

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМНИКА SDR В СРЕДЕ MATLAB И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ALTERA DE2-115

А.А. Амджад

amjadali.ad2014@gmail.com

SPIN-код: 9332-4505

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Программно-определяемая радиосистема (Software-defined radio — SDR) представляет собой программируемый приемопередатчик, обладающий возможностью работы с различными протоколами беспроводной связи без необходимости изменения или обновления аппаратного обеспечения. Прогресс в области SDR привел к эскалации разработки протоколов и широкому спектру приложений с большим акцентом на программируемость, гибкость, мобильность и энергоэффективность в сотовой связи, Wi-Fi и M2M-связи. Следовательно, система SDR заслужила большое внимание и имеет большое значение как для научных кругов, так и для промышленности. Разработчики SDR намерены упростить реализацию коммуникационных протоколов, позволяя исследователям экспериментировать с прототипами в развернутых сетях. В этой статье выполнен обзор SDR, а затем представлена архитектура с нулевой промежуточной частотой (архитектура нуль-ПЧ). После этого выполнено моделирование архитектуры нуль-ПЧ в среде MATLAB и представлена ее реализация на платформе Altera DE2-115.

Ключевые слова

Программно-определяемая радиосистема (SDR), архитектура нуль-ПЧ, Altera DE2-115, NCO-управляемый гармонический генератор, СС-фильтр, FIR-фильтр, аналого-цифровой преобразователь, ADA-HSMC

Поступила в редакцию 04.02.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Программно-определяемая радиосистема (Software-defined radio — SDR) была впервые предложена Джозефом Митолой в 1991 г. Концепция SDR существует уже некоторое время, но благодаря недавним достижениям в области электроники возможность реализации систем SDR становится все более реальной. Сейчас акцент смещается в сторону построения максимально гибких и эффективных систем. Система SDR является совокупностью аппаратных и программных технологий, позволяющих переконфигурировать системные архитектуры для беспроводных сетей и пользовательских терминалов [1].

Система SDR обеспечивает возможность эффективного и сравнительно недорогого создания многомодовых, многополосных, многофункциональных беспроводных устройств, которые могут быть адаптированы, обновлены или улучшены с помощью обновлений программного обеспечения. Основная задача SDR — замена как можно большего количества аналоговых компонентов и проводных цифровых устройств передатчика-приемника программируемыми

устройствами, включая воздушный интерфейс, схемы модуляции и кодирования, а также преобразователи данных (аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, АЦП/ЦАП) [2, 3]. Конечной целью проектирования радиопередатчика является реализация всех функций приемопередатчика в программном обеспечении.

Архитектура с нулевой промежуточной частотой (нуль-ПЧ). Существует несколько архитектур SDR: приемник на основе гетеродина, приемник с цифровой обработкой промежуточной частоты (ПЧ), приемник с нулевой ПЧ, цифровой приемник с низкой ПЧ и приемник полосовой дискретизации. Рассмотрим процессы моделирования и аппаратного обеспечения для приемника с нулевой ПЧ.

Оригинальный гомодинный приемник был разработан в 1932 г. группой ученых, которые искали способ упростить гетеродинную архитектуру. Новый приемник был способен демодулировать амплитудно-модулированные (АМ) сигналы с помощью локального генератора, синхронизированного по частоте с несущей искомого сигнала. Полученный сигнал мог быть непосредственно преобразован в основную полосу, где все нежелательные помехи были отклонены фильтром низких частот (LPF). Полученная архитектура имела меньшую сложность и энергопотребление, но страдала от высокой неточности дискретных компонентов. Такие проблемы, как утечка локального генератора (LO) и наличие постоянной составляющей, серьезно угрожали приему [4, 5].

