Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет *кібербезпеки*

Кафедра *інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Порівняльний аналіз програмно-визначених радіостанцій

(тема)

Виконав:
здобувач *4* року навчання,
групи *ТРІМІ-22-1*
Юрій Шумаков
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва спеціальності)
Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма *Інформаційно-мережна інженерія*
(повна назва освітньої програми)

Керівник *доц. к.т.н. Дарія Чеботарьова*
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

В.о. завідувача кафедри ІМІ _____ *Дарія ЧЕБОТАРЬОВА*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

2026 р.

Не містить відомостей, заборонених до відкритого публікування

Студент _____ *Юрій Шумаков*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Керівник _____ *Дарія Чеботарьова*
(підпис) (власне ім'я, прізвище)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет *кібербезпеки*

Кафедра *Інформаційно-мережної інженерії*
(повна назва)

Рівень вищої освіти *перший (бакалаврський)*

Спеціальність *172 Телекомунікації та радіотехніка*
(код і повна назва)

Тип програми *освітньо-професійна*

Освітня програма *Інформаційно-мережна інженерія*
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри ІМІ_____
(підпис)

"*02*" *червня* 2026р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві *Шумакову Юрію Вікторовичу*
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Порівняльний аналіз програмно-визначених радіостанцій*

затверджена наказом університету від "*02*" *червня* 2026 р. № *466 Ст*

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії *15 липня 2026 р.*

3. Вихідні дані до роботи *Проаналізувати розвиток, сучасний стан та перспективи використання технології SDR. Дослідити архітектуру, основні елементи та принцип дії SDR. Проаналізувати проблеми безпеки в SDR, зокрема основні загрози безпеці, методи виявлення загроз та захисту SDR, а також перспективи розвитку безпеки SDR. Виконати порівняльний аналіз сучасних доступних SDR за основними технічними характеристиками та запропонувати конкретні рішення для різних потреб в SDR.*

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

1. Аналіз стану та розвитку SDR

2. Архітектура та принцип дії SDR

3. Аналіз питань безпеки в SDR

4. Порівняльний аналіз SDR

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____

Слайди у форматі Power Point (назва, мета та задачі роботи, аналіз стану та розвитку SDR, сфери використання технології SDR, переваги використання технології SDR, перспективи розвитку SDR, базова архітектура SDR, архітектура безпеки SDR, безпека SDR, основні загрози, методи виявлення та захисту SDR, порівняння методів захисту безпеки SDR, ключові технічні характеристики SDR, порівняння SDR за характеристиками обладнання, порівняння SDR за ціною і можливостями, рекомендації щодо вибору моделі SDR, висновки)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / термін виконання етапів роботи	Примітка
1	*Ознайомлення із завданням. Уточнення ТЗ.*	*02.06.26*	*Виконано*
2	*Підбір літератури за темою роботи.*	*03.06 - 08.06.26*	*Виконано*
3	*Виконання розділу 1*	*09.06 - 14.06.26*	*Виконано*
4	*Виконання розділу 2*	*15.06 - 21.06.26*	*Виконано*
5	*Виконання розділу 3*	*22.06 – 30.06.26*	*Виконано*
6	*Виконання розділу 4*	*01.07 - 10.07.26*	*Виконано*
7	*Оформлення пояснювальної записки,*		
	презентаційного матеріалу та підготовка		
	до захисту у ЕК	*11.07 - 15.07.26*	*Виконано*

Дата видачі завдання *02 червня 2026 р.*

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ *доц. Дарія Чеботарьова*
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 80 с., 16 рис., 11 табл., 22 джерела, 1 додаток

Об'єкт дослідження – програмно-визначені радіостанції.

Мета роботи – порівняльний аналіз сучасних доступних SDR та рекомендації щодо вибору SDR.

Результати – в роботі виконано аналіз розвитку, сучасного стану та перспектив використання технології SDR; досліджено архітектуру, основні елементи та принцип дії SDR; проаналізовано проблеми безпеки в SDR, зокрема основні загрози безпеці, методи виявлення загроз та захисту SDR, а також перспективи розвитку безпеки SDR; виконано за основними технічними характеристиками порівняльний аналіз сучасних доступних SDR та запропоновано конкретні рішення для різних потреб в SDR.

SDR, ПРОГРАМНО-ВИЗНАЧЕНЕ РАДІО, ТЕХНОЛОГІЯ, ПЛІС, АПАРАТНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, АЦП, ЦАП, БЕЗПЕКА, ЗАХИСТ

THE ABSTRACT

Explanatory note: 80 p., 16 fig., 11 tabl., 22 sources, 1 app.

Object of research - software defined radio.

The purpose of the work is a comparative analysis of modern available SDRs and recommendations for choosing SDRs.

Results - the work analyzes the development, current state and prospects for using SDR technology; examines the architecture, main elements and principle of operation of SDRs; analyzes security problems in SDRs, in particular, the main security threats, methods for detecting threats and protecting SDRs, as well as prospects for the development of SDR security; performs a comparative analysis of modern available SDRs based on their main technical characteristics and proposes specific solutions for various needs in SDRs.

SDR, SOFTWARE-DEFINED RADIO, TECHNOLOGY, FPGA, HARDWARE, SOFTWARE, ADC, DAC, SECURITY, PROTECTION.

ЗМІСТ

С.

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 8
ВСТУП 10
1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА РОЗВИТКУ SDR 11
1.1 Еволюція технології SDR 11
1.2 Сучасний стан та сфери використання технології SDR 15
1.3 Переваги використання технології SDR 20
1.4 Перспективи розвитку SDR 22
2 АРХІТЕКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ SDR 27
2.1 Базова архітектура програмно-визначеного радіо 28
2.3 Функціональна схема SDR та основні пристрої 30
2.2 Принцип дії SDR 34
3 АНАЛІЗ ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ В SDR 36
3.1 Архітектура безпеки SDR 36
3.2 Основні загрози безпеці SDR 39
3.3 Методи виявлення загроз та захисту SDR 42
3.4 Тенденції розвитку безпеки SDR 48
4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ SDR 50
4.1 Порівняння SDR різних форм-факторів 50
4.2 Порівняння сучасних доступних SDR 53
4.3 Прийняття рішень щодо варіантів використання SDR 61
ВИСНОВКИ 64
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 66
ДОДАТОК А СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ 69

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АЗ – апаратне забезпечення;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

БПЛА – безпілотні літальні апарати;

БС – базова станція в мережі мобільного зв’язку;

КХ – короткі хвилі;

МН – машинне навчання;

НЧ/СЧ/ВЧ – низькі частоти/середні частоти/високі частоти;

ПЗ – програмне забезпечення;

ПК – персональний комп’ютер;

ПЛІС – програмовані логічні інтегральні схеми;

ПЧ – проміжна частота;

РЧ – радіочастотний;

СМЗ – стільникові мережі зв’язку;

УКХ – ультракороткі хвилі;

ФАПЧ – фазове автопідлаштування частоти;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

ШІ – штучний інтелект;

4G – технології мобільного зв’язку 4-го покоління;

5G – технології мобільного зв’язку 5-го покоління;

6G – технології мобільного зв’язку 6-го покоління;

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast) -автоматичне залежне спостереження-мовлення;

COTS (Commercial Off-The-Shelf) – комерційний готовий продукт (апаратне чи програмне забезпечення, готове до використання без необхідності розробки з нуля);

MIMO (Multiple Input, Multiple Output) – технологія безпроводового зв'язку з використанням множинних входів і множинних виходів;

RAN (Radio Access Network) - мережа радіо доступу;

SDR (Software-Defined Radio) – системи програмно-визначеного радіо;

SWaP-C (Size, Weight, Power, and Cost) – розмір, вага, енергоспоживання та вартість;

V2X (Vehicle-to-Everything) – технологія, що забезпечує здатність транспотрного засобу комунікувати з іншими автомобілями (V2V) та дорожньою інфраструктурою (V2I).

ВСТУП

Програмно-визначене радіо SDR (Software-Defined Radio) є дуже важливою та затребуваною технологією, оскільки традиційні радіотехнології потребують окремих мікросхем для кожного завдання, а SDR керується комп'ютерним кодом. Це дає змогу змінювати завдання пристрою звичайним оновленням прошивки.

Технологія SDR не нова, вона тримається на ринку майже 30 років, але за цей час вона не втратила популярність, а навпаки набула вагомого розвитку, суттєвої популярності та актуальності. Технологія SDR широко використовується в різних галузях: військові системи, телекомунікації, мобільний зв'язок найвищих поколінь, дослідницькі платформи тощо.

SDR є необхідною для розвитку військових технологій, оскільки дозволяє миттєво переналаштовувати рації, відстежувати безпілотні літальні апарати, глушити частоти ворога, підсилювати захист зв'язку та багато іншого. В мобільному зв'язку SDR дозволяє реалізувати дешеве масштабування мереж, вже зараз мобільні оператори впроваджують стандарти 5G та 6G шляхом зміни програмного забезпечення (ПЗ), а не заміни базових станцій. SDR розкриває великі можливості для різноманітних досліджень, а компактні USB-модулі дають змогу розробникам та науковцям вільно аналізувати весь радіопростір.

Актуальність досліджень, впроваджень та розвитку технології SDR в Україні значно зросла з початком повномасштабної війни. SDR є критично важливими для військової галузі, особливо в наш час і в нашій країні.

Дана кваліфікаційна робота присвячена дослідженню різноманітних питань, пов’язаних з використанням технології SDR. Аналіз наукових та інших інформаційних джерел за темою роботи [1 – 22] підтвердив актуальність та важливість обраної теми, саме тому дана кваліфікаційна робота є актуальною.

1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА РОЗВИТКУ SDR

1.1 Еволюція технології SDR

У традиційних аналогових радіосистемах комунікація була обмежена характеристиками апаратних компонентів, що використовуються в радіопередавачах і приймачах. Однак, з появою програмно-визначеного радіо, системи зв'язку стали більш універсальними та динамічними [1].

Історію виникнення програмно-визначеного радіо можна простежити від перших кроків у сфері радіокомунікацій. Спочатку розробка засобів зв'язку відбувалася ізольовано, де під кожну цільову задачу проектувалася специфічна апаратна архітектура. Проте така роздробленість суттєво обмежувала адаптивність та модернізацію систем, стримуючи технологічний прогрес. Концепція SDR зумовила фундаментальну зміну, оскільки відбувся перехід від апаратно-залежних платформ до гнучких рішень, функціонал яких динамічно реконфігурується програмним шляхом [2].

Еволюція технології SDR (табл. 1.1) характеризується низкою трансформаційних досягнень, кожне з яких розширює межі продуктивності та можливостей.

Ранні системи SDR були революційними у своєму підході, але вони мали обмеження пропускної здатності, обчислювальної потужності та апаратних ресурсів, пов'язаних з кремнієм, доступним на той час. Тим не менш, вони створили основу для подальших інновацій та розробки більш складних архітектур SDR.

Розширення можливостей в цифровій обробці сигналів та розробці апаратного забезпечення призвели до розробки широкосмугових SDR, здатних підтримувати широкі діапазони частот та високі швидкості передачі даних, головним чином завдяки досягненням у технологіях інтегральних схем [2].

Таблиця 1.1 – Етапи розвитку технології SDR

№	Період	Етап розвитку	Дата	Зміст
1	1970 – 1980-ті	Витоки та військові проєкти	1970-ті	Початок концепції. Дослідники з оборонних відомств великих країн (наприклад США) почали експериментувати з цифровою обробкою сигналів замість використання громіздких аналогових схем
			1984 р.	Цифрове радіо. Компанія E-Systems ввела цей термін, розробивши приймач, де завади усувалися програмно
2	1990-ті	Академічний розвиток та стандартизація	з 1991р.	Проєкт SPEAKeasy. Головна військова програма США, мета якої – створити одну радіостанцію, що могла б імітувати понад 10 різних військових радіосистем, просто змінюючи прошивку
			1992 р.	Введення терміна SDR. Опубліковано першу наукову статтю про SDR, її автор Джозеф Мітол вважається батьком технології SDR
			1996 р.	SDR Forum. Засновано організацію (тепер Wireless Innovation Forum), яка об'єднала телеком-гігантів для створення єдиних стандартів архітектури програмного радіо

Продовження табл.1.1

№	Період	Етап розвитку	Дата	Зміст
3	2000-ні	Поява комерційних та дослідницьких платформ	2001 р	Проєкт GNU Radio. Стартувала розробка безкоштовної бібліотеки з відкритим кодом. Це дозволило будь-якому програмісту створювати радіосхеми за допомогою комп'ютера
			2004 р	Поява USRP. Метт Еттус створив платформу Universal Software Radio Peripheral (USRP), це було перше доступне за ціною професійне обладнання для різних установ
			2009 р.	Застосування в 3G та 4G. Технологія SDR стала основою для базових станцій мобільного зв'язку і для переходу на нові покоління (просто дистанційне оновлення ПЗ на БС)
4	2010 – 2012 р	RTL-SDR Революція та масове хобі	з 2010 р.	Доступність для всіх. Пристрої вартістю $10–$20 відкрили світ радіообсервації для мільйонів аматорів. Стало можливим приймати сигнали літаків (ADS-B), супутників погоди та рацій
			2012 р.	Випадкове відкриття. Розробники виявили, що дешеві USB-тюнери для цифрового ТБ на чипі Realtek RTL2832U можна перевести в режим передачі сирих радіоданих на ПК

Продовження табл.1.1

№	Період	Етап розвитку	Дата	Зміст
5	2014 – 2020 р	Повно-дуплексні системи та розширення діапазону	2014 р.	Доступний передавач. Поява пристроїв HackRF One та BladeRF, що дозволили звичайним користувачам не лише приймати, а й транслювати сигнали у широкому діапазоні (від 1 МГц до 6 ГГц)
			з 2014 р.	LimeSDR та мікросхеми LMS7002M. Поява високоінтегрованих чипів (RFIC), які об'єднали всі радіокомпоненти на одному кристалі. Це дозволило створювати мініатюрні повноцінні базові станції мобільного зв'язку
6	з 2020-го до тепер	Сучасний етап (5G, ШІ та РЕБ)	2020-ті	Віртуалізація мереж (vRAN та Open RAN). Сучасні станції 5G майже повністю перейшли на SDR. Уся обробка сигналу відбувається у хмарі на стандартних серверних процесорах
			2020-ті	Штучний інтелект. ШІ інтегрується в SDR для автоматичного розпізнавання типів модуляції та пошуку вільних частот у реальному часі
			з 2022 р.	Військовий фокус. Війна в Україні дала колосальний поштовх розвитку SDR. Технологія стала основою для гнучких систем РЕБ та РЕР, оскільки дозволяє миттєво адаптуватися до зміни частот ворожих дронів

Важливою тенденцією в розвитку SDR було збільшення кількості каналів та поява програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС). Перші системи зазвичай мали одноканальні архітектури і це обмежувало їхню здатність обробляти кілька сигналів одночасно. Досягнення в апаратному проектуванні, зокрема поява ПЛІС, дозволили розробити багатоканальні SDR, здатні обробляти кілька сигналів паралельно. Цей прогрес дозволив SDR підтримувати дуже високу пропускну здатність з 16 незалежними радіоланцюгами в одному корпусі. В свою чергу ПЛІС забезпечують гнучкість та масштабованість, необхідні для реалізації складних алгоритмів та протоколів обробки сигналів в апаратному забезпеченні. Розробники SDR з використанням ПЛІС можуть досягти високопродуктивної обробки сигналів з низькою затримкою та енергоспоживанням, що робить їх ідеальними для застосувань реального часу [2].

