

УДК 621.396.6:004.4

СОВРЕМЕННЫЕ SDR (SOFTWARE-DEFINED RADIO) ТЕХНОЛОГИИ

А.А. ДМИТРЕНКО

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»
(г. Минск, Беларусь)*

E-mail: ales.dmitrenko@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены принципы построения и современное состояние технологий программно-определяемого радио (Software-Defined Radio (SDR)). Описана архитектура SDR-систем, ключевые компоненты аппаратной и программной части. Приведён обзор наиболее распространённых программных и аппаратных платформ. Перечислены основные тенденции развития и направления практической реализации SDR-технологий.

Abstract. The principles of construction and the current state of Software-Defined radio (SDR) technologies are considered. The architecture of SDR systems, key hardware and software components are described. An overview of the most common software and hardware platforms is provided. The main trends in the development and practical implementation of SDR technologies are listed.

Введение

Программно-определяемое радио (Software-Defined Radio, SDR) представляет собой современный подход к разработке и реализации радиотехнических систем, при котором функциональность ряда традиционных аппаратных элементов реализуется на программном уровне.

Базовые принципиальные схемы радиотехнических систем оставались неизменными длительное время: аналоговые фильтры, смесители, усилители промежуточной частоты, детекторы и др. элементы реализовывались на уровне «железа» в виде отдельных физических устройств. Модернизация таких систем требовала физической замены компонентов, что делало их негибкими и дорогостоящими в сопровождении.

Появление быстрых аналого-цифровых преобразователей (АЦП), мощных цифровых сигнальных процессоров (Digital Signal Processing, DSP) и программируемых логических матриц (Field Programmable Gate Array, FPGA) открыло принципиально новый путь. Идею SDR в систематизированном виде сформулировал американский инженер Джозеф Митола (Joseph Mitola) в 1991 году: перенести максимальное количество функций радиотехнических систем (фильтрация, модуляция/демодуляция, кодирование/декодирование и др.) из аналоговой схемотехники в программное обеспечение [1].

Ключевая идея SDR заключается в том, что большая часть обработки сигналов выполняется в цифровой области. Аналоговая часть сводится к минимуму: антенна, усилители, смесители и АЦП/ЦАП преобразователи. Все остальные функции реализуются программно на универсальных процессорах, FPGA или специализированных вычислительных платформах.

В настоящее время технологии SDR являются основным направлением развития современной инфраструктуры беспроводной передачи данных. Технологии SDR лежат в основе современных беспроводных сетей, таких как 5G/6G, IoT, военных и гражданских систем связи (в том числе спутниковых) и даже бытовых устройств. Понимание SDR-принципов становится обязательной компетенцией для любого инженера в области беспроводных технологий.

Архитектура SDR систем

Ключевая идея SDR состоит в том, чтобы оцифровать радиосигнал как можно раньше и выполнить всю его обработку в цифровом виде с помощью программного обеспечения или реконфигурируемой цифровой логики.

Обобщённая архитектура SDR-системы включает следующие ключевые компоненты (рис. 1) [2, 3]:

1. Аналоговая часть (Analog Front-End, AFE) в составе:

- антенные системы для приёма/передачи радиосигналов;
- маломощный усилитель (МШУ) (low noise amplifier, LNA) (в канале приёма);
- усилитель мощности (Power amplifier, PA) (в канале передачи);
- смеситель для преобразования частот;
- фильтры для подавления помех и зеркальных каналов / восстановления сигналов.

2. АЦП/ЦАП:

- высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) (в канале приёма);
- высокоскоростные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) (в канале передачи).

Секция 1 «Радиотехника, антенны и устройства СВЧ»

3. Интерфейсы передачи данных (PCIe, USB 3.0, 10GbE и др.).

4. Вычислительное ядро:

- процессор общего назначения (CPU) для управления и контроля.
- FPGA для обработки высокочастотных сигналов в реальном времени.
- DSP для специализированных алгоритмов ЦОС.
- GPU для параллельных вычислений (в некоторых системах).

5. Программное обеспечение (выполняет вычислительные задачи по фильтрации, модуляции/демодуляции, кодированию/декодированию, шифрации/дешифрации и другие функции, ранее реализованные в виде дискретных аналоговых устройств):

- драйверы устройств;
- фреймворки обработки сигналов (GNU Radio, MATLAB, LabVIEW);
- прикладные программы.

