

Экспериментальная апробация SDR-платформы LibreSDR

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. На сегодняшний день прототипирование и апробация большинства технических решений в области радиосвязи и радиотехнического позиционирования основано на применении технологии программно-конфигурируемого радио SDR (Software Defined Radio). Однако широкое использование популярных и хорошо зарекомендовавших себя SDR-платформ, таких как USRP (Universal Software Radio Peripheral), LimeSDR и AD-FMCOMMS, по-прежнему затруднено из-за их высокой стоимости и низкой доступности. Одним из решений, способных популяризировать технологию SDR, и сделать её более доступной для академического и научного сообщества, является использование недавно появившейся на рынке недорогой SDR-платформы LibreSDR. Данная работа посвящена экспериментальной проверке процедур передачи и приёма опорных сигналов стандарта LTE с использованием LibreSDR. Проведённый эксперимент показал, что LibreSDR не уступает по характеристикам и возможностям известным и апробированным SDR-платам USRP. Результаты апробации позволяют говорить о широких перспективах использования LibreSDR в академической и образовательной среде молодыми учёными и студентами при разработке и верификации систем радиосвязи и позиционирования средствами SDR.

Ключевые слова: LibreSDR; LTE; SDR; программно-конфигурируемое радио; экспериментальная апробация

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние два десятилетия исследования в области беспроводных телекоммуникаций доказали эффективность использования технологии программно-конфигурируемого радио SDR (Software Defined Radio) при разработке, прототипировании и экспериментальной апробации систем подвижной радиосвязи [1]–[6] и позиционирования [7]–[17]. В области разработки систем радиосвязи применение программно-конфигурируемого радио предлагает множество преимуществ [18]–[21]. Гибкость программных и аппаратных средств технологии SDR позволяет разработчикам оперативно настраивать и адаптировать радиосистемы, благодаря чему устройства радиосвязи могут более эффективно использовать спектр, изменяя параметры передачи и приёма в режиме реального времени.

Несмотря на распространение технологии SDR при прототипировании и экспериментальной апробации систем радиосвязи и радионавигации [1]–[21], их распространение в академическом и научном сообществе по-прежнему затруднено из-за высокой стоимости и низкой доступности хорошо зарекомендовавших себя SDR плат, таких как USRP (Universal Software Radio

Peripheral) B210 [22], N210 [23], LimeSDR [24], AD-FMCOMMS [25] и ADALM-PLUTO [26].

Альтернативой перечисленным является недавно появившаяся на рынке SDR-платформа LibreSDR. В данном исследовании приводятся основные характеристики, ключевые компоненты, особенности работы и экспериментальная апробация SDR-платформы LibreSDR при передаче и приеме опорных сигналов на физическом уровне LTE согласно 3GPP TS 36.211[27].

Материал статьи организован следующим образом. В разделе II представлены характеристики LibreSDR. В разделе III описывается экспериментальная проверка данной платы в лабораторных условиях. В заключении IV сформулированы выводы.

II. ХАРАКТЕРИСТИКИ LIBRESDR

Плата LibreSDR появилась в продаже около года назад и позиционируется, как аналог популярного SDR-модуля ADALM-PLUTO (или PlutoSDR) [25], предназначенного для обучения. LibreSDR выполнена в металлическом корпусе, изготовленном на ЧПУ-станке (числовое программное управление) для более эффективного рассеивания тепла и прочности. Внешний вид платформы LibreSDR и её габаритные размеры приведены на рис. 1 и рис. 2, соответственно.



