

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2022-69-1-4>

УДК 621.396.969.1

Олексій ПОЛКАРОВСЬКИХ

Одеський національний морський університет

<https://orcid.org/0000-0002-1893-7390>

e-mail: polalexey@gmail.com

Юлій БОЙКО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0603-7827>

e-mail: boiko_julius@ukr.net

Віталій ТКАЧУК

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>

e-mail: tkachukv.p@gmail.com

Віктор АДЄЄВ

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0001-8136-4989>

e-mail: avdieiev.v.m@gmail.com

Олексій СВИСТУНОВ

ДП «НОВАТОР»

<https://orcid.org/0000-0002-8474-1978>

e-mail: office@novator-tm.com

СИСТЕМИ ПРОГРАМНО-КОНФІГУРОВАНОГО РАДІО ЯК ОСНОВА РОЗВИТКУ ПЕЛЕНГАЦІЙНИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ НАСТУПНОГО ПОКОЛІННЯ

Сучасна тенденція проникнення програмно-конфігурованого радіо (SDR - Software Defined Radio) у науку, виробництво визначається появою на ринку доступних та багатофункціональних програмно-апаратних рішень. Аналіз досвіду розробки сучасних радіотехнічних комплексів дозволяє говорити про виникнення нової парадигми в галузі телекомунікацій та радіозв'язку, пов'язаної з напрямком SDR. З точки зору розробника сучасної радіоапаратури напрямок SDR є багатовекторним і охоплює наступні сфери застосування: радіоприймальні та радіопередавальні пристрої, радіолокація і пеленгація, системи електричного зв'язку. Метою роботи є історичний огляд та огляд сучасних тенденцій у галузі створення радіотехнічних комплексів на основі систем SDR. Для цього у роботі аналізуються особливості стандартизації та архітектура радіостанції SDR, сучасні тенденції використання SDR, зарубіжний досвід використання SDR, еволюція радіостанцій SDR, структура апаратної частини радіоприймача RTL-SDR, особливості реалізації приймача SDR у спеціалізованому програмному забезпеченні (СПО).

Ключові слова: програмно-конфігуроване радіо, SDR, SCA, FPGA, DSP, GPP, ASIC, пеленгатор.

Oleksiy POLIKAROVSKYKH

Odessa National Maritime University

Juliy BOIKO, Vitaliy TKACHUK

Khmelnytskyi National University

Victor AVDIEIEV, Oleksiy SVISTUNOV

State Enterprise "Novator"

SOFTWARE DEFINED RADIO SYSTEMS AS A BASIS FOR THE DEVELOPMENT OF NEW GENERATION DIRECTION FINDING RADIO TECHNICAL SYSTEMS

The current trend of penetration of SDR (Software Defined Radio) in science, industry is determined by the emergence of affordable and multifunctional software and hardware solutions. Analysis of the experience in the development of modern radio systems allows us to speak about the emergence of a new paradigm in the field of telecommunications and radio communications, related to the direction of SDR. From the point of view of the developer of modern radio equipment, the direction of SDR is multi-vector and covers the following areas of application: radio receiving and transmitting devices, radar and direction finding, electrical communication systems. SDR is gaining ground and becoming an invaluable research and development tool in the radio and telecommunications industry for rapidly prototyping new circuitry and algorithmic solutions in real electronic equipment and evaluating it in real operating conditions. Thanks to the development of microprocessor technologies, RF equipment and software, SDR has become into a reliable tool in the arsenal of the designer of radio engineering equipment, and this, in turn, has changed the way innovative solutions in the radio engineering sector of the industry are formed to technical problems. The transition from continuous to discrete signal representation is determined by a compromise between the wide functionality of the radio station, on the one hand, and reasonable operational parameters when meeting the requirements of electromagnetic compatibility standards, on the other. The receiver of an "ideal" SDR radio station should have a minimum firmware, independent of frequency, modulation type and channel width, and meet the requirements of electromagnetic compatibility standards. The aim of the work is a historical overview and review of current trends in the field of radio systems based on SDR systems. To do this, the paper analyses the features of standardization and architecture of SDR radio, current trends in SDR use, foreign experience of SDR use, evolution of SDR radio stations, structure of RTL-SDR radio receiver, features of SDR receiver implementation in Specialized SoftWare (SSW).

Keywords: software-configured radio, SDR, SCA, FPGA, DSP, GPP, ASIC, direction finder.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Програмно-конфігуроване (обумовлене) радіо (SDR) або SDR (SDR - Software Defined Radio) набуває все більшого поширення і стає безцінним інструментом дослідження та розробки у радіотехнічному та телекомунікаційних секторах промисловості для швидкого прототипування нових схематехнічних та алгоритмічних рішень в реальній радіоелектронній апаратурі та оцінці її у реальних умовах експлуатації. Завдяки розвитку мікропроцесорних технологій, радіочастотне обладнання та програмне забезпечення, SDR перетворився на надійний інструмент, який є у арсеналі розробника радіотехнічної апаратури, а це, у свою чергу, змінило спосіб формування інноваційні рішень у радіотехнічному секторі промисловості до технічних проблем.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Термін програмно-конфігурованого радіо зазвичай пов'язують з ім'ям Джозефа Мітоли та його статтею з архітектури SDR [1], опублікованій більше двадцяти п'яти років тому в період його роботи на Міністерство оборони США. Регламентація в області SDR тісно пов'язана з поняттям програмно-конфігурованої архітектури зв'язку (SCA, від англ. Software Communication Architecture), спроектованої вищезгаданим міністерством у рамках робіт з єдиних тактичних систем радіозв'язку (JTRS, від англ. Joint Tactical Radio Systems), які проводились з 1997 з метою розробки стандарту SDR [2]. Архітектура SCA була покликана забезпечити роботу систем військового радіозв'язку з різними радіосигналами незалежно від апаратної платформи за рахунок стандартизованих інтерфейсів прикладного програмування. З метою уніфікації обладнання, що виробляється для потреб міністерства оборони США, воно повинно було відповідати вимогам SCA. У Європі концепція SCA також отримала розвиток для оборонних потреб під назвою ESSOR (від англ. European Secure Software Defined Radio – проект програми Європейського Союзу з створення програмно реконфігурованих радіосистем). У згаданій публікації Джозефа Мітоли практично реалізованими були передача, прийом та обробка сигналів у програмному вигляді на нульовій/проміжній частоті з наступним апаратним перенесенням на проміжну або радіочастоту (ПЧ або RF, від англ. Radio Frequency). На сьогоднішній день розвиток програмно - апаратних засобів SDR дозволяє говорити про можливість програмної обробки сигналів безпосередньо на несучій частоті радіосигналу за рахунок високошвидкісних АЦП, але це поки що такі рішення, де вартість та енергоспоживання грають другорядну роль [3].

