



Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности

Сайт журнала: <http://www.openaccessscience.ru/index.php/ijce/>



УДК 004.932.7

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММНО-КОНФИГУРИРУЕМОГО РАДИО В СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

<sup>1</sup>Гаипов К.Э., <sup>2</sup>Демичева А.А., <sup>3</sup>Малышев Д.О.

ФГБОУ ВО "СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.Ф. РЕШЕТНЕВА", Красноярск, Россия, (660037, Красноярский край, город Красноярск, пр-кт Им.Газеты "Красноярский Рабочий", д. 31), e-mail: <sup>1</sup>gaipovke@yandex.ru, <sup>2</sup>demichevaalena@yandex.ru, <sup>3</sup>ma.hilfe@mail.ru

Рассматриваются научные исследования отечественных и зарубежных авторов по технологии SDR. Описаны наиболее часто встречающиеся области применения технологии, аппаратные решения, возможности применения для реальных задач.

Ключевые слова. Программно-конфигурируемое радио, SDR, сети связи.

## ANALYSIS OF METHODS OF USING SOFTWARE-CONFIGURABLE RADIO IN DATA TRANSMISSION SYSTEMS

<sup>1</sup>Gaipov K.E., <sup>2</sup>Demicheva A.A., <sup>3</sup>Malyshev D.O.

SIBERIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY NAMED AFTER ACADEMICIAN M.F. RESHETNEV, Krasnoyarsk, Russia, (660037, Krasnoyarsk region, Krasnoyarsk Gazety Gazety "Krasnoyarskiy Rabochiy" pr-kt, 31), e-mail: <sup>1</sup>gaipovke@yandex.ru, <sup>2</sup>demichevaalena@yandex.ru, <sup>3</sup>ma.hilfe@mail.ru

The scientific research of domestic and foreign authors on SDR technology is considered. The most common areas of technology application, hardware solutions, and application possibilities for real-world tasks are described.

Keywords: Software-configurable radio, SDR, communication networks.

### Основная часть

Программно-конфигурируемое радио (*Software Define Radio - SDR*) – это радиооборудование, в котором все или большинство функций физического уровня выполняются в программном виде, а функции, выполняемые аппаратно, должны оперативно модифицироваться по требованиям рабочего стандарта связи [1].

Вычислительные функции SDR могут быть реализованы с помощью различных устройств, таких как процессор общего назначения, цифровой сигнальный процессор, программируемая логическая интегральная схема или интегральная схема специального назначения.

Технология SDR позволяет разрабатывать системы передачи данных без изменения аппаратной части, при этом конфигурацию аппаратуры можно изменять с помощью специализированного программного обеспечения. Достоинством SDR является гибкость получаемых решений с возможностью многократного использования одних аппаратных компонентов для разработки большого количества различных устройств, но которые имеют

схожие функции, что позволяет уменьшить временные и экономические затраты на разработку радиотехнических устройств.

Обзор архитектуры SDR, а также аналогового и цифрового разделения системы и взаимосвязи компонентов представлен в [2]. Кроме того, были рассмотрены платформы SDR, разработанные как промышленностью, так и научными кругами, и предоставлено аналитическое сравнение аппаратных платформ в качестве руководства для принятия проектных решений.

### **Область применения**

*SDR*-радиоприемники обеспечивают быструю перестройку по выделенному диапазону частот и позволяют обрабатывать не только тот радиосигнал, который принимается на рабочей частоте, но и радиосигналы, которые присутствуют в определенном участке диапазона волн. При этом, имеется программная возможность анализировать сигнально-помеховую обстановку в точке приёма и управлять процессом установления радиосвязи. Таким образом радиоприёмные устройства, обрабатывая сигнал и выделяя из него информацию, выбирают частоты для ведения радиосвязи не только в условиях случайных, но и в условиях преднамеренных помех. При выборе частот учитывается распределение мощности помехи и радиосигнала в полосе, которую они занимают. В работе [3] приведены результаты моделирования загрузки декаметрового диапазона волн и расчет вероятности занятия частот приемо-передающим радиооборудованием, которые показывают, что как при низкой, так и при высокой загрузке имеются полосы частот с низким уровнем помех. Эти результаты можно использовать для установления радиосвязи, с целью обмена информацией, и осуществить поиск частот свободных от помех в выделенном частотном диапазоне.