Рис. 1. Внешний вид платформы LibreSDR

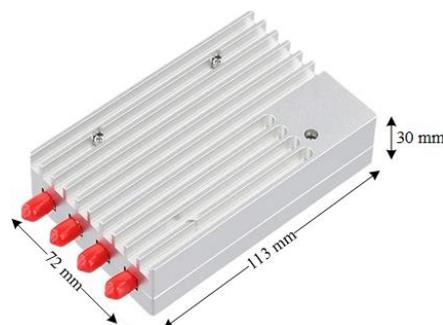


Рис. 2. Габаритные размеры платформы LibreSDR

LibreSDR спроектирована на 10-слойной печатной плате, её внешний вид с лицевой и тыльной стороны приведён на рис. 3. Для снижения стоимости на выходе цифровой микросхемы ФАПЧ (фазовая автоподстройка частоты) используется 8-битная микросхема ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь). На плате LibreSDR присутствуют следующие разъёмы (рис. 4): 1) два коаксиальных разъёма MMCX (Female) для интерфейсов синхронизации 1 PPS и 10 МГц; 2) разъём RJ-45 для интерфейса Gigabit Ethernet, по которому осуществляется передача IQ составляющих сигнала и доступ в консоль встроенной операционной системы (ОС) Linux; 3) два разъёма USB Type-C (OTG и Debug); разъём OTG (On-The-Go) предназначен для доступа в консоль встроенной Linux по последовательному порту, а разъём Debug предназначен для отладки и загрузки встроенного (firmware) программного обеспечения (ПО) средствами Xilinx по интерфейсу JTAG; оба разъёма также используются для подачи питания на LibreSDR; 4) разъём для microSD карты памяти, с которой загружается образ встроенного ПО; 5) четыре коаксиальных разъёма SMA (Female) для двух приёмных и двух передающих каналов.



Рис. 3. Печатная плата платформы LibreSDR



Рис. 4. Внешние разъёмы платформы LibreSDR

На устройстве также присутствует скрытая кнопка DFU (Device Firmware Update), предназначенная для восстановления заводского встроенного ПО. В LibreSDR и PlutoSDR интегрирован радиочастотный трансивер AD9363 [28] производства Analog Devices, однако производитель LibreSDR заявляет, что, в данном случае, он сконфигурирован, как превосходящий по характеристикам трансивер AD9361 [29]. Основные характеристики микросхем радиочастотных трансиверов AD9361 и AD9363 приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА I. ХАРАКТЕРИСТИКИ AD9361 И AD9363

	AD9361	AD9363
Кол-во каналов	2 TX, 2 RX	2 TX, 2 RX
Разрядность ЦАП/АЦП	12 бит	12 бит
Несущие частоты TX	От 47 МГц до 6.0 ГГц	От 325 МГц до 3.8 ГГц
Несущие частоты RX	От 70 МГц до 6.0 ГГц	От 325 МГц до 3.8 ГГц
Поддержка дуплексов	TDD и FDD	TDD и FDD
Полоса пропускания	От 200 кГц до 56 МГц	От 200 кГц до 20 МГц

В отличие от модуля PlutoSDR, основным вычислительным элементом которого является система на кристалле (SoC – System on Chip) Zynq Z-7010 [30] (номенклатурный номер – XC7Z010), в LibreSDR интегрирована более производительная SoC Zynq Z-7020 (номенклатурный номер – XC7Z020). Данные SoC комбинируют два аппаратных ядра ARM Cortex A9 (с тактовой частотой до 1 ГГц) с архитектурой ПЛИС семейства Artix-7 [31]. Ядра данных микропроцессоров могут использоваться для запуска приложений, которые работают под управлением ОС Linux. Основные характеристики микросхем SoC XC7Z010 и XC7Z020 приведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА II. ХАРАКТЕРИСТИКИ SoC XC7Z010 И XC7Z020

	XC7Z010	XC7Z020
Семейство ПЛИС	Artix-7	Artix-7
Кол-во логических ячеек	28000	85000
Кол-во таблиц поиска (LUT)	17600	53200
Кол-во регистров-защёлок	35200	106400
Объём памяти, Мбит	2.1	4.9
Кол-во блоков DSP	80	220

Таким образом, использование SoC Zynq Z-7020 в LibreSDR является более перспективным решением в части разработки собственного HDL-описания устройств беспроводной связи, по сравнению с использованием SoC Zynq Z-7010 в PlutoSDR. Учитывая стоимость LibreSDR (на момент проведения данного исследования она составляет примерно \$300) и вышеприведённые преимущества, выбор этой платформы оказывается более предпочтительным для академического и научно-исследовательского сообщества.

