головний користувач повинен очолити всі інші п-вторинні радіостанції за свій досвід роботи в каналі. Отже, діяльність з доступу до спектра керується CR1 поряд з переговорами між усіма встановленими CR, тоді як всі оновлення повинні передаватися майстром до SB. Це дозволить SB розглядати інші питання оператора та звільнити інформаційні канали для інших користувачів. Коли будь-який CR залишає встановлений канал, головний CR повідомляє SB і негайно створює нову послідовність для використання спектру для забезпечення ефективного використання між різними користувачами. Цей сценарій є більш сумісним з майбутніми гетерогенними мережами, де для гнучкого використання для обмеженого спектру необхідний гнучкий DSA.

1.6.2. Модель системи

Основні завдання полягають у плануванні такої мережі та налаштуванні різних доменів, щоб оптимізувати наявні проміжки спектру. Проект EU FP7-E3 досліджує та визначає рішення для управління та контролю взаємодії, масштабованості та гнучкості в бездротових мережах. Ці рішення врахували як у BS, так і в основних елементах мережі, що забезпечують кінцеве обслуговування (наприклад, шлюзи, контролери доступу, сервери аутентифікації) [27]. У нашій моделі ми зосереджені на виборі каналів для точок доступу до мережі. Отже, ми припускаємо, що когнітивна точка доступу (AP – Access Point) має можливість перевіряти доступні можливості передачі спектру і періодично адаптуватися відповідно до динамічних змін спектру та трафіку. Тому активність даного каналу визначається як середня кількість передач фреймів, усереднена за всією тривалістю перевірок протягом

певного часу. Кумулятивна активність каналу не лише відображає активність певного каналу, але також розглядає активність в інших каналах, що накладаються. Наприклад, кумулятивна активність оцінюється за наступним рівнянням [28]:

$$CA_i = \sum_{k=i-COF}^{i+COF} A_k, \quad k \in CH \quad (1.1)$$

Де CA_i представляє кумулятивну активність каналу i , COF - коефіцієнт накладання каналів, який в 802.11b становить три, CH являє собою набір каналів у системі (набір каналів від 1 до 11 в 802.11b), A_k це активність у певному каналі k . Таким чином, сукупна активність - це сума активності в сусідніх каналах, що перекриваються. Пізнавальна мережа вибирає найкращий можливий канал на основі рівняння [28]:

$$\text{Operating Channel} = \arg \min_i CA_i \quad (1.2)$$

1.6.3. Проблема мульти-хопу(Multi-hop)

Процес відкриття та формування маршруту має іншу процедуру в пізнавальній мережі, ніж в інших мережах. Встановлений зв'язок над багатьма AP може згортатись через динамічні зміни в мережах в різних передавальних доменах. Одне з поточних запропонованих рішень включає в себе зберігання даних або просто буферизацію їх до повторної стабілізації того ж маршруту. Іншим рішенням є пошук та створення нового маршруту. Очевидно, що обидві ці операції викликають значні затримки в мережі. Крім того, буферний вузол, який зберігає дані в певному місці, може бути повністю втрачений, і зв'язок не буде знову відновлюватися протягом певного часу через недоступність спектра. Інші очікувані прямі наслідки: перерва в обслуговуванні та затори в дорозі. Щоб пояснити це, нехай A, B, C, D, E, F, G - позиції, в яких

когнітивні BS вузли розташовані в когнітивній мережі, як показано на малюнку 1.10. Кожний вузол (N) призначений для певного бездротового домену.

Пакет даних відправляється від A до E, використовуючи маршрут (1). Припустимо, що раптова перерва в обслуговуванні відбувається в вузлі C за рахунок зміни зв'язку в вузлі D. Тоді час затримки, що виникає внаслідок буферизації пакетів у вузлі C, виводиться у вигляді [21]:

$$t_h(N_c) = t_{leaving} - t_{arrival} \quad (1.3)$$

Де $t_{leaving}$ і $t_{arrival}$ час прийому пакета і надсилання на вузол C відповідно.

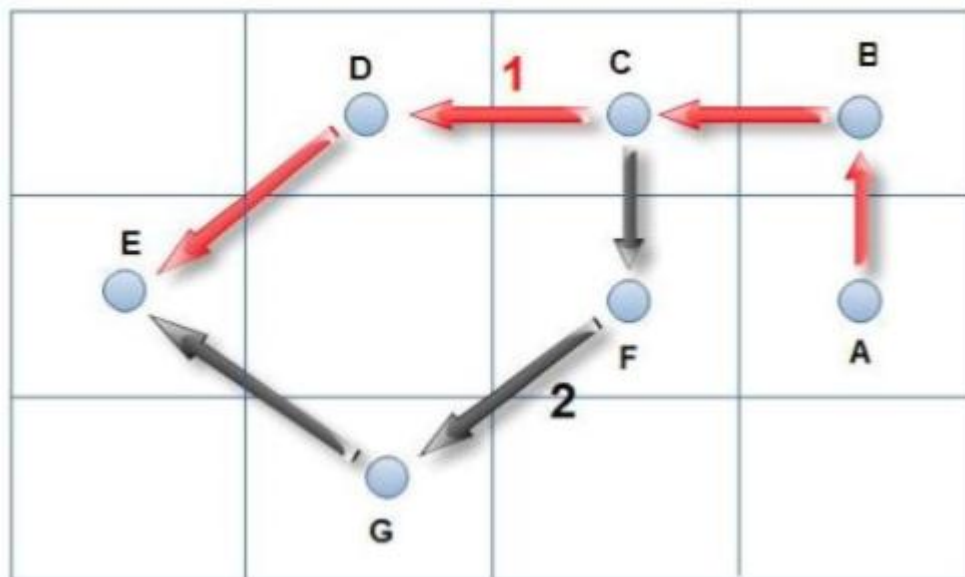


Рис. 1.10. Сценарії маршрутизації в когнітивній мережі

Припускаючи, що вузол N_c буде зберігати дані, доки не буде відкрито новий маршрут, і цей маршрут (2) буде вибрано новою траєкторією для запитуваного QoS, отже, час, який витрачається під час відхилення пакета від постачальника послуг до кінцевого користувача (T_{rec}):

$$T_{rec} = t_h(N_c) + \sum_{n=1}^m t_d \quad (1.4)$$

Де t_d час затримки, витрачений під час адаптації кожного когнітивного вузла по посилянню, і m це число когнітивних вузлів.

Час, витрачений на багаторазове перемикання між багатьма маршрутами для певного посилення, також повинен розглядатися в остаточній затримці:

$$t_{rd} = T_{rec} + \sum_{n=1}^i t_s \quad (1.4)$$

Де t_s є час перемикання, що є функцією траєкторії даних.

Додаткові втрати можуть бути пов'язані з наступним затримками вузлів уздовж вибраної ланки, що призведе до нових значень загальної втрати (IL - Interruption Loss):

$$IL = \int t_{rd} \cdot I_l \cdot \frac{dl}{dt} \quad (1.5)$$

Де I_l є втрата на одну соту.

В результаті, можливість руйнування маршруту $P(R_c)$ збільшується через зростання часу затримки. Це відношення застосовується переважно для довгих маршрутів, що проходять через бездротові перевантажені зони. Тому імовірність розриву посилення може бути записана у вигляді:

$$P(R_c) = \frac{IL}{Nt.C_d} \quad (1.6)$$

Де C_d відображає тривалість виклику.

1.7. Кооперативний та некооперативний спільний доступ до спектра

Той факт, що немає пріоритетів доступу між різними пізнавальними користувачами, які отримують доступ до однієї групи каналів, піднімають важливе питання для обговорення рівня необхідної співпраці між ними під час надходження викликів. Співпраця може бути виражена в обміні інформацією про перешкоди, правил політики спектра та/або готовності до погіршення окремих показників. З

одного боку, існують підходи, які передбачають повне співробітництво суб'єктів, які поділяють спектр [29]. Спільною технікою, що використовується в цих схемах, є формування кластерів для обміну локальною інформацією про перешкоди. Ця локалізована операція забезпечує ефективний баланс між повністю централізованою та розподіленою схемою [30]. Таку схему можна застосувати для мереж, де маршрутизатор і клієнт утворюють кластер. У такому випадку клієнти надсилають свої індивідуальні результати відстеження на маршрутизатор, які потім об'єднуються, щоб отримати остаточний результат. Для когнітивних ad-hoc мереж, де немає централізації, це співробітництво повинно здійснюватися розподіленим способом [31]. Здатність когнітивного радіоприймача адаптуватися до перемикання між каналами та мобільність спектру пропонує величезні можливості для оптимізації продуктивності. Доступ до динамічного спектра є складним завданням у мережах розподіленого типу, особливо коли у пристроїв бракує співпраці. Теорія ігор - це математична основа, яка надає природну платформу для вивчення впливу стратегій прийняття рішень і рівноважних рішень у конкурентному середовищі з обмеженими ресурсами. У теоретичному аналізі гри параметр оптимізації та визначення функції корисності характеризують отримане рівноважне рішення, за умови, що вони існують. Така запропонована ігрова теоретична схема розподілу адаптивних каналів для когнітивних радіоприймачів сформульована для охоплення «егоїстичної» та коопераційної поведінки гравців. Основними проблемами в даному виді комунікацій є проблеми, пов'язані з некооперативним розподілом каналів та алгоритмами балансування навантаження та максимізацією використання спектру. Вибір каналу в розподіленій некооперативній мережі менш вивчений, і дискретний характер проблеми ускладнює моделювання [32].

1.8. Висновок

У цьому розділі наведено комплексний огляд моделей управління когнітивною мережею з точки зору пропускної спроможності та використання спектру. Що стосується аспекту управління мережею, більшість літератури досліджує відомі мережеві архітектури, не визначаючи ключові проблеми, щоб порівняти показники ефективності для успішного розгортання мережі. Таким чином, дослідження з управління мережею потрібно розширювати на багатокористувацькі та/або багаторівневі випадки, а також розглянути практичні питання, такі як доступність каналів спектра, пов'язані з передачею, що має велике значення для практичного дизайну системи. Що стосується використання спектру, існуючі дослідження показали, що послуги більшого використання користувачів можуть бути досягнуті завдяки ефективному дизайну мережі.

2. Програмно-визначувані системи, особливості застосування та роботи

2.1. Програмно-визначувана система (SDR)

Software-defined radio (SDR) — система радіозв'язку, в якій програмне забезпечення використовується як для модуляції, так і для демодуляції радіосигналів.

Суть технології Software Defined Radio полягає в тому, що базові параметри приймально-передаючого пристрою визначаються саме програмним забезпеченням, а не апаратною конфігурацією, як ми звикли бачити в класичних конструкціях. Таким чином, це словосполучення можна перевести, наприклад, як "радіо, яке визначається програмним забезпеченням", але можна піти далі і скоротити до двох слів: "програмне радіо", але з цим варіантом слід бути обережним і в контексті намагатися підкреслювати, що незважаючи на згадку епітета "програмний", ми маємо справу саме з апаратним забезпеченням, параметри якого визначаються програмно.

При використанні SDR персональний комп'ютер стає ядром любительської радіостанції, завдяки чому практично весь обсяг робіт із обробки сигналу перекладається на програмне забезпечення, яке запускається на персональному комп'ютері або керує роботою деяких конкретних спеціалізованих мікропроцесорних пристроїв, призначених для обробки сигналу. Мета такого підходу — створити систему, яка може приймати і передавати практично будь-які радіосигнали за допомогою програмного забезпечення, що є гнучким і адаптивним.

В даний час SDR широко застосовуються у військовому і стільниковому зв'язку, де в режимі реального часу потрібна підтримка різноманітних радіопротоколів, що змінюються.

У режимі прийому SDR може забезпечити вищу ефективність, ніж при використанні традиційних аналогових методів, оскільки при цифровій обробці сигналів їх фільтрація близька до ідеальної. Крім того, за допомогою програмних

алгоритмів можуть бути реалізовані такі функції, які дуже складно отримати при аналоговій обробці.

Ідеальна реалізація SDR-приймача — це підімкнення антени безпосередньо до аналого-цифрового перетворювача (АЦП), сполученого з потужним комп'ютером. У такому разі програмне забезпечення, запущене на комп'ютері, забезпечувало б обробку потоку даних, що поступав, і перетворювало б їх в необхідну форму. Ідеальний SDR-передавач функціонував би аналогічно. Програмне забезпечення формувало б потік даних, який поступав би в цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), підімкнений до антени.

Проте сучасна технологічна база не дозволяє реалізувати таку ідею на всіх можливих частотах. Доступні АЦП ще недостатньо швидкі для роботи в широкій смузі радіоспектру або не мають достатнього динамічного діапазону, щоб оперувати з сигналами, що мають величезну різницю рівнів в цьому спектрі.

Реалізація SDR можлива поки тільки на частотах до 6 ГГц, тому в пристроях з більш високими робочими частотами проблема високоякісної оцифровки ВЧ сигналів вирішується їх перенесенням на більш низьку частоту. Для цього використовуються змішувач і опорний генератор. Таким чином, потрібне певне аналогове устаткування, щоб направити частину спектру частот на обробку в комп'ютері.

Враховуючи величезні можливості, які закладені в SDR, ця технологія займає панівне положення в техніці радіозв'язку.

Взагалі, ідея SDR зовсім недавно виглядала б відверто фантастично. Уявіть собі: ви набираєте певний код на конфігураційній панелі, і пристрій з прийомо-передавача Bluetooth перетворюється в ZigBee-систему. Зауважу, що мова йде не тільки про радіочастотні параметри системи - вид модуляції, потужність високочастотного сигналу, параметрів приймача (чутливість, вибірковість, придушення гармонік), що, взагалі, можна зробити за допомогою комутації відповідних вузлів приладу, але і про

протокольну частину. Тобто в наведеному мною прикладі ми спостерігаємо повне переродження апаратури, яка раніше могла виконувати тільки одну жорстко задану функцію.

Наведений мною приклад трохи перебільшений, оскільки крім таких міжстандартних бездротових систем на даний момент активно розвиваються програмно реконфігуруємі пристрої SDR. Одним з пріоритетних напрямків розвитку систем SDR, безумовно, є створення багато-протокольних радіосистем. Тут активно працюють військові (зі зрозумілих причин), але не тільки вони. Цей напрямок має високу ступінь комерціалізації, завдяки чому він отримав активний розвиток.

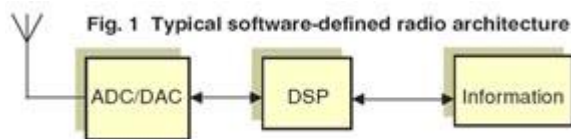


Рис. 2.1. Спрощена архітектура типового Software Defined Radio

Вона містить блоки аналого-цифрового, цифро-аналогового перетворення, антену, ланцюги обробки цифрових сигналів та інші допоміжні блоки. Як правило, крім цифрового сигнального процесора, радіо з архітектурою SDR містить мікроконтролер. Розглянемо докладніше кожен з блоків для випадку приймача з архітектурою SDR. Одним з найбільш важливих вузлів такого SDR-пристрою є аналого-цифровий перетворювач. В реальності АЦП безпосередньо підключається до антени, тобто перетворює безперервний в часі сигнал в дискретну двійково-кодовану форму. Очевидно, що характеристики АЦП будуть значною мірою визначати і параметри пристрою в цілому. Тому слід звернути увагу на такі важливі параметри аналого-цифрових перетворювачів, як відношення «сигнал - шум», розрішення (число біт за вибірку), динамічний діапазон при відсутності паразитних складових, і, нарешті, параметр, вкрай важливий для автономних систем - розсіювана потужність і наявність режимів енергозбереження.

Інший не менш важливий компонент архітектури SDR - цифровий сигнальний процесор. Саме він забезпечує гнучкість системи і використовується головним чином для проведення розрахунків, необхідних для виконання алгоритму обробки сигналу. Традиційно ЦСП використовувалися для виконання функцій перед-модуляційної обробки і обробки сигналу після детектування (в приймачах). Однак останнім часом вони використовуються в основному в трансиверах з розширеними комунікаційними можливостями для детектування, корекції, демодуляції, синтезу частот і фільтрації каналів. Перетворення Фур'є - одна з найбільш поширених функцій, які виконуються ЦСП мало не в кожному комунікаційному пристрої. Широко також використовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ).