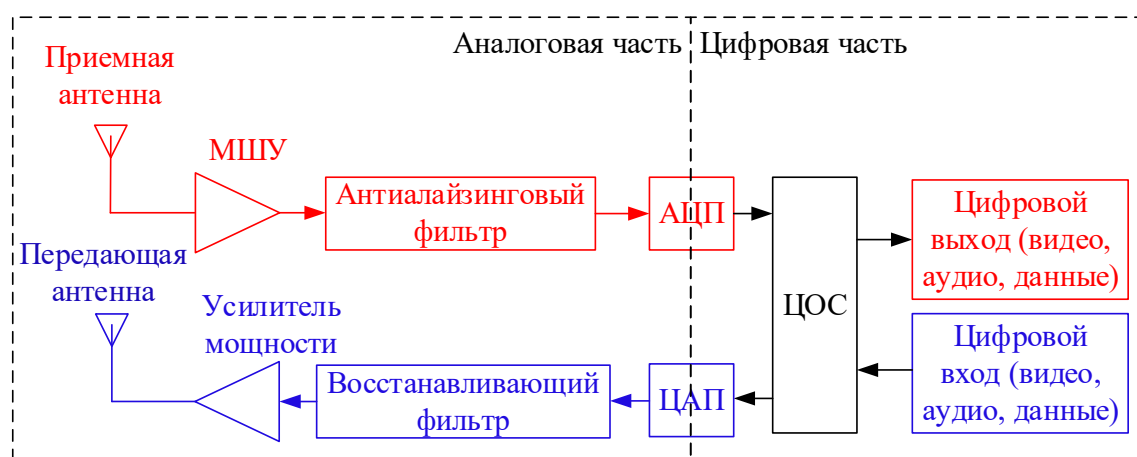


Рис. 1. Обобщённая архитектура SDR-системы

Ключевые параметры SDR-систем

Основными ключевыми параметрами при выборе или разработке SDR-платформ являются:

Частотный диапазон. Большинство бюджетных SDR-платформ работают в диапазоне от единиц МГц до нескольких ГГц. Например, RTL-SDR работает приблизительно от 500 кГц до 1,75 ГГц, тогда как профессиональные решения типа USRP X410 перекрывают диапазон до 7,2 ГГц.

Мгновенная полоса пропускания (Instantaneous Bandwidth). Определяет, какую ширину спектра сигналов система может одновременно оцифровать и обработать. У RTL-SDR это около 2,4 МГц, у USRP N310 — до 160 МГц на канал. Широкая полоса позволяет, например, одновременно наблюдать весь диапазон 2,4 ГГц Wi-Fi.

Динамический диапазон и разрядность АЦП. 8-битный АЦП обеспечивает теоретический динамический диапазон около 48 дБ, 12-битный — около 72 дБ, 16-битный — около 96 дБ. Для реализации профессиональных устройств разрядность имеет принципиальное значение: при малом динамическом диапазоне мощные «нецелевые» сигналы «забивают» слабые полезные сигналы.

Режимы работы платформы (полудуплексный/полнодуплексный режим). Возможность одновременно передавать и принимать радиосигналы на разных частотах — критически важна для систем связи. Бюджетные устройства, как правило, поддерживают возможность только приёма радиосигналов.

Современные наиболее распространенные аппаратные SDR платформы

Современный рынок SDR предлагает широкий спектр устройств, отвечающих разнообразным требованиям пользователей от начального любительского уровня до профессиональных разработчиков.

RTL-SDR (RTL2832U). Режим работы: только прием. Диапазон частот: 25 МГц — 1.7 ГГц. Ширина полосы пропускания: до 3,2 МГц. Разрядность АЦП: 8 бит. Самая массовая и доступная платформа [4]. Изначально микросхема RTL2832U была разработана для USB-тюнеров цифрового телевидения DVB-T. В 2012 году сообщество радиолюбителей обнаружило, что она может работать в режиме выдачи «сырых» IQ-данных, превращая дешёвый DVB-T-приемник (стоимостью 10–25 долларов) в полноценный SDR-приёмник. Сегодня на основе RTL-SDR строят приёмники ADS-B для отслеживания самолётов, метеорологические зонды, системы мониторинга радиочастотного спектра и даже пассивные радары.

HackRF One. Режим работы: полудуплексный режим приём/передача. Диапазон частот: 1 МГц — 6 ГГц. Ширина полосы пропускания: до 20 МГц. Разрядность АЦП/ЦАП: 8 бит. Разработан компанией Great Scott Gadgets как открытая (open-source) SDR платформа. Цена в районе 300–350 долларов делает его популярным выбором для тестирования систем безопасности, изучения протоколов и прототипирования. Благодаря открытой архитектуре, устройство широко используется для исследований и испытаний новых радиотехнологий/

LimeSDR. Режим работы: полнодуплексный режим приём/передача. Диапазон частот: 100 кГц — 3,8 ГГц. Ширина полосы пропускания: до 61,44 МГц. Разрядность АЦП/ЦАП: 12 бит. Разработка британской компании Lime Microsystems на базе собственной микросхемы LMS7002M. Платформа активно используется в проекте OpenBTS/OpenBTS-UMTS для развёртывания экспериментальных GSM/UMTS-сетей.

