

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПЕРЕСТРОЙКИ ЧАСТОТ И СТАНДАРТОВ

Воробьев П. В.¹, Берестовский П. А.², Москалев М. С.³

DOI:10.21681/3034-4050-2025-6-66-70

Ключевые слова: мобильная связь, сотовая связь, LTE, 5G NR, NB-IoT, адаптация.

Аннотация

Цель работы: изучить возможности программно-определяемого радио для динамической перестройки рабочих частот и поддержки нескольких стандартов радиодоступа в рамках единой инфраструктуры. Показать способности SDR-систем адаптироваться к изменяющимся условиям использования спектра.

Метод исследования: оценка ключевых параметров производительности сетей радиодоступа.

Результаты исследования: проведена оценка ключевых параметров производительности сетей радиодоступа

Научная новизна заключается в оценке ключевых параметров производительности SDR-платформ применительно к сценариям динамической перестройки частот и стандартов, что позволяет сформулировать требования к архитектуре и алгоритмам радиосистем следующего поколения.

Введение

Программно-определяемое радио (SDR) представляет собой архитектурный подход к построению беспроводных систем связи, в котором значительная часть функциональности, традиционно реализуемой на аппаратном уровне, переносится в программную область. Такая архитектура обеспечивает гибкость, позволяя системам адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации, поддерживая одновременное или последовательное функционирование в рамках множества стандартов радиодоступа. В условиях современной сотовой инфраструктуры, где требуется совместное обслуживание разнородных сервисов, от высокоскоростного мобильного широкополосного доступа до маломощных IoT-устройств, SDR становится ключевым технологическим решением, обеспечивающим эффективное использование радиочастотного спектра и упрощение архитектуры сетей [1].

Одной из центральных возможностей SDR является способность к динамической перестройке рабочих частот в реальном времени. Она достигается за счёт программной настройки гетеродинов, фильтров и модулей обработки сигнала, благодаря чему, система способна оперативно реагировать на изменения

в спектральной обстановке. В условиях высокой загруженности радиочастотного спектра SDR-устройства могут автоматически переключаться на менее загруженные участки спектра, минимизируя влияние интерференции. Также такие системы способны работать как в лицензируемых, так и в нелицензированных диапазонах, расширяя возможности их применения в различных видах местности (город, сельская местность, поле). Вышеописанные возможности в совокупности с перераспределением частотных ресурсов между пользователями позволяет значительно повысить спектральную эффективность, особенно в условиях неоднородной нагрузки.

Обсуждение

Современные сотовые сети требуют совместной работы различных технологий, таких как LTE, 5G и IoT, каждая из которых имеет собственные требования к радиоканалу, модуляции, протоколам управления и энергопотреблению. SDR позволяет реализовать так называемые multi-RAT системы, в которых одна и та же базовая станция может последовательно или параллельно обслуживать устройства, использующие разные стандарты. Существуют решения [2] для динамического

¹ Воробьев Павел Владимирович, научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: pvorobyev98@gmail.com

² Берестовский Павел Андреевич, младший научный сотрудник Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: berest42@gmail.com

³ Москалев Владимир Сергеевич, слушатель Военной академии связи, г. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: gsg.1991@mail.ru

управления спектром для multi-RAT систем, где каждому RAT назначается часть общего спектра, пропорциональная его требованиям к пропускной способности. Результаты моделирования показывают более высокую эффективность по сравнению со статическими стратегиями распределения спектра. В работе [3] показано, как можно перераспределить недостаточно используемый диапазон GSM на LTE, а также рассмотреть возможность поддержки устройств GSM с меньшим спектром, путем совместного распределения ресурсов для снижения уровня внутренних помех. Такое достигается за счёт загрузки соответствующих программных модулей в память SDR-системы, реализующих физический и канальный уровни каждого конкретного протокола. Данный подход не только упрощает развертывание и обслуживание сети, но и позволяет операторам плавно мигрировать между поколениями технологий без необходимости полной замены оборудования [4].

В основе адаптивности SDR-систем лежат принципы когнитивного радио. SDR-системы могут использовать алгоритмы машинного обучения для прогнозирования спектральной активности и принятия решений об изменении тех или иных параметров сети. Особенно актуальной данная функциональность становится в контексте технологии динамического совместного использования спектра (DSS), применяемой в сетях 5G для совместного использования частотных ресурсов между LTE и 5G NR. SDR обеспечивает гибкую реализацию DSS на уровне временных слотов или OFDM-символов, позволяя операторам эффективнее балансировать нагрузку между поколениями сотовой связи без выделения отдельных частотных блоков. Кроме того, адаптивность SDR повышает устойчивость систем к внешним помехам и преднамеренному подавлению сигнала, что делает его перспективным решением для критически важных и специализированных приложений.