Розвиток систем SDR значно прискорився завдяки технологіям цифрової обробки сигналів (DSP). На відміну від ранніх аналогових платформ, які мали обмежену гнучкість, використання DSP повністю змінило підхід до роботи з радіосигналами. Завдяки ранньому переведенню сигналу в цифрову форму, сучасне програмне радіо виконує ключові завдання (від фільтрації та виправлення помилок до модуляції й демодуляції) виключно за допомогою гнучких обчислювальних алгоритмів.

Таким чином програмно-визначені радіостанції постійно розвиваються від простих приймачів-передавачів до частотно-гнучких, адаптивних та дедалі інтелектуальніших комунікаційних та сенсорних систем.

1.2 Сучасний стан та сфери використання технології SDR

Нові покоління SDR домінують в радіоіндустрії та продовжують розвиватися. На таких ринках, як військові комунікації, радіоелектронна боротьба, радіоелектронна розвідка, вимірювання та випробування, зв'язок для громадської безпеки, моніторинг спектра та інші, SDR стали фактичним

галузевим стандартом. На рис. 1.1 представлено прогрес у впровадженні SDR протягом останніх років. Найближча до центру, темно-бірюзова секція показує першу групу ринків, які перейшли від апаратних радіоархітектур до архітектур SDR, незалежно від того, чи використовували вони сам термін SDR [3].

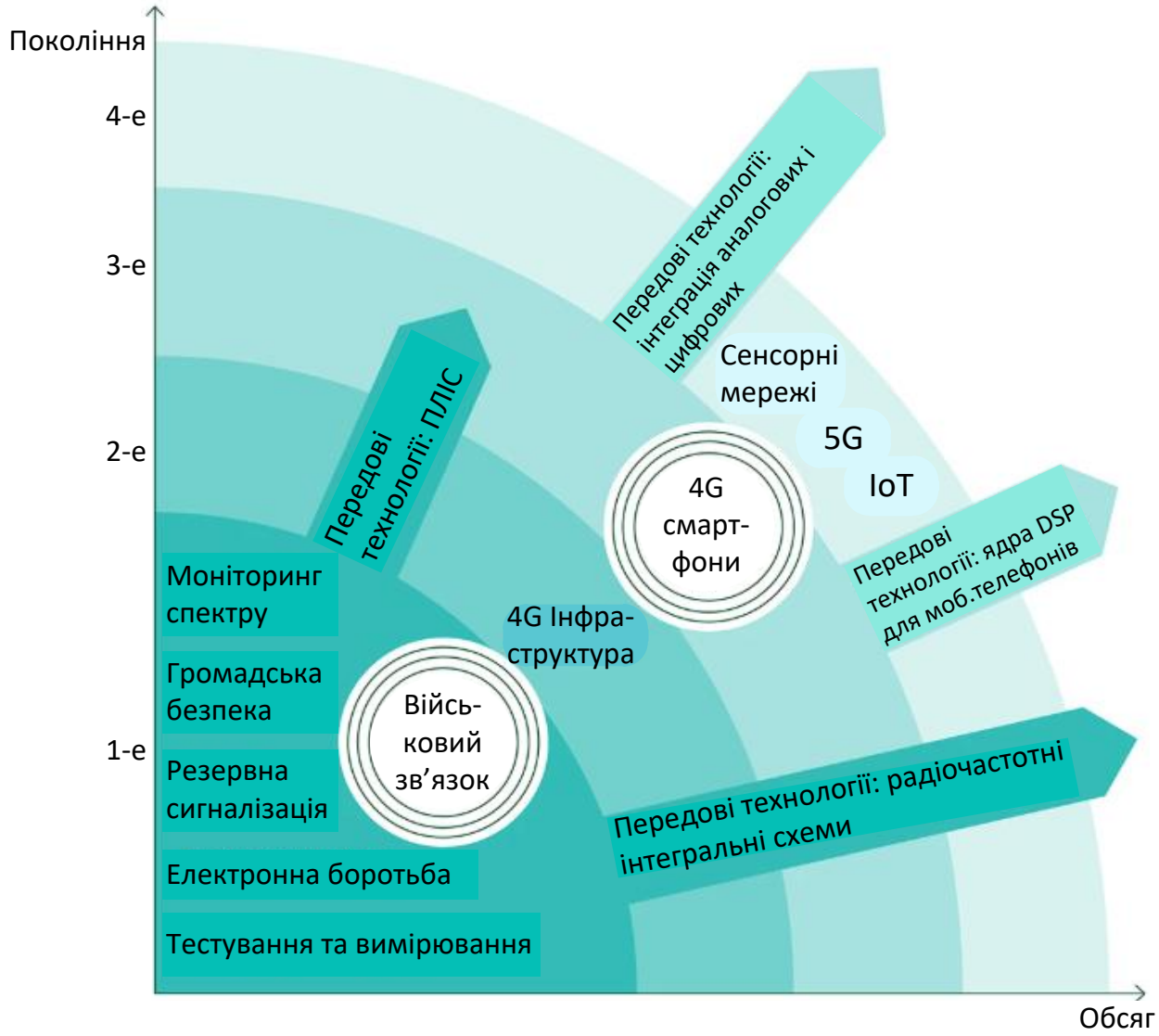


Рисунок 1.1 – Розвиток впровадження SDR

До переходу на SDR на цих ринках спонукала поява ПЛІС від таких компаній, як Analog Devices , та економічно ефективних ПЛІС з інтенсивним використанням цифрової обробки сигналів від таких компаній, як Xilinx (тепер AMD). Разом ці технології дозволили створити більш гнучкі та

високопродуктивні радіоархітектури та задовольнити багатомільярдну потребу на ринку військово-тактичного радіо. Цей попит створив ширший ринковий попит, де інвестиції у військову галузь мали тривалий вплив на розвиток технології SDR далеко за межі оборонного застосування.

Досягнення в ПЛІС та робочих процесах розробки значно розширили можливості обробки SDR, одночасно скорочуючи час проектування. Ресурси цифрової обробки сигналів з вищою щільністю в поєднанні з ефективнішими інструментальними ланцюгами та багаторазовими фреймворками дозволяють інженерам впроваджувати дедалі складніші конвеєри обробки сигналів. Як результат, сучасні комерційні та оборонні системи SDR регулярно підтримують складні та вимогливі форми сигналів, включаючи 5G, вдосконалені форми сигналів військового зв'язку та широкосмугові сигнали радіоелектронної боротьби.

Розвиток програмного забезпечення відіграв ключову роль у розвитку технології SDR. Розробка зручних інтерфейсів та ПЗ з відкритим вихідним кодом зробила технологію SDR доступнішою як для дослідників, любителів, так і для фахівців телекомунікаційної галузі.

Разом ці тенденції зміцнюють позиції SDR як фундаментальної радіоархітектури в різних галузях, закладаючи основу для подальшої еволюції в напрямку більш адаптивних, широкосмугових та програмно-керованих радіочастотних систем.

Універсальність та адаптивність технології SDR призвели до її широкого впровадження в різних галузях промисловості та різних застосуваннях. Сфери використання SDR наведено на рис. 1.2.

У військових та оборонних застосуваннях SDR пропонують виняткову гнучкість та сумісність, що дозволяє швидко переналаштовуватися та адаптуватися до змінних вимог місії. SDR використовуються в широкому спектрі військових систем, зокрема тактичні радіостанції, платформи радіоелектронної боротьби та термінали супутникового зв'язку, забезпечуючи

військових надійними та безпечними комунікаційними можливостями в найскладніших умовах [2].

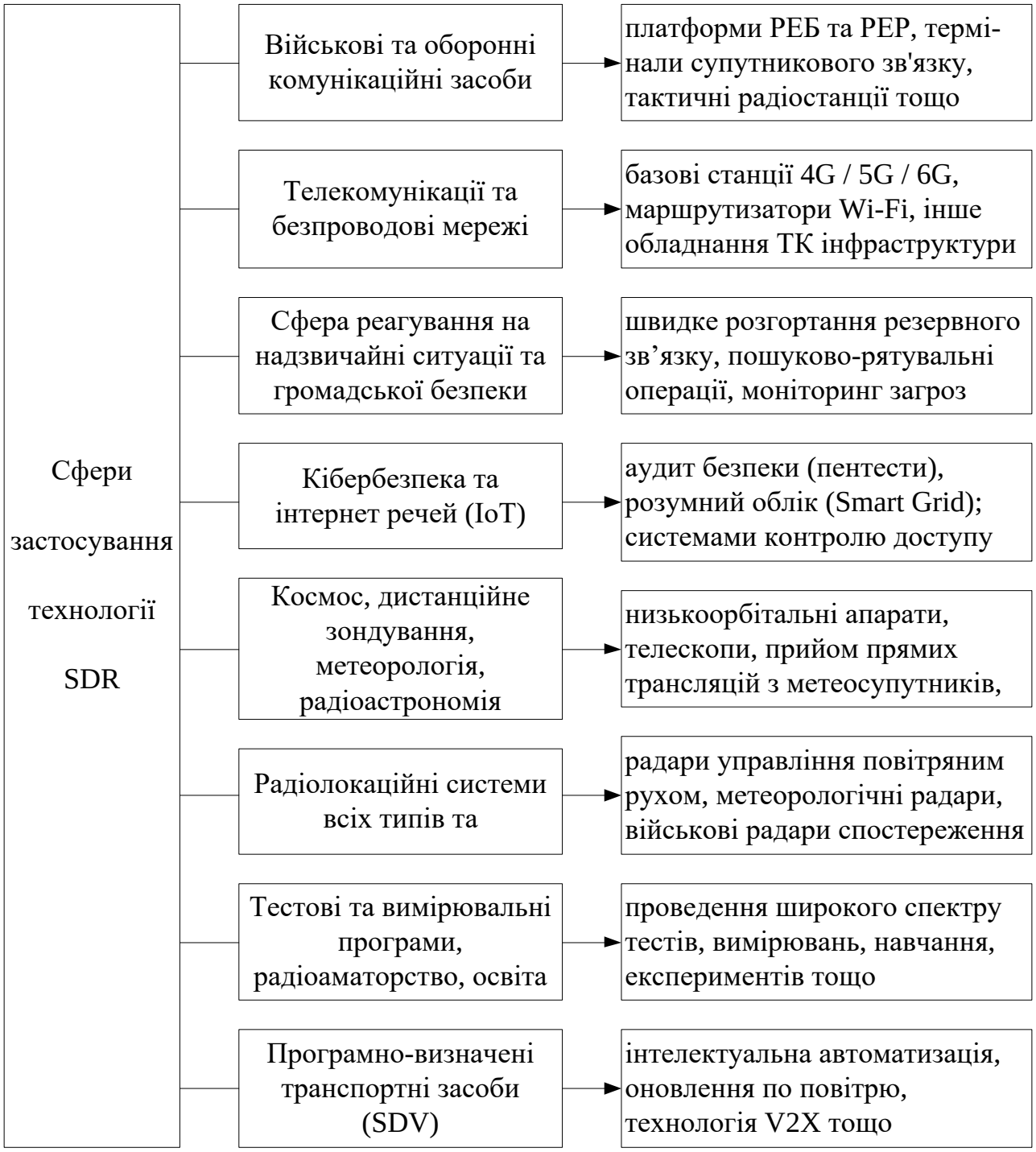


Рисунок 1.2 – Сфери використання SDR

Впровадження SDR докорінно змінило сферу інфокомунікацій та мобільного зв’язку, відкривши шлях для когнітивних радіосистем, адаптивного

розподілу частот та їх спільного використання. Технологія SDR інтегрується в сучасну інфраструктуру від базових станцій мереж мобільного зв’язку до Wi-Fi маршрутизаторів, що допомагає операторам максимально ефективно експлуатувати радіоефір і підвищувати якість сервісу. Водночас SDR є невіддільною частиною екосистем 5G та Інтернету речей (IoT), оскільки гарантує високу гнучкість при розгортанні різнотипних і масштабованих мереж зв'язку.

Дистанційне зондування та радіоастрономія отримали величезну користь від можливостей SDR, які дозволили точно збирати, обробляти та аналізувати дані для наукових досліджень та розвідки. SDR використовуються в наземних та космічних обсерваторіях для захоплення та аналізу сигналів від небесних об'єктів, що дозволяє астрономам працювати з безпрецедентною деталізацією та точністю.

Технологія SDR стала базою для сучасних радіолокаційних систем, забезпечивши якісно нові можливості формування сигналів, їх цифрової обробки та точного виявлення цілей. Програмовані радари активно впроваджуються в авіації, метеорології та військовій розвідці, гарантуючи операторам високу точність даних. Окрім цього, SDR-локатори значно випереджають традиційні аналоги завдяки своїй гнучкості, компактності, меншій вазі та економічній вигідності, що робить їх затребуваними в багатьох галузях.

Гнучкість та висока точність SDR роблять їх незамінними у сфері тестування та вимірювань, де вони використовуються для комплексного аналізу і валідації радіочастотного обладнання. Лабораторії та заводи застосовують програмоване радіо для оцінки модуляції, спектрального аналізу та моделювання поведінки каналів зв'язку. Крім того, завдяки програмному керуванню інженери можуть миттєво створювати індивідуальні тестові сценарії та протоколи під специфічні завдання, що суттєво прискорює та оптимізує весь процес розробки.

Технологія SDR суттєво вплинула і на автомобільну промисловість, а саме на появу і розвиток концепції програмно-визначених транспортних засобів (SDV). SDV перетворюють транспортні засоби з апаратно-орієнтованих продуктів на інтелектуальні системи, керовані передовими програмними архітектурами та програмованими функціями [4]. SDR є базовим фундаментом для побудови всієї системи безпроводового зв'язку сучасного розумного автомобіля. Замість встановлення десятків окремих чипів для кожного типу сигналу, в автомобіль ставиться один або кілька потужних універсальних SDR-модулів.

1.3 Переваги використання технології SDR

Аналіз інформаційних джерел [1 – 8] дозволив детально визначити ключові особливості та переваги використання SDR (рис. 1.3).

Однією з основних переваг SDR є гнучкість та можливість реконфігурації. На відміну від традиційних радіосистем, що є фіксованими та обмеженими у своїх можливостях, SDR можна легко перепрограмувати для адаптації до нових стандартів та протоколів. Ця можливість реконфігурації робить SDR ідеальним для застосувань, де гнучкість та масштабованість є важливими, наприклад, для військового зв'язку та систем реагування на надзвичайні ситуації [1].

Також значною перевагою SDR є його ефективність використання спектру. Використовуючи програмно-визначені методи для оптимізації використання доступних частот, SDR може досягти вищої спектральної ефективності порівняно з традиційними аналоговими радіосистемами. Ця ефективність є вирішальною у все більш переповненому радіочастотному спектрі, де співіснують численні безпроводові технології, які конкурують за обмежену пропускну здатність [1].

Завдяки масштабованості та налаштуванню, системи SDR дозволяють військовим та оборонним підрозділам використовувати РЧ спектр, роблячи

його доступним для більшої кількості користувачів без спеціальних знань. Удосконалені системи SDR є компактними та автономними, що дозволяє їх легко розгортати для широкого спектру застосувань: тактичних військових радіостанцій, авіадиспетчерів, GPS-керованих контролерів зброї, систем супутникової комунікації, збору сигналів розвідки та інших [5].