ADALM-PLUTO (PlutoSDR). Режим работы: полнодуплексный режим приём/передача. Диапазон частот: 325 МГц — 3,8 ГГц. Ширина полосы пропускания: до 20 МГц. Разрядность АЦП/ЦАП: 12 бит. Цена около 150 долларов. Образовательная платформа от компании Analog Devices. Активно используется в университетских курсах по цифровой обработке сигналов благодаря отличной документации и интеграции с MATLAB/Simulink.

USRP (Universal Software Radio Peripheral). Семейство устройств от компании Ettus Research (в настоящее время входит в National Instruments / Emerson) [5]. USRP — промышленный стандарт де-факто для исследований и прототипирования. Модели охватывают широчайший диапазон: от бюджетной USRP B200mini (~700 долларов) до USRP X410, поддерживающей 4 канала по 400 МГц полосы каждый и используемой в разработке 5G-оборудования. USRP работает через протокол UHD (USRP Hardware Driver) и интегрируется с GNU Radio.

Современные наиболее распространенные программные SDR платформы

Для полноценного использования SDR-систем необходимым элементом является соответствующее программное обеспечение, которое позволяет разработчикам и исследователям создавать, тестировать и модифицировать различные алгоритмы обработки сигналов.

GNU Radio. Бесплатная программная среда с открытым исходным кодом, используемая для разработки приложений SDR с помощью графического редактора GNU Radio Companion (GRC) или кода на Python/C++ [6, 7]. GRC предоставляет графический интерфейс, позволяющий пользователю собирать блок-схемы устройств обработки сигналов без необходимости глубокого знания программирования. Библиотека платформы насчитывает сотни готовых блоков: фильтры, модуляторы/демодуляторы (AM, FM, QPSK, QAM, OFDM), блоки синхронизации, декодеры. GNU Radio работает на Linux, macOS и Windows и поддерживает практически все аппаратные платформы через унифицированный интерфейс gr-osmosdr. Данная программная платформа широко используется для обучения, экспериментов и создания прототипов систем связи.

SDR# (SDRSharp). Популярное приложение с графическим интерфейсом, ориентированное на конечного пользователя, которое используется для управления большинством недорогих SDR-устройствами, такими как RTL-SDR. Оно обеспечивает удобный интерфейс для анализа принимаемых сигналов в частотной области (отображение спектра/спектрограммы в реальном времени), поддерживает AM/FM/SSB/CW-демодуляцию, расширяется через плагины. Идеальный выбор для первого знакомства с SDR.

OpenWebRX. Веб-платформа для развёртывания SDR-приёмников с удалённым доступом через браузер. Позволяет нескольким пользователям одновременно слушать разные частоты в рамках одной оцифрованной полосы. На базе OpenWebRX работают тысячи публичных онлайн-приёмников по всему миру (проект WebSDR).

MATLAB / Simulink с SDR Toolbox. Профессиональный инструментарий для академических и корпоративных исследований. Поддерживает USRP, PlutoSDR и другие аппаратные платформы. Используется для проектирования, моделирования и прототипирования систем связи с использованием SDR. Позволяет строить и симулировать цепочки обработки сигналов в Simulink, а затем автоматически генерировать HDL-код для прошивки FPGA.

Тенденции развития SDR технологий

Когнитивное радио (Cognitive Radio, CR). Является одной из наиболее перспективных тенденций в области SDR [8, 9]. Это концепция, в которой радиотехническое устройство интеллектуально адаптирует свои параметры (несущая частота, мощность, законы модуляции, алгоритмы кодирования и др.) к условиям окружающей среды и доступному радиочастотному спектру [2]. Концепция когнитивного радио подразумевает использование алгоритмов обработки данных для анализа радиочастотного эфира в режиме реального времени. На основании этих данных происходит динамическое изменение параметров сигналов, что позволяет оптимизировать использование доступного спектра частот. Данная концепция имеет важное значение для создания защищённых и гибких коммуникационных систем (в первую очередь военных), а также для решения проблем дефицита частот в условиях городских агломераций и высоких требований к пропускной способности каналов связи в сетях 5G/6G. Когнитивное радио позволяет улучшить совместное использование радиоэфира в условиях динамически меняющейся радиосреды, снизить влияние помех и обеспечить качественную связь в сложных условиях, а также автоматически перенастраивать систему связи для поддержания оптимальной производительности. В рамках данной концепции сходятся технологии SDR и ИИ.

