

LibreSDR: имплементация и экспериментальная апробация проекта OpenWiFi

К. Е. Рютин, Г. А. Фокин

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича

ryutin.sut@gmail.com, grihafokin@gmail.com

Аннотация. Технология Wi-Fi долгое время успешно используется для обеспечения беспроводного широкополосного радиодоступа в домах, офисах и общественных местах, однако большинство устройств Wi-Fi имеют закрытую программно-аппаратную реализацию, что усложняет их использование на объектах с критически важной инфраструктурой. Решением описанной проблемы может стать OpenWiFi – проект с открытым исходным кодом, реализующий стек протоколов семейства стандартов IEEE 802.11 на базе платформ программно-конфигурируемого радио. В результате данного исследования была успешно выполнена имплементация и экспериментальная апробация проекта OpenWiFi на доступной платформе LibreSDR.

Ключевые слова: LibreSDR; OpenWiFi; SDR; Wi-Fi; экспериментальная апробация

I. ВВЕДЕНИЕ

Технология Wi-Fi долгое время успешно используется в задачах организации сетей беспроводного широкополосного доступа внутри помещений и в общественных местах. Однако, подавляющее большинство представленных на рынке точек доступа (ТД, AP – Access Point) Wi-Fi имеют закрытую программно-аппаратную реализацию, что делает невозможным изменение функционала ТД на физическом уровне для решения нестандартных частных задач. Вместе с этим, с точки зрения информационной безопасности, закрытая реализация существенно затрудняет применение технологии Wi-Fi на территории промышленных объектов с критически важной инфраструктурой. Иной подход к реализации устройств Wi-Fi связан с использованием технологии программно-конфигурируемого радио (ПКР, SDR – Software-Defined Radio), которая зарекомендовала себя в задачах прототипирования систем беспроводной связи и навигации. Решение таких задач средствами SDR отражено в ряде работ отечественных [1]–[7] и зарубежных [8]–[17] авторов. На данный момент, разработчики и исследователи по всему миру используют инструментальной среды MATLAB [18] для макетирования систем беспроводной связи стандартов LTE (Long-Term Evolution) [19], 5G [20] и Wi-Fi [21] средствами SDR. В частности, пакет расширения WLAN Toolbox среды MATLAB позволяет разрабатывать и апробировать формирователи и анализаторы сигналов Wi-Fi с гибко-настраиваемыми параметрами. Однако, недостаточное быстродействие программ на MATLAB, не позволяет использовать данную среду за рамками этапа лабораторного макетирования. Одним из путей решения описанной проблемы является использование проекта с открытым исходным кодом OpenWiFi [22],

реализующего стек протоколов семейства стандартов IEEE 802.11 [23] на базе SDR-платформ. Далее будет описана имплементация и экспериментальная апробация проекта OpenWiFi на доступной по стоимости платформе LibreSDR [24].

II. ОПИСАНИЕ ПРОЕКТА OPENWiFi

Архитектура проекта OpenWiFi разделена на три основных функциональных модуля: 1) службы и приложения пространства пользователя; 2) службы и драйверы пространства ядра операционной системы (ОС) Linux; 3) аппаратное обеспечение SDR-платформы. Архитектура проекта OpenWiFi показана на рис. 1. Ниже приведено описание всех основных составляющих проекта OpenWiFi во всех функциональных модулях, включая системные службы, низкоуровневые драйверы устройств и модули, реализованные в ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема).