Однак ідеальний пристрій SDR в даний час не може бути реалізовано з причин надмірно високої вартості такої системи і досить відчутних обмежень технологій, що використовуються в основі систем SDR (наприклад, наявні на даний час цифрові сигнальні процесори мають недостатню швидкодію для реалізації одночасно всіх функцій радіо). Тому на даний момент існує кілька реалізацій бездротових платформ, які в більшій чи меншій мірі відповідають факторам архітектури SDR.

Історично однією з перших таких реалізацій була система SPEAKeasy, яка стала успішним проектом по використанню комунікаційних систем на базі технології Software Defined Radio у військовому обладнанні США. Система випробовувалася в США в 1970 році. SPEAKeasy дозволяла цифровій апаратній платформі загального призначення здійснювати зв'язок з іншими системами в широких діапазонах частот, видів модуляції, методів кодування даних і варіювання інших параметрів. Комерційні реалізації систем SDR підрозділяються на платформи для реалізації базових станцій і на пристрої і термінали споживчої категорії. Як правило, продуктивність останніх становить 1 млн операцій в секунду (зважаючи на постійне вдосконалення та здешевлення ЦСП це значення постійно зростає) і вони в першу чергу орієнтовані на роботу від автономних джерел живлення (батареї, акумулятори).

2.2. Використання архітектури SDR в мобільній телефонії

Активний розвиток технологій мобільного зв'язку ставить перед виробниками апаратного забезпечення і інвесторами проблему вибору технологій (CDMA2000, UMTS / W-CDMA, EDGE, GPRS та ін.) Для інвестування коштів. Проблема дуже складна, оскільки передбачити напрямок, в якому ринок обладнання для систем мобільного зв'язку буде розвиватися надалі, досить нелегко. Помилка в цьому випадку веде до суттєвих фінансових втрат. Тому вже зараз багато дослідницьких лабораторій і виробників обладнання мобільної телефонії дивляться в бік технології Software Defined Radio як альтернативи традиційної архітектури сьогоденних стільникових телефонів. Апаратне забезпечення стільникового телефону з архітектурою SDR потенційно підтримує всі стандарти мобільної телефонії, а його фактичні параметри визначає завантажена прошивка вбудованого програмного забезпечення. Однак на цьому переваги телефонів на базі архітектури SDR не закінчуються. Такий мобільний пристрій може дозволити більш ефективно використовувати радіочастотний спектр і споживану від джерела живлення енергію, легко перемикається з одного стандарту зв'язку на інший (наприклад, з GSM на PDC, коли європейці в'їжджають на територію Японії, або з GSM на EDGE для поновлення можливостей телефону) .

Інженери можуть просто вибирати серед програмних модулів, які були створені раніше іншими розробниками SDR-систем, і використовувати їх у своїй продукції в будь-якому поєднанні. Факт багаторазового повторного використання таких програмних модулів дуже привабливий для розробників як з точки зору зниження складності проектування і часу виведення виробу на ринок, так і з точки зору отримання більшої надійності при менших витратах на проектування. Не варто забувати і про те, що апаратне забезпечення систем на базі архітектури SDR простіше, оскільки безліч аналогових ланцюгів в них замінюється програмною обробкою цифрового сигналу. Якщо говорити докладніше про особливості апаратного забезпечення пристроїв мобільної телефонії, то потрібно зазначити, що з точки зору

ринку сьогодні більш економічним варіантом є використання не ЦСП, а більш швидких і гнучких мікросхем ASIC, які використовують жорстко закладені логічні блоки для виконання арифметичних операцій. Іншим дуже підходящим і привабливим компонентом для використання в системах SDR є програмовані логічні мікросхеми ПЛІС, в яких можна програмувати міжз'єднання і логічні функції вже після етапу виробництва пристрою. І, нарешті, зазначу, що хоча мікросхеми ASIC забезпечують кращу продуктивність при низькій вартості, їх програмованість знижується з ростом їх ступеня інтеграції, що іноді є досить відчутним обмеженням. Тому деякі пристрої SDR, що вимагають підтримки великої кількості різних стандартів бездротового зв'язку, можуть вимагати використання в своєму складі кількох мікросхем ASIC. Або в таких випадках можна використовувати зв'язку ЦСП і ПЛІС, в залежності від особливостей і вимог конкретного застосування.

2.3. Архітектура стільникового телефону SDR

Розглянемо приблизну архітектуру стільникового телефону, виконаного на базі технології SDR. Трансивери SDR реалізують свої функції шляхом запуску відповідних модулів і блоків програмного забезпечення на апаратній платформі загального призначення. Аналогова частина апаратного забезпечення для виконання таких функцій, як, наприклад, підстроювання частоти, фільтрація, модуляція і демодуляція, замінюється програмним кодом, який реалізує ці функції в «цифрі». Такий перерозподіл дозволяє одному радіопристроїв перепрограмувати свої змішувачі та фільтри для підтримки великої кількості схем модуляції, що дозволить працювати йому в безлічі різних діапазонів частот.

Розглянемо звичайний двухрежимний стільниковий телефон (рис. 2.2), який являє собою типовий пристрій другого покоління. Наприклад, в Північній Америці такий телефон може працювати в мережах двох видів - застарілої аналогової AMPS і сучасної європейської, наприклад, GSM. Підтримка різних типів мереж здійснюється

простим перемиканням відповідних передавачів і приймачів. Така архітектура не є масштабованою, оскільки для додавання підтримки ще одного постачальника послуг потрібно доповнювати апаратне забезпечення.

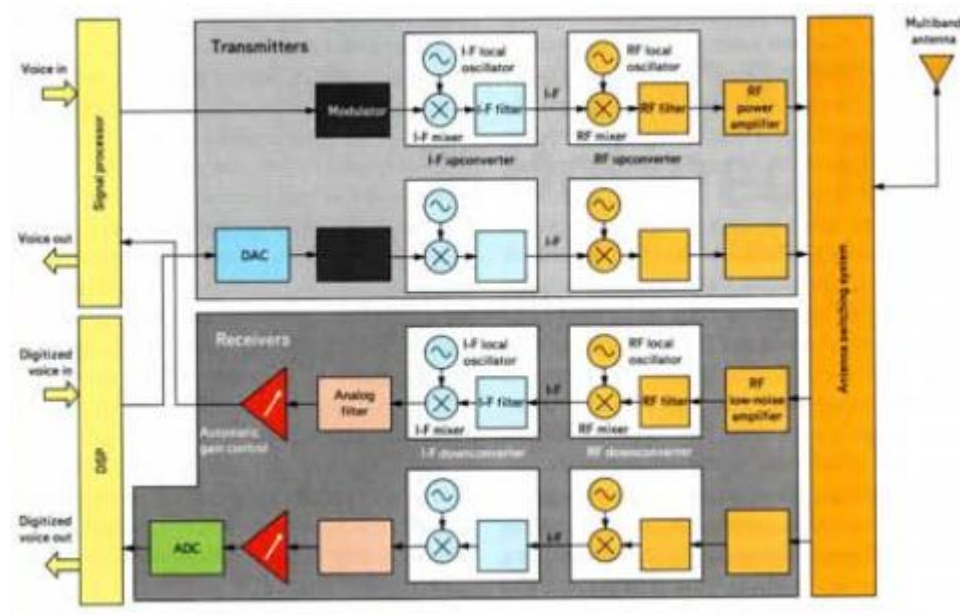


Рис. 2.2. Архітектура дворежимного стільникового телефону, здатного працювати в двох різних мережах, аналоговій та цифровій

В аналоговому режимі вихідні сигнали виходять з аналогового сигнального процесора і подаються на послідовність функціональних блоків такої ж конструкції, які застосовуються в більшості радіо- і телевізійних станціях - стародавньої супергетеродинної архітектури. З сигнального процесора несуча модулюється сигналом і переноситься на проміжну частоту (IF, Intermediate Frequency), а потім підвищується до більш високої частоти RF (Radio Frequency), після чого посилюється і подається на антену.

У зворотному напрямку аналоговий приймач знижує прийнятий аналоговий сигнал в двох каскадах, вибирає відповідний канал і потім подає його на сигнальний процесор для демодуляції. Цифровий трансивер працює аналогічним чином - за винятком того, що замість аналогового використовується цифровий сигнальний

процесор. При цьому можуть також використовуватися операції декомпресії, шифрування і фільтрації.

По суті, дворезимний стільниковий телефон має конфігуровані функції з безліччю програмних ядер, які активуються і деактивуються при необхідності. Технологія SDR пропонує більш елегантне рішення, яке використовує програмовані цифрові сигнальні процесори, які спочатку завантажують і потім запускають ті функціональні блоки, які необхідні для реалізації підтримки конкретного стандарту.

Першим кроком на шляху перетворення традиційного стільникового телефону до системи SDR є перетворення якомога більшої кількості вузлів з аналогових на цифрові. Тобто всі аналогові baseband-ланцюги повинні бути замінені на цифрові. На стороні передавача це означає перетворення в цифровий вигляд мови якомога ближче до мікрофона, всі операції обробки далі (стиснення, фільтрація, модуляція) виконуються цифровими ланцюгами. Аналогічні перетворення потрібні і в приймальній частині телефону. Тут стоїть завдання перетворити вхідний радіочастотний сигнал в цифрову форму якомога ближче до антени для подальшої обробки в програмованих пристроях, і потім перетворити його назад в аналогову форму якомога ближче до динаміка телефону.

Наступним кроком є використання аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворювачів для того, щоб досягти програмованості на високих частотах. Як видно (Рис. 2.3.), SDR-трансивер вимагає менше половини всього апаратного забезпечення традиційного стільникового телефону. Замість дублювання ланцюгів передачі і прийому програмне радіо SDR має всього один ланцюжок, параметри якого налаштовуються відповідно до конкретних вимог. Всі функції визначаються програмно, підтримується безліч стандартів при використанні одного приймача і передавача. Приймач має аналоговий крайовий каскад, при цьому вихід ПЧ перетворюється в цифрову форму і потім піддається обробці в ЦСП. Вибір каналу здійснюється перемиканням фільтрів, цю операцію реалізує ЦСП.

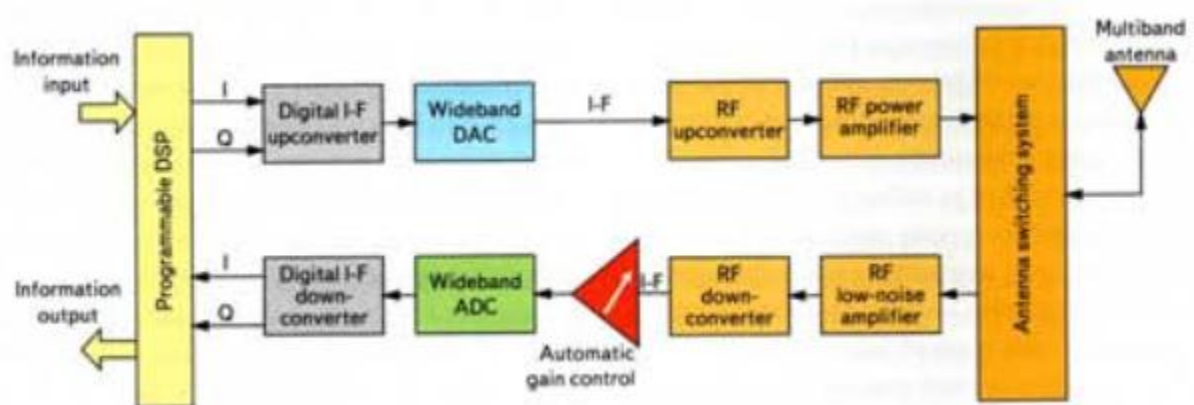


Рис. 2.3. Архітектура стільникового телефону на базі SDR

Можна виділити чотири компоненти, параметри яких є критично важливими для систем SDR і фактично визначають їх характеристики: це АЦП, ЦСП, фільтри і радіочастотні підсилювачі. АЦП є найбільш критичний компонент в системі SDR, оскільки його швидкодія впливає на те, наскільки близько антена повинна бути до самого АЦП. Серед найбільш важливих характеристик самого АЦП необхідно виділити його швидкісні параметри, розрішення і лінійність. Якщо розглядати АЦП з невисокою вартістю (а тільки такі можуть використовуватися в масовій продукції), то розрішення таких приладів в середньому досягає 100 млн виб./с. Це достатнє значення для того, щоб оцифрувати сигнал проміжної частоти, але явно недостатньо для оцифровки високочастотного радіосигналу. Прямий шлях реалізації Software Defined Radio - використовувати архітектуру прямого перетворення, до якої аналогові ланцюги безпосередньо знижують радіочастотний сигнал, пропускаючи етап проміжної частоти (Рис. 2.4). Така архітектура дозволяє підтримувати більш широкий діапазон частот і смуг пропускання за рахунок прямого перетворення і відсутності каскадів проміжної частоти

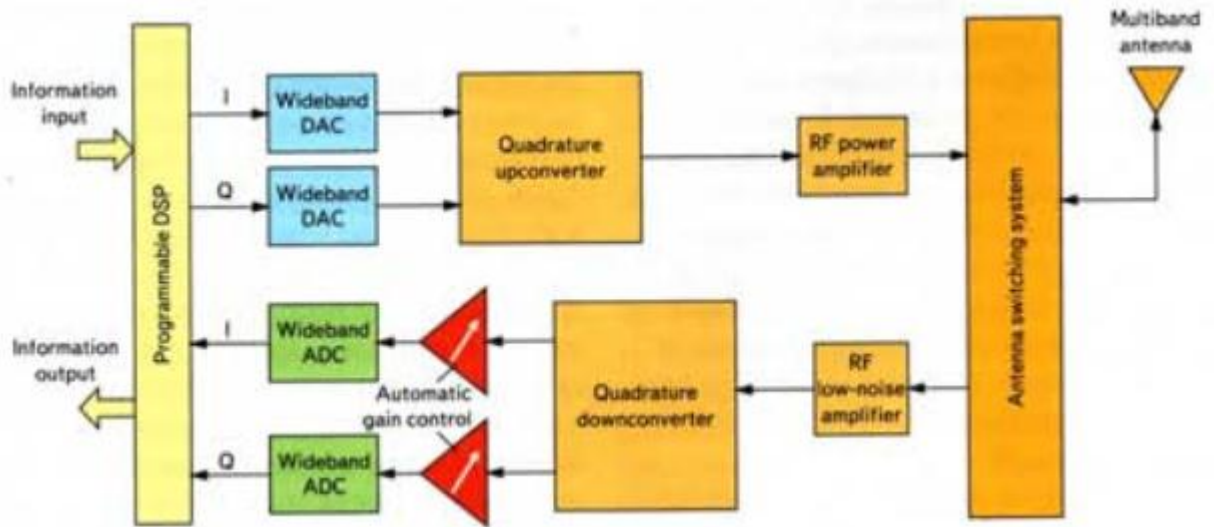


Рис. 2.4. Архітектура стільникового телефону з прямим перетворенням

Потім цей сигнал оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача, після чого необхідний канал може бути обраний шляхом підключення відповідного фільтра. Така функціональність може бути реалізована в цифровому сигнальному процесорі. Однак існують деякі конструктивно-технологічні проблеми в реалізації такої архітектури на мікросхемах, що дещо стримують цей напрямок.

Як вже зазначалося вище, іншим важливим компонентом пристроїв SDR є ЦСП. Незважаючи на постійне зростання продуктивності, для деяких систем може виявитися більш вигідним використання паралельної обробки цифрових даних декількома ЦСП. Однак такий підхід призводить до збільшення розмірів, ваги, розсіюваної потужності і вартості, тому вдаватися до нього варто лише в разі крайньої необхідності.