Міжнародною ініціативою щодо регламентування та стандартизації в області SDR є SDR-форум WInnF (від англ. Wireless Innovation Forum), де публікуються нормативні матеріали рекомендаційного характеру [4, 5]. Відповідно до її рекомендацій, SDR це таке радіообладнання, в якому усі або більшість функцій фізичного рівня виконуються в програмному вигляді, а функції, що виконуються апаратно, повинні оперативно модифікуватися за вимогами робочого стандарту зв'язку. Програмна реалізація функцій обробки сигналів та програмне управління забезпечують кардинальне підвищення функціональних можливостей радіостанції шляхом підтримки роботи в різних діапазонах і стандартах зв'язку, що реалізується за допомогою так званого модельно-орієнтованого проектування (МОП). МОП є математичним та візуальним методом вирішення завдань, пов'язаних з проектуванням систем управління, обробки сигналів та зв'язку. Підхід МОП полягає в систематичному використанні моделей протягом усього процесу розробки для проектування, аналізу, симуляції, автоматичної генерації коду та верифікації, що дозволяє суттєво скоротити час на розробку [6-8]. Побудовані моделі можуть бути реалізовані та верифіковані у спеціалізованому програмному забезпеченні (СПО).

SDR привертає все більшу увагу радіотехнічного та телекомунікаційного секторів впродовж останніх кількох десятиліть, це дозволяє підтримувати швидкі цикли проектування, гнучкий режим реального часу, багаторазове обладнання для різної реалізації трансивера, простота виготовлення, і оновлення, і доступність для багатьох інженерів радіотехніків, зв'язку, технологів та дослідників [9-13]. Це бачення SDR, яке зробило революцію телекомунікаційного сектору впродовж 20 років підживлюється значними прогресом цифрових технологій обробки, аналогово-цифровими та цифро-аналоговими перетворювачами, програмними засобами. Технологія SDR нарешті стає основним, потужним, і доступною системою зв'язку та найважливіший інструмент для створення прототипів. Фактично, на момент написання статті, багато компаній, дослідницькі лабораторії та університетів використовують SDR для підтримки широкого спектру розробок у сфері радіотехніки та зв'язку. Щоб широко використовувати технології SDR для створення прототипів радіосистем системи і мережі зв'язку, необхідно було досягти наступних умов: створити доступні апаратні платформи SDR, які володіють достатньою обчислювальною потужністю, працюють у широкому діапазоні несучих частот, і є портативними. Також необхідною є наявність середовища розробки програмного забезпечення SDR, яке забезпечує комунікацію технології з вищим рівнем платформи SDR, багатий набір модулів, алгоритми, і особливості, і широкий рівень доступності програмного забезпечення. Необхідною є кроспідтримка між апаратним і потужним обчислювальним програмним забезпеченням, що дозволяє цій технології використовувати надійні програмні моделі та інструменти в експериментах та використанні обладнання SDR в реальному часі [14].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Революція в апаратному забезпеченні SDR була тісно пов'язаною з досягненнями в технологіях обчислювальної техніки, аналого-цифрових перетворювачах (АЦП), і цифро-аналогових перетворювачах (ЦАП). Хоча технологія включення апаратного забезпечення SDR існувала протягом двох десятиліть, вартість цієї технології лише нещодавно стала доступною для більшості інженерної спільноти. Платформи, такі як радіо WARP [1], різні системи NUTAQ (раніше Lyrtech) та Universal Software Radio Peripheral (USRP) від Ettus Research (зараз частина National Instruments) [2] знаходять застосування в режимі реального часу у таких областях: бездротові мережі; радіомоніторинг спектру; динамічний доступ до спектру; глобальна система мобільного зв'язку; GSM, CDMA системи зв'язку; WCDMA; LTE базові станції мобільного зв'язку; радары; радіоастрономія; випробувальне обладнання для радіочастот; магнітно-резонансна томографія (МРТ); радіонавігація та GPS; супутниковий зв'язок; радіочастотна ідентифікація (RFID) і т.п.

Щоб отримати певне уявлення про можливості сучасних платформ SDR, давайте вивчимо асортимент систем та їх технічні характеристики. Платформа Ettus USRP N210 (рис. 1а) є широко використовуваною модульною платформою SDR, що складається з радіочастотного інтерфейсу (RFFE), програмованого вентиляний масив (FPGA) і процесора загального призначення (GPP). Ця платформа SDR заснована на початковій структурі, що була розроблена Меттом Еттусом. У 2003 році він почав роботу над USRP, щоб допомогти знизити бар'єр входу до SDR. Завданням модулю RFFE є об'єднання цифрових сигналів синхронізованих вибірок та антени через пряму архітектуру перетворення. Це є поєднанням малощумлячих підсилювачів (МШУ), перемикачів, змінних атенуаторів для регулювання підсилення, гетеродинів та фільтрів нижніх частот у поєднанні з АЦП і ЦАП, інтерфейсом між аналоговими РЧ доменом і цифровим доменом основної смуги пропускання.