Нейросети применяются для классификации сигналов, предсказания занятости радиочастотного спектра, определения оптимального типа модуляции и т.д.

Развитие AI/ML в SDR. Технологии SDR позволили использовать элементы ИИ для решения практически всего перечня задач обработки сигналов и информации в современных телекоммуникационных системах. Нейронные сети обучаются автоматически распознавать типы модуляции (Spectrum Sensing), изменяющиеся в реальном времени. Вместо явного программирования демодулятора для каждого стандарта, система обучается на примерах и в дальнейшем выбирает наиболее подходящие алгоритмы обработки и демодуляции. Алгоритмы RL (Reinforcement Learning) выбирают оптимальные типы модуляции и мощность передачи в зависимости от состояния канала связи. LSTM сети позволяют предсказывать замирание канала связи и помогают адаптировать параметры передачи сигналов (Channel Prediction).

Интеграция с облачными технологиями. SDR технологии позволяют гибко распределять вычислительную нагрузку обработки сигналов между облачными центрами обработки данных (ЦОД) и периферийными оконечными устройствами (например, технология Cloud RAN (C-RAN), в рамках которой функционал периферийной базовой станции сотовой связи частично передается ЦОД). Преимуществами данной концепции являются централизованное управление, хорошая масштабируемость, возможность быстрого развёртывания новых стандартов.

Квантовые вычисления и SDR. Прогресс в области квантовых компьютеров в будущем может значительно повысить эффективность функционирования SDR радиотехнических систем. Например, алгоритм Гровера может экспоненциально ускорить поиск сигналов в большом пространстве параметров, квантовые алгоритмы оптимизации найдут лучшие коды коррекции ошибок и т.д.

Сферы применения SDR технологий

Образовательные и исследовательские проекты.

Мониторинг воздушного пространства (ADS-B). Автоматическое зависимое наблюдение (ADS-B) — это стандарт, по которому самолёты каждую секунду транслируют свои координаты, высоту, скорость и бортовой номер на частоте 1090 МГц. Любой RTL-SDR-приемник с программой dump1090 или FlightAware позволяет в реальном времени отслеживать воздушные суда в радиусе 200–300 км. Именно таким образом устроена организация получения основной части информации о полетах воздушных судов на сайтах FlightAware и Flightradar24.

Исследования в области беспроводной передачи данных. SDR открыл новую эпоху в развитии систем и сетей беспроводной связи [10]. С помощью HackRF или USRP исследователи могут записывать и анализировать сигналы брелоков автосигнализаций, систем TPMS (датчики давления в шинах), метеорологических зондов, пейджеров и любых других систем беспроводной передачи данных (WiFi, GSM и т.д.). Компания SDRplay, например, предлагает образовательную программу для школ, колледжей и университетов. Программно-определяемые радиостанции серии RSP (RSP1B, RSPduo, nRSP-ST) используются для обучения студентов принципам работы радио, цифровой обработки сигналов и создания собственных радиопроектов. Такие системы помогают формировать навыки будущих инженеров и исследователей в сфере радиотехники.

Любительская радиосвязь. SDR произвёл революцию в радиолюбительском сообществе. Программы WSJT-X и JTDX реализуют режимы FT8/FT4, позволяющие организовывать связь в мировом масштабе при мощности передатчика 5–10 Вт. Визуализация спектрограмм в программных платформах GNU Radio и SDR# помогают анализировать прохождение радиоволн, а Skywave Linux (специализированный дистрибутив Linux) поставляется с предустановленным полным набором SDR-инструментов для коротковолновой связи.

Системы и сети телекоммуникаций. С развитием технологий SDR многие ведущие компании начали выпускать коммерческие системы, отвечающие высоким требованиям в области безопасности, совместимости и надежности связи. Крупнейшие производители телекоммуникационного оборудования (Ericsson, Nokia, Samsung) используют USRP и специализированные SDR-платформы для разработки и тестирования стеков протоколов 4G LTE и 5G NR. Базовые станции мобильных сетей связи 5G (в перспективе 6G) используют принципы SDR для поддержки одновременного множественного доступа с использованием различных частотных диапазонов, протоколов и стандартов передачи данных. Компания Rohde & Schwarz предлагает линейку SDR под брендами SOVERON (для военного применения) и CERTIUM (для гражданской связи). Компании Thales и L3Harris Technologies производят системы SDR, применяемые для тактической связи и радиоэлектронной борьбы. Например, RT-2129 CNR от Thales используется армией США для модернизации устаревших систем связи. Компании Elbit Systems, Leonardo, BAE Systems и др. также активно внедряют SDR для создания перспективных мультифункциональных коммуникационных платформ. Современные системы спутниковой связи (StarLink, OneWeb и др.) в целях повышения эффективности их функционирования также решают ряд радиотехнических задач в рамках концепции SDR (адаптивное диаграммообразование;