І, нарешті, фільтри. Вони критично важливі в системах SDR, тому необхідно ретельно підходити до їх вибору. Непоганим рішенням є використання окремих мікросхем цифрових фільтрів. Ці пристрої можуть здійснювати функції фільтрації сигналу при низькій складності і невеликій вартості. На відміну від варіанту реалізації функцій фільтрації на ЦСП, цей варіант не є програмованим, але, тим не менше,

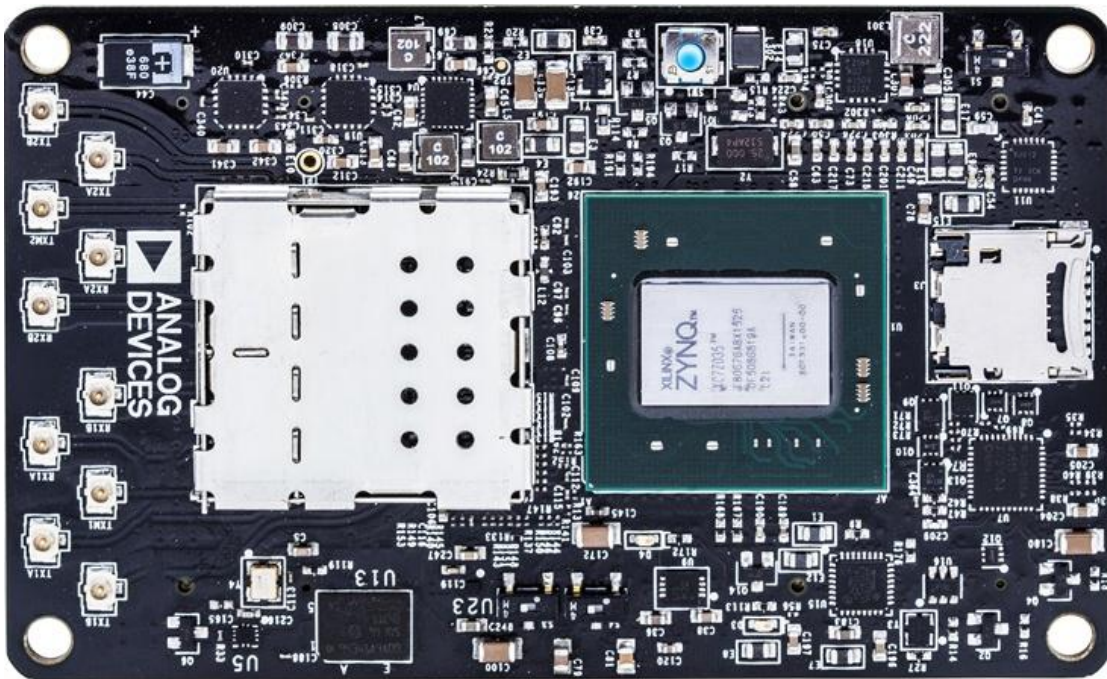
оскільки частотні діапазони для стандартів стільникової телефонії є фіксованими, їх використання в конструкціях стільникових телефонів SDR цілком виправдано.

2.4. Приклади апаратних платформ для систем з архітектурою SDR

Як же реалізувати мультипротокольний бездротовий інтерфейс на базі SDR? Відповідей багато, але найочевиднішою і найбільш логічною є використання модульної архітектури побудови системи. Такий вибір, по-перше, пов'язаний зі сформованим технічним менталітетом, якщо так можна висловитися, інженерно-наукових кадрів світу, тому модульна архітектура на сьогоднішній день є найбільш очевидним етапом подальшого розвитку систем SDR.

Одним з основних компонентів, без якого нам не обійтися - програмовані логічні мікросхеми ПЛІС і цифрові сигнальні процесори DSP для обробки цифрових сигналів. Ці компоненти широко поширені і мають невисоку вартість, тому при грамотному і ретельному проектуванні ми можемо отримати досить недороге універсальне багато протокольне радіо на базі архітектури SDR. Для таких систем (які отримали назву SFF - Small Form-Factor) характерні високі вимоги до продуктивності підсистеми цифрової обробки сигналів і висока складність алгоритмів (з цілком зрозумілих і очевидних причин). Використання зв'язки DSP + FPGA дозволяє застосовувати традиційний підхід до проектування, знизити вартість системи і час розробки.

Прикладом такої платформи SFF може служити система з модульною архітектурою побудови фірми Analog Devices (Рис. 2.5)



Мал. 2.5. Вид платформи SDR формату FFM фірми Analog Devices

BLOCK DIAGRAM

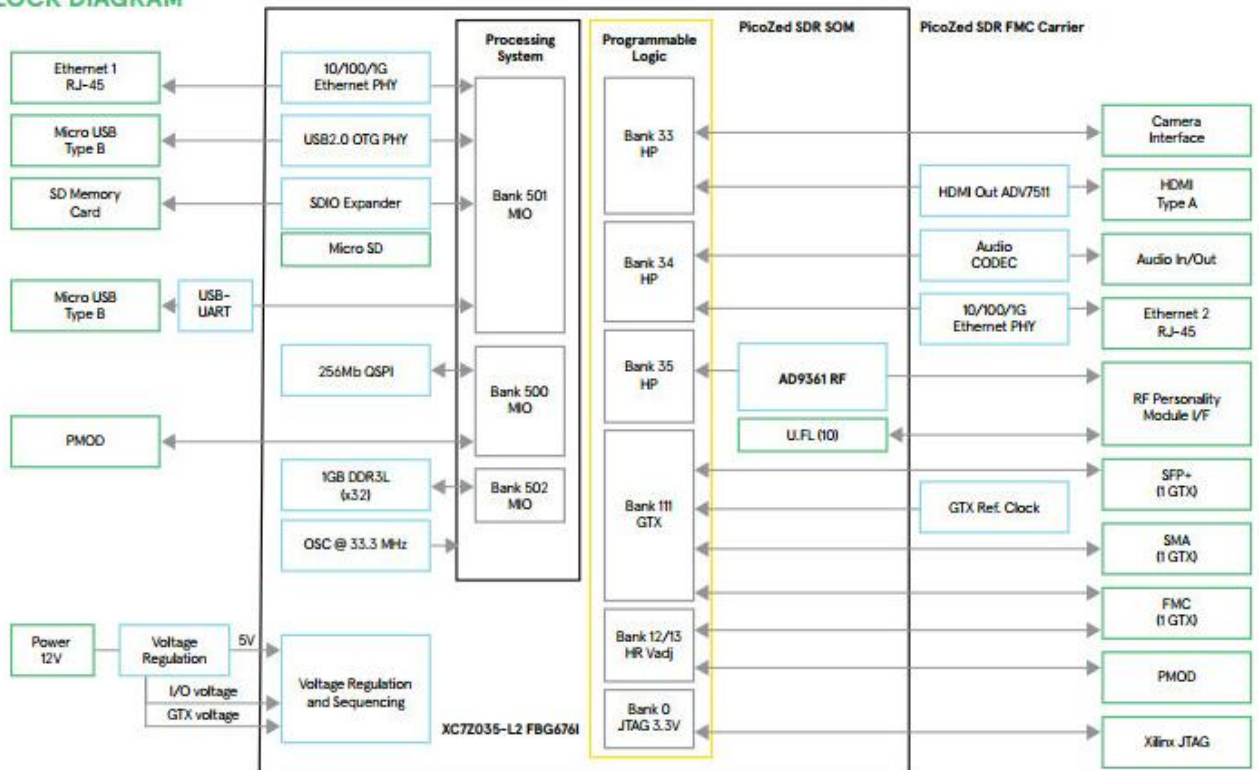


Рис. 2.6. Структурна схема платформи SDR формату FFM фірми Analog Devices

Ця платформа побудована на основі конфігуруємого приємо-передавача AD9361.

AD9361 - це високоякісний, володіючий високим ступенем інтеграції, конфігуруємий прийомо-передавач (RF Agile Transceiver™), розроблений для використання в базових станціях мереж 3G і 4G. Можливості програмування і здатність роботи в широкому діапазоні частот роблять його ідеальним рішенням для створення різних приймально-передавальних радіопристроїв. Компонент містить аналоговий радіочастотний тракт, налаштовуємий каскад аналого-цифрової обробки сигналу в смузі модулюючих частот і інтегровані синтезатори частоти, спрощуючи проектування систем завдяки конфігуруємому інтерфейсу з процесором. Гетеродин приймача AD9361 працює в діапазоні частот від 70 МГц до 6.0 ГГц, а гетеродин передавача - від 47 МГц до 6,0 ГГц, перекриваючи більшість ліцензованих і неліцензованих діапазонів. Ширина смуги каналів становить від 200 кГц до 56 МГц.

Два незалежних приймача прямого перетворення мають чудові коефіцієнт шуму і лінійність. Кожна підсистема прийому включає в себе блоки незалежного автоматичного регулювання підсилення (AGC – Automatic gain control), корекції зміщення постійної складової, корекції квадратурних помилок і цифрової фільтрації, тим самим усуваючи необхідність реалізації цих функцій в зовнішньому комунікаційному процесорі. У AD9361 також є гнучко конфігуруємі режими ручного посилення, якими можна управляти ззовні. Наявні в кожному каналі два аналого-цифрових перетворювача (ADC) з високим динамічним діапазоном оцифровують прийняті синфазні (I) і квадратурні (Q) складові сигналу. Оцифровані сигнали проходять через конфігуровані проріджуючі фільтри і FIR-фільтри (finite impulse response – скіченна імпульсна характеристика) 128-порядку, після чого перетворюється в 12-розрядні вихідні сигнали на відповідній частоті дискретизації.

Передавачі побудовані на архітектурі прямого перетворення, яка забезпечує високу точність модуляції при наднизькому шумі.

Така реалізація передавача дозволяє отримати кращу в своєму класі величину вектора помилок <-40 дБ, що забезпечує значний запас на рівні системи при виборі зовнішнього підсилювача потужності. Вбудований модуль контролю потужності передавача може використовуватися в якості детектора потужності і дозволяє виконувати дуже точні вимірювання потужності передачі.

Повністю інтегровані синтезатори з фазовим автопідстроюванням частоти (ФАПЧ) з дробовим коефіцієнтом ділення і низьким енергоспоживанням генерують частоти для всіх каналів прийому і передачі. У AD9361 забезпечується рівень ізоляції каналів, необхідний для систем дуплексної передачі з частотним поділом (FDD). Також в пристрій інтегровані всі компоненти VCO (Voltage Controlled Oscillator – генератор, керований напругою) і петльових фільтрів. Ядро AD9361 може харчуватися безпосередньо від стабілізатора 1,3 В. Управління мікросхемою здійснюється за допомогою стандартного 4-проводового послідовного порту і чотирьох керівників ліній вводу / виводу. Для мінімізації енергоспоживання в процесі роботи передбачені різні режими зниженого споживання енергії. AD9361 випускається в корпусі CSP_BGA зі 144 кульковими контактами, що має розміри 10 мм × 10 мм.

2.5. Висновок

Не можна сказати, що технологія Software Defined Radio є молодого, оскільки військові вже давно використовують її в своїй апаратурі. З комерційної ж точки зору технологію можна вважати досить молодого і швидко розвиваючоюся. Компоненти для цифрової обробки сигналів, аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення удосконалюються і дешевшають з кожним днем, що постійно наближає вихід технології SDR в маси. Як було сказано, складність конструкції традиційних трансиверів істотно вище, ніж у SDR, не кажучи вже про відсутність у перших будь-якої гнучкості, так необхідної в сучасних умовах швидко змінних стандартів. Тому тотальний перехід до архітектури SDR неминучий, це лише питання часу.

3. Структура програмно визначуваної системи когнітивного радіо для радіосистем 4 та 5 поколінь

Розвиток програмного визначуваних радіосистем (SDR) повинен забезпечувати невелику, легку та економічно ефективну платформу, здатну підтримувати декілька форм сигналів в широкому діапазоні частот. Незважаючи на існування проблем у досягненні бачення швидко змінюємих форм сигналів, SDR є найважливішою технологією для майбутніх комунікацій і є платформою для когнітивних радіоприймачів. Когнітивний радіоприймач пропонується як технологія більш ефективного використання електромагнітного спектру. Хоча основні частотні діапазони, що представляють інтерес, повністю ліцензовані авторизованим користувачам, вони часто не зайняті у великих географічних регіонах або за значні проміжки часу. Когнітивні радіостанції передбачаються як усвідомлювані, адаптовані та інтелектуальні пристрої, здатні навчатися та працювати автономно в широкому діапазоні сценаріїв. Ключовою особливістю когнітивних радіостанцій є можливість виявляти невикористані діапазони частот, переходити до них і обирати відповідні параметри радіостанції. Ці радіостанції повинні мати можливість працювати, не створюючи перешкод для авторизованих користувачів діапазону частот, тому вони повинні контролювати наявність основного користувача та враховувати можливе розташування його приймачів сигналів.

Швидко диверсифіковані вимоги ринку представляють величезний виклик традиційній архітектурі мобільної широкопasmової мережі. З одного боку, обмежене місце в машинному приміщенні та недостатнє енергопостачання не дозволяють розмістити експоненціально зростаючу кількість мережевого обладнання операторів. З іншого боку, чиста неоднорідність, викликана різними специфікаціями обладнання бездротового доступу, викликає проблеми, пов'язані з управлінням та оптимізацією. Тому рішення повинно включати різні технології, такі як віртуалізація мережевих функцій (NFV), програмно визначувані радіосистеми (SDR) та програмно визначувані мережі (SDN).

Мобільний бездротовий трафік зазнав вибухового зростання протягом останніх десяти років, в основному завдяки величезному застосуванню мобільних пристроїв. Оскільки сценарії застосування поширюються від традиційного голосового зв'язку в режимі реального часу до соціальних мереж, розваг та електронної комерції, кількість пристроїв та швидкість передачі даних продовжує зростати експоненціально. Проте широкий консенсус передбачає, що 4G-мобільні мережі не наблизяться до задоволення потреб мереж, з якими будуть стикатися до 2020 року. Оскільки ефективність бездротових каналів наближається до фундаментальних обмежень, майбутнє поліпшення можливостей систем бездротового зв'язку може бути досягнуто альтернативно інновацією та оптимізацією мережевих схем та інфраструктур. Бездротові мережі 4G / 5G характеризуються неоднорідністю через змішане використання високодиференційованих технологій доступу. Тому оператори мережі пропонують особливі вимоги до постачальників обладнання для прийняття економічно ефективних та енергозберігаючих рішень. Ми вводимо деякі нові парадигми для вирішення вищезазначених проблем, включаючи віртуалізацію мережевих функцій (NFV), програмно визначувані радіосистеми (SDR) та програмно визначувані мережі (SDN). По-перше, NFV використовує стандартну технологію віртуалізації ІТ для консолідації кількох типів мережевого обладнання на промислові стандартні сервери високого рівня, комутатори та пристрої зберігання даних. Таким чином, оператори можуть проєтувати мережі розгортаючи мережеві послуги на стандартні пристрої [33]. NFV дозволяє доставку мережевих функцій без встановлення обладнання для кожного нового сервісу, що дозволяє зменшити інвестиції в мережеве обладнання (CAPEX - Capital Expenditure – Капітальні вкладення) та зменшити витрати на керування та експлуатацію мережі (OPEX - Operating expenses – Операційні витрати). Це дає змогу стандартному мережевому пристрою мігрувати з однієї апаратної платформи на іншу.

По-друге, SDR спрямована на реалізацію багатьох режимів, просто реконфігуруючи радіо з різним програмним забезпеченням, що впливає з назви. Програмне забезпечення може бути попередньо завантажено в пристрій або завантажено через фіксовані передачі даних або оновлювати по повітрю (OTA – over-the-air). SDR успішно використовується в системах військової комунікації та нещодавно представлена на ринку побутової електроніки [34]. Вона відіграє важливу роль у військових програмах з вимогами зміни каналів і модуляції. На сьогодні програмне рішення SDR стало привабливим, оскільки воно підтримує швидкий розвиток бездротових стандартів та короткий термін виходу на ринок. По-третє, SDN дозволяє телекомунікаційним розробникам керувати мережевими ресурсами таким самим простим способом, як і звичайні обчислювальні ресурси [35]. Для того, щоб підтримувати програмованість мережі зовнішніми програмами, SDN адреси розділяють площину керування з площини даних з відкритими інтерфейсами між централізованим контролером та пристроями пересилання пакета. З одного боку, контролер програмного забезпечення функціонує як контрольна площина і логічно розглядається як ядро мережевого інтелекту; з іншого боку, мережеві пристрої стають простими пристроями переадресації пакетів, що представляють собою площину даних.