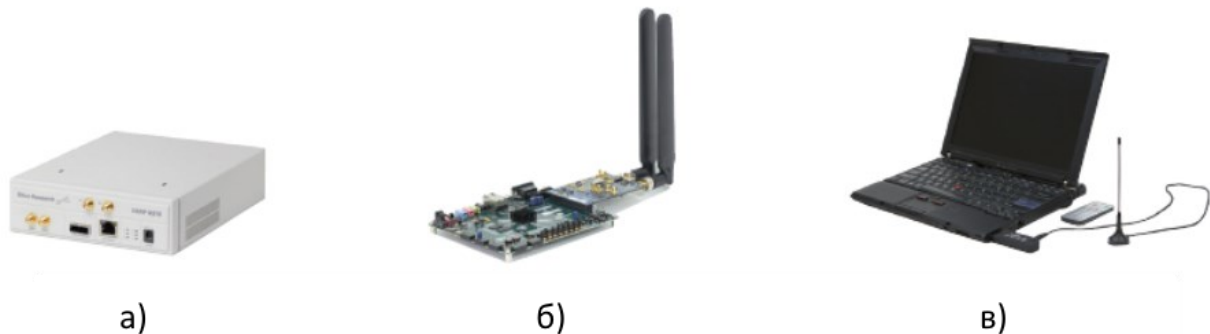


Рис. 1. Три приклади широко використовуваних SDR платформ: а – Ettus Research USRP N210 Platform ; б – ZedBoard з Xilinx Zynq-7000 FPGA з аналоговою частиною FMC ; в – NooElec NESDR Mini SDR USB

Блок FPGA виконує всі високошвидкісні операції цифрової обробки сигналів (DSP) на відліки, що надходять, а також забезпечують точність функції синхронізації, які забезпечують наступні можливості: дуплекс із часовим розподілом (TDD), множинний доступ з поділом часу (TDMA), і операції з кількома входами і багатьма виходами (MIMO) на кількох пристроях. Нарешті, FPGA містить логіку взаємодії з головним процесором. Абстрактний інтерфейс і контроль пристроїв USRP дозволив забезпечити користувача невеликим набором примітивів, за допомогою яких легко будувати системи зв'язку реального часу. USRP драйвер апаратного забезпечення (UHD) був розроблений з метою забезпечити єдиний інтерфейс прикладної програми (API).

Наступним прикладом є комбінована SDR платформа (рис. 1б) Xilinx Zynq на базі ZedBoard 7000 FPGA з AD-FMCOMMS5-EBZ. Вона є спільною розробкою між Analog Devices і Xilinx для забезпечення високої продуктивності систем. Рішення виконано на основі системи на чіпі (SoC). Xilinx Zynq-7000 FPGA має потужну, універсальну обчислювальну продуктивність за рахунок двох вбудованих процесорів ARM і FPGA. Таким чином, Zynq-7000 може підтримувати широкий спектр цифрових функцій на єдиній платформі. AD-FMCOMMS5-EBZ від Analog Devices це п'яте покоління сімейства високошвидкісних аналогових RFFE з інтенсивними обчисленнями Радіочастина виконана на основі AD9361 RF Agile Transceiver, який здатний підтримувати миттєву пропускну здатність до 56 МГц кроком 70 МГц до верхньої границі в 6 ГГц. На відміну від платформи USRP N210 SDR платформа Xilinx Zynq-7000 FPGA/AD-FMCOMMS5-EBZ – це самостійне рішення, що не вимагає окремого ПК. Тут на самому процесорі Zynq-7000 може підтримуватися Linux операційна система. Для підтримки автономних програм Ettus Research випустило USRP E300, який використовує більша частина тих же компонентів, що і Xilinx Zynq-7000 FPGA/AD-FMCOMMS5-EBZ SDR і має подібні характеристики і експлуатаційні характеристики. З точки зору ефективності, USRP N210, Xilinx Zynq-7000 FPGA/AD-FMCOMMS5-EBZ та USRP E300 SDR є надзвичайно високотехнологічними системами, на яких можна реалізувати широкий вибір рішень для різних додатків. З іншого боку, ці рішення варіюється від сотень до десятків тисяч доларів, що може бути непомірно дорого

для відносно простих застосувань, таких як прийом сигналу супутникового зв'язку, бездротовий зондування спектру або застосування, що вимагає численні платформи SDR. Отже, Ринок SDR також став свідком появи численні недорогих та простих платформ SDR наприклад: NooElec NESDR Mini SDR USB-накопичувач (рис. 1в). Ці прості приймачі SDR підключаються через порт USB комп'ютера і виконують широкий спектр операцій на основі доступних пакетів програмного забезпечення, встановлених на комп'ютері, див. таблицю 1.

Таблиця 1.

Параметри широко розповсюджених плат SDR

Параметри	Ettus B210	NI USRP-2932	RTL-SDR
Інтерфейс з ПК	USB 3.0	GBE	USB 3.0
Фізичні канали	2 TX, 2 RX	1 TX, 1 RX	1 RX
Частотний діапазон, МГц	70-6000	400-4400	25-1750
Ширина смуги каналу, МГц	56	20	2.8
АЦП, біт	12	16	8
Орієнтовна вартість, \$	1200	4600	20

Як було показано USRP E300 SDR – це автономна система, яка може підтримувати складні цифрові протоколи та функціональність цифрових сигнальних процесорів (DSP). А радіоканал на основі AD9361 дозволяє USRP E300 підтримувати системи бездротового зв'язку у більшій частині частотного спектру. До недавнього часу ефективне використання обчислювальних апаратних ресурсів SDR великою кількістю користувачів було ключовою технічною проблемою, яка перешкождала широкомасштабному використанню SDR у радіотехнічних системах і безпроводових системах зв'язку. Нова система програмування -RF Network-On-Chip (RFNoC) [6] має за мету виправити цю ситуацію.