III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ LIBRESDR

Экспериментальная апробация LibreSDR была выполнена в MATLAB и состояла из двух частей: 1) передача и приём опорных сигналов стандарта LTE в лабораторных условиях, где передатчиком и приёмником выступали две платы LibreSDR; 2) приём сигнала стандарта LTE от операторской базовой станции стандарта LTE (eNB) на известной частоте. Фото экспериментального стенда представлено на рис. 5. Слева на рис. 5 расположен передатчик сигналов LTE, включающий в себя ноутбук, на котором выполняется MATLAB-программа, реализующая функционал формирователя сигналов на нулевой частоте; к ноутбуку подключена LibreSDR, передающая сформированные сигналы в эфир. Справа на рис. 5 расположен приёмник сигналов LTE, так же включающий в себя ноутбук с подключенной к нему LibreSDR. MATLAB-программа на приеме инициализирует LibreSDR, получает от неё IQ-отсчёты сигнала и вычисляет корреляции по первичному и вторичному сигналам синхронизации (PSS – Primary Synchronization Signal и SSS – Secondary Synchronization Signal) для определения Cell ID.

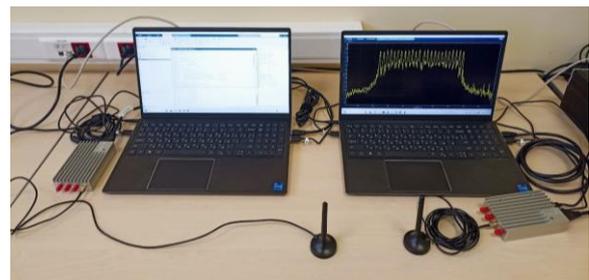


Рис. 5. Экспериментальный стенд

А. Передача и приём сигнала LTE с помощью LibreSDR

В данном эксперименте на стороне передатчика формировались сигналы синхронизации PSS/SSS и опорные сигналы сот CRS (Cell-Specific Reference Signal). Параметры на передаче и приёме были следующими: 1) несущая частота составляла 5 ГГц (для проверки корректности конфигурации трансивера AD9363 аналогично трансиверу AD9361); 2) полоса частот составляла 20 МГц; 3) частота дискретизации составляла 30.72 МГц; 4) параметр Cell ID был инициализирован значением 377.

Проверка корректности работы системы осуществлялась по совпадению Cell ID, инициализированного на стороне передатчика и Cell ID, вычисленного на основе корреляций по сигналам PSS/SSS на стороне приёмника. После передачи и приёма сигнала LTE из эфира был построен спектр на рис. 6. После синхронизации LTE-кадров и вычисления корреляций по PSS и SSS на стороне приёмника был получен Cell ID, совпадающий с установленным на стороне передатчика на рис. 7. Так как, на стороне передатчика не формировался главный блок служебной информации MIB (Master Information Block), на стороне приёмника не была корректно извлечена полоса передаваемого сигнала: параметр NRBDL на рис. 7.

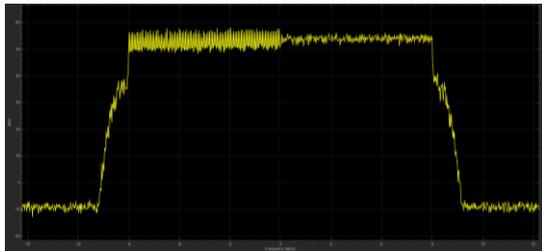


Рис. 6. Спектр сигнала, полученного от платформы LibreSDR

```
Performing cell search...
Timing offset to frame start: 3095 samples
Cell-wide settings after cell search:
  NDLRB: 6
  DuplexMode: 'FDD'
  CyclicPrefix: 'Normal'
  NCellID: 377
  NSubframe: 0

Performing frequency offset estimation...
Frequency offset: 492.469Hz
```

Рис. 7. Параметры передатчика LibreSDR, полученные после приёма

В. Приём сигнала LTE от операторской eNB

В данном эксперименте осуществлялся приём операторской eNB, определённой с помощью мобильного приложения Netmonitor [32]. Данное приложение отображает основные параметры eNB, к которой подключен данный UE (рис. 8).



Рис. 8. Скриншот приложения Netmonitor

Самыми важными параметрами в рамках данного эксперимента являются следующие: абсолютный номер частотного канала EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number), номер частотного бэнда, полоса сигнала, режим дуплекса и физический идентификатор соты PCI (Physical Cell ID).