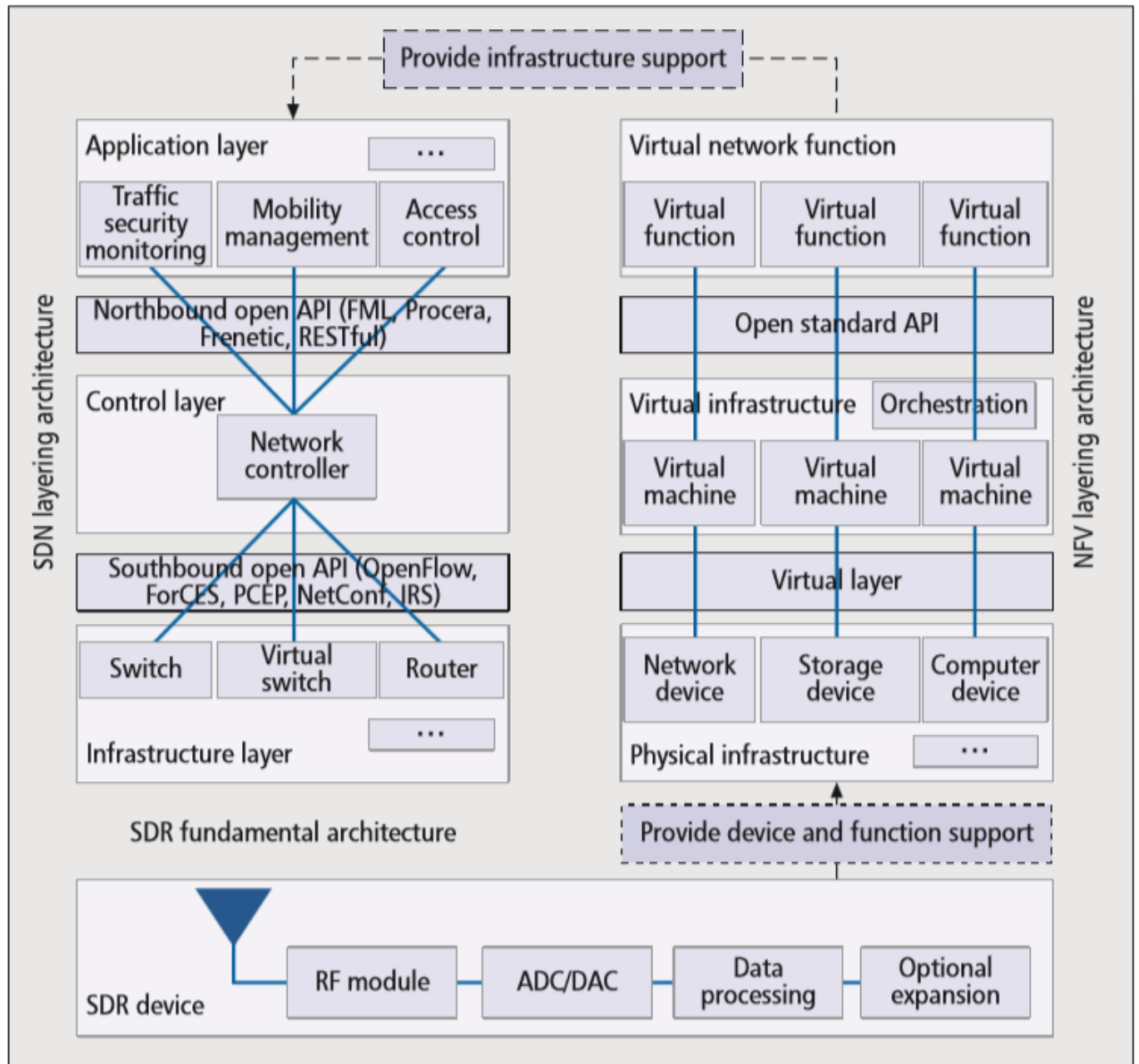


Рис. 3.1. Архітектура мережі з використанням технологій когнітивного радіо, SDR, SDN, NFV

3.1. Попередня оцінка роботи NFV, SDR, SDN та інтегрованої мережевої архітектури 4G / 5G

3.1.1. Попередня оцінка роботи NFV, SDR, SDN

На рис. 3.1. показана гібридна архітектура NFV, SDR та SDN. Завдяки технології NFV, оператори можуть створювати мережу інфраструктури кінцевої мережі із стандартною технологією віртуалізації IT. Це можна досягти шляхом реалізації мережевих функцій за допомогою програмного забезпечення. Легше ввести або протестувати нову мережеву функцію, встановлюючи або оновлюючи програмний пакет, що запускається серверами. Програмне забезпечення, що визначається радіо, також називається програмним радіо (SR), відноситься до бездротового зв'язку, де модуляція передавача утворюється або визначається комп'ютером. Приймач може використовувати комп'ютер, щоб відновити сигнал. SDR долає недоліки обладнання та допомагає розділити функції керування та сервісну функціональність. SDR-пристрої забезпечують підтримку пристроїв і функцій архітектури NFV, а NFV забезпечує підтримку інфраструктури SDN.

NFV: NFV вирішує ці проблеми за допомогою стандартної технології віртуалізації IT, об'єднуючи багато типів мережевого обладнання на промислові стандартні сервери високого обсягу, комутатори та пристрої зберігання даних, розташовані в центрах обробки даних, мережевих вузлах та об'єктах кінцевого користувача. Функція мережі реалізована у програмному забезпеченні, що працює на віртуальних машинах. NFV дозволяє створювати нові механізми для розгортання та обслуговування мережевих та інфраструктурних послуг. Він може бути швидко застосований та вимкнений з мінімальними зусиллями [36, 37]. На рис. 3.1. показана архітектура шарів NFV, включаючи функцію віртуальної мережі та віртуальну та фізичну інфраструктуру. Ці блоки є потенційними цілями для стандартизації. Відкритий стандартний API (Application Programming Interface – прикладний програмний інтерфейс) доступний у поточних розгортаннях, але може знадобитися розширення для обробки віртуалізації мережевих функцій. Структура, представлена

на рис. 3.1., зосереджена на функціях, необхідних для віртуалізації та подальшої роботи мережі оператора.

SDR: SDR - це система радіозв'язку, за якої компоненти, які як правило, реалізуються в апаратній частині, натомість, реалізуються програмним забезпеченням на персональному комп'ютері або у вбудованій системі. Технологія SDR забезпечує гнучкість та економічну ефективність, необхідну для забезпечення комунікацій в майбутньому. Ідеальний SDR має кілька діапазонів і режимів з відкритою архітектурою. Бездротові функції досягаються шляхом завантаження програмного забезпечення, яке пропонує різні послуги радіозв'язку. Основна платформа SDR включає в себе антену, багатодіапазонний радіочастотний (РЧ) модуль, широкосмуговий перетворювач A/D (D/A), процесори DSP та інші розширення. SDR рухає A/D і D/A ближче до РФ, від базової до проміжної частоти або навіть до РФ, і замінює виділені цифрові схеми програмуєчими DSP або FPGA пристроями [38]. Розділяючи системну апаратну архітектуру та функції, SDR може виконувати декілька функцій за допомогою програмного забезпечення на основі порівняно універсальної апаратної платформи. Він може програмувати робочу частоту, пропускну здатність системи, модуляцію та кодування джерела [39]. Крім того, система може бути легко оновлена шляхом зміни модулів процесу.

SDN: управління мережею в SDR відокремлено від переадресації та безпосередньо програмоване, що дозволяє абстрагувати базову інфраструктуру для програм та мережевих послуг і розглядати мережу як логічну або віртуальну сутність [40]. Архітектура SDN показана у лівій частині рис. 3.1. Мережева інтеграція централізована на програмних контролерах SDN. За допомогою SDN підприємства та перевізники отримують незалежний від постачальників контроль над всією мережею з однієї логічної точки, оскільки їм більше не потрібно розуміти і обробляти тисячі стандартів протоколу, а лише приймати інструкції від контролерів SDN. З відкритими інтерфейсами між контрольними та інфраструктурними рівнями SDN це дозволяє

здійснювати безпосередню маніпуляцію лінією пересилання мережевих пристроїв як фізично, так і практично. Крім того, з відкритими API між контролером SDN та шаблонами додатків, бізнес-додатки можуть працювати за абстракцією мережі, використовуючи мережеві служби та можливості, не прив'язуючись до деталей їх впровадження [41]. SDN робить мережу не стільки програмою, скільки індивідуальною для застосування, і додатки, не стільки залежними від мережі, скільки від здатностей мережі. В результаті обчислення, зберігання використання мережевих ресурсів можуть бути оптимізовані. У архітектурі, що показана на рис. 3.1, NFV може збільшити гнучкість розгортання та інтеграції мережевих сервісів в операційній мережі. Цілі NFV можуть бути досягнуті за допомогою механізмів SDN з точки зору підвищення продуктивності, спрощення сумісності з існуючими розгортаннями та полегшення процедур експлуатації та технічного обслуговування [42]. У свою чергу, NFV може підтримувати SDN, надаючи інфраструктуру, на якій може працювати програмне забезпечення SDN. NFV тісно узгоджується з цілями SDN, використовуючи сервери та комутатори. Крім того, SDR також надає підтримку віртуалізації мережевих функцій мобільних мереж.

3.1.2. Вимоги 4G / 5G NFV, SDR та SDN

На рис. 3.2. показана еволюція технологій широкопasmового радіодоступу (RAT – Radio Access Technologies) разом із ключовими характеристиками, такими як розміри комірок, частотні ресурси та вимога до службових носіїв. У епоху 5G мережа бездротового зв'язку повинна бути здатною забезпечувати величезну кількість користувачів різноманітними послугами, що вимагають різної швидкості передачі даних. Як рішення, концепція інтелектуальних гетерогенних мереж (HetNets) пропонується як ієрархічна схема використання ресурсів мережі, що використовує як стільникові технології, так і WLAN. HetNets вимагає підтримки технологій NFV, SDN і SDR на різних рівнях. Для інтерфейсів гетерогенних вузлів та пристроїв, SDR може

застосовуватися для обробки сигналів фізичного рівня та вилучення пакетів даних для верхніх шарів. На рівні end-to-end транспортування пакетів, SDN використовується для гнучкої побудови повноцінних каналів передачі шляхом експлуатації різних мережевих протоколів.

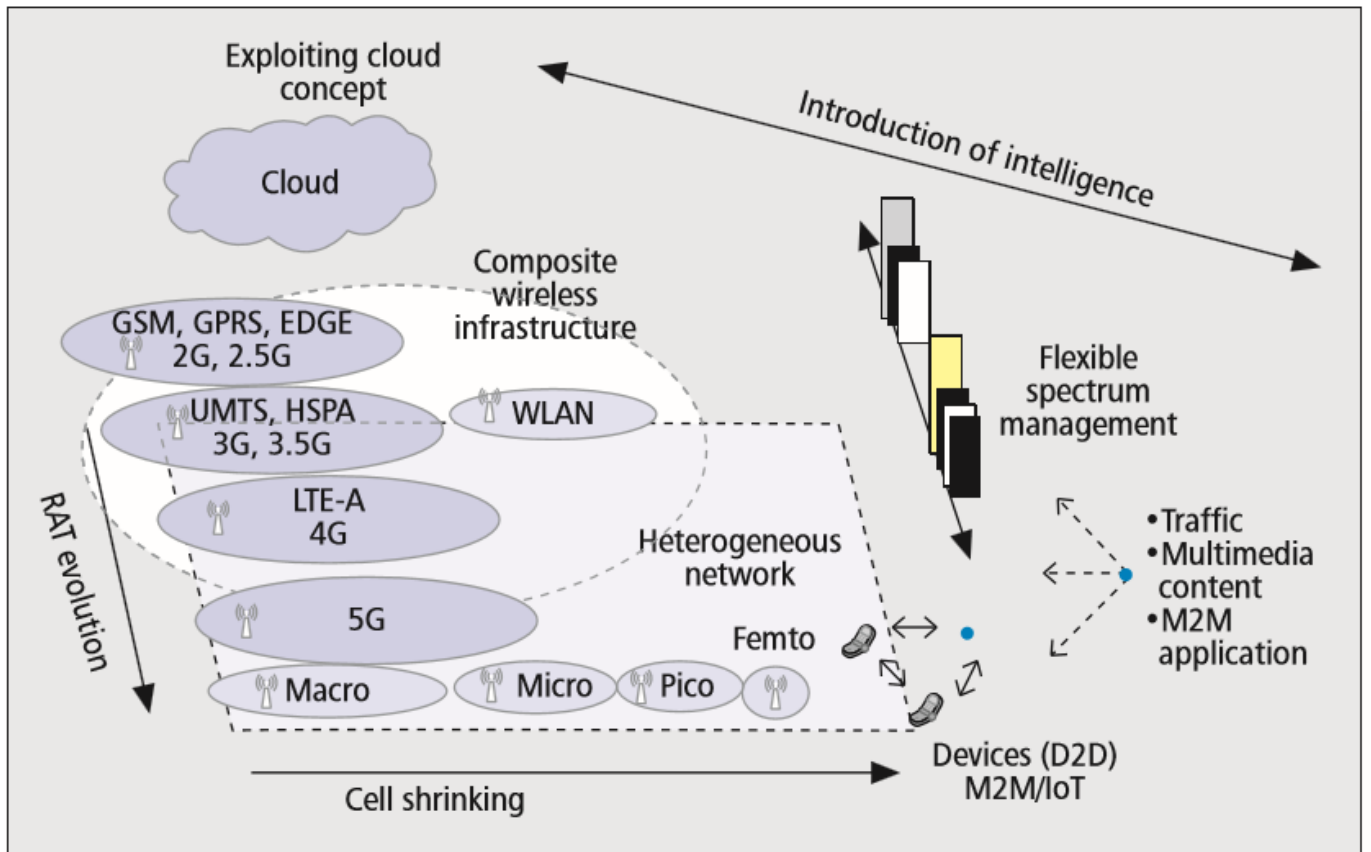


Рис. 3.2. Еволюція мобільних мереж та ключових технологій

3.2. Існуючі стандарти та необхідні розширення для NFV та SDR / SDN

Забезпечення сумісності міжнародних стандартів загальної структури, технічних вимог та специфікацій є важливою метою для пристроїв та систем з підтримкою NFV, SDR та SDN. Протягом останніх років основні міжнародні органи стандартизації телекомунікацій, включаючи WINNF, ONF, ETSI, ITU-T, IEEE тощо, досягли значного прогресу у створенні технічної бази та публікації детальних специфікацій для трьох технологій відповідно з різних точок зору. Однак, для конкретних сценаріїв впровадження, таких як 4G / 5G, все ще багато роботи.

3.2.1. Поточний прогрес стандартизації на NFV, SDN та SDR

Хронологічно концепція SDR і SDN була введена в 1990-х роках на основі потреб додатків, і вони стали гарячими темами досліджень в новому столітті. Порівняно з попередніми двома технологіями, NFV - відносно нова ідея, запропонована провайдерами Інтернет-послуг, щоб відповідати тенденції віртуалізації інфраструктури. Технологія SDR сприяє форуму бездротових інновацій (WINNF), який раніше називався форумом SDR [43]. Форум співпрацює з іншими органами стандартів, такими як MCE, IEEE, ETSI тощо, та регуляторними органами, такими як FCC та NTIA, для остаточного складання звітів, рекомендацій та технічних специфікацій для SDR та суміжних технологій, таких як архітектура програмного забезпечення зв'язку (SCA), когнітивний радіоприймач (CR) та доступ до динамічного спектра (DSA). Форум Open Networking (ONF), створений інтернет-компаніями та постачальниками послуг [44], визначає архітектуру SDN, підтримує стандарт OpenFlow та організовує тестування відповідності пристроїв з підтримкою SDN. У архітектурі SDN мережеві пристрої спрощуються за допомогою програмного, керуючого та інфраструктурного шарів. Функції двох нижніх шарів називаються контролером OpenFlow та перемикачем OpenFlow, які відповідають площині керування та площині даних традиційних мережевих комутаторів і маршрутизаторів

IP / MPLS. ETSI є обраним органом стандартизації групи NFV Industry Specification Group (ISG). Як довідковий матеріал, у Таблиці 3.1. узагальнено та перелічено офіційно опубліковані стандарти трьох технологій.