Радіочастотна мережа на чіпі RFNoC – це нова система програмування для FPGA розроблені в Ettus Research з мета полегшити розробку великих проектів у SDR з FPGA. Ця архітектура дозволяє користувачам легко інтегрувати власні модулі, такі як модулятори, демодулятори, процесори та стеки протоколів, без потреби ставати експертами з проектування FPGA. Основна концепція RFNoC полягає в тому, що не вся мікросхема FPGA підлягає модифікації, користувачі замість цього працюють з мережею функціональних одиниць, які називаються обчислювальними механізмами (CE). Ця мережа різко зменшує складність великих конструкцій і дозволяє динамічну гнучкість під час виконання багатьох програм, яких вимагають когнітивні радіоприймачі. Кожен обчислювальний механізм має однаковий інтерфейс до мережі, тому вони легко взаємозамінні.

Елементи обчислювальної мережі можуть масштабуватися на кількох FPGA, у тому числі різних типів, що дозволяє реалізовувати портативність пристрої USRP. Це також робить динамічним реконфігурування FPGA набагато легшим завдання і значно полегшує виконання часових вимог в FPGA. Мережевим чином підключаються обчислювальні механізми, радіоприймачі та зовнішні мережеві інтерфейси. На рис. 2 показано внутрішні елементи FPGA пристрою X300 із зовнішнім 10G Інтерфейси Ethernet і PCIe.

Пристрій E300 виглядав би так само, але замість Ethernet і PCIe, він має інтерфейси до свого вбудованого ARM ЦП. Мережа існує всередині FPGA, але вона також прозора маршрутизується через декілька FPGA пристрої, які можна підключати безпосередньо або через комутатори Ethernet тощо. Це дозволяє користувачеві легко створювати великі системи, що складаються з багато FPGA і багатьох синхронізованих MIMO-каналів.

Архітектура радіосистем SDR

Загальноприйнято визначати архітектуру радіостанції у термінах моделі відкритих систем зв'язку OSI-7. Будь-яка радіостанція, у тому числі радіостанція SDR, включає апаратну та програмну частини, функції яких спільно визначаються на фізичному рівні та підрівні MAC каналного рівня в моделі OSI. Наприклад, перетворення спектру прийнятого/переданого сигналу, модуляція/демодуляція, фільтрація повинні максимально виконуватися в цифровій області програмно або апаратно при можливості реконфігурації апаратних засобів незалежно від робочого стандарту радіозв'язку [6]. На рис. 3 показано загальну архітектуру радіостанції SDR. Ця функціональна схема визначає побудову приймача та передавача. Кожному функціональному блоку відповідає апаратна чи програмна реалізація. Антена може бути будь-якого типу, від найпростішої дипольної конструкції до фазованої решітки, включаючи інші елементи антенно-фідерного тракту; ця частина радіостанції реалізується тільки в апаратному вигляді. Елемент перетворення з РЧ на ПЛІ відбиває мінімально необхідну апаратну обробку високочастотного (ВЧ) модульованого сигналу у приймачі та передавачі.

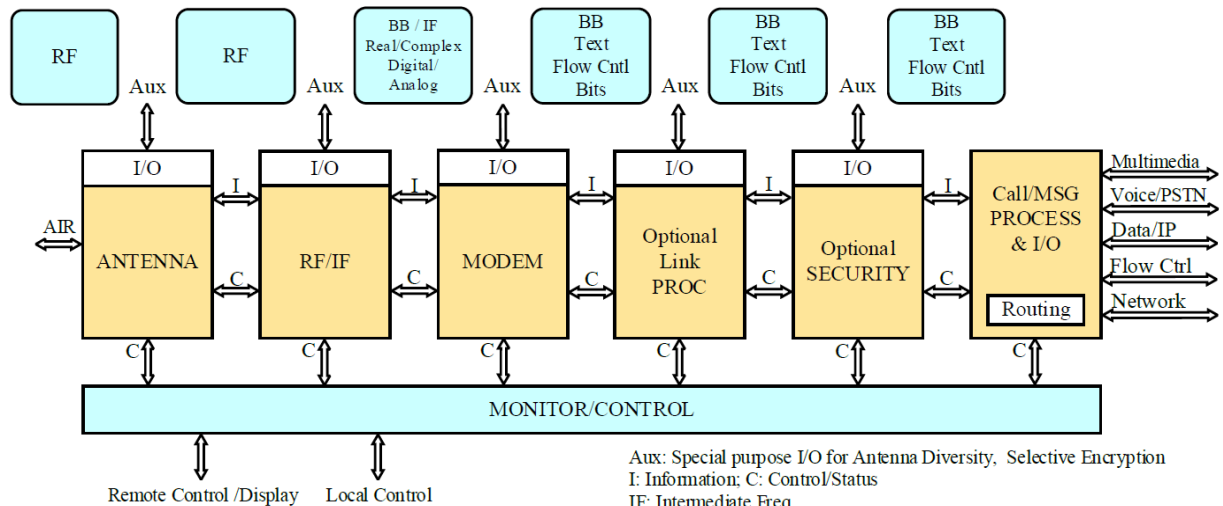


Рис.2. Архітектура радіосистеми SDR [8]

Певне апаратне перетворення прийнятого/переданого сигналу необхідно в будь-якій функціональній схемі радіостанції, бо реально неможливо підключити ЦАП/АЦП безпосередньо до антени для перетворення високочастотного сигналу. Практично елемент RF/IF може включати смгові фільтри (СФ) для модуляційного сигналу [15, 16], змішувач, підсилювач потужності передавача або малощумний підсилювач (МШУ) приймача, опорний ВЧ-генератор (ОГ), модулятор/демодулятор і т.д. АЦП/ЦАП та програмні операції з виконання функцій фізичного рівня: цифровий фільтрації, модуляції/демодуляції, радіочастотної та тактової синхронізації, збирання/розбирання пакетів і т.п. Процесор (Optional Link PROC) виконує функції каналного підрівня MAC з управління та стабілізації параметрів апаратури радіоканалу (RF/IF) та елементів антенно-фідерного тракту. Апаратура процесорної частини може включати спеціалізовані програмовані логічні інтегральні схеми, цифрові сигнальні процесори (DSP, від англ. Digital Signal Processors), процесори загального призначення (GPP, від англ. General Purpose Processor). Основним параметром, що визначає архітектуру приймача-передавача радіостанції SDR, є розташування АЦП/ЦАП щодо приймаючої/передаючої антени. Подання сигналу у цифровому вигляді та його наступна цифрова обробка забезпечують максимальну якість виконуваних функцій і максимальну гнучкість відповідно до основної вимоги багато станційного режиму роботи радіостанції SDR.