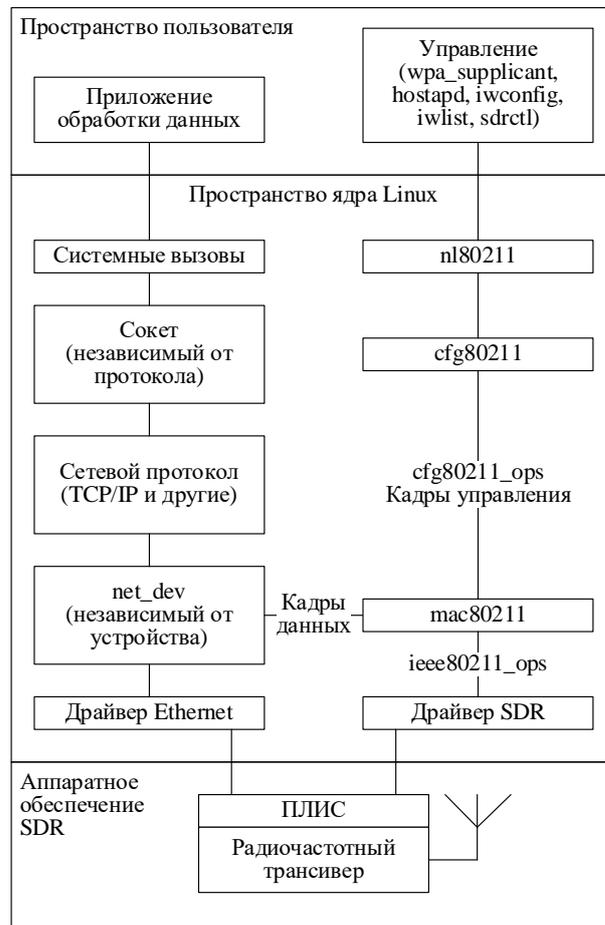


Рис. 1. Архитектура проекта OpenWiFi

Первые два функциональных модуля представлены в репозитории openwifi [25], а третий – в репозитории openwifi-hw [26]. На ПЛИС реализованы HDL (Hardware Description Language) модули конфигурации радиочастотного трансивера, HDL-модули реализации ортогонального частотного мультиплексирования OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), а также межсоединения интерфейсов процессорной системы и модулей в ПЛИС. В пространстве ядра ОС Linux реализованы низкоуровневые драйверы SDR-платформы и драйвер интерфейса Ethernet. Драйвер SDR-платформы взаимодействует со службой управления доступом к среде mac80211 (MAC – Medium Access Control). Драйвер интерфейса Ethernet взаимодействует с сетевыми протоколами и сокетами через службу net_dev, которая получает кадры данных от mac80211. Стандартным механизмом ядра ОС Linux являются системные вызовы – это интерфейсы, через которые компоненты OpenWiFi взаимодействуют с ОС для управления низкоуровневыми ресурсами. Управляющие кадры передаются от mac80211 к подсистеме cfg80211, предоставляющей интерфейс для настройки и стандартизированного управления беспроводными устройствами Wi-Fi. Для взаимодействия между пользовательскими приложениями и драйвером SDR-платформы используется интерфейс nl80211. В пределах пространства пользователя функционируют приложения обработки данных беспроводной сети Wi-Fi и следующие управляющие службы: 1) wpa_supplicant отвечает за аутентификацию и протоколы безопасности беспроводных соединений; 2) hostapd отвечает за создание и управление ТД Wi-Fi через интерфейс nl80211; 3) iwconfig отвечает за ручную конфигурацию параметров беспроводных интерфейсов, созданных через net_dev; 4) iwlist отвечает за получение детальной информации о беспроводных интерфейсах, созданных через net_dev; 5) sdrctl отвечает за управление параметрами SDR-платформы на физическом уровне, такими как центральная частота, ширина канала и усиление.

На данный момент проектом OpenWiFi официально поддерживаются платформы, по аппаратной реализации схожие с LibreSDR. Таким образом, имплементация проекта OpenWiFi на платформу LibreSDR заключалась в изменении файлов аппаратных ограничений (XDC – Xilinx Design Constraints) и дерева устройств Linux в соответствии со схмотехникой платформы LibreSDR.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ

Стенд экспериментальной апробации проекта OpenWiFi на платформе LibreSDR включал в себя: 1) ноутбук, с которого осуществляется доступ в удалённый терминал встроенной ОС LibreSDR с последующей конфигурацией и запуском ТД Wi-Fi; 2) платформу LibreSDR, на которой запускается функционал ТД, реализованный в проекте OpenWiFi; 3) смартфон Xiaomi Redmi Note 10S [27], который подключается к ТД Wi-Fi и является клиентским устройством по отношению к ней; 4) USB-кабель для подачи питания на LibreSDR с USB-порта ноутбука; 5) Ethernet-патчкорд для доступа в удалённый терминал встроенной ОС LibreSDR с ноутбука; 6) 4 всенаправленные антенны на 2 приёмных и 2 передающих канала LibreSDR. Стенд экспериментальной апробации проекта OpenWiFi на платформе LibreSDR приведён на рис. 2.