Таблиця 3.1. Стандарти технологій NFV, SDR, SDN

Технологія	Організація стандартизації	Головні стандарти	Функціональність
NFV	ETSI	ETSI GS NFV-PER 001 002	Продуктивність та концепції
		ETSI GS NFV 001 004	Випадки використання та вимоги
SDR	ETSI	ETSI TR 103 062 064	Випадки використання та визначення
		ETSI TR 102 681/803/839/944/945	
		ETSI TS 102 969/ ETSI EN 302 969	Стандарти мобільних девайсів
		ETSI TS 103 095/146-1	Визначення
	ITU	ITU-R SM.2152	Специфічні стандарти додатків
		ITU-R M.2117-1	
		ITU-R M.2063/2064	
	WINNF	ITU-R Resolution 805/956	Структура системи та безпека
		SDRF-01-P-0006	
		SDRF-02-P-0002	
SDN	ONF	“Software Defined Networking: The New Norm for Networks” Interoperability event technical paper v0.4/v1.0	Визначення та сумісність
		OpenFlow series	Конфігурація та керування
	ITU	ITU-T Resolution 77	Стандартизація для SDN
	IETF	IETF RFC 7149	Перспективи

3.2.2. Необхідні стандартні розширення для майбутніх 4G / 5G мереж

Як згадувалося раніше, майбутні 4G / 5G бездротові мережі характеризуються неоднорідністю і використовуватимуть більш складні технології для використання спектру, мульти-доступу, обробки сигналів, захисту для підтримки взаємоз'єднання ще більш різноманітного користувацького обладнання та пристроїв. Використання NFV, SDN і SDR значною мірою зменшить складність мереж нового покоління, знизить вартість побудови мережі та полегшить майбутню еволюцію мережі. З точки зору роботи мережі, ці три технології стосуються різних рівнів мережі. Специфічно, SDR несе відповідальність за проблеми фізичного рівня, такі як модуляція, обробка сигналів, кодування каналів; та інкапсуляція даних. SDN зосереджується на графіку елементів мережі, що забезпечує кінцевий транспорт, а також перемикання та маршрутизацію пакетів даних із гарантованим QoS. NFV організовує та об'єднує функціональні об'єкти мережі, щоб сервіс та пристрій могли бути швидко розгорнуті. На основі цього розуміння, ключові технології різних шарів можуть бути включені в три схеми.

SDR: висока пропускна спроможність даних та мобільність 4G / 5G досягаються в основному завдяки застосуванню технологій MIMO та динамічного використання спектру, і ці вдосконалення необхідно вбудувати в SDR. Фактично, IMT-Advanced, ITU-T технічні вимоги до систем 4G планували розширити смугу пропускання від 20 МГц до 40 МГц і збільшили кількість антен до 3, 4 або навіть більше. Що стосується 4G або 5G, то гетерогенна мережева структура підкреслює вимогу, що пристрої повинні бути запрограмовані для адаптації до базових мережевих схем, таких як Wi-Fi або стільниковий зв'язок, з повним використанням ресурсів спектру, ліцензованих чи ні. Для досягнення вищезазначених функцій необхідно визначити та запровадити більш ефективні архітектури та ефективні алгоритми в рамках SDR.

SDN: SDN знайшов свої найкращі практики в кампусних мережах (CAN - Campus Area Network) та центрах обробки даних. У майбутніх мобільних

телекомунікаційних мережах складні програми повинні полягати в керуванні мобільним зв'язком, передачі між службами Інтернет-провайдера та безпеки контрольної площини. Оскільки площину керування відокремлено від площини даних, перемикання багатопоточного користувацького обладнання між різнорідними мережами, такими як Wi-Fi та стільниковий зв'язок, може бути легко керованим виключно на більш високому рівні без раптової втрати підключення або переривання сервісу. Для досягнення безперешкодного переключення між мережами різних постачальників послуг IETF запропонував метод під назвою Mobile IP (MIP), який дозволив роумінговим пристроям переміщатися з однієї мережі в іншу з постійною IP-адресою. Цей варіант може бути більш ефективним за підтримки SDN. Безпека - ще одне важливе питання, яке потрібно підкреслити у майбутніх стандартах SDN. Зокрема, ми повинні звернути увагу на деякі конкретні питання, такі як захист конфіденційності підписок та механізми, які є надійними для атак кібер-і шкідливих програм, коли сеанс поширюється від приватних мереж до загальнодоступних мереж Інтернет-провайдера.

NFV: збагачення стандартів NFV має базуватися на перспективах операторів мережі. По-перше, еволюція NFV повинна відповідати тенденції розвитку бездротової мережі; по-друге, необхідно уважно розглянути питання міграції та співіснування нинішніх застарілих мереж та NFV мереж; по-третє, здорова екосистема NFV необхідна для підтримки сталого розвитку. Портативність та сумісність віртуальних пристроїв для мережевого обладнання сприятимуть створенню здорової екосистеми NFV. Портативність надасть свободу оптимізації сервісу та розгортання мережі. Ця операційна сумісність відокремлює віртуальні пристрої від фізичного обладнання, наданого різними постачальниками. Це вимагатиме, щоб NFV визначав уніфіковані інтерфейси та протоколи, подібні до OpenFlow, щоб відокремити абстрактну функцію від базового апаратного забезпечення. У Таблиці 3.2. узагальнено та перелічено запропоновані розширення до стандартів трьох технологій.

Таблиця 3.2. Розширення до стандартів NFV, SDR, SDN

Технологія	Розширення для 4G/5G	Задачі
NFV	Відкритий стандарт API	Визначити уніфікований інтерфейс, який чітко розмежовує екземпляри програмного забезпечення з базового апаратного забезпечення, як це представляють віртуальні машини та їх гіпервізорів.
	Вбудований SDR	Визначити стандарт для монтажу пристрою SDR та уніфікованого базового устаткування NFV.
SDR	Multi-input multi-output (MIMO)	Отримати вищу ефективність спектра за рахунок значного збільшення обчислюваної складності.
	Управління ресурсами	Збільшити складність системи за допомогою ще невідомого режиму керування живленням та конфігурації пристрою в SDR
SDN	Управління мобільністю	Уніфікований передача між постачальниками послуг
	Підтримка гетерогенних мереж	Забезпечення сервісів незалежно від місця розташування або типу доступу до мережі.
	Безпека	Накладні витрати на управління та конфіденційність SDN

3.3. Відкриті проблеми для майбутніх досліджень

На відміну від 4G, система 5G буде включати дуже високі несучі частоти з масивними смугами пропускання, надзвичайною базовою станцією та щільністю пристроїв, а також безпрецедентне число антен. Для досягнення цієї мети основна мережа повинна також досягти безпрецедентного рівня гнучкості та інтелекту, тим часом ця тенденція може з часом розширюватися до мереж радіодоступу. На рис. 3.3. показано зразкову мережу з безліччю ключових технологій, які можуть стати відкритими проблемами для майбутніх досліджень.

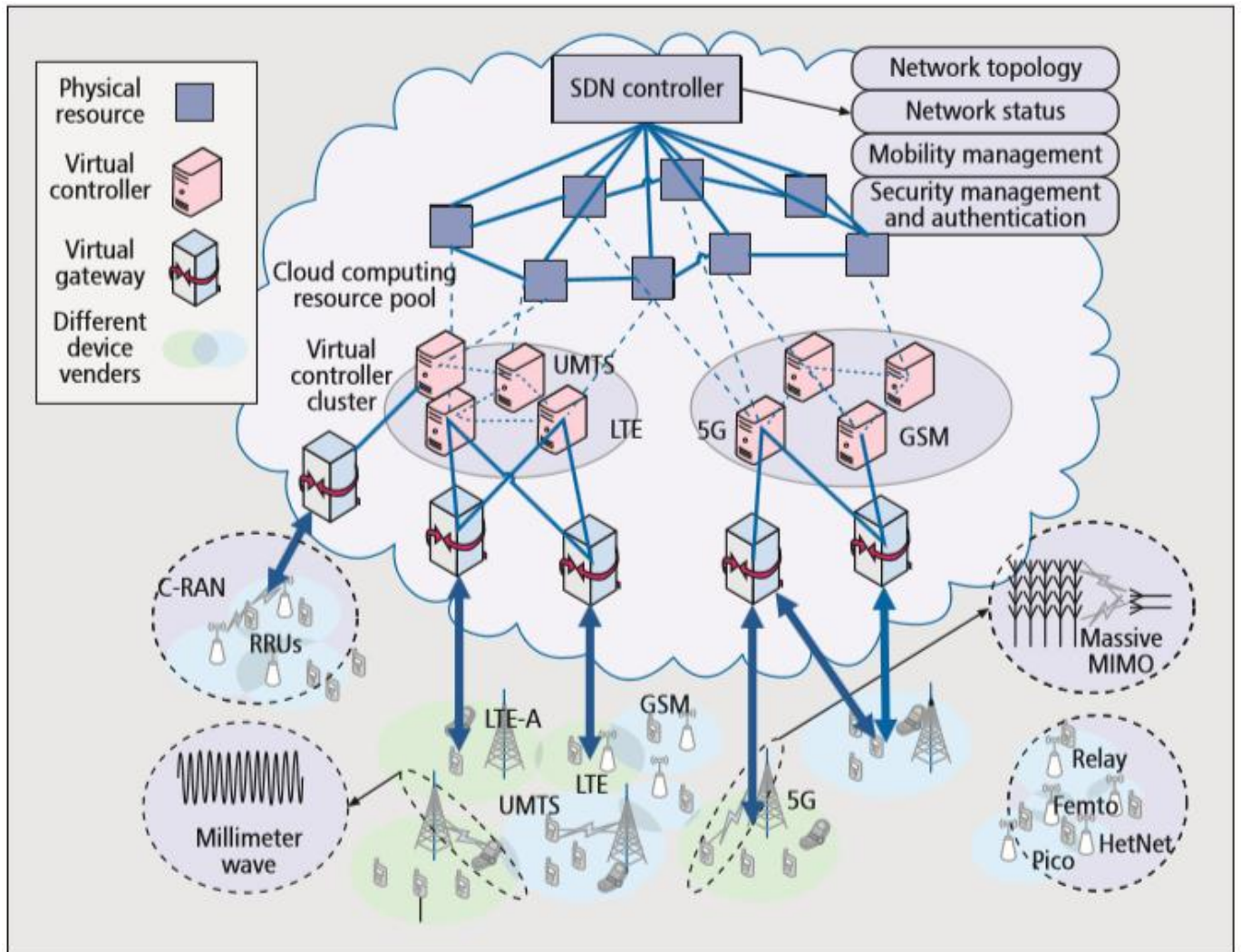


Рис. 3.3. Ключові технології майбутніх 5G мереж

3.3.1. Міліметрові хвилі

Міліметрово-хвильова технологія є перспективною технологією для майбутніх 5G стільникових систем. Стільникові системи майбутнього 5G можуть досягти надзвичайно широкої пропускної здатності від міліметрової хвилі, оскільки її частота коливається від 26,5 до 300 ГГц. Крім того, міліметрові хвилі мають набагато вужчий розмір антенно-променевої лінії в порівнянні з мікрохвилями, що дозволяє точніше спрямовуватися на ціль. Основним завданням міліметрової хвилі до NFV є вимога високої точності пристрою. NFV може доставляти мережеві функції без встановлення апаратного забезпечення для кожної нової послуги, і таким чином пропонувати можливість низької вартості обладнання та експлуатаційних витрат. NFV створює віртуалізовані екземпляри, які мігрують з одного апаратного забезпечення на інше, що відповідає мандату областей обчислень. Технологія Millimeterwave вимагає більш точних пристроїв для високої швидкості передачі даних і високоякісної передачі, що значно збільшить складність дизайну NFV.

3.3.2. Масовий MIMO

Масовий multiple-input multiple-output (MIMO) використовує антенні масиви з декількох сотень елементів, що одночасно обслуговують десятки мобільних користувачів з тим самим частотно-часовим ресурсом. Масові MIMO масштабують звичайний MIMO, щоб отримати всі переваги на більш високому рівні, що включає:

- Збільшення потужності в 10 разів і більше, одночасно покращуючи енергоефективність у понад 100 разів.
- Недорогі, малопотужні компоненти.
- Значне зниження затримки на повітряний інтерфейс.
- Надійність проти непередбачених штучних втручань та навмисного заклинювання.

- Зниження обмежень на точність і лінійність кожного окремого підсилувача та ланцюга РЧ.

В цілому, масивний MIMO є можливим для майбутніх широкосмугових (стаціонарних і мобільних) мереж, які будуть енергоефективними та надійними. Незважаючи на переваги масивного MIMO, це створює величезний виклик для реалізації інтеграції NFV, SDR та SDN. Масиви масових MIMO створюють величезну кількість базових даних в режимі реального часу, що значно підвищить обчислювальні складності. На Рис.3.3. представлена синергія між масовими MIMO і міліметровою хвилею в мобільному зв'язку, оскільки гібридна система може досягати величезної пропускної здатності сот, ніж традиційна LTE-система. Оскільки мобільний трафік продовжує експоненціальне зростання за межами потужності 4G, система MIMO та міліметрової хвилі може задовольнити попит.

3.3.3. Гетерогенні мережі

Гетерогенні мережі (HetNets) були визнані найбільш дієвим рішенням для майбутнього кризису трафіку мобільних даних в контексті LTE-Advanced (LTE-A). У HetNets різні eNodeBs з різною потужністю передачі можуть являти собою різні розміри або шари сот, такі як макро, мікро, піко та фемто. Гетерогенні мережі в повній мірі користуються додатковими характеристиками різних мережних рівнів і, таким чином, стають неминучим напрямом для майбутнього розвитку інформаційних мереж. Проте різноманітні технології доступу до мережі та різні вимоги до сервісу призводять до серії проблем при застосуванні NFV, SDR та SNR до неоднорідних мереж. Це в основному відображається в ресурсах спектру, технологіях доступу до мережі, вимогах до бізнесу, мобільності терміналів та керуванні операціями. Зокрема, завдяки технології SDR, користувачі можуть часто перемикає частоту за високої швидкості передачі даних, що підкреслює належне технічне обслуговування та управління мережею. Одним словом, неоднорідність створює багато проблем для

NFV, SDR та SNR з точки зору спільного управління радіоресурсами, управління мобільністю та забезпечення кінцевого QoS.

3.3.4. C-RAN

C-RAN вперше був представлений Китайським мобільним науково-дослідним інститутом у квітні 2010 року, щоб відповідати майбутнім вимогам RAN, шляхом надання мобільного широкосмугового доступу до Інтернету для бездротових клієнтів із низькою роздільною ціною та високою роздільною здатністю та енергоефективністю. C-RAN приймає концепцію централізованого пулу, де велика кількість дистанційних радіо одиниць (RRH – Remote Radio Head) підключається до центру блоків основної мережі (BBU – Baseband Unit).

Цей прорив архітектури RAN може максимізувати ефективність спектра через кооперативний радіоприймач з розподіленою антеною, що вбудована в RRH. Це критичний крок для створення віртуальних базових станцій по інфраструктурі клауд мережі C-RAN у реальному часі. NFV, безумовно, є належним рішенням для задоволення цієї вимоги. Проте, він може стикатися з багатьма проблемами, оскільки бездротові базові станції мають суворі обмеження в режимі реального часу та високої продуктивності. Крім того, RRUs в C-RAN можуть бути повністю реалізовані за допомогою SDR на основі відкритої платформи. Однак, якщо різні стандарти розподіляються на один і той самий спектр, RRH може підтримувати декілька стандартів лише частково. Кожного разу, коли стандарт змінюється, BBU вимушено перезапустити, а не розділяти мультистандартний ресурс безпосередньо. На рис. 3.3. показана архітектура C-RAN, інтегрована в гетерогенні мережі, в якій можна досягти декількох оптимальних задач, таких як енергоефективність та низька складність. C-RAN у поєднанні з різнорідними мережами може допомогти збалансувати корисне навантаження, покривати користувачів та управляти ресурсом за низького енергоспоживання.

3.4. Висновок

Цей розділ розглядає інтегровану архітектуру NFV, SDR та SDN для мобільних мереж 4G / 5G, розглядаючи еволюцію стандартів та нові ключові технології. Зокрема, висвітлюються існуючі стандарти, необхідні розширення для розміщення майбутніх мобільних мереж. Також формулюються дослідницькі виклики, що виникають у зв'язку з майбутніми технологіями 5G, включаючи Millimeter-Wave, масові MIMO, HetNet, C-RAN та ін. У даному розділі було показано, що хоча оновлення інфраструктури мобільної мережі має пройти довгий шлях, інтеграція NFV, SDR і SDN відіграють важливу роль у прискоренні цієї історичної еволюції.