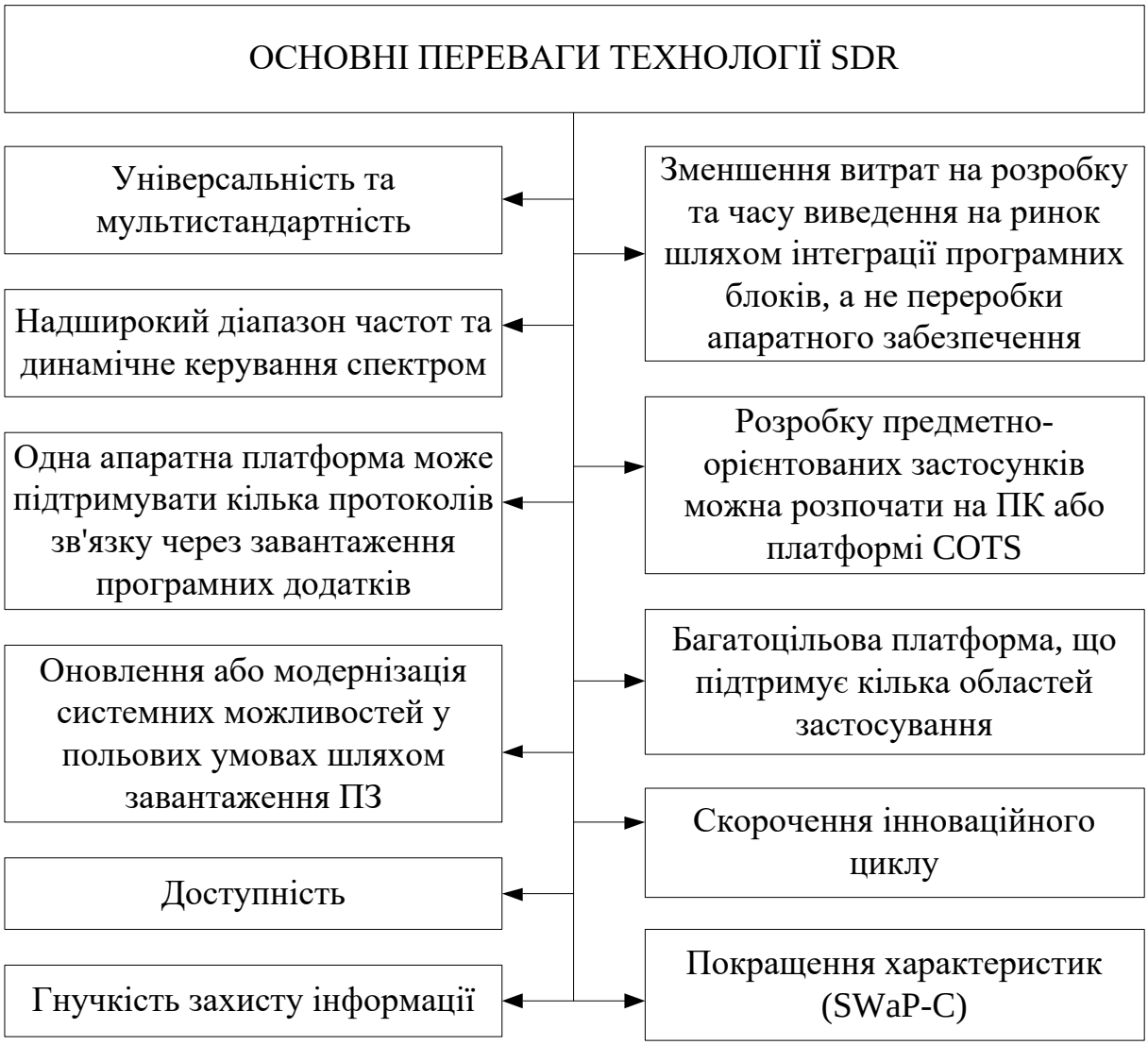


Рисунок 1.3 – Переваги використання SDR

Системи SDR можна налаштувати для виконання низки завдань, включаючи проактивний моніторинг системи, оптимізацію операцій та цілодобовий моніторинг заздалегідь визначених діапазонів частот (або всього радіочастотного спектру) [5].

Оновлення SDR у польових умовах стає легшим завдяки віддаленій установці прошивки, що означає, що датчики робочої сили можуть йти в ногу з сучасними тенденціями галузі. Для порівняння, застарілі радіочастотні системи необхідно вилучати з польових умов і відправляти назад на склад, де компоненти видаляються та оновлюються. Замість періодичної деактивації для оновлення обладнання, один SDR може залишатися працездатним понад десять років завдяки віддаленим оновленням програмного забезпечення [5].

1.4 Перспективи розвитку SDR

Майбутнє програмно-визначеного радіо є багатообіцяючим, оскільки постійні дослідження та розробки зосереджені на підвищенні ефективності, продуктивності та безпеки систем SDR. Новітні технології, такі як машинне навчання (МН) та ШІ, інтегруються в SDR для покращення обробки сигналів та управління радіочастотами, що ще більше розширює можливості програмно-визначених систем зв'язку.

Подільший розвиток технології SDR визначається розширенням смуги пропускання, збільшенням кількості робочих каналів і діапазону частот, а також глибокою інтеграцією ШІ та машинного навчання. Ці інновації суттєво підвищать продуктивність та універсальність систем, відкриваючи шлях для створення раніше неможливих сервісів і додатків. Зокрема, поява широкосмугових SDR-платформ із гнучкими синтезаторами частот дозволить масштабувати технології когнітивного радіо та динамічного управління ефіром, що докорінно змінить принципи функціонування безпроводових мереж [2, 3].

Прогрес у розширенні смуги пропускання, багатоканальності та частотного діапазону відкриває значні перспективи для модернізації SDR та впровадження інноваційних рішень у багатьох галузях. Зокрема, розробка платформ із підвищеною швидкістю дискретизації та ширшою смугою пропускання дозволить застосовувати складніші типи модуляції й алгоритми цифрової обробки, що забезпечить створення надшвидких і продуктивних

систем зв'язку. Водночас поєднання SDR зі штучним інтелектом і машинним навчанням гарантує інтелектуальне керування ефіром та адаптивну фільтрацію сигналів, що оптимізує використання радіоресурсів і підвищить стабільність мереж у складних і мінливих умовах.

Вплив прогресу в галузі SDR виходить далеко за межі суто технічних інновацій, зумовлюючи глибокі соціально-економічні зміни. Надаючи гнучкі та адаптивні рішення для безпроводового зв'язку, ця технологія здатна докорінно змінити принципи глобальної комунікації та взаємодії людей. Зокрема, у кризових ситуаціях та під час ліквідації наслідків катастроф SDR гарантує миттєве розгортання екстрених мереж там, де традиційне залізо зруйноване, підтримуючи критично важливу координацію рятувальних служб. Крім того, програмоване радіо є ключем до подолання цифрового розриву в ізольованих або бідних регіонах, забезпечуючи місцеве населення недорогим і стабільним доступом до інформаційних ресурсів та державних послуг.

Основні напрямки розвитку техології SDR наведено на рис. 1.4 та проаналізовано в табл. 1.2.

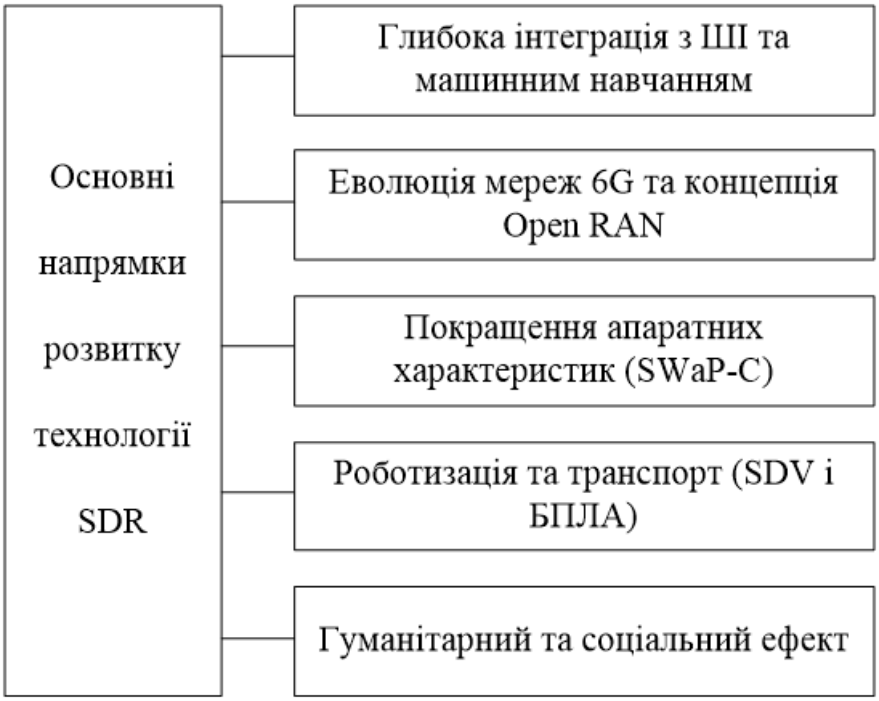


Рисунок 1.4 – Перспективи розвитку SDR

Таблиця 1.2 – Аналіз напрямків розвитку техології SDR

№	Напрямок розвитку	Можливості
1	Глибока інтеграція з ШІ та машинним навчанням	Розумне розпізнавання ефіру за допомогою нейромереж, інтегрованих в SDR
		Автономне когнітивне радіо, радіосистеми будуть самостійно навчатися адаптувати потужність, частоту та тип шифрування до завад у реальному часі
2	Еволюція мереж 6G та концепція Open RAN	Штучний інтелект на фізичному рівні (PHY). В 6G технологія SDR стане основою для динамічного керування спектром.
		Глобальна віртуалізація. ІК компанії остаточно відмовляться від спеціалізованого обладнання на користь хмарних SDR-платформ (Cloud-RAN)
3	Покращення апаратних характеристик (SWaP-C)	Ультраширокосмуговість. SDR будуть охоплювати ГГц-цові смуги пропускання одночасно без втрати якості та затримок
		Зниження енергоспоживання. Оптимізація РЧ-чипів дозволить створювати мініатюрні SDR-модулі з низьким споживанням енергії, що критично для автономних БПЛА, смартфонів та пристроїв IoT
4	Роботизація та транспорт (SDV і БПЛА)	Стандартизація зв'язку автомобілів (V2X). SDV будуть використовувати SDR для одночасного супутникового зв'язку, навігації, радарів безпеки та обміну даними з дорожньою інфраструктурою
		Еволюція РЕБ та автономних дронів. Майбутні системи БПЛА будуть оснащені мікро-SDR, здатними самостійно виявляти та обходити частоти глушіння, змінюючи протоколи зв'язку в польоті

Таблиця 1.2 – Аналіз напрямків розвитку техології SDR

№	Напрямок розвитку	Можливості
5	Гуманітарний та соціальний ефект	Подолання цифрового розриву. Завдяки здешевленню SDR-платформ стане можливим розгортання недорогих базових станцій у найвіддаленіших куточках планети, забезпечуючи зв'язком бідні чи ізольовані громади
		Антикризова стійкість. Створення мобільних SDR-рюкзаків та систем швидкого розгортання забезпечить рятувальні служби гарантованим зв'язком у перші хвилини після будь-яких масштабних катастроф

Окремої уваги заслуговує такий напрямок розвитку, як впровадження ШІ/МН. Зі швидким розвитком бездротових технологій, ШІ та МН стають дедалі важливішими для вирішення основних проблем, таких як обмежений спектр, контроль перешкод та недоліки безпеки. Підходи на основі ШІ/МН мають переваги над традиційними методами, оскільки вони можуть навчатися безпосередньо з реальних середовищ, що дозволяє їм адаптуватися до обставин, що змінюються [9].

ШІ та МН розгортаються на платформах SDR у трьох тісно пов'язаних областях: когнітивне радіо, зондування спектру та безпека фізичного рівня (рис. 1.5).

У когнітивному радіо та спектральному зондуванні методи на основі ШІ/МН зменшують потребу в ручному налаштуванні параметрів і пропонують покращену стійкість до помірного дрейфу обладнання та неідеальності на радіочастотному інтерфейсі. У застосунках безпеки навчені детектори часто викликають тривогу раніше та надійніше, ніж прості пороги енергії або рівня пакетів, і можуть ініціювати пом'якшення до повної деградації зв'язку [9].

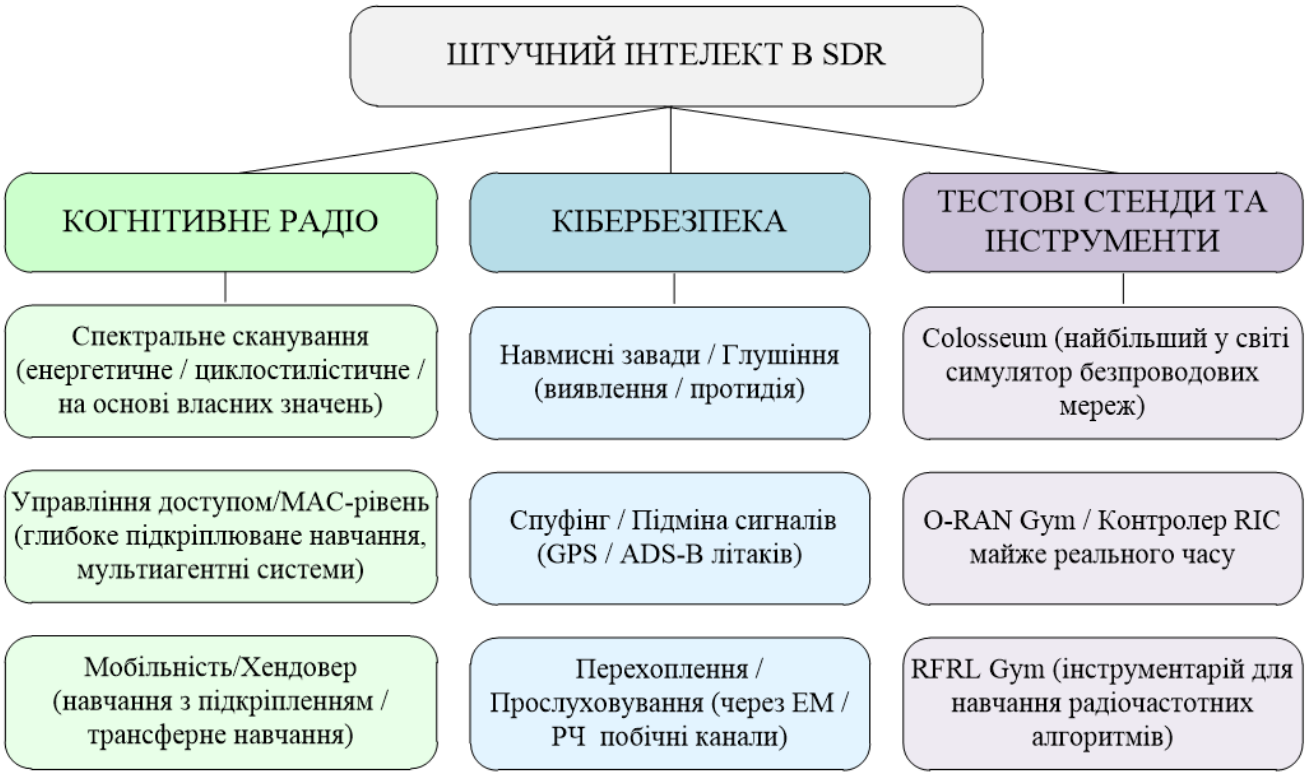


Рисунок 1.5 – Інтеграція ШІ в SDR

Майбутній прогрес залежатиме від тіснішої узгодженості між апаратним забезпеченням SDR та ШІ/МН. Експериментальні звіти, які чітко документують налаштування радіочастот, скановану пропускну здатність, діапазони відношення сигнал/шум, затримку та обчислювальні бюджети, полегшать відтворення та порівняння результатів.

