

Обзорная статья / Review Article

DOI 10.15826/urej.2022.6.2.002

УДК 621.396.42

**Применение программно-определяемого радио
в системах связи****О. А. Кувшинов** ✉, **О. В. Плохих**

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ okuvshinov@inbox.ru

Аннотация

В работе представлены примеры решения актуальных задач электросвязи с использованием технологии программно-определяемых радиосистем (ПОР). Для каждого примера описана проблема и роль ПОР в ее решении. Приведено сравнение основных характеристик и структуры аппаратных составляющих ПОР, которые используются в рассмотренных примерах. Представлены результаты работы с отладочным модулем для российской микросхемы ПОР 1288ХК1Т по сценарию демонстрационного варианта функционирования.

Ключевые слова

программно-определяемое радио, российская микросхема, проблемы электросвязи, аппаратные решения, цифровая обработка сигналов

Для цитирования

Кувшинов О. А., Плохих О. В. Применение программно-определяемого радио в системах связи. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(2):140–159. DOI: 10.15826/urej.2022.6.2.002.

**Application of Software-defined radio
in communication systems****O. A. Kuvshinov** ✉, **O. V. Plokhikh**

Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ okuvshinov@inbox.ru

Abstract

The paper presents examples of solving urgent telecommunication tasks using the technology of Software-defined radio systems (SDR). The problem and the role of SDR in its solution are described for each example. The comparison of the main characteristics and structure of the hardware components of the SDR, which are used in the considered examples, is given. The results of the work with the debugging module for the Russian microchip 1288HK1T according to the scenario of the demo version of functioning are presented.

Keywords

software-defined radio, Russian microchip, telecommunication tasks, hardware solutions, digital signal processing

For citation

Kuvshinov O. A., Plokhikh O. V. Application of Software-defined radio in communication systems. *Ural Radio Engineering Journal*. 2022;6(2):140–159. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2022.6.2.002.

Введение

С помощью технологии радиосвязи сегодня решается множество задач, от предоставления услуг связи для гражданского населения до военных задач обеспечения безопасности государства. В связи с развитием науки и техники в целом, а также с ростом потребностей человека регулярно возникают новые задачи. Их решение, как правило, предполагает тщательную проработку идеи и разработку нового устройства. Однако еще в 1984 году командой американских инженеров была предложена идея ПОР, способная решать разные задачи в разные моменты времени без изменения конструкции системы, а изменяя ее параметры исключительно программными методами [1]. Такие решения предполагают, во-первых, программную настройку частоты опорного генератора и параметров цифрового фильтра, что позволяет программно управлять рабочей частотой и полосой приемного тракта. Во-вторых, модуляция/демодуляция сигнала тоже реализуется программно.

Структурная схема современных приемных ПОР включает следующие элементы: антенна, полосовой аналоговый фильтр, усилитель, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), преобразователь частоты и цифровой фильтр с изменяемыми коэффициентами. На выходе ПОР формируются цифровые отсчеты сигнала с конкретной частотой дискретизации, которые далее по определенному интерфейсу передаются вычислительному устройству, например, компьютеру (ПЭВМ) для обработки и извлечения полезной информации. Передающая ПОР относительно приемной обладает зеркальной структурой последовательности функциональных блоков. На вход такой системы через конкретный интерфейс поступают отсчеты цифрового сигнала от источника сигнала. С помощью преобразователя частоты и цифро-аналогового преобразования (ЦАП) формируется аналоговый сигнал, который затем фильтруется, усиливается и передается в эфир с использованием передающей антенны.

Исполнение современных ПОР представляет собой, как правило, интегральную схему (ИС), выполняющую функции преобразования частоты, фильтрации сигнала и формирования отсчетов

для их дальнейшей обработки. Основным параметрами таких систем являются частота дискретизации, разрядность, рабочий диапазон частот, ширина полосы, чувствительность. АЦП преобразователи могут быть интегрированы в ИС ПОР либо представлены отдельными специализированными ИС. Для первичной обработки сигнала и взаимодействия ПОР с устройствами дальнейшей обработки реализуют различные интерфейсы на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) или процессоров.