З цього погляду необхідно розташовувати перетворювачі АЦП/ЦАП максимально близькі до антени. З іншого боку, цифрова обробка суміші безлічі прийнятих/формованих ВЧ-сигналів без попередньої фільтрації та/або перетворення частоти може пред'являти вищі вимоги щодо швидкості роботи, динамічного діапазону та енергоспоживання цифрових пристроїв. Перехід від безперервного представлення сигналу до дискретного визначається компромісом між широкими функціональними можливостями радіостанції, з однієї сторони, та розумними експлуатаційними параметрами за умови виконання вимог стандартів електромагнітної сумісності – з іншого. Приймач «ідеальної» радіостанції SDR повинна мати мінімальну програмно-апаратну частину, яка не залежить від частоти, виду модуляції та ширини каналу, та задовольняти вимоги стандартів EMC. Спрощена функціональна схема такої радіостанції показано на рис. 3, де: АРП - автоматичне регулювання посилення; АРЧ – автоматичне регулювання частоти; АРПт – автоматичне регулювання потужності.

Апаратна частина приймача включає вхідний СФ, МШУ з функцією автоматичного регулювання посилення та АЦП. Останній передусе антиалайзинговим (від англ., anti-aliasing) фільтром нижніх частот (ФНЧ), який виконує технічну функцію сполучення смуги частот аналогового сигналу з частотою обробки АЦП. Прийнятий сигнал у цифровому вигляді потрапляє в процесор, де і проводиться його подальша обробка: основна селекція відносно сигналів на сусідніх каналах, оптимальна фільтрація, демодуляція, синхронізація та детектування. Апаратна частина передавача включає ЦАП, фільтр, що перебудовується. На виході ЦАП розташовано відновлюючий фільтр (від англ. Reconstruction Filter, Anti-Imaging Filter), який виконує придушення у спектрі аналогового ВЧ-сигналу паразитних частот ЦАП. Аналіз архітектури радіостанції SDR та приймача-передавача «ідеальної» радіостанції SDR ілюструють тенденцію зменшення апаратної обробки з одночасним збільшенням частки програмної обробки радіосигналів, яку можна реалізувати засобами мікропроцесорної обробки та, таким чином, пояснюють виникнення нової парадигми, пов'язаної з SDR. Апаратна частина, що відповідає за обробку радіосигналів на РЧ, включає СФ, змішувачі, МШУ приймача, ОГ та передуючі програмно-керовані АРУ, АРЧ та АРМ. Програмно-апаратна частина, що відповідає за обробку низькочастотного інформаційного сигналу, включає перетворювачі АЦП/ЦАП та процесор, що реалізує програмні операції виконання функцій фізичного та каналного рівнів, таких як

цифрова фільтрація, модуляція/демодуляція, частотна та тактова (бітова) синхронізація, збирання/розбирання пакетів, керування-параметрами обробки радіосигналу на ВЧ.

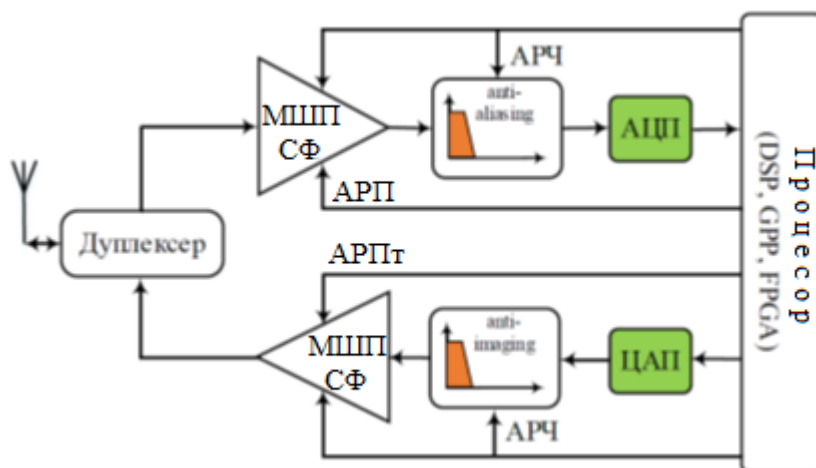


Рис.3. Приймач-передавач ідеальної радіосистеми SDR: МШПТ – малошумний підсилювач; СФ – смуговий фільтр; АЦП/ЦАП – аналогоцифровий та цифроаналоговий перетворювач; АРПТ– коло автоматичного регулювання потужності; АРП – коло автоматичного регулювання підсилення; АРЧ – коло автоматичного регулювання частоти

Програмна реалізація алгоритмів передачі, прийому та обробки сигналів радіозв'язку в SDR найбільш гнучко і оперативно реалізується універсальними GPP. Показовим прикладом подібної успішної реалізації є підвищення продуктивності базових станцій (БС) GSM при заміні на більш сучасні в кінці 90-х; програмне забезпечення БС при цьому не було потрібно міняти зовсім.