Дослідники поступово переходять від абстрактних ідей ШІ/МН до відтворюваних SDR-експериментів та спрямовують мету до масштабованих радіостанцій, керованих даними, які залишаються надійними в різних діапазонах, апаратних платформах та умовах експлуатації.

2 АРХІТЕКТУРА ТА ПРИНЦИП ДІЇ SDR

Програмно-визначене радіо (SDR) – це трансформаційна технологія, яка замінює традиційні аналогові радіокомпоненти цифровою обробкою сигналів (ЦОС), керованою програмним забезпеченням. SDR визначається як технологія радіо, в якому деякі або всі функції фізичного рівня визначені програмно [6]. Ця гнучкість забезпечує швидке оновлення, реконфігурування та широке застосування в різних галузях.

На відміну від звичайних радіосистем, де обробка сигналів здебільшого здійснюється за допомогою апаратних компонентів (змішувачі, фільтри, корекція помилок, синхронізатори, модулятори, демодулятори, частотні тюнери тощо), SDR використовують програмну ЦОС для виконання цих завдань і можуть бути написані програмно.

У системі SDR аналоговий вхідний каскад мінімальний і зазвичай обмежується такими компонентами, як антени та основні схеми радіочастотного входу. Основна обробка, включаючи модуляцію, демодуляцію, фільтрацію та декодування, виконується цифровим способом після аналого-цифрового перетворення (АЦП) [10]. Програмно-визначені пристрої можна просто переналаштовувати та адаптувати до змінних вимог до продукту.

В основі SDR лежить здатність плавно переходити між різними протоколами зв'язку, частотами та схемами модуляції без необхідності модифікації обладнання. Відокремлюючи функціональність радіо від конкретних апаратних компонентів, SDR пропонують неперевершену універсальність та масштабованість. Незалежно від того, чи розгортаються вони в радіолокаційних системах, бездротових мережах чи станціях моніторингу спектру, SDR забезпечують єдину платформу для впровадження, тестування та розгортання передових радіотехнологій з мінімальними апаратними обмеженнями [8, 11].

2.1 Базова архітектура програмно-визначеного радіо

У традиційному аналоговому радіо шлях сигналу зазвичай відповідає такому ланцюжку: антена → підсилювач радіочастот → змішувач → фільтр проміжної частоти → демодулятор → підсилювач аудіо. Кожен блок виконує певну апаратну роль. При цьому для зміни функціонування радіо, потрібно змінити апаратну конструкцію [12].

У SDR-приймачі архітектура переносить значну частину цієї складності на програмне забезпечення: антена → ВЧ-передній пристрій → аналого-цифровий перетворювач → цифрова обробка сигналу → аудіовихід. Завдяки такому підходу, одна платформа SDR може підтримувати кілька режимів радіозв'язку та функцій обробки сигналів за допомогою прошивки або ПЗ, не вимагаючи окремої конструкції аналогового приймача для кожного завдання.

Порівняння концепції аналогового та програмно-визначеного радіо показано на рис. 2.1.

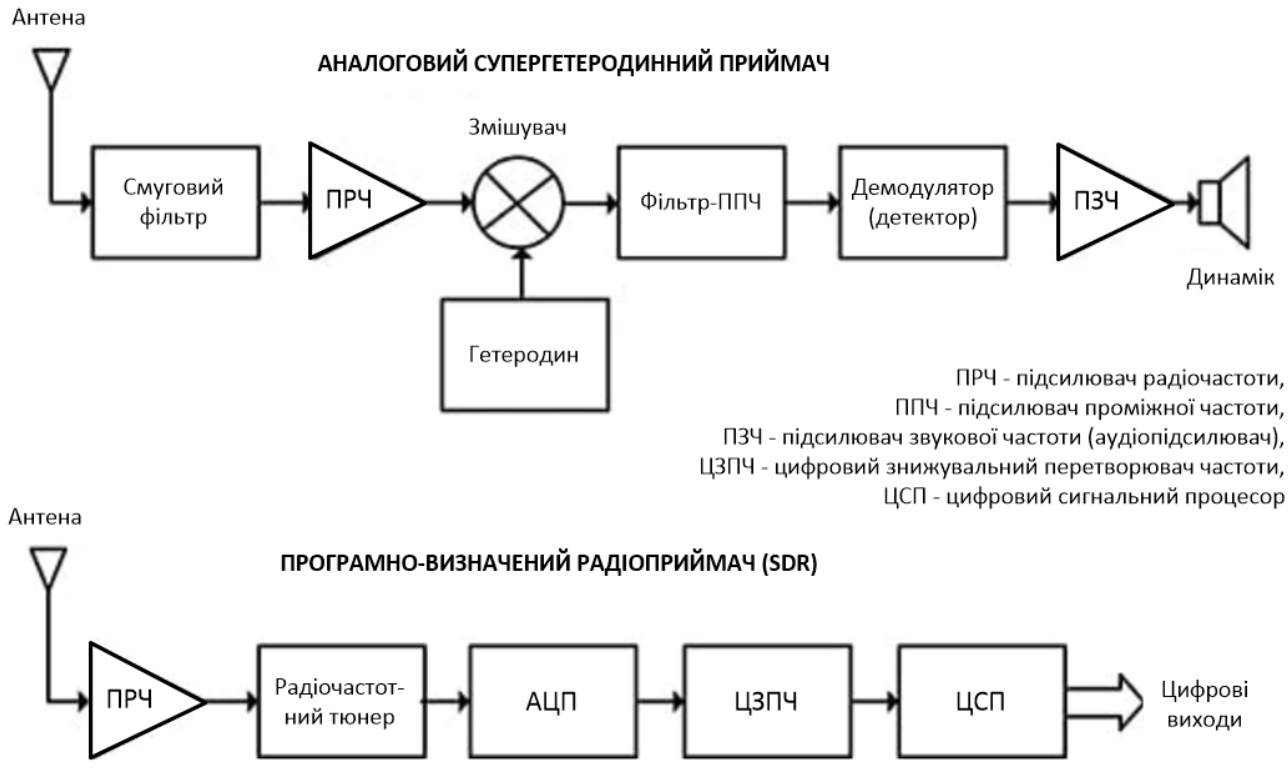


Рисунок 2.1 – Порівняння аналогового та програмно-визначеного радіо

Базова архітектура SDR представлена на рис. 2.2, що показує аналогову та програмну частину системи SDR.

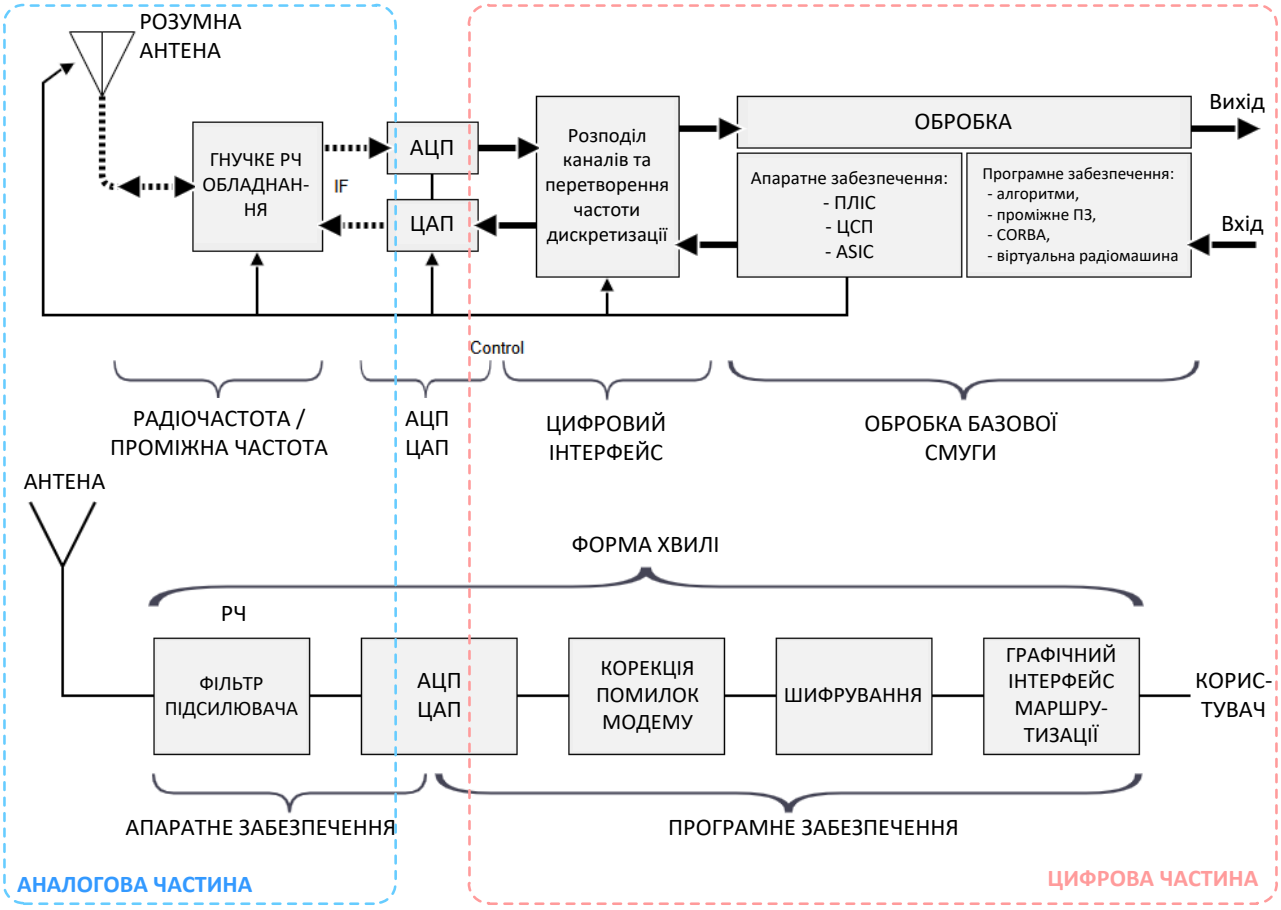


Рисунок 2.2 – Архітектура програмно-визначеного радіо (SDR)

Базову архітектуру SDR можна загалом описати як інтеграцію апаратних та програмних компонентів, де програмне забезпечення становить більшість. Програмний компонент відповідає за обробку сигналів основної смуги частот, що охоплює генерацію та декодування сигналів. Він замінює традиційні фізичні елементи, такі як фільтри, підсилювачі, модулятори, демодулятори, детектори та подільники, їхніми програмними аналогами. Це означає, що значна частина елементів фізичного рівня, таких як схеми модуляції, робочі частоти та частоти дискретизації, визначаються на етапі програмного забезпечення. Аналогічно, важливо зазначити, що сигнали перетворюються між аналоговою та цифровою областями залежно від конкретного застосування. Це перетворення

забезпечується інтегрованими аналого-цифровими та цифро-аналоговими модулями в пристроях SDR, які відіграють вирішальну роль [13].

Варто зазначити, що виділяють п'ять поширених архітектур SDR:

- супергетеродин,
- блочні перетворювачі,
- пряма дискретизація,
- нульова проміжна частота (НПЧ),
- гібридні комбінації.

Кожна з цих архітектур має свої сильні сторони, недоліки та майбутній потенціал. Від високопродуктивної кастомізації супергетеродинних пристроїв до низької ефективності нульової проміжної частоти та швидкої еволюції прямої дискретизації, кожен підхід пропонує унікальні переваги залежно від потреб завдання. Інженери мають підбирати архітектуру відповідно до реальних застосувань [14].

2.3 Функціональна схема SDR та основні пристрої

Функціональна схема SDR представлена на рис. 2.3, вона містить в собі 4 критичні елементи для всіх SDR станцій:

- функція прийому,
- функція передачі,
- синхронізація,
- цифрова основа[11].

Одним з головних компонентів SDR є радіоланцюг прийому, складний комплекс компонентів, ретельно організованих для захоплення, обробки та перетворення вхідних радіосигналів у цифрову форму.

В ланцюгу радіопередачі SDR використовуються цифрові сигнали для генерації модульованих радіосигналів для передачі.

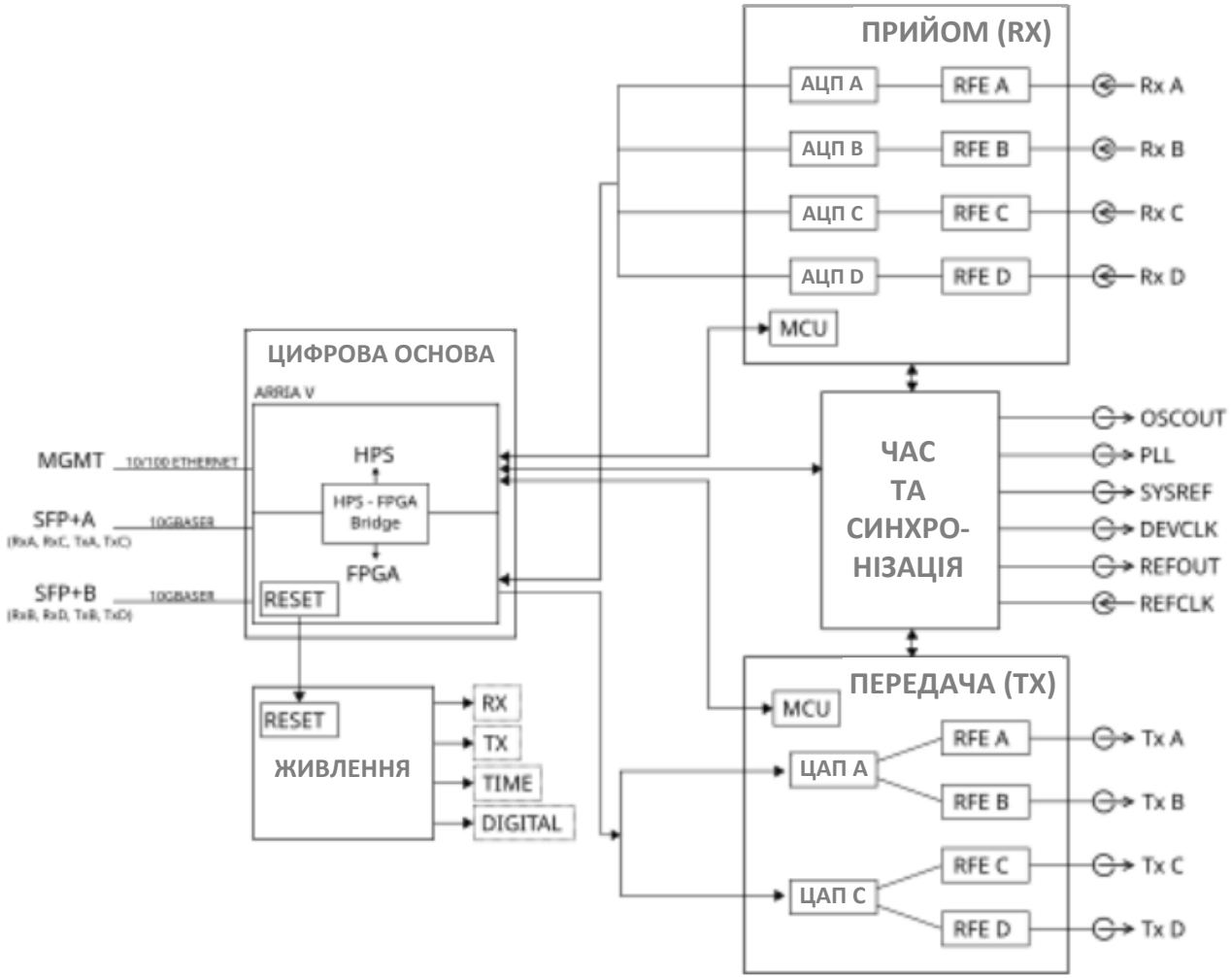


Рисунок 2.3 – Функціональна схема SDR

Точний час та синхронізація в SDR мають першорядне значення для узгодженої роботи, особливо в багатоканальних або багатоантенних конфігураціях.