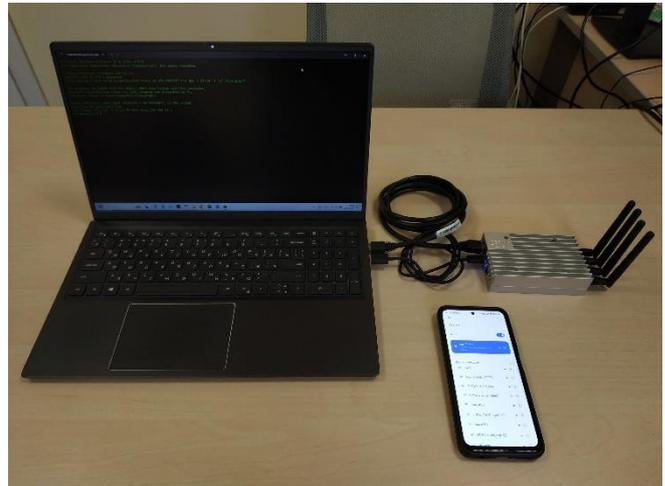


Рис. 2. Стенд экспериментальной апробации проекта OpenWiFi

Экспериментальная апробация проекта OpenWiFi на платформе LibreSDR проводилась в следующем порядке: 1) подключение LibreSDR к ноутбуку с помощью USB-кабеля и Ethernet-патчкорда; 2) подключение к удалённому терминалу встроенной ОС LibreSDR по протоколу SSH (Secure Shell) с помощью ноутбука; 3) выполнение сценариев командной оболочки bash для конфигурации и запуска ТД Wi-Fi в терминале LibreSDR; 4) подключение к ТД Wi-Fi с помощью смартфона; 5) анализ сообщений терминала LibreSDR в момент подключения клиентского устройства к ТД Wi-Fi; 6) анализ основных параметров ТД Wi-Fi на стороне смартфона с помощью мобильного приложения Netmonitor [28]; 7) визит на информационную страницу проекта OpenWiFi, размещённую веб-сервером на борту LibreSDR, с помощью смартфона.

После подключения к удалённому терминалу встроенной ОС LibreSDR по SSH и выполнения bash-скриптов конфигурации и запуска ТД Wi-Fi, терминал LibreSDR информирует об успехе запуска и выводит сконфигурированные MAC-адрес (BSSID – Basic Service Set Identifier) и SSID (Service Set Identifier). MAC-адрес ТД Wi-Fi имеет значение «66:55:44:33:22:79» (hwaddr), а SSID имеет значение «openwifi». Инициализация и запуск ТД Wi-Fi в терминале LibreSDR показаны на рис. 3.

Идентификатор SSID запущенной ТД Wi-Fi виден в списке доступных сетей в окне настроек смартфона. Следовательно, можно сделать вывод, что LibreSDR корректно формирует и передаёт сигналы стандарта IEEE 802.11, в частности, кадры системной информации Beacon. После выбора сети «openwifi» и ввода пароля, происходит успешное подключение к ТД Wi-Fi. Скриншот окна настроек смартфона с подключением к ТД Wi-Fi приведён на рис. 4. На момент проведения данного исследования, не была настроена маршрутизация на стороне ноутбука для раздачи с него доступа в Интернет на LibreSDR, однако сохраняется возможность подключения клиентского устройства (в данном случае, смартфона) к размещённому на LibreSDR веб-серверу.

```
sdr0: interface state UNINITIALIZED->COUNTRY_UPDATE
Using interface sdr0 with hwaddr 66:55:44:33:22:79 and ssid "openwifi"
sdr0: interface state COUNTRY_UPDATE->ENABLED
sdr0: AP-ENABLED
root@analog:~/openwifi#
```