Развитие интегрированных технологий позволяет решить большинство этих проблем. В течение последнего десятилетия мы стали свидетелями массовой миграции от гетеродинной архитектуры к архитектуре нуль-ПЧ. Основная причина этого заключается в том, что благодаря своей простоте архитектуры прямого преобразования (нуль-ПЧ) гораздо больше подходят для монолитной интеграции, чем гетеродинные, и при этом они определенно дешевле [6, 7]. Современный приемник с нулевой ПЧ больше не ограничивается приемом АМ-сигналов, теперь он способен обрабатывать более сложные схемы модуляции, такие как частотная и фазовая, с помощью квадратурного нисходящего преобразования. Типичный приемник прямого преобразования показан на рис. 1.

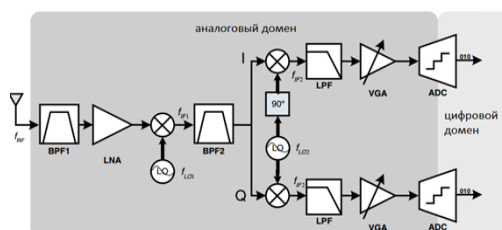


Рис. 1. Приемник для прямого преобразования (архитектура нуль-ПЧ)

диапазон радиочастот выбирается внешним пассивным фильтром, а сигнал усиливается малошумящим усилителем, как в архитектуре супергетеродина. Затем сигнал смешивается непосредственно с постоянным током с помощью радиочастотного квадратурного смесителя, следовательно, остальные пассивные фильтры и ступени смешивания не нужны. Хотя число аналоговых компонентов уменьшается, многие из этих компонентов гораздо сложнее спроектировать: например, при конструировании фильтра выбора канала, который отвечает за

Диапазон радиочастот выбирается внешним пассивным фильтром, а сигнал усиливается малошумящим усилителем, как в архитектуре супергетеродина. Затем сигнал смешивается непосредственно с постоянным током с помощью радиочастотного квадратурного смесителя, следовательно, остальные пассивные фильтры и ступени смешивания не нужны. Хотя число аналоговых компонентов уменьшается, многие из этих компонентов гораздо сложнее спроектировать: например, при конструировании фильтра выбора канала, который отвечает за

подавление помех и сглаживание, необходимо идти на серьезные компромиссы между линейностью мощности и шумом. Точное распределение усиления в основной полосе частот часто может смягчить эти жесткие требования [8].

Моделирование SDR-приемника нуль-ПЧ в среде MATLAB. Программная среда MATLAB широко используется во всех областях прикладной математики, в образовательных проектах и при проведении исследований в университетах, а также в промышленности. MATLAB имеет набор графических инструментов, которые позволяют создавать продвинутый графический интерфейс и графики данных как в 2D, так и в 3D. Существует также специализированное приложение MATLAB Simulink, которое полезно для модульного построения и моделирования динамических систем в реальном времени. Все эти особенности делают MATLAB хорошим выбором для моделирования исследуемого приемника.

Моделирование архитектуры нуль-ПЧ проиллюстрировано на рис. 2. Модель состоит из основных четырех частей: блок принимаемого сигнала; блок с архитектурой нуль-ПЧ; блок декодирования сигнала; блок измерения частоты ошибок символов.