Цифрова основа SDR охоплює різні компоненти, що сприяють обробці сигналів, модуляції/демодуляції та управлінню протоколами.

В SDR одна апаратна платформа може виконувати багато функцій на основі завантажених програмних застосунків. Замість різних апаратних пристроїв SDR використовують високошвидкісні пристрої (ПЛІС, цифрові сигнальні процесори, процесори загального призначення тощо), які можуть бути перепрограмовані [6]. Основні пристрії прийому, передачі, синхронізації та цифрової обробки детально описано в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні пристрої SDR

Елемент	Пристрої	Функціонал
Прийом	підсилювачі	розташовані на передовій лінії приймального ланцюга, відіграють вирішальну роль у підсиленні слабких радіосигналів, вносять мінімальний додатковий шум та забезпечують оптимальний прийом сигналу, особливо в середовищах з низьким співвідношенням сигнал/шум
	змішувачі	поєднують вхідні сигнали з частотами гетеродина, створюють сигнали проміжної частоти (ПЧ), які легше обробляти та оцифровувати; вибір коефіцієнтів змішування дозволяє гнучко налаштовувати частоту для забезпечення широкого діапазону смуг пропускання та частот сигналу [11]
	фільтри	використовуються для ізоляції потрібних частотних смуг та послаблення небажаних перешкод та шуму; часто реалізовані з використанням поверхневих акустичних хвиль або керамічних резонаторів, забезпечують чистоту та вибірковість сигналу, що є вирішальним для підтримки цілісності зв'язку в перевантажених або зашумлених радіосередовищах
	АЦП	перетворюють аналогові сигнали ПЧ у цифровий формат для подальшої обробки цифровою підсистемою SDR; АЦП високої роздільної здатності зі змінною частотою дискретизації визначають обмеження максимальної смуги пропускання сигналу, яку можна захопити, і забезпечують точне представлення аналогових сигналів у цифровій області, зберігаючи точність та цілісність сигналу

Продовження табл. 2.1

Елемент	Пристрої	Функціонал
Передача	ЦАП	слугують мостом між ЦОС та аналоговою радіопередачею; перетворюють цифрові сигнали основної смуги частот, модульовані за допомогою потрібних схем модуляції та даних, на аналогові форми хвиль, придатні для передачі по радіоканалу; ЦАП високої роздільної здатності з низькими характеристиками спотворень забезпечують точне відтворення цифрових сигналів в аналоговій області
	підсилювачі	підсилюють модульовані аналогові сигнали до потрібних рівнів потужності для передачі; вони підвищують силу сигналу, зберігають лінійність та спектральну чистоту, забезпечують відповідність нормативним стандартам та мінімізують спотворення сигналу
	змішувачі	поєднують модульовані сигнали з несучими частотами
	фільтри	усувають позасмугові випромінювання та гармоніки, забезпечуючи спектральну відповідність та чистоту сигналу
Час та синхроні-зація	генератори	служать опорними частотами для різних підсистем SDR, забезпечуючи точну дискретизацію, змішування та модуляцію сигналу
	ФАПЧ	відіграють життєво важливу роль у синтезі та синхронізації частоти, фіксуючи частоти локальних генераторів з опорними сигналами з високою точністю та стабільністю

Продовження табл. 2.1

Елемент	Пристрої	Функціонал
Цифрова основа	Мікросхеми ЦОС (ПЛІС)	виконують складні алгоритми обробки сигналів з неперевершеною гнучкістю та швидкістю; швидко створюють прототипи та оптимізують конвеєри обробки сигналів, адаптовані до вимог конкретних застосувань; виконують багато функцій: цифрове мікшування, повторна дискретизація, обробка пакетів, запуск, буферизація та кадрування
	Вбудовані модулі оперативної пам'яті	забезпечують тимчасове зберігання та буферизацію цифрових зразків сигналів, що сприяє обробці та маніпулюванню потоками вхідних і вихідних даних у режимі реального часу
	Цифрові інтерфейси (Ethernet, USB, PCIe, JTAG тощо)	керування, обмін даними та синхронізація із зовнішніми пристроями та мережами; забезпечують безперешкодну інтеграцію з хост-системами, що дозволяє здійснювати віддалене налаштування, потокову передачу даних та синхронізацію в розподілених розгортаннях SDR

Таким чином, SDR реалізує конвергенцію програмних алгоритмів, цифрової обробки сигналів та високошвидкісних цифрових інтерфейсів, що забезпечує безперешкодну інтеграцію та сумісність між різними компонентами та системами.

2.2 Принцип дії SDR

Принцип дії прийому (RX) в SDR:

1) антена приймає з ефіру всі аналогові електромагнітні хвилі;

2) первинна обробка та перенесення частоти (слабкий сигнал з антени посилюється, оскільки АЦП не може оцифрувати ГГц-ві частоти напряму, РЧ-тюнер за допомогою системи ФАПЧ знижує частоту сигналу до проміжної або нульової частоти);

3) оцифрування (АЦП вимірює напругу сигналу та перетворює радіохвилю на потік чисел 0 та 1);

4) цифрове зниження частоти (спеціальний блок виділяє з усього цифрового потоку саме ту смугу частот, яку потрібно, і відсікає сусідній шум);

5) програмна обробка (цифровий потік передається на комп'ютер, смартфон або процесор, програма за математичними алгоритмами виконує демодуляцію, фільтрує завади та перетворює дані на звук або файли).

Принцип дії при передачі (TX) в SDR (процес іде у зворотному порядку порівняно з прийомом):

1) формування сигналу в програмі (комп'ютерна програма математично кодує голос або цифровий текст у потрібний вид модуляції, на виході створюється цифровий потік даних, зазвичай у вигляді I/Q-квадратурних сигналів);

2) цифро-аналогове перетворення (потік чисел надходить на ЦАП мікросхеми трансивера, який перетворює ці цифри на реальну, але дуже слабку аналогову напругу низької частоти);

3) змішування та перенесення частоти (отриманий аналоговий сигнал змішується із частотою опорного генератора керованого системою ФАПЧ, це переносить сигнал з низької частоти на потрібну робочу радіочастоту);

4) посилення та випромінювання (сформований радіосигнал посилюється підсилювачем потужності і через антену випромінюється в ефір).

3 АНАЛІЗ ПИТАНЬ БЕЗПЕКИ В SDR

Завдяки високій швидкості передачі даних, низькому енергоспоживанню та чудовій масштабованості, SDR все частіше застосовується в різних галузях. Успішне розгортання SDR залежить від розробки та впровадження його механізмів безпеки. Однак проблеми безпеки можуть поставити під загрозу фундаментальні функції через управління програмами, конфігурацію даних або передачу. Використання несанкціонованих програм та мережних служб, шкідливого ПЗ може призвести до несправностей обладнання SDR, його втручання, перешкоджання іншим користувачам та спричинення DoS-атак тощо.

3.1 Архітектура безпеки SDR

Високорівнева архітектура для безпечних радіостанцій має бути сумісною з архітектурою програмного зв'язку (SCA). Архітектура безпеки складається з кількох незалежних частин: червоної зони, чорної зони та підсистеми шифрування, як показано на рис. 3.1. Червона зона зберігає та обробляє незашифровану або менш конфіденційну інформацію. Чорна зона обробляє конфіденційні або зашифровані дані, що робить червону та чорну зони окремими процесорами та третім процесором для підсистеми шифрування. Підсистема шифрування з'єднує обидві зони за допомогою механізму обходу для передачі даних у незашифрованому вигляді між чорною та червоною зонами [15].

Джерела інформації та сигнальні виходи SDR у платформі SCA відповідають червоній зоні. Модулі шифрування/дешифрування для джерела та каналу відповідають підсистемі шифрування, тоді як модулі цифрової

модуляції до цифрової демодуляції відповідають чорній зоні. Потік інформації та ізольовані області в SDR проілюстровано на рис. 3.2.

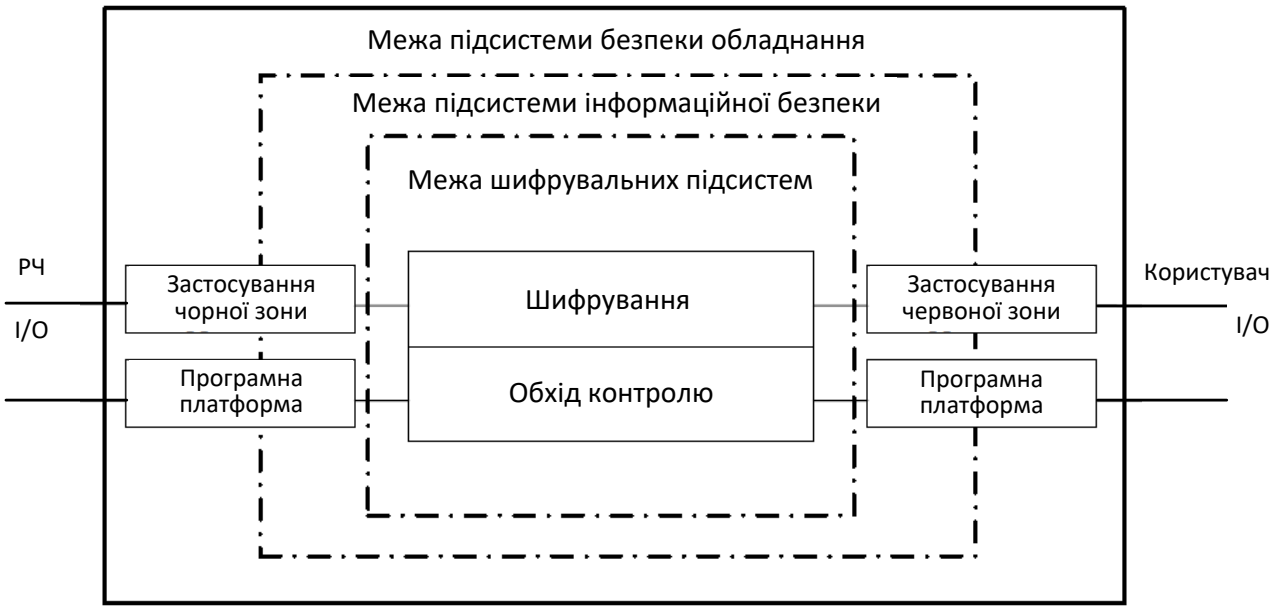


Рисунок 3.1 – Архітектура безпеки програмних комунікацій

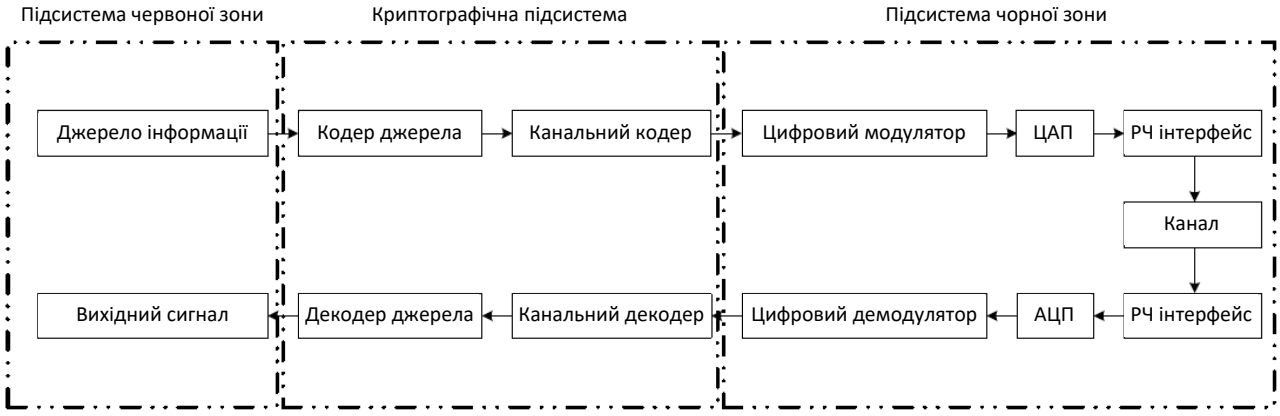


Рисунок 3.2 – Потік інформації та відповідні області ізоляції в SDR

Вимоги безпеки SDR є багатогранними та охоплюють низку вимог безпеки, які необхідно виконувати під час проектування, впровадження, експлуатації та обслуговування системи. Основні вимоги показано на рис. 3.3.

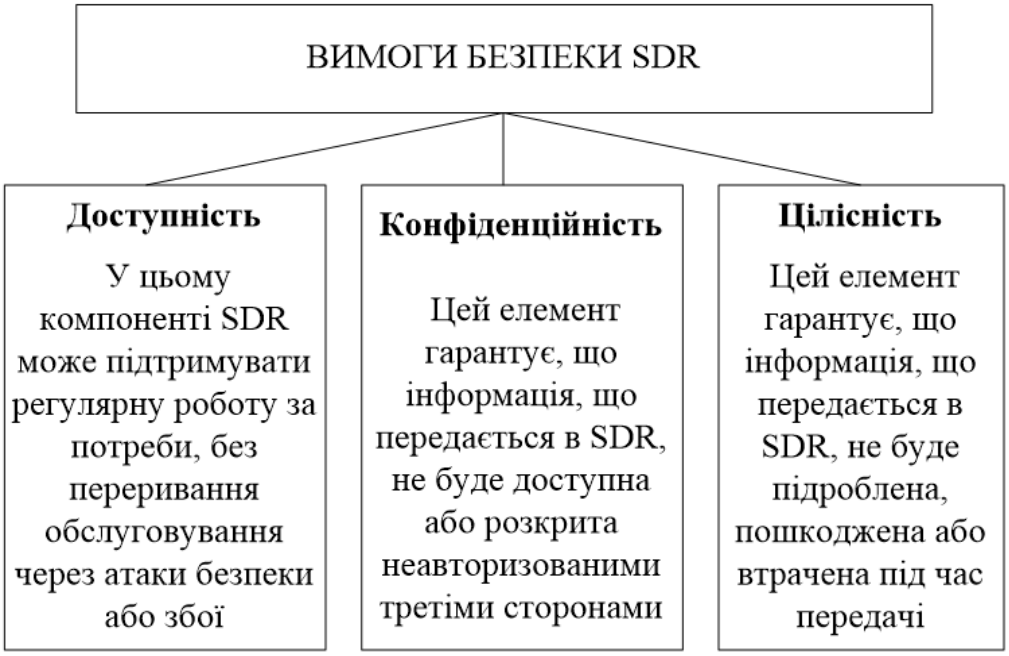


Рисунок 3.3 – Вимоги безпеки SDR

SDR демонструє високу гнучкість, але створює значні проблеми безпеки для розробників та органів сертифікації. Процес управління додатками та процес конфігурації і передачі даних є вразливими до ризиків безпеки протягом свого життєвого циклу експлуатації, як показано на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 – Аспекти загроз безпеці платформ SDR

Процес керування програмою включає критичні кроки, такі як завантаження форми сигналу, активація, а також обчислення та обробка внутрішніх ресурсів. Тому життєво важливо захищати безпеку завантажених файлів конфігурації або програмних модулів, оскільки пристрої програмування SDR можуть потенційно надати зловмисникам можливість здійснювати порушення безпеки шляхом завантаження несанкціонованого радіопрограмного забезпечення. Більш серйозною загрозою є те, що зловмисники можуть намагатися маніпулювати програмним забезпеченням SDR, щоб отримати операційні переваги, такі як передача на рівнях потужності, що перевищують дозволені межі, або на неправильних частотах, або здійснювати атаки на існуючі мережі. Несанкціоновані зміни робочих характеристик SDR, таких як потужність, частота та модуляція, викликають значні занепокоєння у чинних регуляторних органів та постачальників послуг бездротового зв'язку.