Рис. 3. Инициализация и запуск ТД Wi-Fi в терминале LibreSDR

Wi-Fi

Wi-Fi

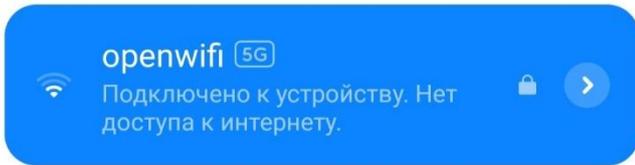


Рис. 4. Скриншот окна настроек смартфона с подключением к ТД

После подключения смартфона к ТД Wi-Fi, терминал LibreSDR информирует об успешности выполнения процедур аутентификации, авторизации и аккаунтинга подключённого клиентского устройства с MAC-адресом «b8:94:e7:61:a5:10». Сообщения о подключении устройства в терминале LibreSDR показаны на рис. 5. Данный MAC-адрес соответствует фактическому MAC-адресу подключённого смартфона. При этом, IP-адрес «192.168.13.8» был выдан смартфону DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) сервером, функционирующем на LibreSDR. Скриншот окна настроек смартфона с IP- и MAC-адресами приведён на рис. 6. Далее, основные параметры ТД Wi-Fi были проанализированы на стороне подключённого смартфона с помощью мобильного приложения Netmonitor: 1) уровень принимаемого от ТД Wi-Fi сигнала при непосредственной близости смартфона к LibreSDR равен -65 дБм; 2) SSID корректно отображает сконфигурированный SSID ТД «openwifi» (параметр Name); 3) центральная частота и частотный диапазон ТД Wi-Fi равны 5180 МГц и 5 ГГц, соответственно (параметр Frequency); 4) частотный канал ТД Wi-Fi равен 36, что соответствует центральной частоте 5180 МГц (параметр Channel); 5) MAC-адрес ТД Wi-Fi соответствует сконфигурированному на стороне LibreSDR (рис. 2) MAC-адресу (параметр MAC address); 6) IP-адрес клиентского устройства соответствует IP-адресу, выданному смартфону DHCP-сервером (рис. 5) на борту LibreSDR (параметр IP address); 7) скорость соединения смартфона с ТД Wi-Fi равна 65 Мбит/с (параметр Link speed); 8) примерное расстояние между смартфоном и ТД Wi-Fi равно 8 м (параметр Distance). Скриншот экрана смартфона с параметрами ТД в Netmonitor приведён на рис. 7.

Затем, для проверки корректности работы ТД Wi-Fi в целом, был совершён визит на информационную страницу проекта OpenWiFi, размещённую веб-сервером на борту LibreSDR, с помощью смартфона. Скриншот экрана смартфона с информационной страницей показан на рис. 8. При отключении клиентского устройства от ТД Wi-Fi, терминал LibreSDR информирует пользователя об этом событии соответствующим сообщением. Сообщение об отключении устройства в терминале LibreSDR приведено на рис. 9.

```
root@analog:~/openwifi# sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 IEEE 802.11: authenticated
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 IEEE 802.11: associated (aid 1)
sdr0: AP-STA-CONNECTED b8:94:e7:61:a5:10
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 RADIUS: starting accounting session 4615756849978399
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 WPA: pairwise key handshake completed (WPA)
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 WPA: group key handshake completed (WPA)
```