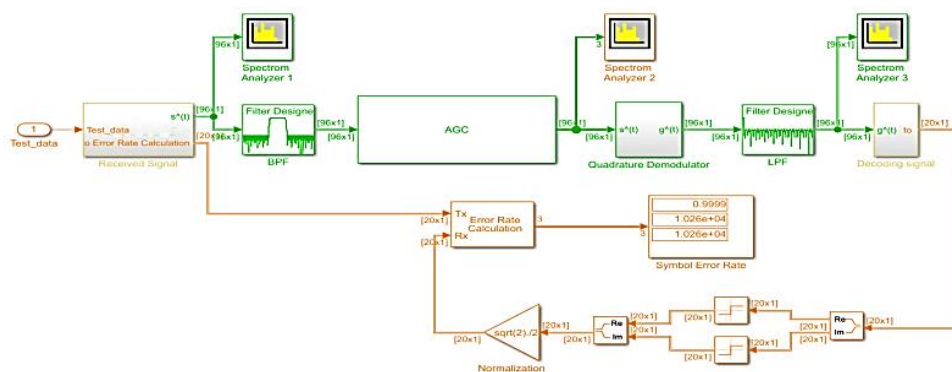


Рис. 2. Схема моделирования приемника SDR нуль-ПЧ в MATLAB

В блоке Received Signal применяется QAM-модуляция переданных символов, затем сигнал модулируется с помощью OFDM-модуляции и интерполируется так, чтобы скорость сигнала на выходе блока интерполяции составляла 3,072 МГц. После этого радиочастотный сигнал модулируется квадратурным сигналом ($f_{\text{mod}} = f_s / 4 = 786$ кГц) и передается по каналу AWGAN с отношением энергии бита к спектральной плотности мощности шума $E_b / N_0 = 5$ дБ (рис. 3).

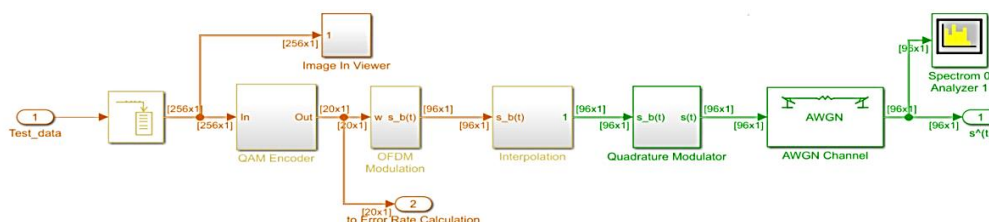


Рис. 3. Схема моделирования блока Received Signal

В блоке Decoding Signal применяются те же операции, что и в блоке Received Signal, но действие осуществляют в противоположном направлении, чтобы получить декодированный сигнал (рис. 4).

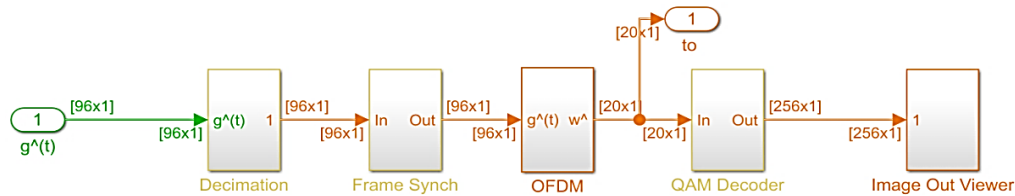


Рис. 4. Схема моделирования блока Decoding Signal

Моделирование архитектуры нуль-ПЧ. Рассмотрим блоки моделируемой архитектуры нуль-ПЧ более подробно. На этом этапе сигнал проходит по каналу и принимается антенной.

Частота принимаемого сигнала на входе полосового фильтра (BPF) составляет 786 кГц при полосе пропускания 160 кГц. Сигнал сначала фильтруется полосовым фильтром с центром полосы около 786 кГц, ширина полосы пропускания равна 200 кГц, величина частотной характеристики фильтра в области пропускания равно 0 дБ и примерно -70 дБ в области среза, как показано на рис. 5.

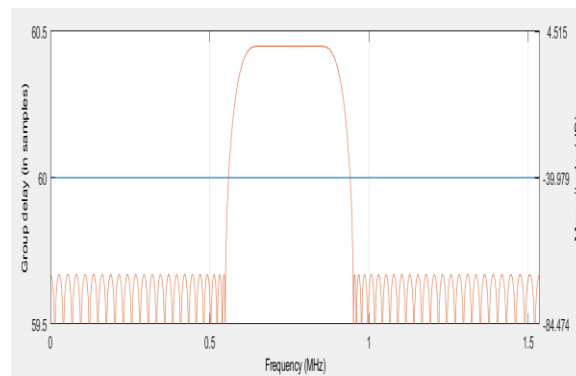


Рис. 5. Характеристика BPF-фильтра

Отфильтрованный сигнал проходит через усилитель с автоматической регулировкой усиления (англ. *automatic gain control* — AGC) для достижения постоянного уровня выходного сигнала (1 Вт), затем сигнал передается в базовую полосу с помощью блока Quadrature Demodulator. После этого сигнал основной полосы пропускается через LPF-фильтр для уменьшения нежелательных частот и паразитных выбросов в спектре сигнала — шпор (рис. 6).