С точки зрения операторов связи, внедрение SDR-архитектуры приносит существенные экономические и эксплуатационные преимущества. Использование единой аппаратной платформы для поддержки множества стандартов снижает капитальные и операционные затраты, упрощая процессы технического обслуживания и модернизации. Обновление до новых стандартов связи, таких как 6G, может осуществляться преимущественно

программным путём. Гибкость SDR также позволяет оперативно перераспределять ресурсы сети в ответ на изменение пользовательской нагрузки – например, во время массовых мероприятий, стихийных бедствий или сезонных колебаний активности. В рамках гетерогенных сетей SDR обеспечивает бесшовную интеграцию макро-, микро- и фемтосот, работающих по разным протоколам, в единую управляемую инфраструктуру [5].

На практике SDR уже находит применение в таких инициативах, как Open RAN, где программная реализация функций DU, CU и RU позволяет добиться интероперабельности между оборудованием разных производителей. В специальной связи SDR используется для создания адаптивных, защищённых и многопротокольных систем, способных функционировать в сложных электромагнитных условиях. В промышленной сфере и IoT SDR-шлюзы обеспечивают межпротокольную совместимость между такими технологиями, как LoRa, Zigbee, NB-IoT и LTE-M, выступая в роли универсальных точек доступа. Перспективы развития SDR связаны с дальнейшей интеграцией ИИ для автономного управления спектром, а также с расширением поддержки терагерцовых диапазонов и интеллектуальных отражающих поверхностей в рамках концепции сетей 6G [6].

При реализации динамической перестройки частот и стандартов связи с помощью SDR критически важно оценивать следующие параметры производительности:

1. Время переключения между режимами. Под ним понимается время, необходимое для переконфигурации радиомодуля с одного режима работы на другой.

В условиях динамического спектра (например, технологий когнитивного радио, IoT с адаптивным доступом) задержка переключения напрямую влияет на эффективность использования спектра и качество обслуживания.

Типичные значения:

- FPGA-базированные SDR (USRP, Ettus, LimeSDR): десятки мс;
- DSP/GPP-базированные SDR (на базе CPU/GPU): десятки мс – сотни мс;
- ASIC/SoC-решения (например, AD9361/AD9371): < 1 мс при предварительной загрузке профиля.

Время переключения между режимами в программно-конфигурируемом радио существенно зависит от ряда факторов, включая архитектуру обработки сигнала — например, FPGA обеспечивает значительно более быструю реконфигурацию по сравнению с CPU-или DSP-ориентированными решениями. Также важен объём переконфигурируемого программного обеспечения: частичная перезагрузка модулей) занимает меньше времени, чем полная перезагрузка всей системы. Применение предварительно загруженных и кэшированных профилей режимов позволяет избежать задержек на этапе инициализации и значительно ускорить переход. Немаловажную роль играет скорость обмена данными между управляющим контроллером и RF-частью устройства — узкие или медленные интерфейсы могут стать «бутылочным горлышком», ограничивающим общую скорость переключения.

Минимизация времени переключения достигается за счёт аппаратной реализации на FPGA и использования кэшированных конфигурационных профилей. Для систем реального времени (VoIP, тактическая связь) критично обеспечивать переключение менее 10 мс.

2. Уровень искажений сигнала. Под ним понимается мера отклонения передаваемого или принимаемого сигнала от идеального. Оценивается через:

- EVM (Error Vector Magnitude) — разница принятого сигнала и его идеальной версии;
- ACLR (Adjacent Channel Leakage Ratio) — утечка мощности в соседние каналы;
- BER (Bit Error Rate) — частота ошибок на бит.

При частой перестройке параметров возможны нестабильности в аналоговой части (ЦАП/АЦП, PLL, фильтры), что приводит к росту искажений.

Типовые требования:

- для LTE/5G: EVM < 3–5 %, ACLR > 45 дБ;
- для Wi-Fi 6: EVM < 2–3,5 %;
- BER < 10^{-6} для надёжной связи.