Основной задачей данной работы является демонстрация актуальности изучения и развития темы программно-определяемых радиосистем. Для этого в первой части работы представлены решения актуальных задач электросвязи с использованием преимуществ технологии ПОР. Во второй части приведен краткий обзор аппаратной части устройств, которые применяются в представленных решениях. В третьей части рассматриваются практические вопросы применения ПОР на базе отечественной микросхемы цифрового четырехканального приемника ПОР 1288ХК1Т производства АО НПЦ «ЭЛВИС», что особенно актуально в условиях ограничения поставок в РФ микросхем импортного производства. К сожалению, российские решения часто уступают зарубежным в качестве и количестве предоставляемого в помощь разработчику демонстрационного и вспомогательного программного обеспечения, технической документации, примеров, а также возможностей сопряжения с другими аппаратными и программными платформами. В ходе разработки часто возникают технические вопросы, что вынуждает обращаться за помощью в техническую поддержку предприятия для прояснения особенностей работы изделия. В настоящей работе приводится описание запуска и настройки демонстрационного примера, сформированное в результате такого взаимодействия. Эти сведения могут оказаться полезными для освоения этого оборудования.

ПОР в системах связи

Сегодня активно эксплуатируются как новейшие сети сотовой связи (ССС), так и сети старших поколений. Это обусловлено в первую очередь отсутствием необходимости в высокой скорости передачи данных в определенных задачах. В связи с этим модернизация и, следовательно, увеличение стоимости и сложности таких сетей неоправданно. Такая тенденция и особенность технологий современных сетей предполагают одновременное использование частот в широком диапазоне спектра: от 800 МГц до 2,6 ГГц и различных сложных сигналов. Дальнейшее развитие СССР способствует еще большему увеличению данного диапазона.

Для поддержания работоспособности сетей необходимо осуществлять регулярный мониторинг состояния радиоэфира, и в качестве универсального решения данной задачи ввиду своих особенностей может быть эффективно использована технология ПОР.

В работе [2] представлено аппаратное решение для мониторинга сигналов ССС второго (2G), третьего (3G) и четвертого поколений (4G). Данное решение выполнено на базе двух ИС: R820T2 и RTL2832U. Устройство принимает сигналы в диапазоне 24–1750 МГц; ширина полосы сигнала может достигать 3 МГц, чувствительность приемника – 3 мкВ. Особенностью данной разработки является совместимость с программными анализаторами трафика. Так, в ходе работы помимо физических параметров сигнала в результате его обработки могут быть получены некоторые служебные данные. Разработанное устройство может быть использовано специальными органами для контроля правомерного использованием частотного ресурса, а также самими операторами связи для достижения стабильного качественного радиоканала за счет программной перенастройкой оборудования.

Кроме мониторинга радиоэфира ПОР могут быть использованы для анализа безопасности протоколов взаимодействия устройств в ССС. Так, в работе [3] представлено описание процедуры атаки на сеть передачи данных за счет уязвимостей протокола GSM. Атака строится по принципу «человек посередине». Такая схема предполагает получение данных злоумышленником от источника, их прослушивание, и ретрансляция адресату. При этом источник и адресат не подозревают о существовании посредника. При наличии специальных средств злоумышленник может расшифровать конфиденциальные пользовательские данные и использовать их в своих целях. Роль ПОР в этом случае заключается в прослушивании радиоэфира с целью определения частоты несущего сигнала и служебных параметров базовой станции (БС), излучающей сигнал наибольшей мощности. Как только определены все служебные параметры такой БС, злоумышленником выполняется настройка поддельной БС с аналогичными служебными данными и более высокой мощностью сигнала. В соответствии с особенностями протокола GSM мобильные терминалы абонентов подключаются к сети через БС с наиболее мощным сигналом в зоне своей радиовидимости. Для формирования сигнала поддельной БС также используется ПОР, формирующая сигнал на требуемой несущей частоте.