Чтобы проверить смоделированную архитектуру, мы передали с ее помощью широко известное тестовое изображение — портрет девушки Лены размером 256×256. Переданное и полученное изображение показано на рис. 7. Точность модели измеряется путем вычисления частоты ошибок символов, показанной на рис. 2. Измеренная частота ошибок символов для $E_b / N_0 = 5$ дБ равна $10^{-0,1}$.

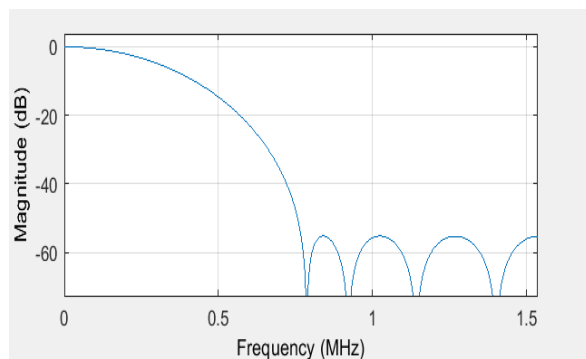


Рис. 6. Характеристика LPF-фильтра



Рис. 7. Тестовое изображение (портрет Лены):

а — отправленное; *б* — полученное

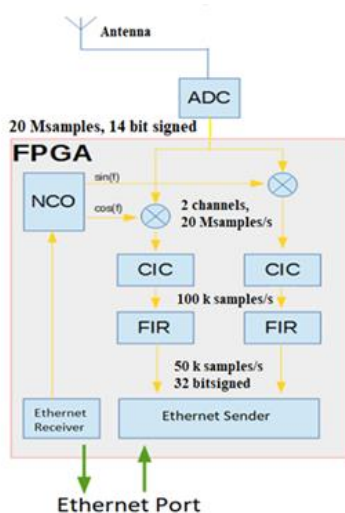


Рис. 8. Структура реализованного SDR

тах, однако у нее есть и недостаток — при переключении с одного частотного диапазона на другой антенну необходимо перестраивать.

Реализация приемника SDR нуль-ПЧ на отладочной плате Altera DE2-115. После того построения модели архитектуры нуль-ПЧ в среде MATLAB построим эту архитектуру на отладочной и образовательной плате Altera DE2-115, чтобы получить реальную реализацию SDR.

Конструкция разрабатываемой системы SDR показана на рис. 8. Сигналы, которые планируется принимать, находятся в диапазоне 2...20 МГц. Для организации приема в этом диапазоне применена простая петлевая антенна. Основным преимуществом такой антенны является то, что благодаря использованию резонанса она позволяет подавлять шумы на неиспользуемых частотах,

После получения сигнала фильтрацию и усиление не применяли. Сигнал был просто оцифрован с помощью специальной платы ADA-HSMC, которая имеет два рекламных канала с 14-битным разрешением и скоростью передачи данных до 65 МГц; в этой работе был использован только один канал со скоростью передачи данных 20 МГц. Подробное описание платы ADA-HSMC можно найти по ссылке [11]. Оцифрованный сигнал передается на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) DE2-115 для применения цифровой фильтрации и децимации, а после — на персональный компьютер (ПК) с помощью UDP-пакетов. Для проектирования цифровой системы пользовались инструментом Qsys.

Цифровые сигнальные процессы. В этой работе применен NCO-управляемый гармонический генератор, который может быть настроен в определенном диапазоне частот, вплоть до 24 МГц. Выходы NCO представляют собой две шины данных с синусоидальной и косинусоидальной дискретизацией. Эти шины идут на два умножителя. Сюда же, на умножители, приходит оцифрованный сигнал с АЦП. Поскольку данные из АЦП являются 14-битными, а ширина данных NCO — 16 бит, результатом умножения является 30-битное знаковое число. Спектр радиосигнала передается с помощью операции умножения. Нас интересуют те спектральные составляющие, которые попадают в низкочастотную область.