В статье [4] проводится обоснование необходимости реализации механизма идентификации несущей в приемопередатчике станции спутниковой связи, реализованного на *SDR* платформе. Описаны причины, по которым применение механизма идентификации несущей являются достаточно эффективным решением, а также преимущества использования программно-реконфигурируемых платформ. Также авторами описан механизм идентификации станции, которая использует уже задействованную в система полосу пропускания. Авторы [5] используют метод золотого сечения для поиска незанятых полос радиочастотного спектра в условиях динамического изменения электронной обстановки при неизвестном изменении шума.

Авторами [6] представлен порядок поиска и выбора радиочастот для передачи информации в радиопередающих и радиоприемных устройствах декаметрового диапазона волн. Работа включает в себя результаты имитационного моделирования, подтверждающие предлагаемые решения.

Авторы работ [7-10] провели серию исследований, посвященных описанию и экспериментальной апробации разработанного *SDR*-демонстратора технологий сетевого позиционирования, который включает в себя подсистему формирования и передачи, а также подсистему приема и обработки опорных сигналов. Исследования были получены с целью обоснования технических решений по повышению точности определения местоположения устройств в процессе фактической эксплуатации сети. Совокупность сформированных опорных сигналов базовых станций удовлетворяют стандартам *LTE*, корректность работы которых подтверждена в ходе лабораторных испытаний.

Также вопрос о повышении помехоустойчивости сигналов с перестановочной частотной модуляцией, с кодированием опорных колебаний на физическом уровне кодом с постоянным весом для низкоскоростных помехоустойчивых передач декаметровый связи по ионосферному радиоканалу предложен в [11]. Показана актуальность данного направления исследования. Цель работы заключается в разработке предложений по управлению параметрами сигнально-кодовых конструкций на основе перестановочной частотной модуляции, обеспечивающего компромиссный выбор между скоростью и помехоустойчивостью при передаче информации по ионосферному радиоканалу в сложной сигнально-помеховой обстановке. Представлен подход по выбору одновременно используемых тоновых опорных колебаний для кодирования сигнальных символов в зависимости от сигнально-помеховой обстановки, по критерию максимальной скорости передачи при сохранении требований по достоверности. Обоснован рациональный выбор числа тоновых опорных колебаний и символьной скорости с позиций эффективного использования энергетических и частотных ресурсов радиолинии. Приведено обоснование предложенных основных этапов управления, представлены результаты аналитического исследования и имитационного моделирования, подтверждающие правомерность сделанных теоретических выводов.

Использование *SDR* для повышения скорости обмена данными в направлениях по радиоканалам декаметрового диапазона волн также приведено в [12], где предлагается метод использования многоканальных радиоустройств, позволяющий минимизировать время на смену рабочих частот при передаче команд управления и исключить процедуру переключения частот в процессе их приёма.

На основе технологии *SDR* возможно создание устройств не только поиска и выбора радиочастот, но и систем автоматической регулировки усиления радиосигналов [13], систем для создания заградительной помехи и шумовой помехи в части полосы радиочастот [14], систем активной защиты информации путем использования генератора помех [15]. Также технология *SDR* используется для приемников самолетов, которые проверяют радиоэфир систем посадки воздушных судов [16], для навигационных комплексов беспилотных летательных аппаратов [17] с целью разработки помехоустойчивого навигационного комплекса, что показывает широкий диапазон практического применения рассматриваемой технологии.

Стоит заметить, что большое число авторов использует декаметровый диапазон радиоволн [3, 6, 11, 12, 24], однако технология *DSR* может применяться для радиосистем широкого диапазона. Так в работе [18] описан метод повышения устойчивости систем радиосвязи, в частности в северных широтах, где широко применяются каналы метеорной радиосвязи. С помощью специального программного обеспечения происходит обнаружение метеорных следов, анализ их параметров, выработка управляющих команд для дальнейшей перестройки полосы пропускания радиопередающего оборудования.

### **Существующие аппаратные решения**

Принципы работы современных программно-конфигурируемых радиоприемников описываются в [19], также рассмотрены примеры применения и программные инструменты для разработки различных конфигураций *SDR* устройств. В [20] рассматриваются существующие открытые решения на основе программно-конфигурируемого радио: *Open Air Interface* от *Eurecom* и *srsLTE* от компании *Software Radio Systems*.