ССС пятого поколения (5G) сегодня являются наиболее прогрессирующим и обсуждаемым направлением в области беспроводной передачи данных. Это, в частности, обусловлено бурным

развитием технологии интернета вещей: только в России сформулирована цель выпуска миллиарда устройств интернета вещей [4] к 2025 году. Основными требованиями к сетям 5G является высокая скорость передачи данных (до 20 Гбит/с), значительная плотность устройств ($10^6/\text{км}^2$) и низкие задержки передачи сигнала (до 1 мс). Для обеспечения желаемых показателей в новых системах активно используют технологию пространственного разнесения MIMO (Multiple Input Multiple Output) – размещение сразу нескольких приемопередающих антенн на устройстве. В работе [5] представлена антенная система из 8 элементов, рассчитанная на диапазон 3,4–3,6 ГГц, для абонентских устройств. Сигнал с антенн обрабатывается четырьмя ПОР (по одному на каждую пару антенн) NI USRP 2943R. Это устройство представляет собой программно-определяемый приемопередатчик, действующий в диапазоне сигналов до 6 ГГц. Авторы работы [5] экспериментально показали, что их устройство может работать на скорости передачи данных 275 Мбит/с с частотой возникновения битовых ошибок $BER = 1 \cdot 10^{-2}$ при отношении сигнал/шум (ОСШ) 15 дБ и способе модуляции 64QAM.

Обзор показывает, что ПОР находит применение для решения различных задач ССС. Перспективным развитием данной технологии может оказаться реализация систем адаптивных антенных решеток (ААР), что особенно актуально для будущих сетей, требующих высокую скорость передачи данных с использованием сверхвысоких частот. Это, в частности, может быть реализовано с использованием российской ИС 1288ХК1Т, позволяющей создать систему ААР из 32 элементов.

Сети интернета вещей используются для автоматизации и цифровизации бытовых и производственных процессов и представляют собой множество разнообразных датчиков, сенсоров, счетчиков и контроллеров, оснащенных приемопередающим радиомодулем. Данные с устройств агрегируются и обрабатываются программно-аппаратными средствами. Эффективность таких систем заключается в высокой автономности работы системы, которая достигается среди прочего за счет кратковременных и сравнительно редких сеансов связи.

В крупных промышленных проектах количество устройств в сети может достигать нескольких сотен на одном объекте. Ввиду высокой плотности устройств, несмотря на относительно редкие сеансы связи, возникают коллизии сигналов, что приводит к потере данных. В работе [6] представлены результаты исследования наложения разных частей пакетов в сети стандарта LoRaWAN при различной мощности сигналов. Задачей ПОР в этом случае является формирование помехи путем приема сиг-

нала с одного устройства LoRaWAN, его фильтрации, усиления и передачи с настраиваемой задержкой. Такой подход обусловлен закрытостью протокола LoRaWAN, в связи с чем использование устройства на базе данного стандарта в качестве генератора помехи оказывается неоправданным. Применение же технологии ПОР в данной задаче позволяет детально и плавно настраивать желаемый сигнал. Авторами работы [6] получено, что при обнаружении коллизий в сети по результатам ее воздействия имеется возможность рассчитать задержку помехи, а вместе с этим воспроизвести более точную модель трассы распространения сигнала. Это может быть учтено при добавлении новых устройств в сеть с целью предупреждения возникновения новых коллизий. В работе [6] также приведены результаты сравнения с данными других исследований.