Передать этот поток на компьютер для анализа довольно сложно, поскольку его скорость составляет до 20 млн выборок в секунду. Нужно осуществить передискретизацию на более низкую частоту, но перед этим необходимо применить фильтр нижних частот (LPF). Для этого используется CIC-фильтр (англ. *cascaded integral-comb* — каскадный интегрально-гребенчатый фильтр типа БИХ (с бесконечной импульсной характеристикой)), который позволяет уменьшить частоту дискретизации в десятки и сотни раз. В среде Altera Quartus II есть инструмент megafunction Wizard, который позволяет создавать и конфигурировать CIC-фильтр для проектов ПЛИС [9].

В разрабатываемом проекте частота сокращается в 200 раз, т. е. после CIC-фильтра частота дискретизации составляет 100 кГц. После CIC-фильтра идет FIR-фильтр (англ. *finite impulse response* — конечная импульсная характеристика), который должен компенсировать пологое спадание амплитудно-частотной характеристики CIC-фильтра. FIR-фильтр также создается в среде Quartus II в Wizard [10] (рис. 9).

На выходе FIR-фильтра уже будут многозначные числа, поэтому нужно округлить наименее значащие биты, чтобы получить 16-битный знаковый сигнал на выходе FIR-фильтра. После фильтрации следует отправить сигналы ввода-вывода на ПК через порт Ethernet. Мы посылаем сигнал в виде UDP-пакетов длиной 1 Кбайт. Разработанное аппаратное обеспечение с использованием инструмента Qsys показано на рис. 10.

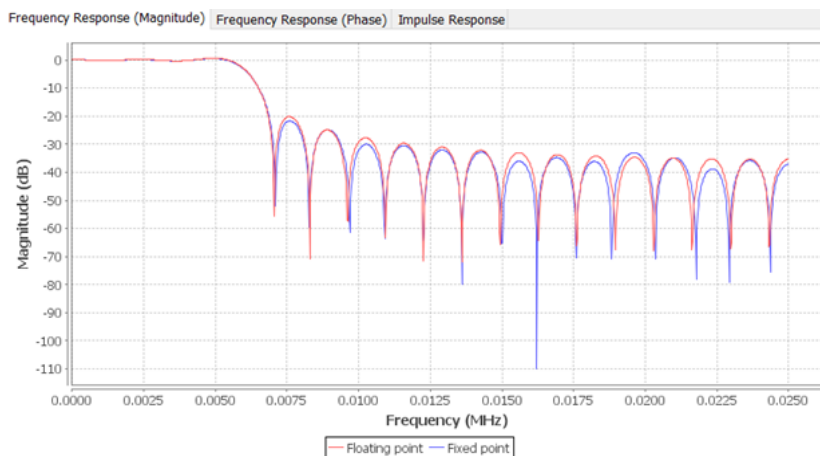


Рис. 9. Амплитудная характеристика FIR-фильтра

Принятый сигнал на стороне персонального компьютера. На стороне ПК мы использовали программу HSDSDR для представления принятого сигнала. Для того чтобы программа поддерживала плату DE2-115, необходимо написать дополнительную библиотеку DLL, которая, имея специальный интерфейс, служит мостиком между платой и программой HSDSDR. Мы использовали библиотеку DLL, написанную с помощью Visual Studio, и обновили ее в соответствии с нашей работой.

Для тестирования реализованного SDR передали сигнал на частоте 7 МГц с помощью простого передатчика, а на ПК с помощью программы HSDSDR получили результаты, показанные на рис. 11.

Заключение. В данной статье приведено краткое описание работы SDR. После этого представлена работа по моделированию нуля-ПЧ SDR в среде MATLAB, а затем продемонстрирована реализация имитационной модели на плате Altera DE2-115.