Зная EARFCN $N_{DL} = 38100$ и номер частотного бэнда (в данном случае, он равен 38), нетрудно вычислить несущую частоту F_{DL} в МГц, на которой вещает операторская eNB по формуле (1).

$$F_{DL} = F_{DL_Low} + 0.1 \times (N_{DL} - N_{DL_Offset}) = 2605 \text{ МГц}, \quad (1)$$

где $F_{DL_Low} = 2570$ МГц является нижней частотой данного бэнда, а $N_{DL_Offset} = 37750$ является смещением, используемым для расчета EARFCN в нисходящей линии связи. Оба этих параметра определяются в 3GPP TS 36.104 [33]. После приёма из эфира LTE-сигнала от операторской eNB был построен спектр на рис. 9.

После синхронизации кадров LTE и вычисления корреляций по PSS и SSS на стороне приёмника был получен Cell ID, совпадающий отображённым в программе Netmonitor на рис. 10. В этом случае MATLAB-программой на стороне приёмника также был декодирован информационный блок MIB, параметры которого совпадают с отображённым в программе Netmonitor.

Таким образом, оба эксперимента подтверждают корректную работу LibreSDR при передаче и приёме сигнала стандарта LTE.

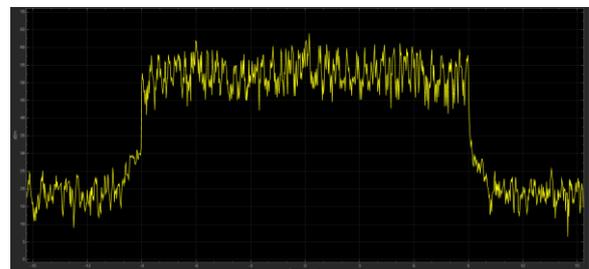


Рис. 9. Спектр сигнала, полученного от операторской eNB

```
Resampling from 30.720Ms/s to 1.920Ms/s for cell search / MIB decoding...

Performing cell search...
Timing offset to frame start: 1411 samples
Cell-wide settings after cell search:
  NDLRB: 6
  DuplexMode: 'TDD'
  CyclicPrefix: 'Normal'
  NCellID: 220
  NSubframe: 0

Performing frequency offset estimation...
Frequency offset: 5929.836Hz
Performing OFDM demodulation...

Performing MIB decoding...
Cell-wide settings after MIB decoding:
  NDLRB: 100
  DuplexMode: 'TDD'
  CyclicPrefix: 'Normal'
  NCellID: 220
  NSubframe: 0
  TDDConfig: 0
  SSC: 0
  CellRefP: 4
  PHICHDuration: 'Normal'
  Ng: 'One'
  NFrame: 783
```

