

УДК 621.396:004.7

СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ SDR ТЕХНОЛОГІЙ, ЯК ОСНОВИ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ЗВ'ЯЗКУ ТА РАДІОМОНІТОРИНГУ

Севрюков О.Ю.

e-mail: oleh.sevriukov@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки,
каф. ІКІ ім. В.В. Поповського,
м. Харків, Україна

Software-Defined Radio (SDR) is an advanced technology in telecommunications, radio monitoring, and wireless systems. It enables flexible signal processing using software instead of traditional hardware modifications. SDR is widely applied in military, mobile networks, satellite communication, and cognitive radio. Key advantages include multi-standard support, adaptive modulation, and real-time reconfiguration. However, SDR faces challenges such as ADC limitations, computational costs, and power consumption. Future developments focus on energy efficiency, AI-based spectrum management, and cloud integration.

Програмно-конфігуроване радіо (SDR) є однією з найперспективніших технологій у сфері телекомунікацій, радіомоніторингу та досліджень бездротових систем. Завдяки цифровій обробці сигналів на універсальних процесорах, сигнальних процесорів (DSP), програмованих логічних матриць (FPGA) або графічних процесорів (GPU), SDR дозволяє здійснювати прийом, передачу та аналіз сигналів різних форматів і частотних діапазонів.

З історичної точки зору, концепція SDR бере початок із військових розробок, але вже у 1990-х роках з розвитком DSP та FPGA ця технологія отримала широке застосування у цивільних системах зв'язку. SDR-системи дозволяють реалізувати широкий спектр функцій, таких як когнітивне радіо, адаптивна модуляція та цифрова фільтрація, що робить їх незамінними для мобільних мереж 5G, 6G, супутникового зв'язку, а також радіомоніторингу.

Основною перевагою SDR є можливість зміни робочих параметрів виключно за допомогою програмного забезпечення. Це дозволяє підтримувати кілька стандартів зв'язку на одному пристрої та швидко оновлювати функціональність без фізичних модифікацій обладнання. У військовій сфері ця властивість забезпечує оперативний перехід між різними каналами та методами шифрування зв'язку, що підвищує рівень захищеності комунікаційних систем. У сфері наукових досліджень SDR використовується для аналізу електромагнітного спектра, тестування нових алгоритмів зв'язку та реалізації машинного навчання для оптимізації бездротових технологій. SDR є потужним інструментом для освіти, що дозволяє студентам отримувати

практичні навички з реальними технологіями, забезпечуючи можливості для експериментів і досліджень без високих витрат на обладнання.

Архітектура SDR включає в себе апаратну частину (антена, RF-frontend, аналого-цифровий та цифро-аналоговий перетворювачі) та програмну частину (цифрова обробка сигналів, програмне забезпечення для управління передачею даних та модуляцією). При цьому важливим фактором є розташування аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) та цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) відносно антени, оскільки воно визначає якість обробки сигналу та рівень фазового шуму [1].

До основних показників SDR належать: частотний діапазон, частота дискретизації, ширина смуги пропускання, розрядність АЦП/ЦАП, пропускна здатність інтерфейсів та обчислювальні ресурси. Відповідно до теореми Найквіста-Шенона, частота дискретизації повинна бути щонайменше вдвічі більшою за максимальну частоту сигналу, щоб уникнути ефекту накладання спектра[2]. Однак при збільшенні частоти дискретизації зростає навантаження на канали передачі даних та обчислювальні ресурси, що обмежує ефективну швидкість роботи SDR-системи. Ширина смуги визначає, скільки інформації яку можна передати за одиницю часу, за теоремою Шеннона, максимальна швидкість передачі інформації за наявності шуму залежить від його смуги пропускання та відношення сигнал/шум (SNR). Одним із ключових параметрів що впливає на можливості SDR-систем, є розрядність АЦП/ЦАП, яка визначає кількість рівнів квантування сигналу.

В табл.1 наведено порівняння характеристик найпоширеніших SDR.

Таблиця 1 - Порівняння характеристик найпоширеніших SDR

Параметр	RTL-SDR	HackRF One	LimeSDR	PlutoSDR+	USRP B210	BladeRF 2.0 xA*
Частотний діапазон	24 МГц - 1.766 ГГц	1 МГц - 6 ГГц	100 кГц - 3.8 ГГц	70МГц-6ГГц	70МГц-6ГГц	47МГц-6ГГц
Пропускна здатність	3.2 МГц	20 МГц	61.44 МГц	56МГц	61.44МГц	61.44МГц
АЦП/ЦАП	8 біт	8 біт	12 біт	12 біт	12 біт	12 біт
Режим роботи	Тільки прийом	Напівдуплекс	Дуплекс	Дуплекс	Дуплекс	Дуплекс
Інтерфейс	USB 2.0	USB 2.0	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.0	USB 3.0
Вартість	\$20	\$300	\$300	\$170	\$2165	\$200-1800

Попри переваги, SDR стикається з певними обмеженнями, серед яких ключовими є обмеження продуктивності АЦП/ЦАП, обчислювальні витрати цифрової обробки сигналів, енергоспоживання та пропускна здатність каналів передачі даних. Використання АЦП із великою розрядністю та високою частотою дискретизації супроводжується необхідністю точного калібрування та компенсації нелінійностей. Для вирішення цих проблем застосовують технологію паралельного АЦП (Time-Interleaved ADCs), адаптивного фільтрування та оптимізованих алгоритмів FFT, наприклад Кулі-Тьюкі, дозволяє зменшити вплив цих факторів на продуктивність системи. Застосування розкладу Тейлора допомагає знизити похибки при компенсації фазового шуму та нелінійних спотворень підсилювачів[3].

Фізичні обмеження реальних АЦП та підсилювачів також відіграють значну роль у продуктивності SDR-систем. Фазовий шум, нелінійні спотворення та міжмодульна інтерференція можуть значно погіршити якість сигналу. Для компенсації таких ефектів використовуються алгоритми цифрової передискретизації та предисторії (Digital Predistortion, DPD), які дозволяють лінеаризувати характеристики підсилювачів, мінімізуючи гармонійні спотворення[4]. Сучасні SDR-системи широко використовують такі програмні платформи, як GNU Radio, SoapySDR, MATLAB Simulink, які забезпечують розробку та тестування алгоритмів цифрової обробки сигналів. Крім того, проєкт srsRAN є одним із ключових open-source рішень для реалізації мобільних мереж 4G/5G на базі SDR.

Перспективи розвитку SDR включають покращення енергоефективності пристроїв, інтеграцію з хмарними обчислювальними платформами та впровадження когнітивних радіомереж. Застосування SDR у мобільних мережах дозволяє ефективно розподіляти ресурси частотного спектра та зменшувати витрати на розгортання інфраструктури. Алгоритми машинного навчання та штучного інтелекту сприяють розширенню функціональних можливостей SDR, роблячи його невід'ємною частиною майбутніх комунікаційних систем.

Список використаних джерел:

1. Галкин В.А, Основы программно-конфигурированного радио. Москва: Горячая линия – Телеком. С.10-14.
2. Travis F. Collins, Robin Getz, Di Pu, Alexander M. Wyglinski Software-Defined Radio for Engineers. 2018. 26 p.
3. Masterson C. Digital Predistortion for RF Communications: From Equations to Implementation. *Analog Dialogue*. 2022. Vol. 56.
4. Y. Lu, L. Zhou, C. Chen A Digital Calibration Technique for Frequency Response Mismatches in M -Channel Time-Interleaved ADCs Based on Taylor