В работе [7] представлен проект распределенной сети интернета вещей, предназначенной для передачи информации между устройствами, работающими на базе протоколов LoRaWAN, ZigBee, Wi-Fi и Bluetooth. В этих технологиях используются различные частотные диапазоны и способы модуляции сигнала. Особенностью сети является значительное расстояние между устройствами: сотни и тысячи километров. Для передачи на таком большом расстоянии используется специализированный протокол S-MIM, предназначенный для организации спутникового канала связи [8]. В данном стандарте для передачи радиосигналов используется S-диапазон: 2–4 ГГц. Для приема и обработки различных сложных сигналов на базе одного устройства используется ПОР Ettus USRP E310 в качестве шлюза между наземной сетью устройств интернета вещей и спутником. Диапазон рабочих частот данного устройства составляет 70 МГц – 6 ГГц, максимальная ширина канала равна 56 МГц, первичная обработка осуществляется с использованием ПЛИС Xilinx ZYNQ 7020 и двух ядер процессора ARM Cortex A9 с тактовой частотой 866 МГц. Для проверки работоспособности системы авторами работы [7] был проведен эксперимент по передаче файла конфигурации в восходящем направлении между двумя устройствами Ettus USRP E310, одно из которых эмулировало работу приемопередатчика спутника, а другое – шлюза наземной сети интернета вещей. Для имитации канала связи использовался аттенуатор 30 дБ. Средняя скорость передачи данных в этом случае оказалась равна 5 кбит/с.

В работе [9] представлен проект комбинирования проводной транспортной сети связи на базе волоконно-оптического кабеля (ВОК) и беспроводной сети доступа для различных типов устройств. Функция ПОР в такой системе заключается в приеме

и передаче радиосигнала клиентского устройства вне зависимости от используемого этим устройством протокола. Основная идея заключается в организации высокоскоростного канала связи между устройствами на большом расстоянии. Это достигается преобразованием радиосигнала сначала в электрическую, а затем в оптическую форму и передачей его через ВОК. Преимущества передачи данных с использованием ВОК способствуют достижению желаемого результата. Аппаратное решение, предлагаемое авторами, представляет собой устройство на базе микроконтроллера STM, четырех приемопередатчиков сигналов диапазона 2,4–2,5 ГГц и четырех преобразователей частоты. Такой подход к аппаратной реализации оказывается более экономичным и гибким вариантом по сравнению с использованием готовых решений ПОР в данном случае. Примерами использования такой системы может быть увеличение площади развертывания сети на базе технологии Wi-Fi, удаленное управление оборудованием на промышленных объектах с особо опасными условиями, достижение низких задержек распространения сигнала. Для модернизации сети Интернет предложенное решение может быть задействовано при развертывании сетей типа FTТх и PON.

ПОР могут быть применены для решения общих задач радиосвязи и использованы в системах различного назначения. Так, в работе [10] представлен алгоритм обнаружения помехи в канале связи, основанный на правильном выборе порога принятия решения о наличии сигнала на выходе приемной антенны. Аппаратная часть ПОР в данной работе представляет собой устройство NI USRP-2954R, обладающее следующими характеристиками: частотный диапазон до 6 ГГц, ширина полосы сигнала до 160 МГц, максимальная частота АЦП – 200 МВыв/с. В своей работе [10] авторы используют ПОР одновременно в качестве передатчика и приемника сигнала, а также генератора помехи и шума. Внутри этого устройства сформированный сигнал поступает на вход приемника, где переносится на несущую частоту 10 МГц, преобразуется в аналоговую форму и усиливается. Принимаемый сигнал также усиливается, переносится на промежуточную пониженную частоту, преобразуется в цифровую форму и передается устройству обработки – ПЭВМ. Для оценки результатов работы предложенного алгоритма авторы [10] демонстрируют зависимости вероятности ложной тревоги от мощности помехи.

В работе [11] представлен метод распознавания способа модуляции принятого сигнала с применением технологий нейронных сетей и ПОР. Роль ПОР в данной работе заключается

в формировании сигналов с различными способами модуляции и манипуляции, а также приеме передаваемых сигналов в широком спектре частот. В качестве аппаратного решения авторами используется Ettus USRP B210. Это устройство представляет собой программно-определяемый приемопередатчик сигналов в диапазоне 70 МГц – 6 ГГц с шириной полосы канала до 56 МГц, включающий 4 канала (2 для приема и 2 для передачи). Настройка осуществляется с применением программного инструмента GNU Radio. Принятые отсчеты различных сигналов обрабатываются разработанным авторами алгоритмом, определяющим способ модуляции отдельного принятого сигнала. Реализованная система с вероятностью не ниже 0,95 различает 24 способа модуляции.