На етапі конфігурації та передачі даних SDR вразливий до зовнішнього втручання та стикається із загрозами безпеці, такими як помилки передачі даних. Важливо забезпечити, щоб завантажені файли конфігурації або програмні модулі налаштовані належним чином. Вимоги безпеки SDR виходять за рамки конфіденційності та цілісності під час передачі даних, вимагаючи, щоб система точно реагувала та виконувала інструкції. Гнучкість терміналів SDR за своєю суттю надає їм можливість завантажувати нові радіопрограми або форми хвиль. Однак увімкнення цієї функції також несе ризики. Наприклад, радіопрограми можуть динамічно налаштовувати параметри передачі на основі отриманих команд, і якщо цей процес не контролювати ефективно, це може призвести до нових вразливостей безпеки.

3.2 Основні загрози безпеці SDR

Аналіз загроз безпеці безпроводового зв'язку, з якими стикається SDR, демонструє широкий спектр атак [15]. Класифікація атак на безпеку, з якими стикається SDR, представлена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Класифікація атак на безпеку, з якими стикається SDR

№	Атака	Мета	Екземпляр	Методи
1	Підслу-ховування	Моніторинг нормальних та законних процесів зв'язку. Перехоплення законно переданих сигналів для отримання інформації з них.	Безпілотний літальний апарат (БПЛА). Вбудована камера	Шумові перешкоди. Конструктивне спуфінг-релейне сповіщення. Спуфінг пілота. Пасивне підслуховування.
2	Спуфінг	Надсилання застарілих або недійсних даних до SDR для порушення їхньої функціональності. Отримання несанкціонованого доступу для зміни поведінки SDR.	БПЛА. Супутник.	Атака повторного відтворення. Вразливість протоколу. Порушення автентифікації.
3	DoS-атака	Виведення SDR з ладу або приведення їх у недоступний стан	Бездротова мережа.	Глушіння. Переповнення. Переповнення буфера. Вразливість протоколу. Апаратний троян.
4	Несанкціо-нований доступ	Пошук конфіденційних внутрішніх даних та інформації без модифікації.	Система зв'язку. БПЛА.	Апаратна ін'єкція. Програмна ін'єкція. Атака аналізу трафіку. Атака по бічним каналам. Атака з помилками.

Продовження табл. 3.1

№	Атака	Мета	Екземпляр	Методи
5	Зловмисна ін'єкція	Модифікація даних, що зберігаються або передаються за допомогою SDR.	БПЛА. Радіочастотна мережа.	Апаратна ін'єкція. Програмна ін'єкція. Реалізація. Вразливість. Апаратний троян. Клонування пристроїв. Форма сигналу. Вразливість завантаження.
6	Атаки по бічних каналах	Аналіз інформації по бічних каналах для отримання конфіденційної інформації. Ініціювання апаратних збоїв для отримання доступу до конфіденційної інформації	Вбудована камера	Характеристики чіпа. Побічний канал аналіз. Атака з помилкою.
7	Атаки на ланцюг поставок	Пошкодження або втручання в програмне забезпечення та апаратне забезпечення SDR	БПЛА. Автономний підводний апарат.	Підроблені компоненти SDR. Втручання в прошивку. Експлойти нульового дня.
8	Постквантова міграція	Криптографічні примітиви	Алгоритм AES-128	Злом алгоритму шифрування

Таким чином, SDR стикається з надзвичайно серйозними загрозами безпеці. З одного боку, ці загрози можуть призвести до витоку конфіденційної інформації, що серйозно порушує конфіденційність та безпеку пристроїв і користувачів. З іншого боку, вони також негативно впливатимуть на стабільність та надійність роботи SDR. Крім того, засоби атаки, спрямовані на SDR, демонструють різноманітні характеристики, а спільні проблеми безпеки його програмного та апаратного забезпечення є складними та заплутаними. SDR працює в динамічно мінливому електромагнітному середовищі. Ця характеристика середовища може викликати нові загрози безпеці, тим самим ставить під загрозу ефективність існуючих механізмів безпеки [15].

Для гарантування безпечної роботи SDR слід вживати низку цілеспрямованих заходів:

1) важливо посилити криптографічну технологію SDR та забезпечити безпеку даних під час передачі та зберігання за допомогою передових алгоритмів шифрування;

2) слід впроваджувати комплексний механізм виявлення вторгнень, оскільки цей механізм може контролювати робочий стан SDR у режимі реального часу та оперативно виявляти та блокувати потенційні атаки;

3) під час проектування програмного та апаратного забезпечення SDR необхідно повністю враховувати схеми захисту безпеки, щоб забезпечити його адаптацію до динамічного електромагнітного середовища та гнучке налаштування стратегій безпеки відповідно до змін навколишнього середовища.

3.3 Методи виявлення загроз та захисту SDR

Оскільки SDR знаходить широке застосування в численних галузях, його проблеми безпеки стають дедалі помітнішими. Саме тому існує потреба в поглибленому аналізі існуючих схем програмного та апаратного захисту для

SDR та дослідженні заходів виявлення та захисту безпеки на основі нових технологій.

Поява загроз безпеці SDR робить ефективне виявлення цих загроз надзвичайно важливим. Сучасні дослідження щодо виявлення безпеки SDR (рис. 3.5) в першу чергу зосереджені на виявленні атак шляхом ідентифікації шкідливих шаблонів у SDR, які відхиляються від очікуваної нормальної поведінки [15].

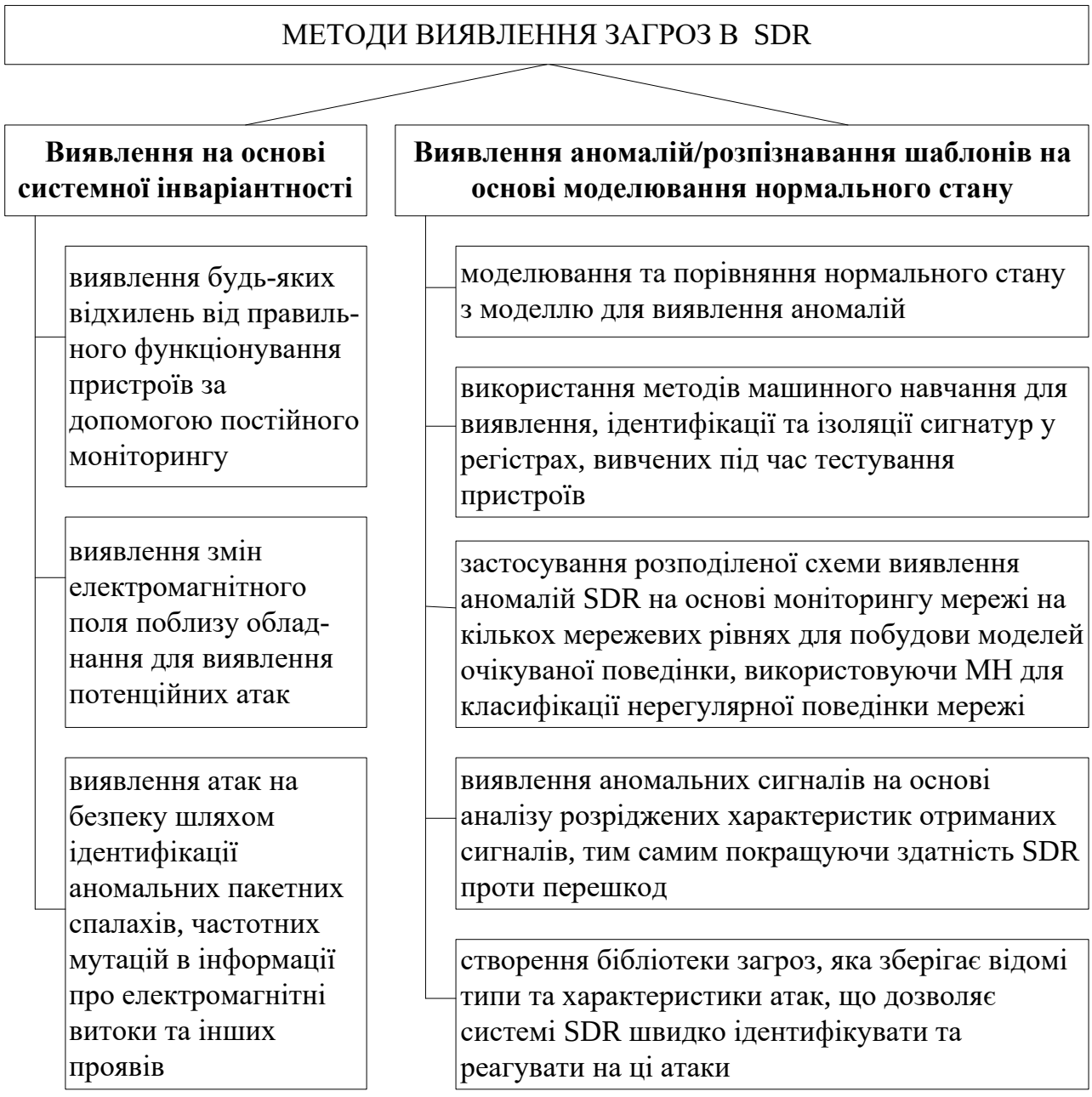


Рисунок 3.5 – Методи виявлення загроз в SDR

Успішне розгортання технології SDR залежатиме від розробки та впровадження фундаментальних механізмів безпеки для забезпечення стійкості до загроз безпеці як для мереж, так і для кінцевих точок.

Рішення захисту безпеки SDR поділяються на дві категорії: програмний захист та апаратний захист (рис. 3.6).



Рисунок 3.6 – Методи захисту безпеки в SDR

Програмні рішення захисту використовують технології захисту від несанкціонованого доступу для захисту від встановлення шкідливого або дефектного програмного забезпечення. Цей процес включає методи та

алгоритми для безпечного завантаження та розповсюдження програмного забезпечення на SDR. Це безпечне завантаження захищає цілісність обмінюваних даних, запобігає підслуховуванню та забезпечує механізми для забезпечення автентифікації між сторонами, що взаємодіють.

Програмні рішення захисту демонструють високу гнучкість та чудову економічну ефективність. Зазвичай вони здатні швидко адаптуватися до нових загроз безпеці за допомогою таких засобів, як онлайн-оновлення або оновлення ПЗ. Але програмні рішення вимагають використання певної кількості системних ресурсів під час роботи, що може вплинути на продуктивність пристроїв SDR.

Апаратні рішення захисту можуть похвалитися відносно високою безпекою, можуть працювати незалежно та демонструвати відмінну стабільність. Як правило, спираючись на механізми безпеки фізичного рівня, їх важко зламати засобами атаки на основі програмного забезпечення. Як правило, вони не залежать від збоїв програмної системи або конфліктів ПЗ і здатні забезпечити стабільний та надійний захист безпеки. Вони не залежать від операційного середовища програмної системи та можуть запропонувати захист безпеки одразу після запуску пристрою. Однак вони мають високу вартість та не мають гнучкості, а їх обслуговування є складнішим. Витрати на дослідження, розробку, виробництво та розгортання рішень апаратного захисту зазвичай високі, що може збільшити загальну вартість пристроїв SDR. Після завершення проектування та виробництва апаратного забезпечення важко проводити модифікації та оновлення. Крім того, усунення несправностей та усунення апаратних збоїв, як правило, є складнішими, ніж вирішення проблем ПЗ. Апаратні рішення не можуть адаптувати політики безпеки до мінливих середовищ [15].

В таблиці 3.2 представлені загрози безпеці SDR та відповідні методи захисту безпеки. Порівняння продуктивності схем захисту безпеки SDR на основі програмного та апаратного забезпечення представлено у табл.3.3.

Таблиця 3.2 – Порівняння методів захисту безпеки SDR

Тип загрози	Методи захисту	Переваги	Недоліки	Тип
Атака підслухо-вування	Динамічний зв'язок зі стрибками частоти. Шифрування на фізичному рівні. Придушення електромагнітних перешкод.	Висока продуктивність у режимі реального часу.Низьке енергоспо-живання.	Висока вартість обладнання. Потрібні спеціальні радіочастотні модулі.	АЗ, ПЗ
Атака підробки	Цифровий підпис та автентифікація. Багаторежимне об'єднання навігації.	Гарантія безпеки на рівні протоколу. Підтримка віддаленої перевірки.	Залежить від довірених третіх сторін. Висока складність оновлень ПЗ.	ПЗ
Відмова в обслуго-вуванні	Апаратний брандмауер. Виявлення аномалій трафіку на основі ШІ.	Блокування в режимі реального часу на апаратному рівні. Потужні можливості захисту від перешкод.	Високі обчислювальні вимоги. Потрібне навчання моделі.	АЗ, ПЗ
Несанкці-онований доступ	Надійне середовище виконання. Керування ідентифікацією пристроїв на основі блокчейну.	Децентралі-зований механізм довіри. Запобігання втручанню в прошивку.	Висока затримка в консенсусі блокчейну. Великі накладні витрати на зберігання.	АЗ, ПЗ

Продоження табл. 3.2

Тип загрози	Метод захисту	Переваги	Недоліки	Тип
Зловмисне впровадь-ження	Безпечне завантаження сигналу. Виявлення апаратних троянів.	Захист цілісності даних від початку до кінця. Підтримка динамічної перевірки коду.	Спирається на попередньо визначені бібліотеки загроз. Повільна реакція на нові атаки.	АЗ, ПЗ
Атака по бічних каналах	Динамічне масштабування напруги та частоти. Конструкція електромагнітного екранування.	Завуалювання шуму на фізичному рівні. Не потрібно модифікувати ПЗ.	Збільшений об'єм та вага пристрою. Зменшена гнучкість розгортання.	АЗ
Атака ланцюга поставок	Апаратний корінь довіри. Програмне забезпечення для сканування ланцюга поставок.	Блокує шкідливі компоненти у джерелі. Підтримує автоматизований аудит.	Вимагає реструктуризації процесів ланцюга поставок. Висока початкова вартість.	АЗ, ПЗ

Таблиця 3.3 – Порівняння апаратних та програмних методів захисту

Рішення	Гнуч кість	Еконо-мічна ефе-ктивність	Суміс-ність	Незалеж-ність	Стабіль-ність	Спожи-вання ресурсів
Програмне	+	+	–	–	–	+
Апаратне	–	–	+	+	+	–

Програмні рішення захисту вимагають значних ресурсів для розробки та тестування ПЗ, потребують регулярного оновлення, але характеризуються високою гнучкістю, низькими витратами на розгортання та високою масштабованістю. Апаратні рішення захисту вимагають додаткових апаратних компонентів, що підвищує виробничі витрати пристрою, їх важко оновлювати, але вони зазвичай пропонують високу продуктивність, низьку затримку, високий рівень безпеки, довший термін служби та вищу надійність.

3.4 Тенденції розвитку безпеки SDR

Основні напрямки розвитку безпеки SDR показано на рис.3.7.