автоматическое отслеживание сдвига частоты из-за движения спутников; смена законов и параметров модуляции сигналов в зависимости от качества канала связи; динамическое распределение полосы пропускания между пользователями и др.). LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee и другие стандарты LPWAN (Low Power Wide Area Network) реализуются на SDR платформах, обеспечивая низкое потребление энергии благодаря программной оптимизации, гибкость в выборе модуляции и скорости передачи данных, а также возможность сосуществования множества различных стандартов на одном устройстве.

Радиолокационные системы. Современные РЛС с АФАР (Active electronically scanned array, AESA), РЛС с синтезом апертуры (Synthetic Aperture Radar System, SAR) и другие виды РЛС реализуются на SDR-платформах. Это позволяет менять частоту дискретизации и разрешение в реальном времени, реализовать сложные алгоритмы обработки в цифровой области, а также адаптировать параметры РЛС под условия окружающей среды.

Средства радиоэлектронной борьбы. Устройства на основе SDR технологий используются для мониторинга и контроля радиочастотного спектра, обнаружения и анализа радиосигналов. Обработка сигналов на универсальных вычислительных платформах в рамках SDR концепции позволяет использовать элементы ИИ и алгоритмы машинного обучения для решения задач обнаружения сигналов, классификации типов модуляции и оценки параметров модуляции, назначения наиболее эффективных структуры и параметров помех, а также широкого перечня других специфических задач радиоэлектронной борьбы.

Заключение

Программно-определяемое радио прошло путь от академической концепции до повсеместно применяемой технологии менее чем за тридцать лет. В настоящее время SDR — это одновременно мощный инструмент исследователя, доступная учебная платформа и основа промышленной телекоммуникационной инфраструктуры.

Доступность бюджетных платформ (RTL-SDR за 15 долларов) совместно с богатейшей экосистемой открытого программного обеспечения (GNU Radio, srsRAN, OpenWebRX) снизила порог входа практически до нуля. Студент с ноутбуком и USB-SDR приемником сегодня может решать задачи, которые двадцать лет назад требовали хорошо оснащенной радиотехнической лаборатории за сотни тысяч долларов.

В перспективе конвергенция SDR технологий с элементами ИИ открывает дорогу к полностью автономным когнитивным радиосистемам, способным самостоятельно оптимизировать процесс использования радиочастотного спектра, выбирать наиболее эффективные протоколы передачи данных и адаптироваться к помеховой обстановке. Это делает понимание SDR-технологий не просто полезным, а стратегически необходимым навыком для инженеров нового поколения.

Начать практическое освоение SDR технологий можно с установки GNU Radio, приобретения RTL-SDR-приемника и воспроизведения классических учебных задач: приём FM-радио, декодирование пакетов ADS-B, визуализация радиочастотного спектра. Этот практический фундамент послужит отправной точкой для изучения более сложных тем — OFDM, MIMO и протоколов сотовой связи.

Список использованных источников

1. Mitola, J. (1992). Software Radios: Survey, Critical Evaluation and Future Directions. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 8(4), 25–31.
2. Dillinger, M., Madani, K., & Alonistioti, N. (Eds.). (2003). Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions. John Wiley & Sons.
3. Хорошавин, В. А., & Ефимов, Е. Н. (2020). Программно-определяемые радиосистемы: архитектура и применение. Радиотехника, (3), 45–57.
4. Markus, C., Rhett, D., & Balint, S. (2016). RTL-SDR for Engineers and Hobbyists: From Basics to Advanced Techniques. CreateSpace Independent Publishing.
5. Ettus Research. (2023). USRP Hardware Driver and USRP Manual. Официальная документация. <https://files.ettus.com/manual/>
6. Blossom, E. (2004). GNU Radio: Tools for Exploring the Radio Frequency Spectrum. Linux Journal, 2004(122), 4.
7. GNU Radio Project. (2024). GNU Radio Documentation. <https://wiki.gnuradio.org/>
8. Fette, B. A. (Ed.). (2009). Cognitive Radio Technology (2nd ed.). Newnes / Elsevier.
9. Haykin, S. (2005). Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 23(2), 201–220.
10. Orebaugh, A., & Ramirez, G. (2007). Ethereal Packet Sniffing. Syngress Publishing.