Рис. 5. Сообщения о подключении устройства в терминале LibreSDR

ИДЕНТИФИКАТОРЫ УСТРОЙСТВА

IP-адрес

fe80::ad66:7389:caa2:8e2d
192.168.13.8

MAC-адрес Wi-Fi устройства

b8:94:e7:61:a5:10

Рис. 6. Скриншот окна настроек смартфона с IP- и MAC-адресами

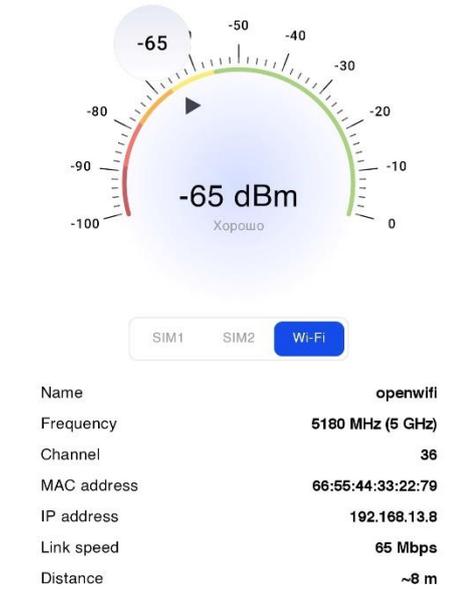


Рис. 7. Скриншот экрана смартфона с параметрами ТД в Netmonitor

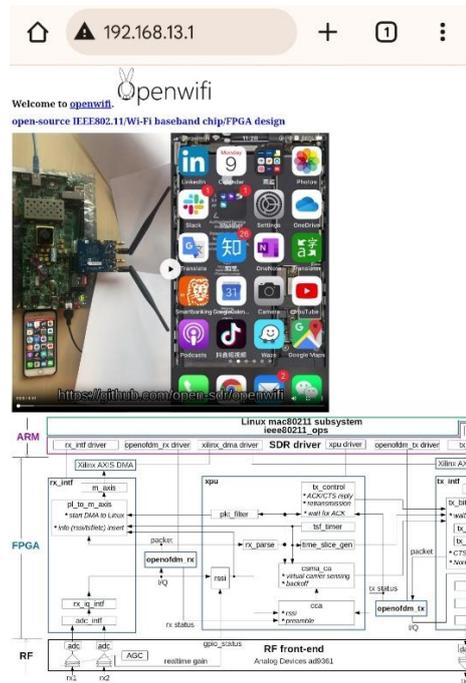


Рис. 8. Скриншот экрана смартфона с информационной страницей

```
sdr0: AP-STA-CONNECTED b8:94:e7:61:a5:10
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 RADIUS: starting accounting session 63E1E96C62187AA9
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 WPA: pairwise key handshake completed (WPA)
sdr0: STA b8:94:e7:61:a5:10 WPA: group key handshake completed (WPA)
sdr0: AP-STA-DISCONNECTED b8:94:e7:61:a5:10
root@analog:~/openwifi#
```