4. Моделювання каналу зв'язку програмно визначуваної системи LTE

4.1. Модель каналу зв'язку програмно визначуваної системи LTE

Для моделювання будуть використовуватись пакети підтримки радіостанцій Xilinx на основі Zynq з Matlab і Lte Toolbox для створення багатоантенної передачі LTE для одночасного передавання та отримання на одній платформі SDR. Файл зображення кодується, запаковується у радіо фрейм для передачі, а потім декодується на прийом.

Перевірка, чи встановлено LTE Toolbox, і чи ліцензія дійсна

```
if isempty(ver('lte')) % Перевірка чи встановлений LTE Toolbox
    error('zynqRadioLTEMIMOTransmitReceive:NoLST', ...
        'Please install LTE Toolbox to run this example.');
```

```
elseif ~license('test', 'LTE_Toolbox') % Перевірка ліцензії
    error('zynqRadioLTEMIMOTransmitReceive:NoLST', ...
        'A valid license for LTE Toolbox is required to run this example.');
```

```
end
```

Налаштування областей та фігур, які відобразатимуться

```
% Побудова графіків
if ~exist('imFig', 'var') || ~ishandle(imFig)
    imFig = figure;
    imFig.NumberTitle = 'off';
    imFig.Name = 'Image Plot';
    imFig.Visible = 'off';
else
    clf(imFig); % Видалення фігури
    imFig.Visible = 'off';
end

% Побудова графіків оцінки каналу
if ~exist('hhest', 'var') || ~ishandle(hhest)
    hhest = figure('Visible','Off');
    hhest.NumberTitle = 'off';
    hhest.Name = 'Channel Estimate';
else
    clf(hhest); % Видалення фігури
    hhest.Visible = 'off';
end

% Налаштування графіку спектра
spectrumScope = dsp.SpectrumAnalyzer( ...
    'SpectrumType', 'Power density', ...
    'SpectralAverages', 10, ...
    'YLimits', [-150 -60], ...
    'Title', 'Received Baseband LTE Signal Spectrum', ...
```

```

        'YLabel',          'Power spectral density');

% Налаштування графіку сузір'я для PDSCH символів
constellation = comm.ConstellationDiagram('Title', 'Equalized PDSCH Symbols', ...
        'ShowReferenceConstellation', false);

```

Ініціалізація SDR пристрою

```

txsim = struct; % Створення порожньої структури для передавача
txsim.SDRDeviceName = 'AD936x'; % Встановлення SDR пристрою
radio = sdrdev(txsim.SDRDeviceName); % Створення об'єкту SDR пристрою

```

Дизайн передавача

Загальна структура передавача LTE може бути описана наступним чином:

- Імпортування файлу зображення та перетворення його в бінарний потік.
- Створення сигналу LTE основного діапазону, використовуючи LTE Toolbox, упаковуючи потік двійкових даних у транспортні блоки спільного каналу DL-SCH.
- Підготовка основного сигналу для передачі за допомогою обладнання SDR.
- Відправка даних основної передачі в апарат SDR для безперервної передачі на бажану центральну частоту.

Передавач керується за допомогою параметрів у структурі `_txsim_`.

```

txsim.RC = 'R.7';          % Конфігурація основного каналу зі смугою 10 MHz
txsim.NCellID = 88;       % Ідентифікація клітини
txsim.NFrame = 700;      % Вихідна кількість фреймів
txsim.TotFrames = 1;     % Кількість фреймів для генерації
txsim.DesiredCenterFrequency = 2.45e9; % Центральна частота в Гц
txsim.NTxAnts = 2;       % Кількість антен

```

Щоб візуалізувати переваги використання багатоканальної передачі та прийому, можна зменшити параметр посилення передавача, щоб зменшити якість отриманого сигналу, як показано нижче:

```

txsim.Gain = -10;

```

Підготовка файлу зображення

У прикладі читаються дані з файлу зображення, масштабуються для передачі, а також перетворюються в потік двійкових даних. Розмір переданого зображення безпосередньо впливає на кількість радіофреймів LTE, необхідних для передачі зображення. Масштабний коефіцієнт $scale = 0,5$ як показано нижче, вимагає передачі 5 LTE фреймів. Збільшення масштабного коефіцієнта призведе до передачі більшої кількості кадрів; навпаки, зменшення масштабного коефіцієнта зменшить кількість кадрів.

```
% Дадавання файлу та конвертація у бінарний потік
fileTx = 'peppers.png';           % Ім'я файлу
fData = imread(fileTx);           % Зчитування
scale = 0.5;                       % Коефіцієнт масштабу
origSize = size(fData);           % Початковий розмір файлу
scaledSize = max(floor(scale.*origSize(1:2)),1); % Розмір після масштабування
heightIx = min(round((1:scaledSize(1))-0.5)./scale+0.5),origSize(1));
widthIx = min(round((1:scaledSize(2))-0.5)./scale+0.5),origSize(2));
fData = fData(heightIx,widthIx,:); % Зміна розміру зображення
imshow(fData);                    % Запис нового розміру зображення
binData = dec2bin(fData(:),8);     % Конвертування у 8-бітний формат
trData = reshape((binData-'0').',1,[]).'; % Створення бінарного потоку
```

Ця частина відповідає за відображення картинки, яка була передана. Якщо файл було прийнято успішно, він декодується та відображається.

```
figure(imFig);
imFig.Visible = 'on';
subplot(211);
    imshow(fData);
    title('Transmitted Image');
subplot(212);
    title('Received image will appear here...');
    set(gca, 'Visible', 'off');
    set(findall(gca, 'type', 'text'), 'visible', 'on');
pause(1);
```

Створення базового сигналу LTE

Використовуються параметри конфігурації за замовчуванням, визначені в TS36.101, додаток A.3.12.1 для створення основного каналу за допомогою <matlab: doc ('lteRMCDL') lteRMCDL>.

Параметри конфігурації | rmc | в подальшому можуть бути переналаштовані як потрібно. У наступному коді створюється сигнал основної смуги, | eNodeBOutput |, повністю заповнена сітка ресурсів, | txGrid |, а також повна конфігурація основного каналу, використовуючи <matlab: doc ('lteRMCDLTool') lteRMCDLTool>.

Використовується потік двійкових даних, який був створений з файлу вхідного зображення | trData | як вхід до транспортного кодування і упаковується в декілька транспортних блоків у спільному каналі фізичного низхідного каналу (PDSCH). Кількість кадрів, створених для передачі, залежить від масштабування зображення, яке було встановлено при імпорті файлу зображення. Генерація сигналу основної частоти LTE відображається у наступному коді:

```
% Створення основного каналу
rmc = lteRMCDL(txsim.RC);

% Обчислення необхідної кількості LTE фреймів у відповідності до розміру зображення
trBlkSize = rmc.PDSCH.TrBlkSizes;
txsim.TotFrames = ceil(numel(trData)/sum(trBlkSize(:)));

% Конфігурування параметрів основного каналу
rmc.NCellID = txsim.NCellID;
rmc.NFrame = txsim.NFrame;
rmc.TotSubframes = txsim.TotFrames*10; % 10 підфреймів в 1 фреймі
rmc.CellRefP = txsim.NTxAnts;
rmc.PDSCH.RVSeq = 0;

% Заповнення підфрейму 5 фіктивними даними
rmc.OCNGPDSCHEnable = 'On';
rmc.OCNGPDCCHEnable = 'On';

% У випадку для передачі двома каналами необхідно налаштувати розподілення
if rmc.CellRefP == 2
    rmc.PDSCH.TxScheme = 'TxDiversity';
    rmc.PDSCH.NLayers = 2;
    rmc.OCNGPDSCH.TxScheme = 'TxDiversity';
end
```



```
fprintf('\nGenerating LTE transmit waveform:\n')
fprintf(' Packing image data into %d frame(s).\n\n', txsim.TotFrames);

% Запакування картинки у LTE фрейм
[eNodeBOutput,txGrid,rmc] = lteRMCDLTool(rmc,trData);
```

Підготовка до передачі

Передавач використовує | transmitRepeat | функціональність для безперервного передавання сигналу основної частоти LTE в циклі пам'яті DDR на платформі Zynq-Based Radio.

```
sdrTransmitter = sdrTx(txsim.SDRDeviceName);
sdrTransmitter.BasebandSampleRate = rmc.SamplingRate;
sdrTransmitter.CenterFrequency = txsim.DesiredCenterFrequency;
sdrTransmitter.ShowAdvancedProperties = true;
sdrTransmitter.Gain = txsim.Gain;

% Застосування мапінгу для TX каналу
if txsim.NTxAnts == 2
    fprintf('Setting channel map to ''[1 2]''.\n\n');
    sdrTransmitter.ChannelMapping = [1,2];
else
    fprintf('Setting channel map to ''1''.\n\n');
    sdrTransmitter.ChannelMapping = 1;
end

% Масштабування сигналу для кращої вихідної потужності
powerScaleFactor = 0.8;
if txsim.NTxAnts == 2
    eNodeBOutput =
[eNodeBOutput(:,1).*(1/max(abs(eNodeBOutput(:,1)))*powerScaleFactor) ...
eNodeBOutput(:,2).*(1/max(abs(eNodeBOutput(:,2)))*powerScaleFactor)];
else
    eNodeBOutput = eNodeBOutput.*(1/max(abs(eNodeBOutput))*powerScaleFactor);
end

% Приведення сигналу, що передається до int16 - це звичний формат для SDR.
eNodeBOutput = int16(eNodeBOutput*2^15);
```

Повторна передача за допомогою SDR Hardware

|transmitRepeat| функція передає LTE сигнал на платформу SDR і зберігає зразки сигналів у апаратній пам'яті. Приклад потім передає форму сигналу безперервно over-the-air без пробілів, доки не буде підготовлено метод для передачі. Повідомлення з'являються у вікні команд, щоб підтвердити успішне надсилання.

```
sdrTransmitter.transmitRepeat(eNodeBOutput);
```

Дизайн приймача

Загальна структура приймача LTE може бути описана наступним чином:

- Фіксування відповідної кількості кадрів переданого сигналу LTE, використовуючи обладнання SDR.
- Визначення та виправлення зсуву частоти прийнятого сигналу.
- Синхронізування захопленого сигналу з початком кадру LTE.
- Демодуляція OFDM сигналу.
- Оцінка каналу для прийнятого сигналу.
- Декодування PDSCH і DL-SCH для отримання переданих даних з транспортних блоків кожного радіоканалу.
- Реконструкція отриманого блоку для формування отриманого зображення.

У цьому прикладі представлені спектральна щільність енергії захопленої форми сигналу, а також відображаються візуалізації оціночного каналу, вирівнювання символів PDSCH та отриманого зображення.

Налаштування приймача

Приймач керується за допомогою параметрів, визначених у | gxsim | структурі. Частота дискретизації приймача становить 15,36 МГц, що є стандартною частотою дискретизації для захоплення смуги пропускання LTE з 50 блоків ресурсів(RB). 50 RB еквівалентно смузі пропускання сигналу 10 МГц.

```
rxsim = struct;
rxsim.RadioFrontEndSampleRate = sdrTransmitter.BasebandSampleRate; % Налаштування
частоти вибірки такої ж самої як у передавача
rxsim.RadioCenterFrequency = txsim.DesiredCenterFrequency;
rxsim.NRxAnts = txsim.NTxAnts;
rxsim.FramesPerBurst = txsim.TotFrames+1; % Кількість кадрів LTE за повтор
% Захоплення на 1 більше LTE фреймів для забезпечення часової компенсації
rxsim.numBurstCaptures = 1; % Кількість повторів

% Похідні параметри
samplesPerFrame = 10e-3*rxsim.RadioFrontEndSampleRate; % Період LTE фреймів 10мс

rxsim.SDRDeviceName = txsim.SDRDeviceName;

sdrReceiver = sdr_rx(rxsim.SDRDeviceName);
sdrReceiver.BasebandSampleRate = rxsim.RadioFrontEndSampleRate;
sdrReceiver.CenterFrequency = rxsim.RadioCenterFrequency;
sdrReceiver.SamplesPerFrame = samplesPerFrame;
sdrReceiver.OutputDataType = 'double';
sdrReceiver.EnableBurstMode = true;
sdrReceiver.NumFramesInBurst = rxsim.FramesPerBurst;

% Налаштування каналу RX
if rxsim.NRxAnts == 2
    sdrReceiver.ChannelMapping = [1,2];
else
    sdrReceiver.ChannelMapping = 1;
end

% burstCaptures містить sdrReceiver.FramesPerBurst кількість послідовних фреймів.
burstCaptures = zeros(samplesPerFrame, rxsim.NRxAnts, rxsim.FramesPerBurst);
```

Налаштування LTE приймача

Модель спрощує прийом сигналу LTE, вважаючи, що передані параметри PDSCH відомі. Також передбачається FDD дуплексний режим, а також чотири порти (CellRefP) для декодування MIB(Master Information Block).

```
enb.PDSCH = rmc.PDSCH;
enb.DuplexMode = 'FDD';
enb.CyclicPrefix = 'Normal';
enb.CellRefP = 4;
```

Частота дискретизації сигналу регулює захоплену пропускну здатність. Кількість захоплених RB отримується з таблиці пошуку за допомогою обраної частоти дискретизації та відображається у вікні команд.

Пропускна здатність: {1,4 МГц, 3 МГц, 5 МГц, 10 МГц, 20 МГц}

```
SampleRateLUT = [1.92 3.84 7.68 15.36 30.72]*1e6;
NDRBLUT = [6 15 25 50 100];
enb.NDLRB = NDLRBLUT(SampleRateLUT==rxsim.RadioFrontEndSampleRate);
if isempty(enb.NDLRB)
    error('Sampling rate not supported. Supported rates are %s.',...
        '1.92 MHz, 3.84 MHz, 7.68 MHz, 15.36 MHz, 30.72 MHz');
end
fprintf('\nSDR hardware sampling rate configured to capture %d LTE
RBs.\n',enb.NDLRB);
```

Оцінка каналів налаштована для виконання за допомогою клітинних опорних сигналів. Вікно усереднення 9-на-9 використовується для мінімізації ефекту шуму.

```
cec.PilotAverage = 'UserDefined'; % Тип пілотного усереднення символу
cec.FreqWindow = 9; % Розмір частотного вікна
cec.TimeWindow = 9; % Розмір часового вікна
cec.InterpType = 'Cubic'; % 2D тип інтерполяції
cec.InterpWindow = 'Centered'; % Тип інтерполяційного вікна
cec.InterpWinSize = 3; % Розмір інтерполяційного вікна
```

Захоплення та обробка сигналів

Використовується цикл `while` для захоплення та декодування послідовності кадрів LTE. Оскільки форма сигналу LTE постійно передається по повітрю в циклі, перший кадр, який захоплюється приймачем, не гарантується першим кадром, який був переданий. Це означає, що кадри можуть бути декодовані з послідовності. Щоб включити отримані кадри до рекомбінації у правильному порядку, необхідно визначити їхні номери. Master Information Block (MIB) містить інформацію про поточний номер фрейму, тому його необхідно декодувати. Після визначення номера фрейму PDSCH та DL-SCH декодуються, а також вирівняні символи PDSCH. Дані не передаються в підкадрі 5; тому захоплені дані для підкадра ігноруються для декодування. Спектральна щільність енергії (PSD) захопленого сигналу побудована для відображення отриманої передачі LTE.