В работе [21] приводится перечень наиболее популярных устройств *SDR*, включающий в себя название устройства, минимальную и максимальную рабочие частоты, пропускную способность, разрядность аналого-цифрового преобразователя, а также список программного обеспечения для работы *SDR*-устройств. В практической части работы предложен алгоритм реализации программно-определяемого радио на ПЛИС, создана модель квадратурного демодулятора сигналов, осуществлен выбор программируемых интегральных логических схем для создания программно-определяемой радиосистемы, а также ее моделирование. Осуществлена симуляция работы модели квадратурного демодулятора на ПЛИС и проверка его работы.

С точки зрения производства ПЛИС лидирующие позиции занимают компании *Altera* (принадлежит *Intel*) и *Xilinx* [22]. В статье проводится обоснование выбора платформы для реализации спутникового модема на основе *SDR* технологии, описаны преимущества и ограничения, накладываемые на платформу. Представлена структурная схема модема, применяемого в системах спутниковой связи, и обосновано применение ПЛИС для его реализации на основе *SDR*-технологии. Проведен анализ основных характеристик различных поколений ПЛИС в задачах цифровой обработки сигналов. Сделан выбор отладочной платформы, для реализации спутникового модема на основе *SDR* технологии.

Авторы исследования [23] провели обзор применения устройств на основе *SDR* компании *National Instruments*, описали актуальность применения, анализ выбора оборудования, область применения устройств. Данный факт показывает имеющееся программное и аппаратное обеспечение, которое можно использовать для решения радиотехнических задач.

В [24] авторами предлагается структура аналоговой части *SDR* радиоприёмных устройств декаметрового диапазона, которая используется для построения систем декаметровой связи, обеспечивающих заданные вероятностно-временные характеристики и решающие проблему электромагнитной совместимости. Приведена структура *SDR* радиоприёмного устройства с расширенным динамическим диапазоном по принимаемому сигналу. Предложенная архитектура построения аналоговой части *SDR* позволяет при заданной мощности передатчика увеличить пропускную способность канала связи, а для заданной скорости передачи информации существенно (в разы) понизить требования к энергетике трассы, что позволяет использовать менее мощный передатчик и более простую передающую или универсальную антенну.

### **Применения технологий в процессе обучения**

Для изучения и дальнейшего использования технологии *SDR* на базе государственных образовательных учреждениях функционируют исследовательские лаборатории. Это необходимо для подготовки кадров соответствующей квалификации с практическими навыками работы с актуальными на сегодняшний день технологиями. Так с целью исследований в области цифровой обработки сигналов в Военном учебном центре Сибирского Федерального Университета (СФУ), г. Красноярск, была создана лаборатория «Приемо-передающие системы специального назначения» [25].

Курсантами Военного учебного центра СФУ в рамках дипломного проектирования разрабатываются аппаратно-программные комплексы, в частности, используемые как передающие устройства, приемные устройства и генераторы сигналов, как постановщики

помех. Данные исследования проводятся с целью повышения помехоустойчивости систем радиопередачи. Также проводятся работы на базе научно-образовательного центра «Беспроводные инфотелекоммуникационные сети» СПбГУТ им. проф. М.А. Бонч-Бруевича [20] для исследования оборудования, применяемого для работы сетей 5G. Данные работы дают понять важность развития технологий SDR в образовательной деятельности.

### **Заключение**

Радиосистемы на основе технологий SDR обеспечивают гибкое управление радиочастотным спектром, в частности быстрое и надежное распознавание незанятых частот из определенного диапазона в условиях динамически изменяющейся электронной среды, генерация сигналов определенных частот для создания заградительных помех, определение местоположения радиоустройств. Однако выбор частотного диапазона осложняется неизвестными и изменяющимися во времени дисперсией шума, количеством и динамическим диапазоном сигналов в анализируемой полосе пропускания.

Использование SDR технологии может быть обосновано тем, что она позволяет принимать и передавать сигналы с использованием разных частот и стандартов, выбор которых зависит от самых различных факторов. Тем самым возможно применение рассматриваемой технологии в различных областях.