Рис. 9. Сообщение об отключении устройства в терминале LibreSDR

Результат проведённой экспериментальной апробации подтвердил корректность имплементации проекта OpenWiFi на аппаратную платформу LibreSDR.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты исследования позволяют говорить о возможности применения LibreSDR в задачах организации беспроводного широкополосного радиодоступа с использованием технологии Wi-Fi на территории промышленных объектов с повышенными требованиями к информационной безопасности. Вместе с этим, результаты данной работы дают перспективу применения LibreSDR с функционирующим на ней проектом OpenWiFi в задачах построения систем радионавигации с использованием технологии Wi-Fi. С учётом открытого исходного кода проекта OpenWiFi, возможна его модификация под нужды конкретной задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Оценка и компенсация погрешности синхронизации базовых станций при позиционировании пользовательских устройств // Экономика и качество систем связи. 2024. № 3(33). С. 87-96. EDN LEEING.
- [2] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Использование SDR- технологии для задач сетевого позиционирования: реализация канала передачи и приема навигационных данных // Экономика и качество систем связи. 2024. № 2(32). С. 78-88. EDN KMGIWU.
- [3] Фокин Г.А., Григорьев В.А., Рютин К.Е. [и др.] Технология сетевого позиционирования LTE часть 4 SDR-демонстратор в полевых условиях // Первая миля. 2023. № 4(112). С. 34-41. DOI 10.22184/2070-8963.2023.112.4.34.41. EDN ZUWKTT.
- [4] Фокин Г.А., Григорьев В.А., Рютин К.Е. Технология сетевого позиционирования LTE. Часть 3 SDR-демонстратор в лабораторных условиях // Первая миля. 2023. № 3(111). С. 72-80. DOI 10.22184/2070-8963.2023.111.3.72.78. EDN LSYUSJ.
- [5] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования: формирование информационного блока MIB // Экономика и качество систем связи. 2023. № 2(28). С. 30-42. EDN VUHHPF.
- [6] Рютин К.Е., Фокин Г.А. Использование SDR-технологии для экспериментальной апробации передачи данных по стандарту LTE // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2024): Материалы XIII Международной научно-технической и научно-методической конференции. В 4-х томах, Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2024 года. С. 405-409. EDN HXBVFE.
- [7] Рютин К.Е. Разработка демонстратора формирователя опорных сигналов стандарта LTE // Студенческая весна - 2022: 76-я Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 24–25 мая 2022 года. С. 29-34. EDN QBYTGN.
- [8] C. Diouf, G.J.M. Janssen, H. Dun, T. Kazaz, C.C.J.M. Tiberius. A USRP-Based Testbed for Wideband Ranging and Positioning Signal Acquisition // in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021. Vol. 70. P. 1-15.
- [9] H. Yan, S. Hanna, K. Balke, R. Gupta, D. Cabric. Software Defined Radio Implementation of Carrier and Timing Synchronization for Distributed Arrays // 2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2019. P. 1-12.
- [10] C. Diouf, G.J.M. Janssen, T. Kazaz, H. Dun, F. Chamanzadeh, C.C.J.M. Tiberius. A 400 Msps SDR platform for prototyping accurate wideband ranging techniques // 2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC). Bremen, Germany, 2019. P. 1-6.
- [11] S. Prager, M.S. Haynes, M. Moghaddam. Wireless Subnanosecond RF Synchronization for Distributed Ultrawideband Software-Defined Radar Networks // in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020. Vol. 68. № 11. P. 4787-4804.
- [12] S. Prager, T. Thirivikraman, M. Haynes, J. Stang, D. Hawkins, M. Moghaddam. Ultrawideband synthesis for high-range resolution software defined radar // 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18). Oklahoma City, OK, USA, 2018. P. 1089-1094.
- [13] J.A. Peral-Rosado [et al]. Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems // in Proceedings of 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2013. P. 5610.
- [14] T.F. Collins, R. Getz, D. Pu, A.M. Wyglinski. Software-defined radio for engineers. Artech House, 2018.
- [15] R.W. Stewart, K.W. Barlee, D.S.W. Atkinson, L.H. Crockett. Software defined radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. Strathclyde Academic Media, 2015.
- [16] J. M. Reylund. Software Defined Radio: Theory and Practice. . Artech House, 2024.
- [17] C.R. Johnson, Jr., W.A. Sethares, A.G. Klein. Software Receiver Design: Build Your Own Digital Communication System in Five Easy Steps. Cambridge University Press, 2011.
- [18] MATLAB. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html> (Дата обращения 10.02.2025).
- [19] LTE Toolbox. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> (Дата обращения 10.02.2025).
- [20] 5G Toolbox. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (Дата обращения 10.02.2025).
- [21] WLAN Toolbox. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/wlan.html> (Дата обращения 10.02.2025).
- [22] OpenWiFi: An industry movement for accelerating Wi-Fi infrastructure innovation. [Электронный ресурс]. URL: <https://telecominfraproject.com/openwifi/> (Дата обращения 10.02.2025).
- [23] IEEE 802.11, The Working Group Setting the Standards for Wireless LANs. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ieee802.org/11/> (Дата обращения 10.02.2025).
- [24] Фокин Г.А., Рютин К.Е. Экспериментальная апробация SDR-платформы LibreSDR // Научно-техническая конференция Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А.С. Попова, посвященная Дню радио. 2024. № 1(79). С. 174-177. EDN SKWRVY.
- [25] openwifi. [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/open-sdr/openwifi> (Дата обращения 10.02.2025).
- [26] openwifi-hw [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/open-sdr/openwifi-hw> (Дата обращения 10.02.2025).
- [27] Xiaomi Redmi Note 10S. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mi.com/ru/product/redmi-note-10s/> (Дата обращения 10.02.2025).
- [28] Netmonitor: 5G, Cell & WiFi. [Электронный ресурс]. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonito&hl=en> (Дата обращения 10.02.2025).