Рішення з відкритим кодом для прототипування SDR

Як було показано в попередньому розділі статті, відповідні цифрові обчислювальне устаткування в поєднанні з універсальним RFFE є одними з необхідних складових частин для забезпечення широкого впровадження технології SDR. Тим не менш, впровадження систем SDR також вимагає достатньої підтримки програмного забезпечення та інструментів, які доступні користувачеві для того, щоб забезпечують швидкий розвиток і еволюцію рішень та конструкцій. Різноманітність SDR з відкритим програмним кодом, включають OSSIE [3], CubicSDR, ALOE [4] та широко використовуваний радіо GNU проект [5]. Для кращого розуміння цих програмних фреймворків з відкритим кодом для побудови та експлуатації систем зв'язку, розглянемо еволюцію програмного забезпечення з відкритим кодом для SDR, шляхом вивчення історії та можливостей GNU Radio. У 2001 році Ерік Блоссом заснував GNU Radio проект з метою забезпечення стандартів для створення програм SDR за допомогою безкоштовного програмного забезпечення. Він привернув велику спільноту користувачів і розробників з усього світу, проект став найкращим середовищем для дизайну багато досліджень у сфері SDR та когнітивних радіо. GNU Radio працює за допомогою підключення архітектури, де блоки обробки сигналів та алгоритми поміщені разом у таку послідовність, що вибірки проходять через графік, з кожним блок, що працює незалежно від цих вибірок. Крім того, GNU Radio поставляється з різноманітною графікою, інструментами для створення графіків та інструменти моделювання: наприклад - різні моделі каналів, щоб забезпечити прості способи моделювання та спостереження поведінки нової розробки. Коли справа доходить до створення системи зв'язку та іншої обробки сигналів систем, GNU Radio має кілька режимів, які допомагають забезпечити переміщення даних через систему. Інтуїтивно зрозумілий спосіб обробки сигналу полягає в переміщенні даних у вигляді потоку вибірок. GNU Radio підтримує поточкову модель з моменту її заснування, і це вирішує ряд питань комунікацій. GNU Radio також реалізує система передачі повідомлень, де повідомлення одиниць протокольних даних (PDU), які можуть представляти пакет, кадр, фрагмент як єдине ціле. Граничні умови з ними набагато легше обробляти таким чином і таким чином дозволяє зосередитися на ефективній обробці даних у PDU. GNU Radio має третю модель для переміщення навколишніх даних, які називають системою тегового потоку, який спеціально розроблений для проходження метаданих. Теги рухаються синхронно з даними і обробляються належним чином за допомогою зміни частоти вибірки. Кожна з трьох моделей переміщення даних мають своє застосування в GNU Radio і програмний комплекс, до певної міри, використовує кожну концепцію. Наукова радіотехнічна спільнота має ряд проблем, якими є одночасно адресація, перевірка існуючих стандартів, покращень і питань ефективності, і ризиків безпеки. Крім того, дослідницька спільнота дивиться на нові моделі комунікацій, які можуть або не можуть бути прив'язані до існуючих систем або методів. Нарешті, дослідження постійно рухаються у напрямку вирішення проблеми бездротової передачі даних, таких як стандарти 5G. GNU Radio як проект, не є

безпосередньо зацікавлені в конкретних стандартах. Натомість GNU Radio розробляє архітектурний каркас і API, що дозволяє розробляти та вивчати проблеми за допомогою зовнішнього дерева модульної концепції проекту. З іншого боку, у проекті є кілька програмних напрямів, зосереджених на конкретних стандартах.

Результати вибору платформи SDR для розробки пеленгатора БПЛА

Отже для розробки складної радіотехнічної розробки пеленгатора нами обрано систему USRP N210 Networked Series виробництва Ettus Research: USRP N210 забезпечує обробку з високою пропускну здатністю та високим динамічним діапазоном. USRP N210 Networked Series призначений для високонавантажених радіотехнічних рішень, які потребують високих технічних характеристик, див. табл. 2.

Таблиця 2.

Параметри системи SDR Ettus Research USRP N210 Platform [6]

№	Параметри
1.	Use with GNU Radio, LabVIEW™ and Simulink™
2.	Modular Architecture: DC-6 GHz
3.	Dual 100 MS/s, 14-bit ADC
4.	Dual 400 MS/s, 16-bit DAC
5.	DDC/DUC with 25 mHz Resolution
6.	Up to 50 MS/s Gigabit Ethernet Streaming
7.	Fully-Coherent MIMO Capability • Gigabit Ethernet Interface to Host
8.	2 Gbps Expansion Interface
9.	Spartan 3A-DSP 1800 FPGA (N200)
10.	Spartan 3A-DSP 3400 FPGA (N210)
11.	1 MB High-Speed SRAM
12.	Auxiliary Analog and Digital I/ O
13.	2.5 ppm TCXO Frequency Reference
14.	0.01 ppm w/ GPSDO Option

Архітектура USRP N210 включає FPGA Xilinx® Spartan® 3A-DSP 3400, подвійний АЦП 100 Мв/с, подвійний ЦАП 400 Мв/с і підключення Gigabit Ethernet для потокової передачі даних на/з комп'ютера. Модульна конструкція дозволяє USRP N210 працювати від до 6 ГГц, а порт розширення дозволяє синхронізувати декілька пристроїв серії USRP N210 і використовувати їх у конфігурації МІМО. Додатковий модуль GPSDO також може бути використаний для підналаштування еталонного годинника USRP N210 з точністю до 0,01 ppm від світового стандарту GPS. USRP N210 може передавати до 50 Мв/с до/ з хост-програм, рис. 4. Користувачі можуть реалізувати власні функції в структурі FPGA або у вбудованому 32-розрядному програмному ядрі RISC. USRP N210 забезпечує більшу ємність FPGA, ніж USRP N200, для додатків, які потребують додаткової логіки, пам'яті та ресурсів для цифрової обробки сигналів. FPGA також має потенціал для обробки до 100 Мс/с у напрямках передачі та прийому. Прошивку FPGA можна міняти через інтерфейс Gigabit Ethernet, що значно пришвидшує відладку, рис. 5.