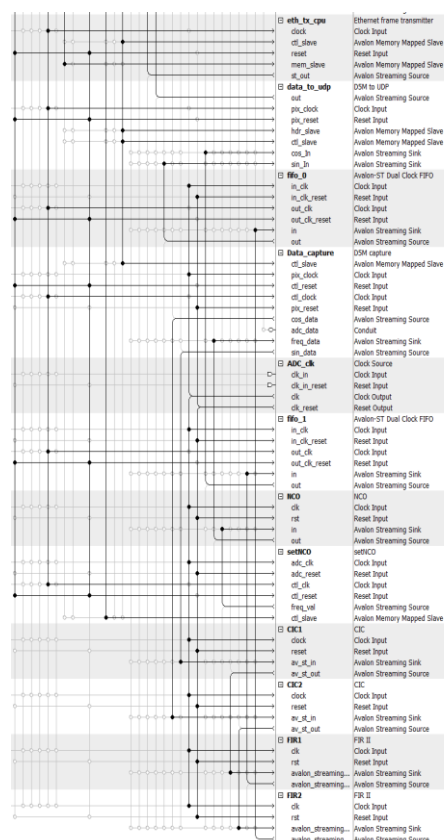


Рис. 10. Схема разработки аппаратного и программного обеспечения

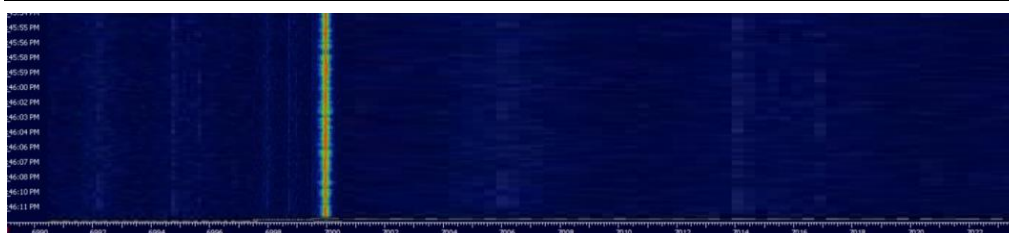


Рис. 11. Полученный спектр на HSDSR

В будущем мы стремимся разработать систему SDR таким образом, чтобы она могла декодировать принятые сигналы, поэтому мы планируем проделать большую работу:

- в аналоговом радиочастотном интерфейсе добавление адаптивных фильтров и усилителей на входе приемника для увеличения возможностей выбора желаемой полосы сигнала;
- на стороне ПЛИС применяются необходимые алгоритмы обнаружения и декодирования принятых сигналов.

Литература

- [1] Lalgé A.M., Karpe M.S., Bhandari S.U. Software defined radio principles and platforms. *IJACR*, 2013, vol. 3, no. 11, pp. 2–3.
- [2] DRF cognitive radio definitions. Working document SDRF-06-R-0011-V1.0.0. IEEE, 2007.
- [3] Воробьев О.В., Фокин Г.А. Проект учебно-методического комплекса «Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе программно-конфигурируемого радио». *V Межд. науч.-тех. и научно-методич. конф. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. Т. 2.* СПб., СПбГУТ, 2016, с. 280–284.
- [4] Фокин Г.А. Принципы и технологии цифровой связи на основе программно-конфигурируемого радио: обзор современных тенденций в области создания комплекса подготовки специалистов. *Труды учебных заведений связи*, 2019, т. 5, № 1, с. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-78-94>
- [5] Razavi B. Design considerations for direct-conversion receivers. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Analog Digit. Signal Process.*, 1997, vol. 44, no. 6, pp. 428–435. DOI: <https://doi.org/10.1109/82.592569>
- [6] Abidi A.A. Direct-conversion radio transceivers for digital communications. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1995, vol. 30, no. 12, pp. 1399–1410. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSCC.1995.535515>
- [7] Roupheal T.J. *Wireless receiver architectures and design.* Academic Press, 2014.
- [8] Bourdoux A., Craninckx J., Dejonghe A., et al. Receiver architectures for software-defined radios in mobile terminals: the path to cognitive radios. *IEEE Radio Wirel. Symp.*, 2007, pp. 535–538. DOI: <https://doi.org/10.1109/RWS.2007.351886>
- [9] Understanding CIC compensation filters. Application Note 455. Altera corp., 2007.
- [10] FIR Compiler II. User Guide. Altera corp., 2014.