Уровень искажений сигнала в системах программно-конфигурируемого радио при динамической перестройке частот и стандартов определяется совокупностью факторов, среди которых ключевую роль играет качество синтезатора частот. Нелинейные искажения, вносимые АЦП/ЦАП при работе на пределе

динамического диапазона вносят существенный вклад в ухудшение параметров сигнала. После каждого переключения режима возможны ошибки, связанные с неточностью или отсутствием своевременной калибровки аналоговых и цифровых цепей — например, коррекции IQ-дисбаланса или усиления. Стабильность характеристик системы может снижаться под влиянием внешних условий (изменение температуры окружающей среды или дрейф параметров компонентов со временем), что дополнительно усугубляет искажения и требует внедрения адаптивных механизмов компенсации в реальном времени.

Динамическая перестройка требует автоматической калибровки RF-цепи после каждого переключения. Использование адаптивных алгоритмов цифрового предискажения (DPD) и автоматической коррекции IQ-дисбаланса позволяет сохранять качество сигнала даже при частых сменах режимов.

3. Пропускная способность. Под ней понимается максимальный объём данных, который может быть передан за единицу времени в заданном режиме. При переключении между стандартами пропускная способность может меняться на порядки. Важно оценить пиковую пропускную способность в каждом режиме, расходы на переконфигурацию и спектральную эффективность

Прежде всего, пропускная способность напрямую зависит от ширины полосы используемого радиоканала — чем шире полоса, тем выше теоретический максимум скорости передачи данных. Не менее важны выбранные схемы модуляции и кодирования более высокие порядки модуляции и эффективные коды коррекции ошибок позволяют упаковать больше бит в один символ, но являются более требовательными к соотношению сигнал/шум. Также существенное влияние оказывает вычислительная нагрузка на процессор или ПЛИС — перегруженная система не успевает обрабатывать данные в реальном времени, как следствие, это приводит к снижению фактической пропускной способности. Задержки на уровнях стека протоколов — от MAC до прикладного уровня — могут вносить накладные расходы, особенно при частых переключениях между стандартами, когда требуется новая инициализация соединений или согласование параметров.

4. Стабильность соединения. Под ней понимается способность поддерживать устойчивое соединение при переключениях, в условиях помех, замираний и изменений среды.

Метрики оценки:

- время безотказной работы;
- частота разрывов соединения;
- время восстановления после сбоя;
- уровень RSSI/SNR до и после переключения.

Ключевую роль в обеспечении стабильности соединения играют алгоритмы хэндовера – чем более интеллектуалы механизмы выбора целевой частоты или стандарта, тем меньше вероятность разрыва связи при переключении (жесткого хэндовера). Важным элементом устойчивости является наличие буферизации данных и механизмов повторной передачи, позволяющих компенсировать кратковременные потери пакетов в момент реконфигурации. Метрики качества канала, такие как CQI и SINR — напрямую влияют на своевременность и корректность принятия решения о переключении: неточные или запаздывающие оценки могут привести к неоптимальному выбору режима и ухудшению соединения. Критически важна точность и скорость восстановления синхронизации после переключения – как по времени, так и по частоте, поскольку даже кратковременная потеря синхронизма может вызвать сбой приёма или передачи.

При выборе и использовании платформ SDR для задач динамической перестройки частот и стандартов рекомендуется отдавать предпочтение гибридным архитектурам, таким как USRP с FPGA-процессором или LimeSDR с интегрированной ПЛИС, где FPGA отвечает за сверхбыструю реконфигурацию RF-цепей и обработку сигнала в реальном времени, а CPU/GPP управляет высокоуровневой логикой. Для минимизации

задержек целесообразно использовать платформы с поддержкой предзагрузки и кэширования конфигурационных профилей – например, ADALM-PLUTO или устройства на базе AD9361/AD9371. Они позволяют сохранять настройки модуляции, фильтрации и частоты в памяти и мгновенно активировать их по команде. Обязательным требованием является наличие встроенных механизмов автоматической калибровки после переключения – коррекции IQ-дисбаланса, усиления и фазы, что реализовано, в трансиверах Analog Devices и поддерживается в драйверах SoapySDR или UHD. Наконец, эффективность всей системы повышается при использовании платформ с возможностью мониторинга в реальном времени – сбора метрик RSSI, BER, EVM, SINR через API, чтобы система оперативно реагировала на ухудшение канала и инициировала переключение до возникновения разрывов связи. Такой подход обеспечивает оптимальный баланс между скоростью, качеством и стабильностью в динамически меняющейся радиосреде.