Рис.4. Система SDR Ettus Research USRP N210 Platform

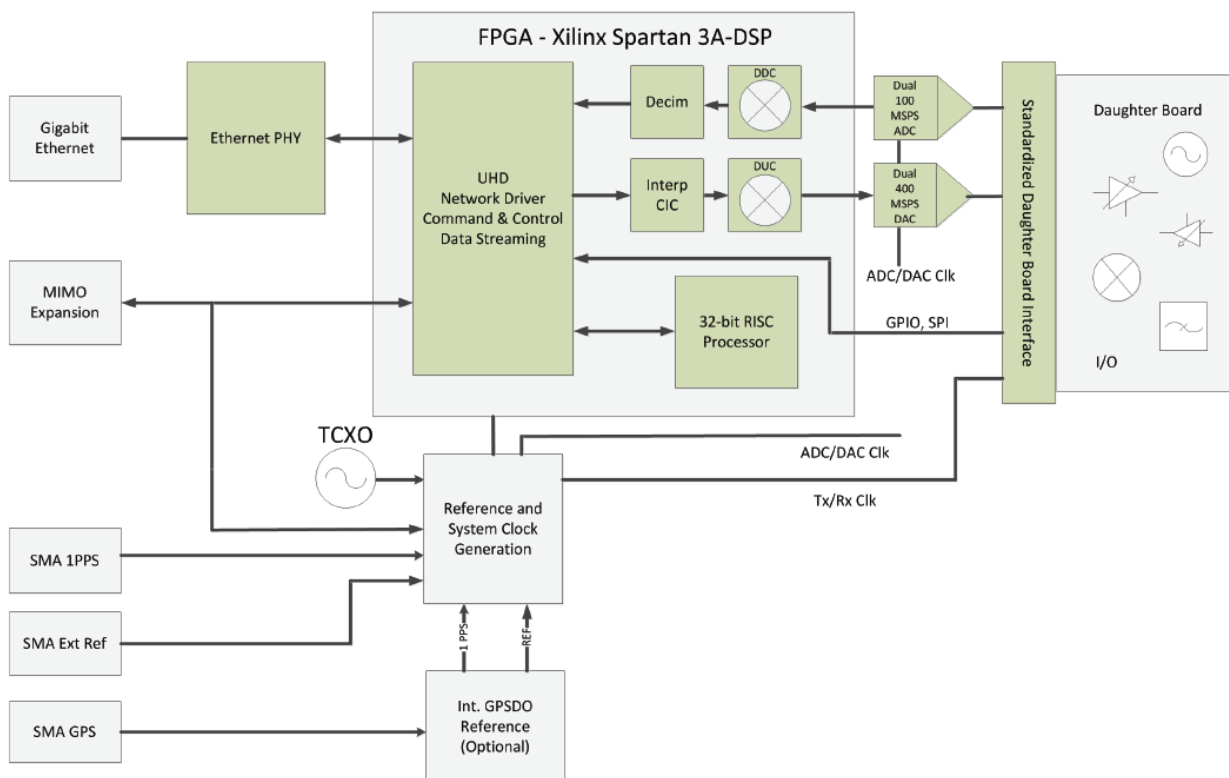


Рис.5. Функціональна схема USRP N210 [6]

Ettus Research™ USRP™ N200 і N210 є найефективнішим класом апаратного забезпечення з сімейства продуктів USRP™ (Universal Software Radio Peripheral), що дозволяє інженерам швидко проектувати та впроваджувати потужні, гнучкі програмні радіосистеми. Обладнання N200 і N210 ідеально підходить для рішень, які потребують високої продуктивності та великої пропускної здатності. Такі програми включають створення прототипів фізичного рівня, динамічний доступ до спектру та когнітивне радіо, моніторинг спектру, запис і відтворення сигналів. Продукти мережевої серії пропонують можливість MIMO з високою пропускною здатністю та динамічним діапазоном. Інтерфейс Gigabit Ethernet служить з'єднанням між N200/N210 і головним комп'ютером. Це дозволяє користувачеві одночасно реалізувати 50 Mc/s пропускної здатності в режимі реального часу в напрямках прийому і передачі (повний дуплекс). З'єднання мережевої серії MIMO розташоване на передній панелі кожного пристрою. Для реалізації повної конфігурації MIMO 2x2 за допомогою додаткового кабелю MIMO можна підключити два блоки мережевої серії. Зовнішні PPS та опорні входи також можна використовувати для створення більших багатоканальних систем. N200 і N210 в основному однакові, за винятком того, що N210 має більший FPGA для тих, хто має намір інтегрувати власні функціональні можливості FPGA. USRP Hardware Driver™ є офіційним драйвером для всіх продуктів Ettus Research. Драйвер апаратного забезпечення USRP підтримує Linux, Mac OSX, Windows.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Досягнення технології SDR зробили революцію, як у радіотехнічному так і телекомунікаційному сектор дослідження, розробці та освітній діяльності. Недороге, доступне та надійне SDR апаратне забезпечення в поєднанні з методами розробки SDR у системах з відкритим програмним кодом середовища та потужне комп'ютерне програмне забезпечення, здатне взаємодіяти з платформами SDR, істотно змінили підходи до створення прототипів радіотехнічних системи та мереж.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mitola J. The software radio architecture / J. Mitola // IEEE Communications Magazine. - 1995. - Vol. 33., Iss. 5. - P. 26–38. DOI:10.1109/35.393001.
2. Belisle C. The software communications architecture: two decades of software radio technology innovation / C. Belisle, V. Kovarik, L. Pucker, M. Turner // IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 31–37. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263343.
3. Moy C. Software radio: a catalyst for wireless innovation / C. Moy, J. Palicot // IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 24–30. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263342.
4. Wireless Innovation Forum. [Electronic resource] URL: <https://www.wirelessinnovation.org> (date of appeal: 30.03.2022).
5. GNU Radio. The Free & Open Soft Radio Ecosystem. [Electronic resource] URL: <https://www.gnuradio.org> (date of appeal: 30.03.2022).