Использование технологии SDR описаны как в статьях отечественных авторов на русском языке [1, 3-4, 6-14, 16-25], так и в статьях зарубежных и отечественных авторов на английском языке [2, 5, 15].

*Благодарности: работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» СибГУ им. М.Ф. Решетнева.*

### **Список литературы**

1. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 372 с., ил.
2. Hassan Nasser, Abdelrazak Badawieh, Abdulkarim Assalem. A Survey of Software Radios: Reconfigurable Platforms, Development Tools, and Future Directions. RENSIT, 2020, 12(2):207-218; DOI: 10.17725/rensit.2020.12.207.
3. Солозобов С.А., Шевченко В.В., Щукин А.Н. Децентрализованное использование частотного ресурса декаметрового диапазона волн в сложной помеховой обстановке // Техника средств связи. 2020. № 1 (149). С. 28-36.
4. Николаев А.В., Медоев В.Э. Реализация механизма идентификации несущей в модеме станции спутниковой связи на основе SDR платформы // МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ «СИМВОЛ НАУКИ» № 5 / 2021. С. 29-31.
5. Buhaiov M. V. Fast Spectrum Sensing Method for Cognitive Radio // Visnyk NTUU KPI Serii a – Radiotekhnika Radioaparatabuduvannia, 2020, Iss. 83, pp. 41–46
6. Солозобов С.А., Шевченко В.В., Щукин А.Н. Статистический выбор рабочих частот в декаметровом диапазоне волн для различных видов радиосигналов // Техника средств связи. 2020. № 2 (150). С. 55-62.

Гаипов К.Э., Демичева А.А., Малышев Д.О. Анализ методов использования программно-конфигурируемого радио в системах передачи данных // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9 № 11(49) с. 9–17

---

7. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б., Харин В.Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 28-47.
8. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Модели приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ. 2022. № 3. С. 62-83.
9. Фокин Г. А., Рютин К.Е. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования: формирование информационного блока MIB // «ЭКОНОМИКА И КАЧЕСТВО СИСТЕМ СВЯЗИ» 2/2023. С. 30-42.
10. Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 52–65. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65>.
11. Дворников С.В., Балыков А.А. Предложения по управлению скоростью передачи и помехоустойчивостью сигналов с перестановочной частотной модуляцией // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №6. С. 20-26.
12. Жуков Г. А., Будко П. А., Дяченко А. Н. Повышение скорости обмена данными в направлениях «берег-море-берег» по радиотрактам декаметрового диапазона волн // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 2. С. 147-174. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-147-174
13. Прасолов А.А. Обзор применения систем автоматической регулировки усиления в радиоприемных устройствах // «ЭКОНОМИКА И КАЧЕСТВО СИСТЕМ СВЯЗИ» 1/2021. С. 45-57.
14. Овчаров А.А., Хохлюк А.А. Анализ пропускной способности программируемой радиостанции с многоканальной передачей информации с учетом спектральных характеристик преднамеренных помех // Институт специальной связи и защиты информации Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского East European Scientific Journal #2(66), 2021. С. 62-71
15. Foziljonov Kh.I., Faziljanov I.R Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference // SCIENCE AND INNOVATION INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL VOLUME 2 ISSUE 4 APRIL 2023 UIF-2022: 8.2 | ISSN: 2181-3337 | SCIENTISTS.UZ. PP. 46-52.
16. Аркасов М. В., Горбачева И.И. Разработка SDR приемника для контроля дальнего эфира систем посадки воздушных судов // Актуальные проблемы авиации и космонавтики – 2021, том 3. С.1224-1225.
17. Богословский А. В., Разиньков С. Н., Сёмка Э. В., Буслаев А. Б. Применение программируемых логических интегральных схем в системах многоканальной цифровой обработки сигналов спутниковой навигации // Вестник кибернетики. 2023. Т. 22, № 2. С. 13–20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20.
18. Рябов И.В., Толмачев С.В. Аппаратно-программный комплекс для организации связи в полярных широтах // Радиотехнические и телекоммуникационные системы, 2020, №1. С. 62-71.
19. Устюгов В. А., Лавреш И. И., Истомина Ю. Н., Макаров П. А. О применении устройств SDR в образовательном процессе для технических специальностей вуза // Вестник