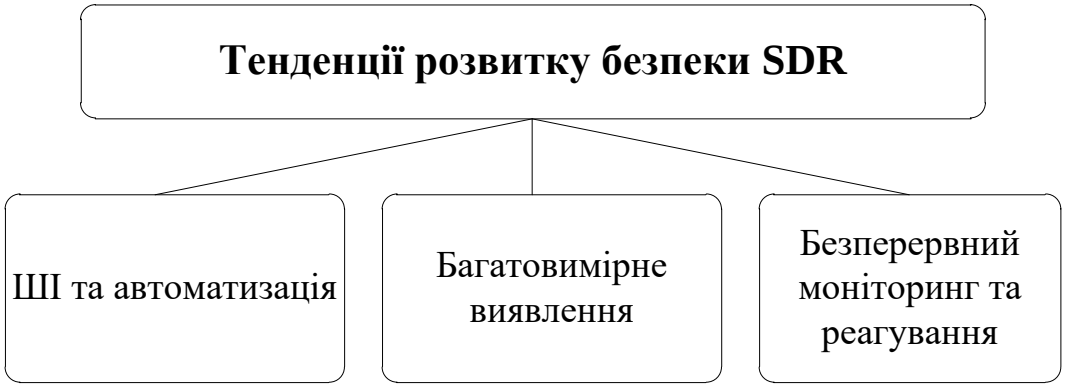


Рисунок 3.7 – Тенденції розвитку безпеки SDR

Використання ШІ та алгоритмів МН для проведення поглибленого аналізу радіосигналів має вирішальне значення для виявлення аномальних закономірностей та потенційних загроз. Ці алгоритми досягають інтелектуального виявлення та оцінки безпеки. Методи МН широко застосовуються в дослідженнях класифікації радіочастотних сигналів та зондування спектру, навчені глибокі нейронні мережі виконують виявлення та класифікацію сигналів майже миттєво.

Багатовимірне виявлення відбувається на кількох рівнях, включаючи сигнали, протоколи та системи, радіосигнали глибоко аналізуються на рівні

сигналу для виявлення аномалій та потенційних загроз. На рівні протоколу проводиться виявлення безпеки протоколів зв'язку для забезпечення їхньої безпеки та надійності. На системному рівні проводиться оцінка безпеки загальної архітектури та конфігурації програмно-визначеної радіосистеми для виявлення потенційних вразливостей безпеки та слабких місць.

Механізм моніторингу в режимі реального часу безперервно контролює робочий стан програмно-визначеної радіосистеми. Після виявлення інциденту безпеки або аномальної поведінки можна швидко реагувати та вживати відповідних заходів безпеки.

4 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ SDR

4.1 Порівняння SDR різних форм-факторів

Програмно-визначені радіостанції побудовані на основі чотирьох категорій платформ, кожна з яких має свої певні характеристики, що разом забезпечують чітке уявлення про операційне середовище.

Форм-фактор – це стандарт, який визначає фізичні розміри, форму, вагу та розташування ключових елементів технічного пристрою або його компонентів. Форм-фактор гарантує сумісність деталей від різних виробників. За форм-фактором виділяють чотири види програмно-визначених радіостанцій: високопродуктивні платформи, компактні SDR, SDR середнього розміру та повнорозмірні SDR. Результати порівняння цих видів SDR представлено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Порівняння SDR різних форм-факторів

Показник	Високо-продуктині платформи	Компактні SDR	SDR середнього розміру	Повнорозмірні SDR
Емуляція середо-вища	Високо-продуктивна, модульна та масштабована платформа як еталонне середовище, в якому можна протестувати SCA	SDR складається зі смартфона на базі Android та потратив-ного приймача-передавача, підключеного через USB-кабель	Потужні радіопристрої, які зазвичай використо-вуються в транспортних засобах.	Радіоблок, який може бути використаний для високо-швидкісних систем зв'язку з високими вимогами до продуктивності

Продовження табл. 4.1

Показник	Високо-продуктині платформи	Компактні SDR	SDR середнього розміру	Повнорозмірні SDR
Інтерфейс корис-тувача	Розроблений на JAVA, можна використовувати спеціальну програму або розробити власний інтерфейс користувача	Розроблений на JAVA як додаток для Android, що працює на смартфоні. Керування здійснюється за допомогою сенсорного екрана.	Розроблений на JAVA, працює на робочій станції, можна використо-вувати спеціальну програму або розробити власний інтерфейс користувача	Розроблений на JAVA, працює на робочій станції, можна використо-вувати спеціальну програму або розробити власний інтерфейс користувача
Елементи обробки сигналів	Функції обробки сигналів та РЧ приймача-передавача реалізовані в одному блоці, на різних платах. З'єднання через високо-швидкісну об'єднувальну плату	Функції обробки сигналів розподілені між смартфоном та блоком РЧ приймача-передавача	Функції обробки сигналів виконуються у блоці SDR і на настільному ПК, залежно від обчислю-вальної потужності	Функції обробки сигналів та РЧ приймача-передавача реалізовані в одному блоці, на різних платах. З'єднання між платами через високошвидкісну об'єднувальну плату.
Блок РЧ приймача		Комерційні готові до використання РЧ пристрої (COTS)	Комерційні готові до використання РЧ пристрої (COTS)	

Продовження табл. 4.1

Показник	Високо-продуктині платформи	Компактні SDR	SDR середнього розміру	Повнорозмірні SDR
Середо-вище розробки	Настільний комп'ютер, інструмент розробки SCA Architect, середовище розробки програмування, компілятор та бібліотеки	Настільний комп’ютер, програма на смартфоні Android, інструмент розробки SCA Architect, середовище розробки програмува-ння, крос-компілятор та бібліотеки	Настільний комп'ютер, інструмент розробки SCA Architect, середовище розробки програмуванн я,компілятор та бібліотеки	Настільний комп'ютер, інструмент розробки SCA Architect, середовище розробки програмування компілятор та бібліотеки
Переваги	Надзвичайно висока продуктивність обробки сигналів і РЧ харак-ик. Універсальність Масштабованість. Можливість налаштовувати блок SDR з різними платами обробки COTS	Компактність, мобільність, широкий частотний діапазон, візуалізація ефіру в реальному часі, низька вартість	Найвища багато-смуговість та обчислювальн а потужність для розширеного моніторингу зі збереженням при цьому відносної мобільності	Має вищу якість, забезпечує набагато вищу швидкість обробки даних, високу масш-таббованість, що дозволяє оновлюватися до новіших матеріалів.

Асортимент SDR станцій охоплює широкий спектр апаратних рішень: від бюджетних USB-адаптерів для радіоприйому до потужних професійних систем, здатних працювати у повнодуплексному режимі на високих швидкостях. Доступні приймачі, як-от RTL-SDR, здобули широке визнання завдяки своїй ціні, що робить їх ідеальними для моніторингу сигналів та аналізу спектра. Водночас професійні пристрої, наприклад Ettus Research USRP X410, пропонують високу пропускну здатність та потужність, тому активно застосовуються в індустріальних проєктах для розробки сучасних систем бездротового зв’язку [16].

4.2 Порівняння сучасних доступних SDR

Для виконання порівняльного аналізу були досліджені різні інформаційні джерела останніх років [16 – 22], з цих джерел було визначено найбільш популярні доступні SDR, які є доступними для покупки та які активно підтримуються станом на 2026 рік. До таких SDR відносяться такі: RTL-SDR Blog V4 (RTL2832U / R828D), Airspy R2, Airspy Mini, Airspy HF+ Discovery, SDRplay RSP1B, SDRplay RSPdx-R2, SDRplay RSPduo, ADALM-Pluto (PlutoSDR), HackRF One, LimeSDR Mini 2.0, BladeRF 2.0 micro (xA4 and xA9), Ettus USRP B200 / B200mini / B210, KrakenSDR і саме для цих SDR було виконано порівняльний аналіз.

Для порівняння різних SDR було використано наступні ключові технічні характеристики: діапазон частот, роздільна здатність АЦП, частота дискретизації / миттєва пропускна здатність, коефіцієнт шуму (NF), наявність дуплексу, наявність прийому та передачі, наявність ПЛІС, наявність MIMO. Дані характеристики описано в табл. 4.2.

Зовнішній вигляд розглянутих моделей SDR представлено на рис. 4.1.

Таблиця 4.2 – Ключові технічні характеристики SDR

№	Назва	Визначення	Опис
1	Діапазон частот	Діапазон радіочастот, на які може налаштуватися SDR	Ширший діапазон означає можливість приймати (передавати) більше типів сигналів. Більшість недорогих SDR охоплюють УКХ; спеціалізовані приймачі, орієнтовані на КХ, охоплюють лише вузький діапазон, але роблять це надзвичайно добре.
2	Роздільна здатність АЦП (розрядність)	Визначає динамічний діапазон приймача	Більша розрядність означає більшу різницю між найслабшим і найсильнішим сигналом, які пристрій може обробляти одночасно, не втрачаючи слабкий сигнал через шум і не перевантажуючи сильний. Наприклад, 8-бітний АЦП має теоретичний динамічний діапазон близько 48 дБ, 12-бітний АЦП – 72 дБ, 14-бітний АЦП – 84 дБ.
3	Частота дискретизації / Миттєва пропускна здатність	Визначає, наскільки широкий фрагмент спектру можна використовувати одночасно.	Частота дискретизації 2 МГц відображає 2 МГц спектру; частота дискретизації 56 МГц може відображати весь стільниковий діапазон одночасно. Вищі частоти дискретизації вимагають швидших USB/мережних інтерфейсів та потужніших процесорів хоста.
4	Коефіцієнт шуму (NF)	Вимірює, скільки шуму сам приймач додає до сигналу.	Чим нижче NF, тим краще. Прості SDR мають коефіцієнт шуму близько 5 – 7 дБ; професійні USRP наближаються до 5 – 8 дБ, але з кращим керуванням динамічним діапазоном; спеціалізовані КХ-приймачі досягають показників менше 4 дБ на КХ-діапазонах.

Продовження табл. 4.2

№	Назва	Визначення	Опис
5	Наявність дуплексу	Можливість одночасних прийома та передачі	Повний дуплексний режим означає, що можна передавати та приймати одночасно на різних частотах (потрібно для MIMO, ретрансляторів, деяких протоколів). Напівдуплексний режим означає, що можна передавати та приймати дані одночасно (HackRF One — це напівдуплексний режим).
6	TX/RX	Наявність прийомної та передавальної частини	Багато SDR призначені лише для прийому. Ті, що можуть передавати, відкривають можливості для таких застосувань, як аматорські цифрові режими, введення сигналу, тестування форм хвиль та навчання. Для передачі на ліцензованих частотах потрібна відповідна ліцензія.
7	ПЛІС	Наявність програмованої логічної інтегральної схеми	Деякі SDR мають вбудовану ПЛІС, яка може виконувати обробку сигналів до того, як дані потраплять до головного ПК, що дозволяє вищі ефективні частоти дискретизації та складнішу обробку на пристрої. Деякі моделі вбудованої ПЛІС не мають.
8	MIMO	Наявність кількох входів та виходів	Для роботи з кількома входами та кількома виходами потрібні щонайменше два когерентні ланцюги TX/RX. Корисно для рознесеного прийому, досліджень просторового мультиплексування та експериментальної роботи зі стільниковим зв'язком. Деякі SDR підтримують MIMO 2×2.



Рисунок 4.1 – Найбільш популярні доступні SDR

Порівняльний аналіз доступних SDR представлений в табл. 4.3 та 4.4. У таблицях порівняння представлено вичерпний огляд різних сучасних моделей програмно-визначених радіостанцій. У таблицях представлено різноманітний асортимент моделей SDR, доступних на ринку, які відрізняються технічними характеристиками, можливостями та ціновими категоріями.

В табл. 4.3. SDR порівнюються за ключовими технічними характеристикамии, такими як діапазон частот, роздільна здатність, частота дискретизації, кількість каналів передавача та приймача, можливість дуплексного зв'язку та інші.

В табл. 4.4 SDR порівнюються за різними можливостями, зокрема ціною, перевагами, недоліками, простотою програмування та масштабом спільноти використання.

Таблиця 4.3 – Порівняння SDR за характеристиками обладнання

SDR	Діапазон частот	Біти АЦП	Частота дискретизації	Передавач (TX)	MIMO	Канали	Інтерфейс	ПЛІС
RTL-SDR Blog V4	500 кГц – 1,766 ГГц	8-бітний	2,56 МГц	ні	ні	1 прийом	USB 2.0	ні
Airspy R2	24 МГц – 1,8 ГГц	12-бітний	10 МГц	ні	ні	1 прийом	USB 2.0	ні
Airspy Mini	24 МГц – 1,8 ГГц	12-бітний	6 МГц	ні	ні	1 прийом	USB 2.0	ні
Airspy HF+ Discovery	500 Гц– 31 МГц та 60– 260 МГц	>18-бітний	660 кГц (КХ) / 768 кГц (УКХ)	ні	ні	1 прийом	USB 2.0	ні
SDRplay RSP1B	1 кГц – 2 ГГц	14-бітний	10 МГц	ні	ні	1 RX, 1 антенний порт	USB 2.0	ні
SDRplay RSPdx-R2	1 кГц – 2 ГГц	14-бітний	10 МГц	ні	ні	1 RX, 3 антенні порти	USB 2.0	ні
SDRplay RSPduo	1 кГц – 2 ГГц	14-бітний	10 МГц (один), 2 МГц (кожен, подвійний)	ні	ні	2 незалежних RX-тюнери	USB 2.0	ні
ADALM-Pluto (Pluto SDR)	325 МГц – 3,8 ГГц	12-бітний	20 МГц	так, повний дуплекс	ні	1 TX, 1 RX	USB 2.0; Ethernet	так

Продовження табл. 4.3

SDR	Діапазон частот	Біти АЦП	Частота дискретизації	Передавач (TX)	MIMO	Канали	Інтерфейс	ПЛІС
HackRF One	1 МГц – 6 ГГц	8-бітний	20 МГц / 20 MSPS	так, напів дуплекс	ні	1 TX/RX спільний	USB 2.0	так
LimeSDR Mini 2.0	10 МГц – 3,5 ГГц	12-бітний	40 МГц	так, повний дуплекс	ні (1×1 на Mini)	1 TX, 1 RX	USB 3.0	так
BladeRF 2.0 micro (xA4 and xA9)	47 МГц – 6 ГГц	12-бітний	56 МГц	так, повний дуплекс	так (2×2)	2 TX, 2 RX	USB 3.0	так
Ettus USRP B200	70 МГц – 6 ГГц	12-бітний	56 МГц	так, повний дуплекс	ні (1×1)	1 TX, 1 RX	USB 3.0	так
Ettus USRP B210	70 МГц – 6 ГГц	12-бітний	56 МГц	так, повний дуплекс	так (2×2)	2 TX, 2 RX	USB 3.0	так
Kraken SDR	24 МГц – 1,766 ГГц	8-бітний	2,56 МГц на канал	ні	так (5-канальний когерентний)	5 когерентних RX	USB 2.0	ні

Прості варіанти, такі як RTL-SDR, забезпечують базову функціональність за низькою ціною, тоді як високоякісні пристрої від Ettus пропонують розширені функції для професійного використання. Порівняння показує компроміси між частотним покриттям, обчислювальною потужністю, варіантами інтерфейсу та ціною на SDR, що дозволить користувачам вибирати на основі своїх конкретних вимог та бюджетних обмежень.