Рис. 10. Параметры операторской eNB, полученные после приёма

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была экспериментально апробирована недавно появившаяся на рынке SDR-плата LibreSDR. Результаты эксперимента показали, что плата LibreSDR не уступает по функциям и возможностям более известным SDR-платформам, таким как USRP, LimeSDR и AD-FMCOMMS, имея при этом более низкую стоимость.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Фокин Г.А., Буланов Д.В., Волгушев Д.Б. Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР // Вестник связи. 2015. № 6. С. 26-30.
- [2] Фокин Г.А., Лаврухин В.А., Волгушев Д.А., Киреев А.В. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 2 (60). С. 94-99.
- [3] Волгушев Д.Б., Киреев А.В., Фокин Г.А. Модельно-ориентированный синтез систем радиосвязи на основе программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. 2015. С. 50-53.
- [4] Фокин Г.А., Лаврухин В.А., Волгушев Д.А., Киреев А.В. Практическая реализация приемопередатчика ОФМ-2 на SDR платформе Ettus B210 в среде GNU Radio // Информационные технологии моделирования и управления. 2016. Т. 99. № 3. С. 178-187.
- [5] Лаврухин В.А., Фокин Г.А. Разработка LPD-приемопередатчика с поддержкой MIMO на основе программно-конфигурируемого радио в приложении к управлению роботом // Extreme Robotics. 2016. Т. 1. № 1. С. 119-128.
- [6] Fokin G., Volgushev D., Kireev A., Bulanov D. and Lavrukhin V. Designing the MIMO SDR-based LPD transceiver for long-range robot control applications // 2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), St. Petersburg, Russia, 06-08 October 2014. pp. 456-461.
- [7] Борисов Е.Г., Машков Г.М., Фокин Г.А. Экспериментальный стенд оценки точности позиционирования на основе программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции. 2016. С. 120-125.
- [8] Mashkov G., Borisov E. and Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed // 2017 19th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang, Korea (South), 19-22 February 2017. pp. 979-984.
- [9] Mashkov G., Borisov E. and Fokin G. Positioning accuracy experimental evaluation in SDR-based MLAT with joint processing of range measurements // 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), Jakarta, Indonesia, 03-05 October 2016. pp. 7-12.
- [10] Mashkov G., Borisov E. and Fokin G. Experimental validation of multipoint joint processing of range measurements via software-defined radio testbed // 2016 18th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang, Korea (South), 31 January 2016 - 03 February 2016. pp. 268-273.
- [11] Ryutin K.E. and Fokin G.A. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. MIB Transceiver Development // 2023 Seminar on Signal Processing, Saint Petersburg, Russian Federation, 22-22 November 2023. pp. 115-119.
- [12] Fokin G., Volgushev D., Grigoriev V. Ryutin K. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Field Experiment Demonstrator // 2023 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, Russian Federation, 15-17 November 2023. pp. 1-6.
- [13] Fokin G., Ryutin K., Grigoriev V. and Bobrovskiy V. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Synchronization Subsystem // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO, Pskov, Russian Federation, 28-30 June 2023. pp. 1-6.
- [14] Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Receiver Processing Procedures // 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, Moscow, Russian Federation, 14-16 March 2023. pp. 1-7.
- [15] Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Transmitter Development // 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Sofia, Bulgaria, 06-09 June 2022. pp. 153-158.
- [16] Fokin G., Volgushev D. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Problem Statement // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on-Board Communications, Moscow, Russian Federation, 15-17 March 2022. pp. 1-6.
- [17] Volgushev D., Fokin G. Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Receiver Development // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, Russian Federation, 2022. pp. 1-6.
- [18] Collins T.F., Getz R., Pu D., Wyglinski A.M. Software-defined radio for engineers. Artech House, 2018.
- [19] Stewart R.W., Barlee K.W., Atkinson D.S.W., Crockett L.H. Software defined radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. Strathclyde Academic Media, 2015.
- [20] Reyland J.M. Software Defined Radio: Theory and Practice. Artech House, 2024.
- [21] Johnson C.R., Sethares W.A., Klein A.G. Software Receiver Design: Build Your Own Digital Communication System in Five Easy Steps. Cambridge University Press, 2011.
- [22] USRP B210. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ettus.com/all-products/ub210-kit/> (Дата обращения 25.02.2024).
- [23] USRP-2932. [Электронный ресурс] URL: <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/usrp-2932-specs/page/specs.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [24] LimeSDR. [Электронный ресурс]. URL: <https://limemicro.com/products/boards/limesdr/> (Дата обращения 25.02.2024).
- [25] AD-FMCOMMS3-EBZ Evaluation Board. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/eval-ad-fmcomms3-ebz.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [26] ADALM-PLUTO Evaluation Board. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/resources/evaluation-hardware-and-software/evaluation-boards-kits/adalm-pluto.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [27] 3GPP TS 36.211. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. V17.0.0, 2021-12.
- [28] AD9363 Datasheet and Product Info. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9363.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [29] AD9361 Datasheet and Product Info. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.analog.com/en/products/ad9361.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [30] Zynq 7000 SoC. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/soc/zynq-7000.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [31] Artix 7 FPGA Family. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.xilinx.com/products/silicon-devices/fpga/artix-7.html> (Дата обращения 25.02.2024).
- [32] Netmonitor: Cell & WiFi. [Электронный ресурс]. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.parizene.netmonitor> (Дата обращения 25.02.2024).
- [33] 3GPP TS 36.104 V18.4.0 (2023-12) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 18).