На этой же элементной базе реализован блок цифровой обработки и управления радиолокатора системы аэрологического радиозондирования, описанный в [12]. ИС AD9361 включена в приемный тракт на промежуточной частоте 400 МГц, а дальнейшая обработка сигналов, управление и взаимодействие с компьютером по сети Ethernet выполняется средствами ZYNQ 7020.

Технология ПОР широко применяется в задачах радиолокации. Например, в работе [13] представлены результаты разработки ветрового профайлера или радиолокатора параметров ветра для получения профиля ветра на высотах от 200 м до 4 км. У данного радиолокатора излучение зондирующих радиопульсов и прием отраженного сигнала осуществляется тремя разнесенными в пространстве фазированными антенными решетками. Радиолокатор принимает отдельно на каждую антенну отраженный на разных высотах от неоднородностей атмосферы сигнал. Дальнейшая корреляционная обработка этих сигналов позволяет определить горизонтальный вектор скорости ветра на разных высотах. Разработчики профайлера использовали 4-канальный модуль ПОР Pentek 7642 с 14-разрядными АЦП и цифровым переносом сигнала с промежуточной частоты (ПЧ) 60 МГц на нулевую частоту.

Из представленных вариантов использования ПОР в решениях задач радиосвязи видно, что такие системы эффективны в имитации разнообразных сложных сигналов, а вместе с тем и эмулировании различных реальных систем связи. Выбор подходящего устройства ПОР способствует экономии средств на разработку макета, а использование специализированного программного обеспечения (ПО) для взаимодействия с таким устройством дополнительно упрощает и ускоряет процесс разработки.

ПОР находит применение и в системах навигации. В работе [14] представлено решение для определения местоположения мобильных устройств в помещении при помощи имеющейся беспроводной локальной сети на базе стандарта Wi-Fi. Принцип работы заключается в накоплении данных о текущем состоянии канала путем приема и обработки пилот-сигналов с помощью двух различных алгоритмов машинного обучения. В результате формируется набор временных и частотных параметров сигналов в эфире, на основании чего делается вероятностное заключение о текущем местоположении источника анализируемого сигнала. Применение ПОР обусловлено возможностью выделения отдельных поднесущих из сложного OFDM-сигнала (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным разделением поднесущих). Аппаратная реализация представляет собой приемопередатчик NI USRP 2932. Устройство функционирует в диапазоне 400 МГц–4,4 ГГц с каналами с шириной полосы до 20 МГц. Конфигурация устройства и обработка сигнала осуществляется программными методами с использованием ПЭВМ. Для передачи данных на компьютер предусмотрен интерфейс Gigabit Ethernet. В результате экспериментов авторами работы [12] получено, что погрешность определения местоположения в помещении при наличии только одной точки доступа Wi-Fi достигает 0,67 м.

В работе [15] показано, что технология ПОР может быть применена в задачах спутниковой навигации. Авторами разработан приемник спутниковых навигационных сигналов на базе ИС R820T2 и RTL2832U. Обработка в представленном примере осуществляется средствами ПЭВМ. Применение ПОР в подобных задачах обусловлено разнообразием существующих навигационных систем и вместе с этим широкого спектра частот. Для демонстрации работоспособности авторами предложенного решения выполнен ряд экспериментов по приему и обработке реального сигнала системы GPS. В результате было заключено, что показатели системы сопоставимы с современными широко используемыми устройствами потребителей спутниковых навигационных услуг.

Представленные примеры демонстрируют универсальность технологии ПОР не только в значении частотного ресурса, используемого устройством по назначению, но и универсальность в применении в различных областях радиосвязи. Актуальность изучения и развития этой технологии также подкрепляется тем, что она находит применение не только в самых новых, перспективных и развивающихся направлениях, но и в классических задачах радиосвязи.

Аппаратная реализация ПОР

В таблице 1 сведены основные характеристики всех аппаратных реализаций технологии ПОР, которые были представлены в предыдущем пункте. На основании этих примеров может быть сформировано представление о наиболее используемой архитектуре таких устройств.