Гаипов К.Э., Демичева А.А., Малышев Д.О. Анализ методов использования программно-конфигурируемого радио в системах передачи данных // Международный журнал информационных технологий и энергоэффективности. – 2024. – Т. 9 № 11(49) с. 9–17

Сыктывкарского университета. Сер. 1: Математика. Механика. Информатика. 2023. Вып. 2 (47). С. 56–68. [https://doi.org/10.34130/1992-2752\\_2023\\_2\\_56](https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_2_56)

20. Бабанов И.А., Андреев Р.А., Федоров А.С. Использование программно-определяемого радио для тестирования узла сети LTE/NR на основании специфицированных процедур // International journal of Professional Science №12-2020. С. 100-105.
21. Жигулин В. А., Пешков И. В., Фортунова Н. А. Реализация программно-определяемого радиоприемника на базе программируемых логических интегральных схем [Электронный ресурс] // Огарев-online. – 2022. – №13. – Режим доступа: <https://journal.mrsu.ru/arts/realizaciya-programmno-opredelyaemogo-radiopriemnika-na-baze-programmiruemых-logicheskix-integralnyx-sxem>
22. Николаев А.В., Медоев В.Э. Выбор и обоснование SDR платформы для реализации модема станции спутниковой связи // СИМВОЛ НАУКИ №1-2 / 2020. С. 20-23.
23. Абрамов А.А., Якуш Н.А. Разработка методики поверки USRP для высокоточного исследования радиосистем // Труды МАИ. 2022. № 127. DOI: 10.34759/trd-2022-127-12
24. Хвостунов Ю.С. Предложения по построению аналоговой части SDR радиоприёмных устройств декаметрового диапазона системы радиосвязи с ППРЧ // Техника средств связи. 2022. № 1 (157). С 35-44.
25. Гарин Е.Н., Копылов В.А., Сушкин И.Н. Научные разработки лабораторий военного учебного центра имени Героя России Генерала Армии В.П. Дубынина при ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» // Вестник военного образования. Июль-август 2020 №4 (25). С. 62-66.

## References

1. Galkin V.A. Fundamentals of software-configurable radio. – М.: Hotline – Telecom, 2015. – 372 p., ill.
2. Hassan Nasser, Abdelrazak Badawieh, Abdulkarim Assalem. A Survey of Software Radios: Reconfigurable Platforms, Development Tools, and Future Directions. RENSIT, 2020, 12(2):207-218; DOI: 10.17725/rensit.2020.12.207.
3. Solozobov S.A., Shevchenko V.V., Shchukin A.N. Decentralized use of the frequency resource of the decameter wave range in a complex interference environment // Communications equipment. 2020. No. 1 (149). pp. 28-36.
4. Nikolaev A.V., Medoev V.E. Implementation of the identification mechanism of a satellite communication station in a modem based on the SDR platform // INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL "SYMBOL OF SCIENCE" No. 5 / 2021. pp. 29-31.
5. Buhaiov M. V. Fast Spectrum Sensing Method for Cognitive Radio // Visnyk NTUU KPI Serii a – Radiotekhnika Radioaparaturbuduvannia, 2020, Iss. 83, pp. 41-46
6. Solozobov S.A., Shevchenko V.V., Shchukin A.N. Statistical selection of operating frequencies in the decameter wave range for various types of radio signals // Communications equipment. 2020. No. 2 (150). pp. 55-62.
7. Fokin G.A., Volgushev D.B., Kharin V.N. Using SDR technology for network positioning tasks. Formation of LTE reference signals // T-Comm: Telecommunications and transport. 2022. Volume 16. No. 5. pp. 28-47.