Заключение

Таким образом, программно-определяемое радио выступает не просто как технологическое решение, но как стратегическая основа для построения будущих беспроводных сетей. Его способность к динамической адаптации, поддержке множества стандартов и эффективному использованию спектра делает SDR незаменимым элементом эволюции сотовой инфраструктуры. В условиях стремительного развития 5G, экспоненциального роста числа IoT-устройств и подготовки к переходу на 6G, SDR обеспечивает плавную и экономически эффективную трансформацию сетей, позволяя избежать радикальных замен оборудования и сохраняя инвестиции операторов на долгосрочную перспективу.

Литература

1. Буланов Д. В., Лазарев В. О. Методика создания прототипа автономного мобильного приемопередатчика на платформе программируемого радио // Computational nanotechnology. 2015. № 3.
2. A. Alsouhaily and E. S. Sousa. 2014. Dynamic Spectrum Management in Multi-Radio Access Technology (RAT) Cellular Systems. Wireless Communications Letters, IEEE 3, 3 (June 2014), 249–252.
3. Xingqin Lin and Harish Viswanathan. 2013. Dynamic Spectrum Refarming with Overlay for Legacy Devices. CoRR abs/1302.0320 (2013).
4. Швырев Б. А., Погорелов Д. В., Бердник М. В. Противодействие несанкционированным полетам беспилотных летательных аппаратов // NBI-technologies. 2018. № 1.

5. Стрельцов Н. А., Горячев Н. В., Трусов В. А. SDR-трансиверы и их применение // НиКа. 2014.
6. Куприяновский В. П., Намиот Д. Е., Покусаев О. Н. Периферийные вычисления для современной мобильности // International Journal of Open Information Technologies. 2025. № 2.

USING SOFTWARE-DEFINED RADIO FOR DYNAMIC FREQUENCY AND STANDARD AGILITY

Vorobyov P. V.⁴, Berestovsky P. A.⁵, Moskalev M. S.⁶

Keywords: software defined radio, mobile communications, cellular communication, LTE, 5G NR, NB-IoT, adaptation.

Abstract

Purpose of work: to analyze the capabilities of software-defined radio (SDR) in the context of dynamic reconfiguration of operating frequencies and support for multiple radio access technologies within a unified cellular infrastructure. Particular attention is paid to the ability of SDR systems to adapt to changing conditions of radio frequency spectrum usage, enabling simultaneous or sequential operation with various communication standards such as LTE, 5G NR, and NB-IoT.

Research method: evaluation of key performance parameters, including switching time between modes, signal distortion level, throughput, and connection stability.

Results of the study: an assessment of key performance parameters was conducted – switching time between modes, signal distortion level, throughput, and connection stability.

Scientific novelty lies in the systematization and quantitative evaluation of key SDR platform performance parameters — switching time, distortion level, throughput, and connection stability – specifically applied to scenarios involving dynamic frequency and standard reconfiguration. This enables formalization of requirements for the architecture and algorithms of next-generation adaptive radio systems.

References

1. Bulanov D. V., Lazarev V. O. Metodika sozdaniya prototipa avtonomnogo mobil'nogo priemoperedatchika na platforme programmiruemogo radio // Computational nanotechnology. 2015. № 3.
2. A. Alsouhaili and E. S. Sousa. 2014. Dynamic Spectrum Management in Multi-Radio Access Technology (RAT) Cellular Systems. Wireless Communications Letters, IEEE 3, 3 (June 2014), 249–252.
3. Xingqin Lin and Harish Viswanathan. 2013. Dynamic Spectrum Refarming with Overlay for Legacy Devices. CoRR abs/1302.0320 (2013).
4. Shvyrev B. A., Pogorelov D. V., Berdnik M. V. Protivodejstvie nesankcionirovannym poletam bespilotnyh letatel'nyh apparatov // NBI-technologies. 2018. № 1.
5. Strel'cov N. A., Gorjachev N. V., Trusov V. A. SDR-transivery i ih primenenie // НиКа. 2014.
6. V. P. Kuprijanovskij, D. E. Namiot, O. N. Pokusaev Periferijnye vychislenija dlja sovremennoj mobil'nosti // International Journal of Open Information Technologies. 2025. № 2.



⁴ Pavel V. Vorobyov, Researcher of the Military Academy of Communications, Research Center, St. Petersburg, Russia. E-mail: pvorobyev98@gmail.com

⁵ Pavel A. Berestovsky, Junior Researcher of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: berest42@gmail.com

⁶ Vladimir S. Moskalev, student of the Military Academy of Communications, St. Petersburg, Russia. E-mail: gsg.1991@mail.ru