Таблиця 4.4 – Порівняння SDR за ціною і можливостями

SDR	Ціна, $ США	Переваги	Недоліки	Легкість програмування	Масштаб спільноти
RTL-SDR Blog V4	30 – 40 $	початківці, ADS-B, NOAA, сканування	низький динамічний діапазон, 8 біт, без передачі	найлегше	дуже великий
Airspy R2	169 $	висока продуктивність УКХ	вбудовані ВЧ-діапазон і передавальні канали	середнє	великий
Airspy Mini	99 $	підвищення рівня УКХ порівняно з RTL-SDR	вбудовані ВЧ-діапазон і передавальні канали	середнє	великий
Airspy HF+ Discovery	169 $	відмінний прийом КХ	вузьке покриття (немає УВЧ), немає передавача	середнє	середній
SDRplay RSP1B	33 $	широкий діапазон RX, найкраще співвідношення ціни та якості RX	немає передачі даних, API із закритим кодом	середнє	великий
SDRplay RSPdx-R2	199 $	НЧ/СЧ/ВЧ відмінність + 3 антенні порти	немає передачі даних, API із закритим кодом	середнє	великий
SDRplay RSPduo	279 $	рознесений прийом, дводіапазонний моніторинг	немає передачі, погана робота блокувальника зблизька	середнє	середній
ADALM-Pluto (Pluto SDR)	149 – 229 $	освіта, проекти Python/MATLAB TX+RX	обмежений діапазон частот, вузьке місце USB2	найлегше (найкращий Python TX)	дуже великий

Продовження табл. 4.4

SDR	Ціна, $ США	Переваги	Недоліки	Легкість програмування	Масштаб спільноти
HackRF One	340 $	широкосмугове покриття, експерименти в TX, хакерство	8-бітний АЦП, напівдуплексний, нестійкий АЦП	легке	дуже великий
LimeSDR Mini 2.0	399 $	розробка FPGA з відкритим кодом, кастомний DSP	висока ціна, історичні проблеми з NF, обмежений асортимент	середнє	середній
BladeRF 2.0 micro xA4	540 $	MIMO, широкодіапазонний TX/RX, дослідження протоколів	висока ціна, вимоги до хоста USB3	середнє	середній
BladeRF xA9	665 $	розширена обробка сигналів ПЛІС	висока ціна, для повноцінного використання потрібна експертиза FPGA	середнє	малий – середній
Ettus USRP B200	~675 $	дослідження, освіта, одноканальний	висока ціна	легке (дуже добре, UHD/Python)	великий (академічний)
Ettus USRP B210	~1119 $	дослідження, MIMO, довідкова платформа	дуже висока ціна	легко (дуже добре, UHD/Python)	дуже великий (академічний)
Kraken SDR	349 $	радіопеленгація, полювання	тільки для спеціалістів, 8-бітна якість RTL	легке / середнє	середній (нішевий)

4.3 Прийняття рішень щодо варіантів використання SDR

З результатів порівняльного аналізу (табл. 4.3 - 4.4) видно, що всі моделі SDR мають дуже різноманітні характеристики та можливості. Не існує єдиного найкращого SDR для всіх цілей. Правильний вибір SDR залежить від того, яку мету переслідує користувач, яке заплановане програмування та на яку вартість розраховує користувач. Варіанти використання представлено в табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Варіанти використання SDR відповідно мети

№	Мета	Пропозиція
1	Початок роботи з SDR з мінімальними витратами	Комплект RTL-SDR Blog V4 (приблизно 40 $ з антеною). Він підтримує аналоговий та сучасний цифровий стандарти мовлення, може приймати ADS-B, метеосупутники, розсіювати метеорити та виконувати базове сканування у величезній спільноті навчальних посібників та програмного забезпечення.
2	Потрібен найкращий КХ-приймач з ціною до 200 $	Airspy HF+ Discovery (169 $). За таку ціну ніщо не зрівняється з прийомом НЧ/СЧ/ВЧ. Якщо також потрібні УКХ, слід додати Airspy R2 або RSP1B як другий пристрій.
3	Потрібен один приймач, який охоплює все від НЧ до 2 ГГц з гарною апаратною фільтрацією	SDRplay RSP1B (133 $) або RSPdx-R2 (199 $). 14-бітний АЦП та апаратний банк фільтрів справді корисні в щільних радіочастотних середовищах. RSPdx-R2 кращий для НЧ/СЧ/ВЧ. RSP1B має кращу цінність для загального використання.
4	Потрібні 2 одночасні канали RX або рознесений прийом.	SDRplay RSPduo (279 $) для рішення лише для прийому з максимальною програмною підтримкою. BladeRF 2.0 micro xA4 (540 $) або USRP B210 (1119 $) для можливості повнодуплексного MIMO-трансивера.

Продовження табл. 4.5

№	Мета	Пропозиція
5	Потрібен TX/RX з можливістю розробки на Python	ADALM-Pluto (149 – 229 $). Екосистема pyadi-iio – це найкращий досвід роботи з трансиверами Python SDR, доступний за ціною до 500 $. Якщо потрібне ширше частотне покриття (до 47 МГц – тоді BladeRF 2.0.
6	Потрібен максимально широкий діапазон частот для широкомугового сканування спектру	HackRF One (1 МГц–6 ГГц, 340 $). 8-бітний АЦП обмежує чутливість і динамічний діапазон, але для спектральних досліджень та ідентифікації сигналів у широкому діапазоні ніщо не зрівняється з ним за ціною. Інструмент hackrf_sweep забезпечує повну сканування в діапазоні 0 – 6 ГГц.
7	Проведення досліджень, створення прототипів бездротових протоколів, побудова тестових стендів для СМЗ	Ettus USRP B210 (1119 $) – це кращий вибір: найкраща якість драйверів, найповніша екосистема програмного забезпечення (GNU Radio, srsRAN, OpenBTS, MATLAB), підтримка MIMO та можливість приймати опорні сигнали годинника, керовані GPS. Якщо бюджет обмежений, то найближча альтернатива – BladeRF 2.0 micro.
8	Радіопеленгація або полювання	KrakenSDR (349 $ + антени). За таку ціну немає іншого комерційно доступного готового рішення для 5-канальної когерентної пеленгації.
9	Для освіті та при використанні MATLAB або Simulink	Краще рішення – ADALM-Pluto. Analog Devices значно інвестувала в освітню екосистему навколо нього. USRP B200/B210, якщо бюджет дозволяє розширити можливості.
10	Моніторинг іоносфери та зондуванням каналів	Airspy HF+ Discovery для моніторингу лише на прийомі. Для активних зондів – USRP B200/B210 або PlutoSDR з відповідним підсиленням та відповідною ліцензією.

Таким чином, для різних цілей та можливостей кристувача можна підібрати оптимальний варіант моделі SDR.

Для початківців рекомендується RTL-SDR Blog V4. Інвестиції мінімальні, спільнота величезна, а спектр можливостей достатній.

Для фахівців, що працюють з КХ рекомендується Airspy HF+ Discovery, що пропонує надзвичайну продуктивність за свою ціну. При потребі ширшого загального покриття (до 2 ГГц) найкращий варіант для одного пристрою – це SDRplay RSPdx-R2.

Для розробників Python, які створюють проекти трансиверів, рекомендується ADALM-Pluto з pyadi-iio, що є найзручнішим для розробників і доступним за ціною до 500 $. Екосистема, навчальні посібники та інтеграція з MATLAB не мають собі рівних для навчання та швидкого прототипування.

Для досліджень MIMO та протоколів рекомендується BladeRF 2.0 micro, що забезпечує найкраще співвідношення ціни та якості для повної сумісності 2×2 MIMO. USRP B210 є еталонним стандартом, якщо дозволяє бюджет.

Для пеленгації рекомендується KrakenSDR, що є унікальним та спеціально створеним для цього.

Також при виборі необхідно враховувати мови програмування. Python є домінуючою мовою для розробки SDR-проєктів, але також використовуються технології SoapySDR, ADALM-Pluto, USRP, GNU Radio тощо. C/C++ залишається важливим для критично важливих для продуктивності програм і розробки ПЛІС. В академічних умовах найбільш актуальним є MATLAB, а PlutoSDR та USRP мають найкращу офіційну підтримку.

ВИСНОВКИ

Програмно-визначене радіо докорінно змінило підходи до проектування та впровадження радіотехнологій. Завдяки своїй гнучкості та універсальності, SDR дедалі частіше застосовуються в різних радіочастотних сферах, зокрема у військовому зв'язку, інфокомунікаціях, тестуванні обладнання, розгортанні мереж 5G та IoT. Високопродуктивні SDR відіграють важливу роль в критично важливих оборонних галузях, таких як радіолокація, моніторинг спектру, радіорозвідка, засоби радіоелектронної боротьби, супутниковий зв'язок.

В першому розділі даної роботи детально розглянуто еволюцію, сучасний стан та сфери використання технології SDR, переваги використання та перспективи розвитку технології SDR.

Використання SDR забезпечує суттєві переваги, серед яких – економічна ефективність, можливість роботи з кількома протоколами на одній платформі, скорочення витрат на розробку та впровадження. Універсальність цих систем дозволяє швидко створювати прототипи нових форм хвиль і легко адаптуватися до будь-яких завдань: від аматорських радіоекспериментів до реалізації складних рішень в аерокосмічному та оборонному секторах.

В другому розділі досліджено базову архітектуру програмно-визначеного радіо, функціональну схему SDR та основні пристрої, а також принцип дії SDR.

В третьому розділі проаналізовано важливі питання безпеки в SDR, зокрема архітектура безпеки SDR, основні загрози безпеці SDR, методи виявлення загроз та захисту SDR, а також тенденції розвитку безпеки SDR.

В четвертому розділі виконано порівняльний аналіз сучасних доступних моделей SDR (табл. 4.3 – 4.4) та розроблено рекомендації щодо вибору оптимальних варіантів використання SDR для конкретних умов та потреб користувачів (табл. 4.5).

Аналіз SDR демонструє баланс між частотним діапазоном, обчислювальними ресурсами, типами інтерфейсів та вартістю, що дозволяє

підібрати обладнання відповідно до індивідуальних завдань та бюджету. Як свідчать результати порівняння (табл. 4.3 – 4.4), кожна модель SDR має унікальні технічні характеристики. Прості рішення, наприклад RTL-SDR, забезпечують базовий функціонал за доступною ціною, натомість професійні пристрої, наприклад Ettus, пропонують високоефективні та розширені можливості. Універсального рішення не існує, тому вибір оптимального пристрою залежить від конкретних цілей користувача, запланованого програмного забезпечення та фінансових можливостей.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. The Role of Software-Defined Radio in Modern Communication. AnyTone. 23.07.2025. URL: https://www.anytone.net/a-news-the-role-of-software-defined-radio-in-modern-communication.html.

2. Brandon Malatest. Pioneering the Wireless Frontier: The Evolution and Future Horizons of Software Defined Radios. *Everything RF.* 23.04.2024. URL: https://www.everythingrf.com/community/pioneering-the-wireless-frontier-the-evolution-and-future-horizons-of-software-defined-radios.

3. The Evolution of Software-Defined Radio: Past, Present, and the Intelligent Future. *Everything RF*. 03.02.2026. URL: https://www.everythingrf.com/community/the-past-30-years-of-software-defined-radios.

4. Liotou E., Tzelalidou D., Christodoulou G. The Rise of the Software-Defined Vehicle: Architectures, Enabling Technologies, and Future Opportunities. *Department of Informatics and Telematics, Harokopio University of Athens, Greece.* 28.05.2026. URL: https://arxiv.org/html/2605.30001v1.

5. Jaimie Brzezinski. 5 benefits of software defined radios (SDRs) over legacy RF systems. *CRFS*. URL: https://www.crfs.com/blog/5-reasons-why-militaries-need-sdr-sensors-at-the-edge (дата звернення: 28.06.2026).

6. What is Software Defined Radio (SDR)? *VIAVI Solutions*. URL: https://www.viavisolutions.com/en-us/what-software-defined-radio-sdr (дата звернення: 29.06.2026).

7. Новітні технології та засоби зв'язку у ЗСУ: шлях трансформації та перспективи розвитку / О. Лаврут та ін. *Ukrainian Military Pages*. 2019. URL: https://www.ukrmilitary.com/2019/04/signal.html#google_vignette.

8. Introduction to Software Defined Radios (SDR).A Resource of White Papers and Articles on Software Defined Radios. *EverythingRF*. 2025. URL: https://cdn.everythingrf.com/wpfiles/introduction_to_software_defined_radios_sdr__639002511891467544.pdf.

9. Shadman Rahman Doha, Ahmed Abdelhadi. Artificial Intelligence in Software Defined Radio: A Survey. *School of Electrical Engineering & Computer Science University of North Dakota*. Grand Forks, USA, 2026. С. 1 – 15. URL: https://doi.org/10.36227/techrxiv.176823035.55020784/v1.

10. Designing Software Defined Radio (SDR) with RFSoC System on Module. *iWave Global*. 22.07.2025. URL: https://iwave-global.com/articles/software-defined-radio-sdr-with-rfsoc-system-on-module/.

11. Brandon Malatest. Exploring the World of Software Defined Radio (SDR). *Everything RF*. 01.04.2024. URL: https://www.everythingrf.com/community/exploring-the-world-of-software-defined-radio-sdr.

12. Vincent Zhang. Software Defined Radio (SDR): A Complete Practical Guide to I/Q Sampling, Portable SDR Receivers, Antennas, and Real-World Shortwave Listening. *IWISTAO*. 08.03.2026. URL: https://iwistao.com/blogs/iwistao/software-defined-radio-sdr-a-complete-practical-guide-to-i-q-sampling-portable-sdr-receivers-antennas-and-real-world-shortwave-listening?srsltid=AfmBOopTItwuIPfg4zCXPz2h9pvi1m0UvRMt2gE068K4556WLvrjVVK4.

13. Ramos M.A., Camacho R., Buitrago P.A., Urda R.D. and Restrepo J.P. Software Defined Radio, a perspective from education. *Frontiers in Education*. 2024. Vol. 8. P. 1 – 10. URL: https://doi.org//10.3389/feduc.2023.1228610.

14. Software Defined Radios – Which RF Architecture Should I Choose?. Epiq Solutions. 30.10.2025. URL: https://blog.epiqsolutions.com/software-defined-radios-which-rf-architecture-should-i-choose.

15. Tong Wu , Xueguang Zhou and Wei Fu. Security issues in software-defined radio: a review. Cybersecurity. 27.01.2026. Volume 9, article number 19. P. 1–26. URL: https://doi.org/10.1186/s42400-025-00433-x.

16. List of software-defined radios. *Grokipedia*. 08.12.2025. URL: https://grokipedia.com/page/List_of_software-defined_radios.

17. The Complete Amateur Radio SDR Buyer’s Guide and Comparison (2025). *Alauda Projects*. 01.06.2026. URL: https://www.alauda.ro/2026/06/the-complete-amateur-radio-sdr-buyers-guide-and-comparison-2025/.

18. Specification between different SDRs. *Signalens*. 01.02.2026. URL: https://signalens.com/compare/#Specification-between-different-SDRs.

19. SDR Cards: The Complete Guide to High-Performance Software-Defined Radio Solutions in 2026. *EMG2*. 18.06.2026. URL: https://emg2.com/en/sdr-cards-the-complete-guide-to-high-performance-software-defined-radio-solutions-in-2026/?cn-reloaded=1.

20. Comparing High-Performance Software-Defined Radios. *COTS Journal. The Journal of Military Electronics & Computing.* 23.03.2023. URL: https://www.cotsjournalonline.com/comparing-high-performance-software-defined-radios/.

21. Chaudhari Q. Top 5 Software Defined Radios (SDR) for RF Experimentation. *Wireless Pi*. URL: https://wirelesspi.com/top-5-software-defined-radios-sdr-for-rf-experimentation/ (дата звернення: 23.06.2026).

22. Morgan A. SDR Radio Guide: How to Choose the Right Software-Defined Radio. *Alibaba.com Electronics Hub.* 30.04.2026. URL: https://electronics.alibaba.com/buyingguides/sdr-radio-guide-how-to-choose-the-right-sdr-for-beginners-enthusiasts.