Амджад Али Али — студент, кафедры «Информационные системы и телекоммуникации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Федоров Сергей Владимирович, доцент кафедры «Информационные системы и телекоммуникации», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Амджад А.А. Моделирование приемника SDR в среде MATLAB и его реализация на Altera DE2-115. *Политехнический молодежный журнал*, 2021, № 04(57). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-04-686>

MODELING AN SDR RECEIVER IN MATLAB AND ITS IMPLEMENTATION ON ALTERA DE2-115

A.A. Amjad

amjadali.ad2014@gmail.com

SPIN-code: 9332-4505

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**Abstract**

Software-defined radio (SDR) is a programmable transceiver that can work with a variety of wireless protocols without the need for hardware changes or upgrades. Advances in SDR have led to an escalation in protocol development and a wide range of applications with a greater emphasis on programmability, flexibility, mobility and energy efficiency in cellular, Wi-Fi and M2M communications. Consequently, the SDR system has received a lot of attention and is of great importance for both academia and industry. The SDR developers intend to simplify the implementation of communication protocols, allowing researchers to experiment with prototypes in deployed networks. This article provides an overview of SDR and introduces a zero-IF architecture. After that, the simulation of the zero-IF architecture was performed in the MATLAB environment and its implementation on the Altera DE2-115 platform was presented.

Keywords

Software Defined Radio (SDR), null-IF architecture, Altera DE2-115, NCO-controlled harmonic generator, CIC filter, FIR filter, analog-to-digital converter, ADA-HSMC

Received 04.02.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Lalge A.M., Karpe M.S., Bhandari S.U. Software defined radio principles and platforms. *IJACR*, 2013, vol. 3, no. 11, pp. 2–3.
- [2] DRF cognitive radio definitions. Working document SDRF-06-R-0011-V1.0.0. IEEE, 2007.
- [3] Vorob'yev O.V., Fokin G.A. [Radio communication systems model based design via software defined radio]. *V Mezhd. nauch.-tekh. i nauchnometodich. konf. Aktual'nye problemy infotelekkommunikatsiy v nauke i obrazovanii. T. 2* [V Int. Sci.-Tech. and Methodological Conf. Vol. 2]. Sankt-Petersburg, SPbGUT Publ., 2016, pp. 280–284 (in Russ.).
- [4] Fokin G.A. Principles and technologies of digital communication based on software defined radio: a review of modern trends in the field of creating a curriculum. *Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi* [Proceedings of Telecommunication Universities], 2019, vol. 5, no. 1, pp. 78–94. DOI: <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-1-78-94> (in Russ.).
- [5] Razavi B. Design considerations for direct-conversion receivers. *IEEE Trans. Circuits Syst. II Analog Digit. Signal Process.*, 1997, vol. 44, no. 6, pp. 428–435. DOI: <https://doi.org/10.1109/82.592569>
- [6] Abidi A.A. Direct-conversion radio transceivers for digital communications. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 1995, vol. 30, no. 12, pp. 1399–1410. DOI: <https://doi.org/10.1109/ISSCC.1995.535515>
- [7] Roupael T.J. *Wireless receiver architectures and design*. Academic Press, 2014.

- [8] Bourdoux A., Craninckx J., Dejonghe A., et al. Receiver architectures for software-defined radios in mobile terminals: the path to cognitive radios. *IEEE Radio Wirel. Symp.*, 2007, pp. 535–538. DOI: <https://doi.org/10.1109/RWS.2007.351886>
- [9] Understanding CIC compensation filters. Application Note 455. Altera corp., 2007.
- [10] FIR Compiler II. User Guide. Altera corp., 2014.

Amjad A.A. — Student, Department of Information Systems and Telecommunications, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Fedorov S.V., Assoc. Professor, Department of Information Systems and Telecommunications, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Amjad A.A. Modeling an SDR receiver in MATLAB and its implementation on Altera DE2-115. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2021, no. 04(57). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2021-04-686.html> (in Russ.).