Таблица 1. Характеристики различных устройств ПОР

Table 1. Characteristics of various SDR devices

Устройство	Диапазон частот, ГГц	Максимальная ширина канала, МГц	Количество каналов	Тип исполнения
RTL-SDR	0,024–2,2	3,2	1	ИС
NI USRP 2943R	1,2–6,6	40	2	Спец. ИС + ПЛИС
Ettus USRP E310	0,07–6	56	4	ИС + ПЛИС + Процессор
NI USRP-2954R	0,01–6	160	2	Спец. ИС + ПЛИС
Ettus USRP B210	0,07–5,6	56	4	ИС + ПЛИС + Процессор
NI USRP 2932	0,4–4,4	20	2	Спец. ИС + ПЛИС

Устройство RTL-SDR представляет собой комбинацию приемника радиочастотных сигналов спутникового телевидения на базе ИС R820T2 и демодулятора на базе ИС RTL2832U. В 2012 году были замечены скрытые возможности ИС RTL2832U, позволяющие оцифровывать сигнал в широком спектре частот¹. В связи с этим было разработано специальное ПО в качестве прошивки микросхемы RTL2832U, позволяющее превратить приемник спутниковых сигналов телевидения в полноценную приемную ПОР. Структурная схема устройства R820T2 представлена на рис. 1а.

Приемник обладает чувствительностью $-97,5$ дБм и выполняет фильтрацию, усиление и перенос на промежуточную частоту сигналов в диапазоне 42 МГц–1,766 ГГц. По умолчанию возможны несколько вариантов промежуточной частоты от 4,063 до 4,57 МГц.

Структурная схема демодулятора RTL2832U представлена на рис. 1б.

¹ My Journey Into SDR Software Defined Radio. Available at: <https://www.wirelesshack.org/my-journey-into-sdr-software-defined-radio-part-1-introduction.html> (дата обращения: 16.02.2022).

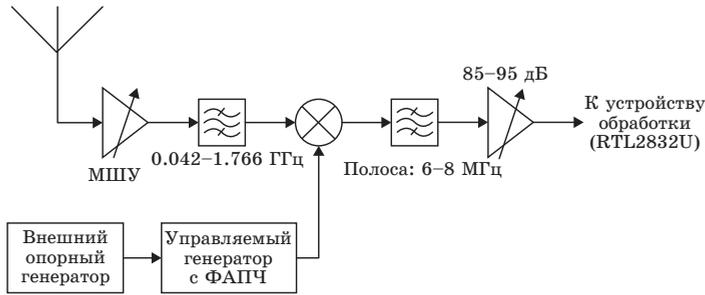


Рис. 1а. Структурная схема устройства R820T2:
МШУ – малозумящий усилитель; ФАПЧ – система фазовой автоподстройки частоты, включающая в себя делители частоты и фильтр нижних частот (ФНЧ)

Fig. 1a. Block diagram of R820T2:
МШУ – low-noise amplifier (LNA); ФАПЧ – phase-locked loop (PLL) with low-pass filter (LPF) and frequency dividers

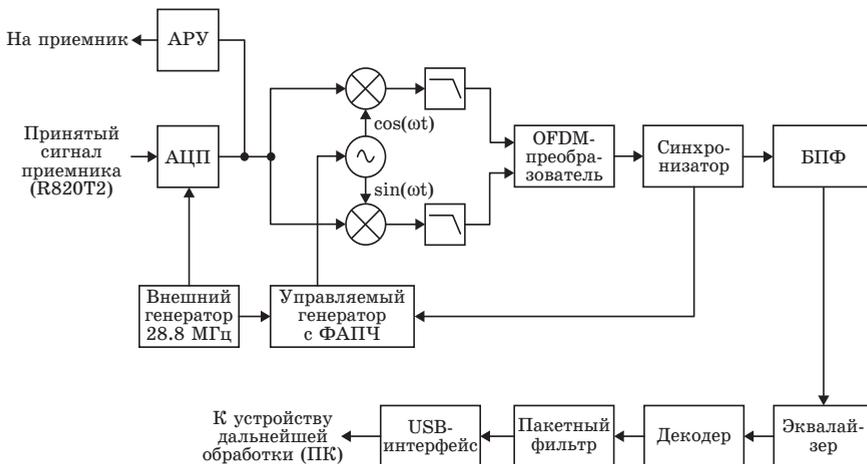


Рис. 1б. Структурная схема устройства RTL2832U:

АРУ – автоматическая регулировка усиления;
БПФ – блок выполнения быстрого преобразования Фурье

Fig. 1b. Block diagram of RTL2832U:
АРУ – automatic gain control (AGC); БПФ – fast Fourier transform (FFT)

Демодулятор выполняет демодуляцию сигнала с OFDM-модуляцией, выделение полезной информации из полученных поднесущих, фильтрацию пакетов и передачу обработанных данных на дальнейшее устройство обработки с использованием интерфейса USB.

Структурная схема устройств NI USRP 29xx представлена на рис. 2 и актуальна для всех представленных в данной работе моделей устройств.

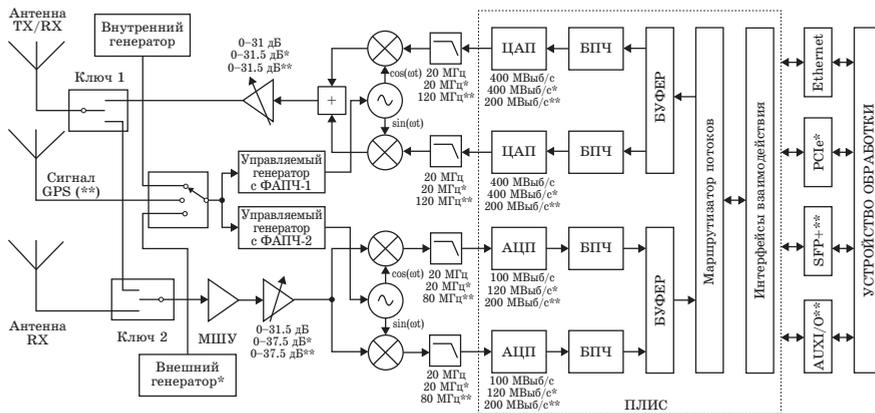


Рис. 2. Структурная схема устройств NI USRP 29xx:

БПЧ – блок преобразователя частоты

Fig. 2. Block diagram of NI USRP 29xx:

БПЧ – digital down- or up-converter (DDC, DUC)

Одна из двух антенн может быть как передающей, так и приемной. Назначение антенны в каждый отдельный момент времени регулируется парой ключей 1 и 2. Другая антенна работает только в приемном режиме. Знак звездочки (*) в подписи к элементу схемы означает, что данный атрибут актуален для устройств NI USRP 2943R и NI USRP 2954R, а две звездочки (**) – только для NI USRP 2954R. Возможность использования сигнала GPS в качестве опорного реализована в NI USRP 2932R и NI USRP 2954R. Различия, возникающие по мере продвижения к наиболее продвинутой модели, заключаются в возможности реализации более широкой полосы пропускания ФНЧ, повышенной частоте АЦП и ЦАП, а также разнообразии интерфейсов взаимодействия с внешними устройствами. Эти интерфейсы предназначены в первую очередь для передачи сформированных дискретных отсчетов принятого сигнала основному устройству обработки. В NI USRP 2954R присутствуют альтернативные тракты прохождения сигнала (не показаны на схеме), обеспечивающие прием в диапазоне 10–500 МГц. В приемной части этого тракта выполняется предварительное повышение частоты до 2,4 ГГц для обеспечения возможности дальнейшей обработки сигнала средствами устройства. Функциональные блоки, объединенные штриховой рамкой, реализованы в данных устройствах при помощи ПЛИС Xilinx Kintex-7. Для программного управления настройками и обработки сигналов ПОР по умолчанию настроена на работу с ПО LabVIEW.

Структурная схема устройств Ettus USRP представлена на рис. 3.