Коли кадри LTE були успішно декодовані, номер виявленої кадру відображається в командному вікні на кадрі за кадром, а для кожного субкадра відображається вирівняна сузір'я символів PDSCH. Оцінка частотної характеристики величини каналу між опорною точкою 0 комірки та приймаючою антеною також показана для кожного кадру.

```
enbDefault = enb;

while rxsim.numBurstCaptures
    % Параметри LTE за замовчуванням
    enb = enbDefault;

    % Захоплення SDR
    fprintf('\nStarting a new RF capture.\n\n')
    len = 0;
    for frame = 1:rxsim.FramesPerBurst
        while len == 0
            % Зберігання одного LTE фрейму
            [data, len, lostSamples] = sdrReceiver();
            burstCaptures(:, :, frame) = data;
        end
        if lostSamples
            warning('Dropped samples');
        end
        len = 0;
    end
end
```

```

if rxsim.NRxAnts == 2
    rxWaveform = reshape(permute(burstCaptures,[1 3 2]), ...
        rxsim.FramesPerBurst*samplesPerFrame,rxsim.NRxAnts);
    spectrumScope.ShowLegend = true;
    spectrumScope.ChannelNames = {'SDR Channel 1','SDR Channel 2'};
else
    rxWaveform = burstCaptures(:);
end

% Відображення спектральної щільності потужності захопленої послідовності фреймів
spectrumScope.SampleRate = rxsim.RadioFrontEndSampleRate;
spectrumScope(rxWaveform);

% Корекція зсуву частоти відповідно відомому ID комірки
frequencyOffset = lteFrequencyOffset(enb,rxWaveform);
rxWaveform = lteFrequencyCorrect(enb,rxWaveform,frequencyOffset);
fprintf('\nCorrected a frequency offset of %i Hz.\n',frequencyOffset)

% Виконання пошуку сліпої комірки щоб отримати ідентифікацію комірки та часове
зміщення
% Використання 'PostFFT' SSS метод детектування для підвищення швидкості
cellSearch.SSSDetection = 'PostFFT'; cellSearch.MaxCellCount = 1;
[NCellID,frameOffset] = lteCellSearch(enb,rxWaveform,cellSearch);
fprintf('Detected a cell identity of %i.\n', NCellID);
enb.NCellID = NCellID; % From lteCellSearch

% Синхронізація отриманих зразків до початку LTE фрейму та обрізання будь-яких
зразків, що є частиною непомного фрейму
rxWaveform = rxWaveform(frameOffset+1:end,:);
tailSamples = mod(length(rxWaveform),samplesPerFrame);
rxWaveform = rxWaveform(1:end-tailSamples,:);
enb.NSubframe = 0;
fprintf('Corrected a timing offset of %i samples.\n',frameOffset)

% OFDM демодуляція
rxGrid = lteOFDMDemodulate(enb,rxWaveform);

% Оцінка каналу для 4 CellRefP
[hest,nest] = lteDLChannelEstimate(enb,cec,rxGrid);
sfDims = lteResourceGridSize(enb);
Lsf = sfDims(2); % OFDM символів на підфрейм
LFrame = 10*Lsf; % OFDM символів на фрейм
numFullFrames = length(rxWaveform)/samplesPerFrame;
rxDataFrame = zeros(sum(enb.PDSCH.TrBlkSizes(:)),numFullFrames);
recFrames = zeros(numFullFrames,1);
rxSymbols = []; txSymbols = [];

% Декодування MIB, PDSCH і DL-SCH для кожного фрейму
for frame = 0:(numFullFrames-1)
    fprintf('\nPerforming DL-SCH Decode for frame %i of %i in burst:\n', ...
        frame+1,numFullFrames)

% Розпакування підфрейму #0 з кожного фрейму прийнятої послідовності
enb.NSubframe = 0;
rxsf = rxGrid(:,frame*LFrame+(1:Lsf),:);
hestsf = hest(:,frame*LFrame+(1:Lsf),:,:);

```

```

% PBCH демодуляція. Розпакування елементів(REs)відповідаючих PBCH прийнятої
послідовності
enb.CellRefP = 4;
pbchIndices = ltePBCHIndices(enb);
[pbchRx,pbchHest] = lteExtractResources(pbchIndices,rxsf,hestsf);
[~,~,nfmod4,mib,CellRefP] = ltePBCHDecode(enb,pbchRx,pbchHest, nest);

% Якщо PBCH декодування вдачне CellRefP~=0 тоді оновлення інформації
if ~CellRefP
    fprintf(' No PBCH detected for frame.\n');
    continue;
end
enb.CellRefP = CellRefP;

% Декодування MIB для отримання поточного номеру фрейма
enb = lteMIB(mib,enb);

enb.NFrame = enb.NFrame+nfmod4;
fprintf(' Successful MIB Decode.\n')
fprintf(' Frame number: %d.\n',enb.NFrame);

% Пропускна спроможність eNodeB може бути більшою, ніж смуга отриманого
сигналу, тому необхідно обмежити пропускну здатність для обробки
enb.NDLRB = min(enbDefault.NDLRB,enb.NDLRB);

% Збереження отриманих номерів фреймів
recFrames(frame+1) = enb.NFrame;

% Обробка підфреймів(окрім 5 підфрейму)
for sf = 0:9
    if sf~=5 % Ігнорування 5 підфрейму
        % Розпакування підфрейму
        enb.NSubframe = sf;
        rxsf = rxGrid(:,frame*LFrame+sf*Lsf+(1:Lsf),:);

        % Оцінка каналу з коректним числом CellRefP
        [hestsf,nestsf] = lteDLChannelEstimate(enb,csc,rxsf);

        % PCFICH демодуляція. Розпакування REs відповідних PCFICH прийнятої
послідовності
        pcfichIndices = ltePCFICHIndices(enb);
        [pcfichRx,pcfichHest] =
lteExtractResources(pcfichIndices,rxsf,hestsf);
        [cfiBits,recsym] = ltePCFICHDecode(enb,pcfichRx,pcfichHest,nestsf);

        % CFI декодування
        enb.CFI = lteCFIDecode(cfiBits);

        % Отримання PDSCH індексів
        [pdschIndices,pdschIndicesInfo] = ltePDSCHIndices(enb, enb.PDSCH,
enb.PDSCH.PRBSset);
        [pdschRx, pdschHest] = lteExtractResources(pdschIndices, rxsf,
hestsf);

        % Виконання декодування, демарпінгу, демодуляції та дескремблінгу
прийнятої інформації використовуючи оцінку каналу

```

```

        [rxEncodedBits, rxEncodedSymb] =
ltePDSCHDecode(enb,enb.PDSCH,pdschRx,...
                pdschHest,nestsf);

    % Додавання декодованого символу до потоку
    rxSymbols = [rxSymbols; rxEncodedSymb{:}];

    % Розмір транспортного блоку
    outLen = enb.PDSCH.TrBlkSizes(enb.NSubframe+1);

    % Декодування DL-SCH
    [decbits{sf+1}, blkcrc(sf+1)] = lteDLSCHDecode(enb,enb.PDSCH,...
        outLen, rxEncodedBits);

    % Рекодування переданих символів PDSCH
    % Кодування переданого DL-SCH
    txRecode = lteDLSCH(enb,enb.PDSCH,pdschIndicesInfo.G,decbits{sf+1});
    % Модуляція переданого PDSCH
    txRemod = ltePDSCH(enb, enb.PDSCH, txRecode);
    % Декодування переданого PDSCH
    [~,refSymbols] = ltePDSCHDecode(enb, enb.PDSCH, txRemod);
    % Додавання кодованого символу до потоку
    txSymbols = [txSymbols; refSymbols{:}];
    release(constellation); % Попередній реліз сузір'я
    constellation(rxEncodedSymb{:}); % Складання поточного сузір'я
    pause(0);
end
end

% Збірка декодованих бітів
fprintf(' Retrieving decoded transport block data.\n');
rxdata = [];
for i = 1:length(decbits)
    if i~=6 % Ігнорування 5 підфрейму
        rxdata = [rxdata; decbits{i}{:}];
    end
end
end

% Зберігання інформації з прийнятого фрейму
rxDataFrame(:,frame+1) = rxdata;

% Побудова оцінки каналу між CellRefP 0 та прийомною антеною
focalFrameIdx = frame*LFrame+(1:LFrame);
figure(hhest);
hhest.Visible = 'On';
surf(abs(hhest(:,focalFrameIdx,1,1)));
shading flat;
xlabel('OFDM symbol index');
ylabel('Subcarrier index');
zlabel('Magnitude');
title('Estimate of Channel Magnitude Frequency Repsonse');
end
rxsim.numBurstCaptures = rxsim.numBurstCaptures-1;
end
% Реліз обох об'єктів - приймача та передавача після завершення прийому
release(sdrTransmitter);
release(sdrReceiver);

```


Відображення результатів

Частота помилок біт (BER) між переданими та отриманими даними обчислюється для визначення якості отриманих даних. Отримані дані потім перетворюються на зображення та відображаються.

```
% Визначення індексу першого переданого фрейму
[~,frameIdx] = min(recFrames);

fprintf('\nRecombining received data blocks:\n');

decodedRxDataStream = zeros(length(rxDataFrame(:)),1);
frameLen = size(rxDataFrame,1);
% Рекомбінація прийнятих блоків у коректному порядку
for n=1:numFullFrames
    currFrame = mod(frameIdx-1,numFullFrames)+1; % Поточний номер фрейма
    decodedRxDataStream((n-1)*frameLen+1:n*frameLen) = rxDataFrame(:,currFrame);
    frameIdx = frameIdx+1; % Інкремент
end

% Обчислення величини вектора похибки (EVM)
if ~isempty(rxSymbols)
    evmCalculator = comm.EVM();
    evmCalculator.MaximumEVMOutputPort = true;
    [evm.RMS, evm.Peak] = evmCalculator(txSymbols, rxSymbols);
    fprintf(' EVM peak = %0.3f%%\n', evm.Peak);
    fprintf(' EVM RMS = %0.3f%%\n', evm.RMS);
else
    fprintf(' No transport blocks decoded.\n');
end

% Обчислення коефіцієнту бітових помилок (BER)
bitErrorRate = comm.ErrorRate;
err = bitErrorRate(decodedRxDataStream(1:length(trData)), trData);
fprintf(' Bit Error Rate (BER) = %0.5f.\n', err(1));
fprintf(' Number of bit errors = %d.\n', err(2));
fprintf(' Number of transmitted bits = %d.\n', length(trData));

% Відновлення картинки з прийнятої інформації
fprintf('\nConstructing image from received data.\n');
str = reshape(sprintf('%d', decodedRxDataStream(1:length(trData))), 8, []).';
decdata = uint8(bin2dec(str));
receivedImage = reshape(decdata, imsize);

% Побудова картинки
if exist('imFig', 'var') && ishandle(imFig)
    figure(imFig); subplot(212);
else
    figure; subplot(212);
end
imshow(receivedImage);
title(sprintf('Received Image: %dx%d Antenna Configuration', txsim.NTxAnts,
rxsim.NRxAnts));
```

Оримані результати

Starting a new RF capture.

Establishing connection to hardware. This process can take several seconds.

Corrected a frequency offset of 5.338078e+00 Hz.

Detected a cell identity of 88.

Corrected a timing offset of 137376 samples.

Performing DL-SCH Decode for frame 1 of 5 in burst:

Successful MIB Decode.

Frame number: 702.

Retrieving decoded transport block data.

Performing DL-SCH Decode for frame 2 of 5 in burst:

Successful MIB Decode.

Frame number: 703.

Retrieving decoded transport block data.

Performing DL-SCH Decode for frame 3 of 5 in burst:

Successful MIB Decode.

Frame number: 704.

Retrieving decoded transport block data.

Performing DL-SCH Decode for frame 4 of 5 in burst:

Successful MIB Decode.

Frame number: 700.

Retrieving decoded transport block data.

Performing DL-SCH Decode for frame 5 of 5 in burst:

Successful MIB Decode.

Frame number: 701.

Retrieving decoded transport block data.