6. Ettus Research. [Electronic resource] URL: <https://www.ettus.com> (date of appeal: 30.03.2022).
7. NooElec. [Electronic resource] URL: <https://www.nooelec.com/store/sdr.html> (date of appeal: 30.03.2022).
8. Bilén S.G. Software-Defined Radio: A New Paradigm for Integrated Curriculum Delivery / S.G. Bilén, A.M. Wyglinski, C. Anderson, T. Cooklev, C.B. Dietrich, B. Farhang-Boroujeny, *et al.* // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - P. 184–193. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815911.
9. El-Hajjar M. Demonstrating the Practical Challenges of Wireless Communications Using USRP /M. El-Hajjar, Q.A. Nguyen, R.G. Maunder, S.X. Ng // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - P. 184–193. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815911.
10. Petrova M. System-oriented communications engineering curriculum: teaching design concepts with SDR platforms /M. Petrova, A. Achtzehn, P. Mähönen // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - pp. 202–209. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815913.
11. Stewart R.W. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR / R.W. Stewart, L. Crockett, D. Atkinson, K. Barlee, D. Crawford, I. Chalmers, *et al.* //IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 64–71. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263347.
12. Wyglinski A.M. Revolutionizing software defined radio: case studies in hardware, software, and education / A.M. Wyglinski, D.P. Orofino, M.N. Ettus, T.W. Rondeau // IEEE Communications Magazine. - 2016. - Vol. 54., Iss. 1. - P. 68–75. DOI:10.1109/MCOM.2016.7378428.
13. Stewart R.W. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. / R.W. Stewart, K.W. Barlee, D.S.W. Atkinson, L.H. Crockett. - Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2015.
14. Фокин Г.А. Практическая реализация приемопередатчика OFM-2 на SDR платформе Ettus B210 в среде GNU Radio / Г.А. Фокин, В.А. Лаврухин, Д.А. Волгушев, А.В. Киреев // Информационные технологии моделирования и управления.- 2016. - Т. 99. - № 3. - С. 178–187.
15. Boiko J. M. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. M. Boiko, I. S. Pyatin, O. I. Eromenko, I. R. Parkhomey // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2019. – № 1' (34). – С. 5-15.
16. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод: монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толупа. - Київ: Логос, 2018. - 227 с.

REFERENCES

1. Mitola J. The software radio architecture /J. Mitola // IEEE Communications Magazine. - 1995. - Vol. 33., Iss. 5. - P. 26–38. DOI:10.1109/35.393001.
2. Belisle C. The software communications architecture: two decades of software radio technology innovation / C. Belisle, V. Kovarik, L. Pucker, M. Turner // IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 31–37. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263343.
3. Moy C. Software radio: a catalyst for wireless innovation / C. Moy, J. Palicot // IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 24–30. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263342.
4. Wireless Innovation Forum. [Electronic resource] URL: <https://www.wirelessinnovation.org> (date of appeal: 30.03.2022).
5. GNU Radio. The Free & Open Soft Radio Ecosystem. [Electronic resource] URL: <https://www.gnuradio.org> (date of appeal: 30.03.2022).
6. Ettus Research. [Electronic resource] URL: <https://www.ettus.com> (date of appeal: 30.03.2022).
7. NooElec. [Electronic resource] URL: <https://www.nooelec.com/store/sdr.html> (date of appeal: 30.03.2022).
8. Bilén S.G. Software-Defined Radio: A New Paradigm for Integrated Curriculum Delivery / S.G. Bilén, A.M. Wyglinski, C. Anderson, T. Cooklev, C.B. Dietrich, B. Farhang-Boroujeny, *et al.* // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - P. 184–193. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815911.
9. El-Hajjar M. Demonstrating the Practical Challenges of Wireless Communications Using USRP /M. El-Hajjar, Q.A. Nguyen, R.G. Maunder, S.X. Ng // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - P. 184–193. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815911.
10. Petrova M. System-oriented communications engineering curriculum: teaching design concepts with SDR platforms /M. Petrova, A. Achtzehn, P. Mähönen // IEEE Communications Magazine. - 2014. - Vol. 52., Iss. 5. - pp. 202–209. DOI:10.1109/MCOM.2014.6815913.
11. Stewart R.W. A low-cost desktop software defined radio design environment using MATLAB, simulink, and the RTL-SDR / R.W. Stewart, L. Crockett, D. Atkinson, K. Barlee, D. Crawford, I. Chalmers, *et al.* //IEEE Communications Magazine. - 2015. - Vol. 53., Iss. 9. - P. 64–71. DOI:10.1109/MCOM.2015.7263347.
12. Wyglinski A.M. Revolutionizing software defined radio: case studies in hardware, software, and education / A.M. Wyglinski, D.P. Orofino, M.N. Ettus, T.W. Rondeau // IEEE Communications Magazine. - 2016. - Vol. 54., Iss. 1. - P. 68–75. DOI:10.1109/MCOM.2016.7378428.
13. Stewart R.W. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. / R.W. Stewart, K.W. Barlee, D.S.W. Atkinson, L.H. Crockett. - Glasgow: Strathclyde Academic Media, 2015.
14. Фокин Г.А. Практическая реализация приемопередатчика OFM-2 на SDR платформе Ettus B210 в среде GNU Radio / Г.А. Фокин, В.А. Лаврухин, Д.А. Волгушев, А.В. Киреев // Информационные технологии моделирования и управления.- 2016. - Т. 99. - № 3. - С. 178–187.
15. Boiko J. M. Investigation of signals distortion during interpolation in SDR transmitters with QPSK modulation / J. M. Boiko, I. S. Pyatin, O. I. Eromenko, I. R. Parkhomey // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2019. – № 1' (34) – С. 5-15.
16. Boiko J.M. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості у ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завод: монографія / J. M. Boiko, V. A. Дружинін, S. V. Толупа. - Київ: Логос, 2018. - 227 с.