8. Fokin G. A., Volgushev D. B. Using SDR technology for network positioning tasks. LTE reference signal reception and processing models // Bulletin of SibGUTI. 2022. No. 3. pp. 62-83.
9. Fokin G. A., Ryutin K.E. Using SDR technology for network positioning tasks: formation of the MIB information block // "ECONOMICS AND QUALITY OF COMMUNICATION SYSTEMS" 2/2023. pp. 30-42.
10. Fokin G. A., Volgushev D. B. Using SDR technology for network positioning tasks. Procedures for receiving and processing LTE reference signals // Bulletin of SibGUTI. 2023. Vol. 17, No. 1. pp. 52-65. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65>.
11. Dvornikov S.V., Balykov A.A. Proposals for controlling the transmission rate and noise immunity of signals with permuted frequency modulation // T-Comm: Telecommunications and Transport. 2020. Volume 14. No. 6. pp. 20-26.
12. Zhukov G. A., Budko P. A., Dyachenko A. N. Increasing the speed of data exchange in the directions "coast-sea-coast" by radio paths of the decameter wave range // Control systems, communications and security. 2023. No. 2. pp. 147-174. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-2-147-174
13. Prasolov A.A. Review of the application of automatic gain control systems in radio receivers // "ECONOMICS AND QUALITY OF COMMUNICATION SYSTEMS" 1/2021. pp. 45-57.
14. Ovcharov A.A., Khokhlyuk A.A. Analysis of the bandwidth of a programmable radio station with multichannel transmission of information taking into account the spectral characteristics of intentional interference // Institute of Special Communications and Information Protection Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute East European Scientific Journal #2(66), 2021. pp. 62-71
15. Foziljonov Kh.I., Faziljanov I.R Active methods and means of information protection against leakage through channels of side electromagnetic radiation and interference // SCIENCE AND INNOVATION INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL VOLUME 2 ISSUE 4 APRIL 2023 UIF-2022: 8.2 | ISSN: 2181-3337 | SCIENTISTS.UZ Pp. 46-52.
16. Arkasov M. V., Gorbacheva I.I. Development of an SDR receiver for monitoring the long-range broadcast of aircraft landing systems // Actual problems of aviation and cosmonautics - 2021, volume 3. pp.1224-1225.
17. Bogoslovsky A.V., Razinkov S. N., Semka E. V., Buslaev A. B. Application of programmable logic integrated circuits in multichannel digital signal processing systems of satellite navigation // Bulletin of Cybernetics. 2023. Vol. 22, No. 2. pp. 13-20. DOI 10.35266/1999-7604-2023-2-13-20
18. Ryabov I.V., Tolmachev S.V. Hardware and software complex for communication in polar latitudes // Radio engineering and telecommunication systems, 2020, No. 1. pp. 62-71.
19. Ustyugov V. A., Lavresh I. I., Istomin Yu. N., Makarov P. A. On the use of SDR devices in the educational process for technical specialties of the university // Bulletin of Syktyvkar University. Ser. 1: Mathematics. Mechanics. Computer science. 2023. Issue 2 (47). pp. 56-68. [https://doi.org/10.34130/1992-2752\\_2023\\_2\\_56](https://doi.org/10.34130/1992-2752_2023_2_56)
20. Babanov I.A., Andreev R.A., Fedorov A.S. The use of software-defined radio for testing an LTE/NR network node based on specified procedures // International journal of Professional Science No. 12-2020. pp. 100-105.

21. Zhigulin V. A., Peshkov I. V., Fortunova N. A. Implementation of a software-defined radio receiver based on programmable logic integrated circuits [Electronic resource] // Ogarev-online. – 2022. – No.13. – Access mode: <https://journal.mrsu.ru/arts/realizaciya-programmno-opredelyaemogo-radiopriemnika-na-baze-programmiruemyx-logicheskix-integralnyx-sxem>
  22. Nikolaev A.V., Medoev V.E. The choice and justification of an SDR platform for the implementation of a satellite communication station modem // SYMBOL OF SCIENCE No.1-2 / 2020. pp. 20-23.
  23. Abramov A.A., Yakush N.A. Development of the USRP verification methodology for high-precision research of radio systems // Proceedings of MAI. 2022. No. 127. DOI: 10.34759/trd-2022-127-12
  24. Khvostunov Yu.S. Proposals for the construction of the analog part of the SDR radio receiver devices of the decimeter range of the radio communication system with RF // Equipment of communication means. 2022. No. 1 (157). From 35-44.
  25. Garin E.N., Kopylov V.A., Sushkin I.N. SCIENTIFIC DEVELOPMENTS OF LABORATORIES OF THE MILITARY TRAINING CENTER NAMED AFTER HERO OF RUSSIA ARMY GENERAL V.P. DUBYNIN AT THE FEDERAL STATE EDUCATIONAL INSTITUTION OF HIGHER EDUCATION "SIBERIAN FEDERAL UNIVERSITY" // Bulletin of military education. July-August 2020 No.4 (25). pp. 62-66.
-