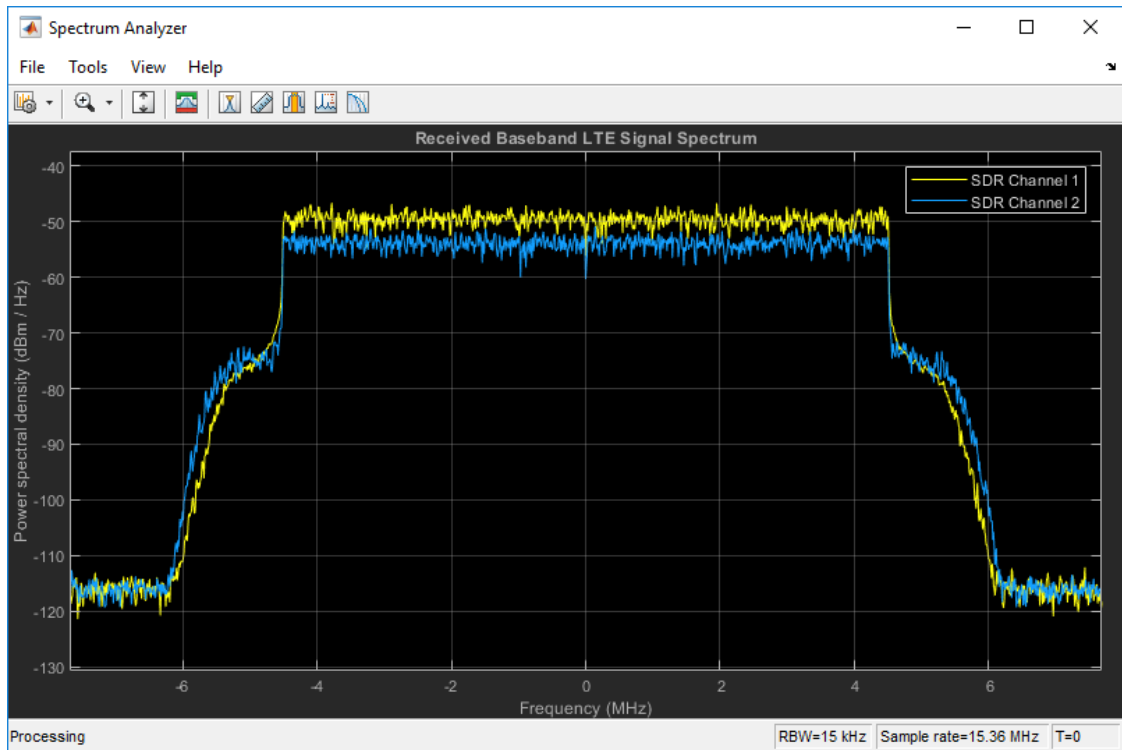


Рис. 4.1. Спектр прийнятого LTE сигналу

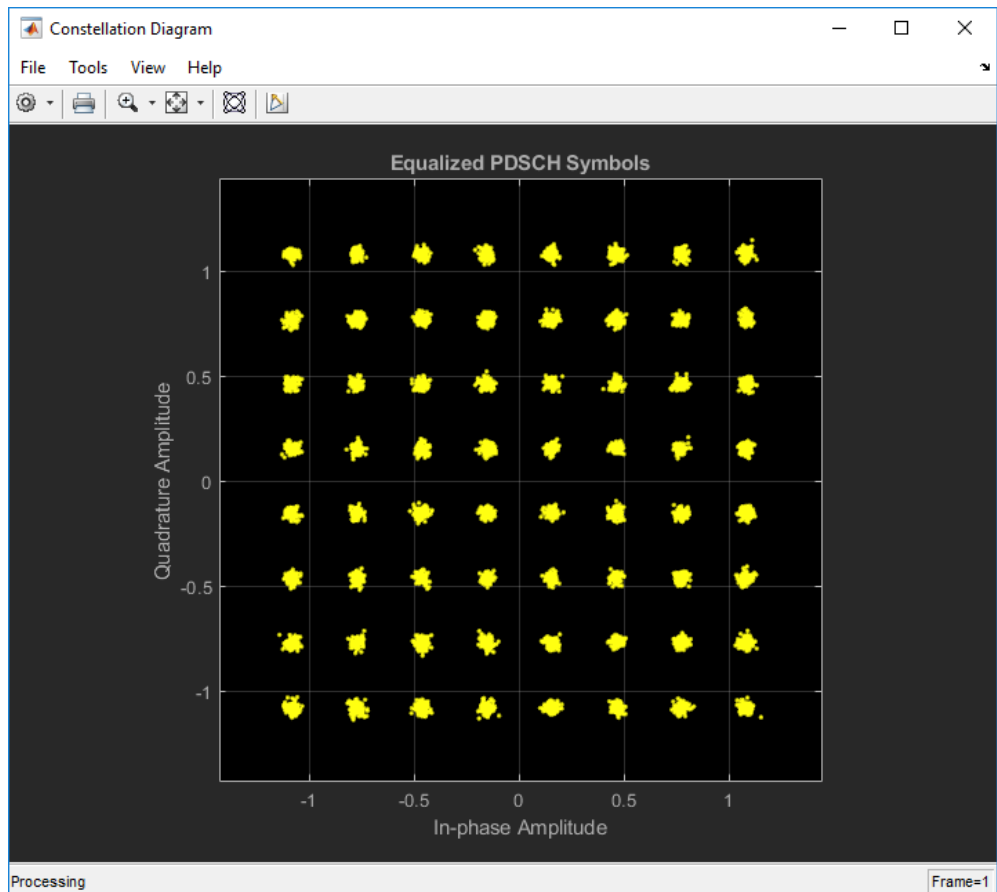


Рис. 4.2. Сигнальне зур'я PDSCH каналу

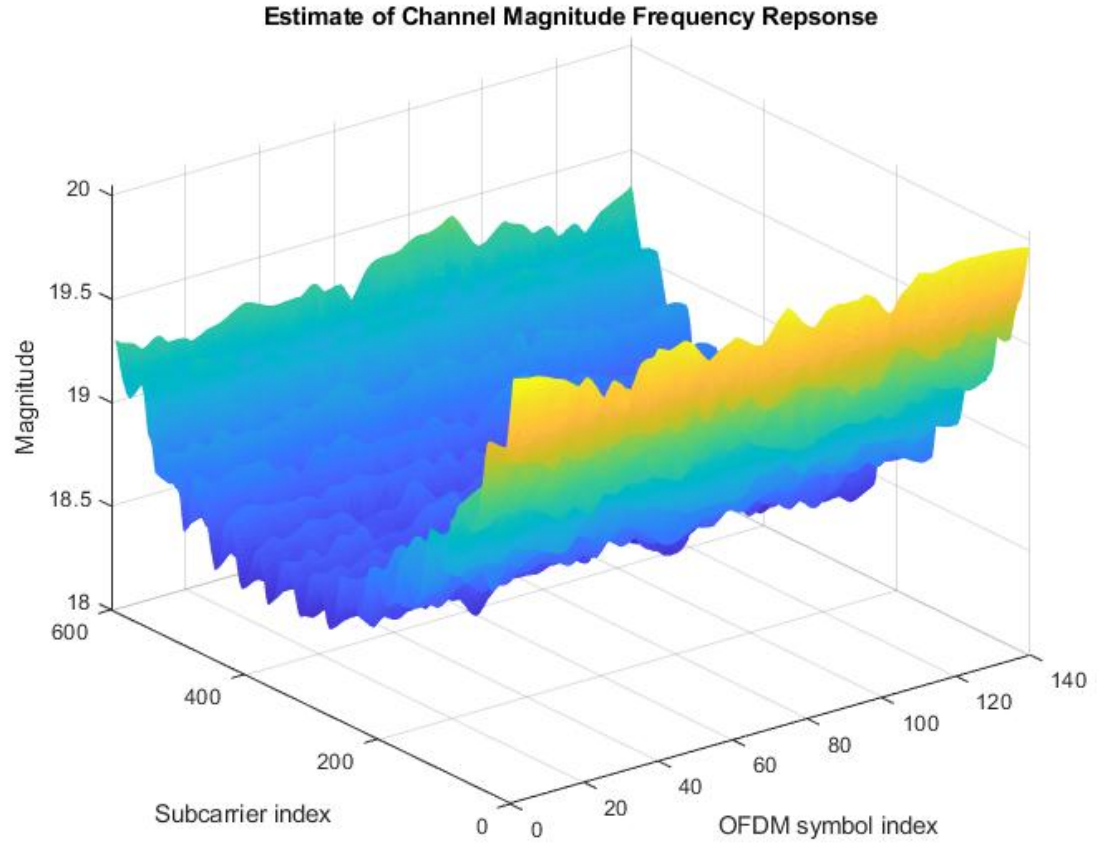


Рис. 4.3. Оцінка частотної характеристики каналу

Recombining received data blocks:

EVM peak = 6.551%

EVM RMS = 1.491%

Bit Error Rate (BER) = 0.00000.

Number of bit errors = 0.

Number of transmitted bits = 1179648.

4.2. Висновок

В даному розділі була розроблена модель каналу зв'язку програмно-визначуваної системи LTE. Були розглянуті та проаналізовані основні компоненти системи, побудовані спектр отриманого сигналу, сигнальне сузір'я та оцінка частотної характеристики каналу. Були підраховані максимальне значення вектора похибки, середньо квадратичне значення вектора похибки, коефіцієнт бітових помилок, кількість бітових помилок та кількість переданих бітів інформації.

Висновок

З огляду на швидкий розвиток бездротових телекомунікаційних систем, а саме, систем 4 та 5 поколінь, існує потреба в створенні недорогого, ефективного, та реконфігуруемого обладнання для задоволення потреб споживачів у якості та швидкості зв'язку. Мета даної роботи полягала у створенні моделі системи, яку можна було б пераналаштовувати на роботу з різними технологіями, мала достатню продуктивність у поєднанні з невеликою вартістю.

Виходячи з особливостей роботи радіосистем 4 та 5 поколінь, найкраще для використання підходить саме когнітивна радіосистема на основі програмно-визначуваної системи. Тому у дипломній роботі були розглянуті особливості застосування когнітивного радіо в радіосистемах 4 та 5 поколінь, особливості застосування та роботи програмно-визначуваних радіосистем та структура програмно-визначуваної радіосистеми когнітивного радіо для радіосистеми 4 та 5 поколінь.

Було створено модель каналу зв'язку програмно-визначуваної радіосистеми LTE зв'язку. Були побудовані спектр отриманого сигналу, сигнальне сузір'я та оцінка частотної характеристики каналу. Були підраховані максимальне значення вектора похибки, середньо квадратичне значення вектора похибки, коефіцієнт бітових помилок, кількість бітових помилок та кількість переданих бітів інформації.

Виходячи з отриманих показників та можливостей створеної системи, можна сказати, що дана система має достатню кількість переваг для застосування її у телекомунікаційних системах 4 та 5 поколінь.

Список використаної літератури

- 1) K. B. Letaief, and W. Zhang, "Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks", Proceedings of IEEE, vol. 97, no. 5, 2009, pp. 878 - 893.
- 2) Towards Cognitive Radio Systems. Main Findings from the COGNAC project. M. Matinmikko and T. Bräysy (eds.). Espoo 2011. VTT Tiedotteita - Research Notes 2575.
- 3) K. C. Chen, Y. J. Peng, N. Prasad, Y. C. Liang, and S. Sun, "Cognitive Radio Network Architecture: Part I - General Structure," In proceedings of the 2nd International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ICUIMC'08), Malaysia, 2008.
- 4) OFCOM, "Digital dividend: cognitive access, A Consultation on licenceexempting cognitive devices using interleaved spectrum," Technical Report, 16th Feb 2009.
- 5) L. Hong-Jie, W. Zhong-Xu, L. Shu-Fang, and Y. Min, "Study on the performance of spectrum mobility in cognitive wireless network," In proceedings of the 11th IEEE Singapore International Conference on Communication Systems (ICCS 2008), Guangzhou, China, 2008, pp.1010 - 1014.
- 6) Q. H. Mahmoud, Cognitive Networks towards Self-Aware Networks, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, England, 2007.
- 7) G. Bansal, M. Hossain, P. Kaligineedi, H. Mercier, C. Nicola, U. Phuyal, M. Rashid, K.C. Wavegedara, Z. Hasan, M. Khabbazian, and V. K. Bhargava, "Some Research Issues in Cognitive Radio Networks", In proceedings of the (AFRICON 2007), 2007, pp. 1 - 7.
- 8) A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: the cooperation-processing tradeoff," Wireless Communications and Mobile Computing, Special Issue: Cognitive Radio, Software Defined Radio and Adaptive Wireless Systems, vol. 9, no. 7, 2007, pp. 1049 - 1060.
- 9) K. Po and J. Takada, "Signal Detection based on Cyclic Spectrum Estimation for Cognitive Radio in IEEE 802.22 WRAN System," IEICE Tech. Rep., vol. 106, no. 558, 2007, pp. 15 - 19.
- 10) A. Al-Dulaimi, N. Radhi, and H. S. Al-Raweshidy, "Cyclostationary Detection of Undefined Secondary Users," In proceedings of the IEEE International Conference and Exhibition on Next Generation Mobile Applications, Services, and Technologies (NGMAST'09), Cardiff, 2009, pp. 230 - 233.
- 11) N. S. Shankar, C. Cordeiro, and K. Challapali, "Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures," In proceedings of the 1st IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, 2005, pp. 160 - 169.

- 12) Z. Zhang and X. Xie, "Intelligent Cognitive Radio: Research on Learning and Evaluation of CR Based on Neural Network", In proceedings of the 5th International Conference on Information and Communications Technology (ICICT 2007), Cairo, Egypt, 2007, pp. 33 - 37.
- 13) N. Baldo and M. Zorzi, "Learning and Adaptation in Cognitive Radios using Neural Networks", In proceedings of the 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC 2008), Las Vegas, USA, 2008, pp. 998 - 1003.
- 14) K. Tsagkaris, A. Katidiotis, and P. Demestichas, "Neural network-based learning schemes for cognitive radio systems", Journal of Computer Communications, vol. 31, no. 5, 2008, pp. 3394 - 3404.
- 15) A. Al-Dulaimi and L. Al-Saeed, "An Intelligent Scheme for First Run Cognitive Radios," In proceedings of the IEEE International Conference and Exhibition on Next Generation Mobile Applications, Services, and Technologies (NGMAST'10), 2010, pp. 158 - 161.
- 16) A. M. Wyglinski, M. Nekovee, Y. Thomas Hou, Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice, ELSEVIER Inc, 2010.
- 17) I. Baldine, A. Bragg, G. Evans, and D. Stevenson, "Dynamic Spectrum Management - Applying Optical Networking Techniques to Wireless DSA Networks," In proceedings of the 1st IEEE International Symposium on Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2005), Baltimore, USA, 2005, pp. 615 - 618.
- 18) A. Abbagnale and F. Cuomo, "Leveraging the Algebraic Connectivity of a Cognitive Network for Routing Design," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 11, no. 7, 2011, pp. 1163 - 1178.
- 19) H. Gang, L. Lixia, L. Hongjian, P. Deming, and X. Ming, "A Distributed Capacity Estimation Algorithm of Cognitive Network," In proceedings of the 4th International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCOM 2009), China, 2009, pp. 1 - 5.
- 20) M. Vu, N. Devroye, and V. Tarokh, "On the Primary Exclusive Region of Cognitive Networks," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 7, 2009, pp. 3380 - 3385.
- 21) A. Al-Dulaimi, S. Al-Rubaye, and H. S. Al-Raweshidy, "Renovate Cognitive Networks under Spectrum Unavailability," In proceedings of the 6th Advanced International Conference on Telecommunications (AICT 2010), Spain, 2010, pp. 41 - 45.
- 22) S. Zaidi, D. McLernon, and M. Ghogho, "Outage Probability Analysis of Cognitive Radio Networks Under Self-Coexistence Constraint," In proceedings of the 4th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS 2010), New Jersey, USA, 2010, pp. 1 - 6.
- 23) A. Pras, "Network Management Architectures," Thesis University of Twente, The Netherlands, 1995.

- 24) A. Al-Dulaimi and H. Al-Raweshidy, "Multi-Operator Cognitive Radios Sharing One Channel", In proceedings of the 7th ACM international symposium on Mobility management and wireless access (MobiWac'09), Tenerife, Spain, 2009, pp. 114 - 117.
- 25) A. Anand and R. Chandramouli, "Resource Allocation in Cognitive Radio Networks," in Y. Xiao and F. Hu (Eds.), Cognitive Radio Networks, CRC Press, Jan. 2009.
- 26) Ž. Tabaković, "A Survey of Cognitive Radio Systems", Internet: www.fer.unizg.hr/_download/repository/KDI_Tabakovic_Zeljko.pdf: Accessed: June, 28, 2012.
- 27) Z. Feng et al. "Requirements for Collaborative Cognitive RRM," End-to-End Efficiency - E3, E3_WP3_D3.1_080725.doc, 2008.
- 28) B. S. Manoj, R.R. Rao, and M. Zorzi, "Architectures and Protocols for Next Generation Cognitive Networking," in F. H. P. Fitzek and M. D. Katz (Eds.), Cognitive Wireless Networks, Springer, 2007, pp. 271 - 284.
- 29) K. V. Katsaros, P. A. Frangoudis, G. C. Polyzos, and G. Karlsson, "Design challenges of open spectrum access," In proceedings of the 19th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2008), French Riviera, France, 2008, pp. 1 - 5.
- 30) I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "A survey on spectrum management in cognitive radio networks," IEEE Communications Magazine, vol. 46, no. 4, 2008, pp. 40 - 48.
- 31) I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, and K.R Chowdhury, "CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks," Ad Hoc Networks, vol. 7, no. 5, 2009, pp. 810 - 836.
- 32) S. Subramani, T. Basar, S. Armour, D. Kaleshi, and F. Zhong, "Noncooperative Equilibrium Solutions for Spectrum Access in Distributed Cognitive Radio Networks," In proceedings of the 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN 2008), Chicago, USA, 2008, pp. 1 - 5.
- 33) S. Sun, Y. Ju, and Y. Yamao, "Overlay Cognitive Radio OFDM System for 4G Cellular Networks," IEEE Wireless Commun. , 2013, vol. 20. DOI: 10.1109/MWC.2013.6507396, pp. 68–73.
- 34) SDRF Cognitive Radio Definitions, SDRF-06-R-0011-V1.0.0, 8 Nov 2007, URL(2014-10-13): <http://groups.winnforum.org/d/do/1585>.
- 35) Software-Defined Networking: The New Norm for Networks, URL, 2014-10-13, <https://www.opennetworking.org/images/stories/downloads/sdn-resources/white-papers/wp-sdn-newnorm.pdf>.
- 36) J. Batalle et al. , "On the Implementation of NFV over an OpenFlow Infrastructure: Routing Function Virtualization," IEEE SDN4FNS , Nov. 2013, pp. 1–6.

- 37) H. Masutani, NTT Network Innovation Labs. Yokosuka, Japan, "Requirements and Design of Flexible NFV Network Infrastructure Node Leveraging SDN/OpenFlow," IEEE ONDM , May 2014, pp. 258–63.
- 38) M. Palkovic et al. , "Future Software-Defined Radio Platforms and Mapping Flows," IEEE Signal Process Mag. , Mar. 2010, pp. 22–33.
- 39) M. Sadiku and C. Akujuobi, "Software-Defined Radio: A Brief Overview," IEEE Potentials , vol. 23, no. 4, Oct./Nov. 2004, pp. 14–15.
- 40) B. A. A. Nunes et al. , " A Survey of Software-Defined Networking: Past, Present, and Future of Programmable Networks," IEEE Commun. Surveys & Tutorials , vol. 16, no. 3, 3rd Quarter 2014, pp. 1617–34.
- 41) S. Sezer et al. , "Are We Ready for SDN? Implementation Challenges for Software-Defined Networks," IEEE Commun. Mag. , vol. 51, no. 7, July 2013, pp. 36–43.
- 42) L. R. Battula, "Network Security Function Virtualization(NSFV) Towards Cloud Computing with NFV Over Openflow Infrastructure: Challenges and Novel Approaches" IEEE ICACCI , Sept. 2014, pp. 1622–28.
- 43) Base Station System Structure, SDRF-01-P-0006-V2.0.0, Jan 15, 2002.
- 44) Open Networking Foundation, October 2012 Interoperability Event Technical Paper, v0.4, Feb. 7, 2013.
- 45) Internet Engineering Task Force, "Software-Defined Networking: A Perspective from Within a Service Provider Environment," Mar. 2014.
- 46) NFV Performance & Portability Best Practices, ETSI GS NFV-PER 001 V1.1.1 release 2014-06-30.
- 47) Architectural Framework, ETSI GS NFV 002 V1.1.1 Release 2013-10-10.
- 48) <https://www.mathworks.com/help/supportpkg/xilinxzynqbasedradio/examples/transmit-and-receive-lte-mimo-using-a-single-analog-devices-ad9361-ad9364.html>
- 49) 3GPP TS 36.191. "User Equipment (UE) radio transmission and reception." 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA).
- 50) Anwer Adel Al-Dulaimi, "Cognitive Radio Systems in LTE Networks", June 2012.