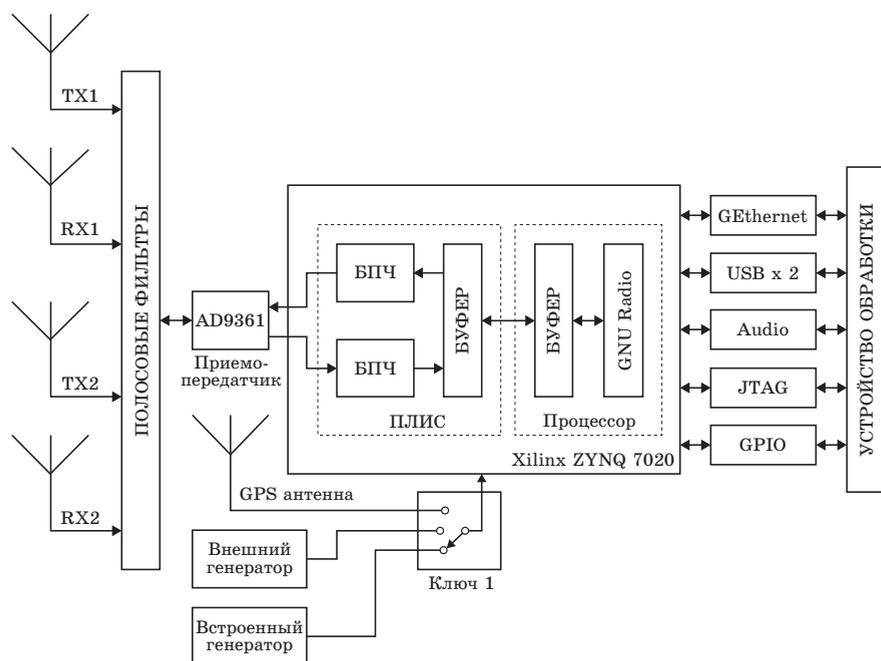


Рис. 3. Структурная схема устройств Ettus USRP

Fig. 3. Block diagram of Ettus USRP

Приемопередающий тракт реализован на базе ИС AD9361. Эта микросхема представляет собой двухканальный дуплексный гетеродинный приемопередатчик со встроенными 12-разрядными АЦП и ЦАП преобразователями. Обработка и транспортировка отсчетов сигнала выполняется с помощью вычислительной платформы Xilinx ZYNQ 7020, которая содержит два ядра ARM Cortex-A9 и ПЛИС. Как и в случае устройства NI USRP 2954R, возможны несколько вариантов источника опорного сигнала, включая сигнал GPS. Для взаимодействия с внешними устройствами обработки сигналов в платформе реализованы различные специализированные высокоскоростные интерфейсы и интерфейсы общего назначения. Для программного управления по умолчанию процессор настроен на работу с ПО GNU Radio.

Описать все разнообразие существующих реализаций довольно трудоемкая задача, решение которой не предусмотрено в рамках данной работы. Системы ПОР в формате модульных решений на базе микросхем Analog Devices разрабатываются также российским предприятием АО «Инструментальные Системы». Среди их характеристик следует особо отметить широкий рабочий диапазон частот – до 6 ГГц и максимальную ширину полосы сигнала в режиме передатчика – до 450 МГц.

Более полный список и структурные схемы представлены на официальном сайте предприятия². Разработкой собственных устройств для решения задач цифровой обработки сигналов, в том числе устройств систем ПОР, занимается российское предприятие АО НПЦ «ЭЛВИС».

Цифровой приемник 1288ХК1Т

В данной главе описаны процесс и результат ознакомления с демонстрационными вариантами взаимодействия с четырехканальным цифровым приемником производства АО НПЦ «ЭЛВИС» на базе ИС 1288ХК1Т. Разработчиками предлагается отладочная плата MF-01EM, оснащенная четырьмя приемными каналами с 10-разрядными АЦП AD9215, обеспечивающими частоту выходных отсчетов до 105 МВыв/с. Для первичной обработки сигнала и реализации интерфейсов взаимодействия отладочная плата оснащена ПЛИС Xilinx SPARTAN XC3S400A. Максимальная тактовая частота всей система равна 100 МГц.

В таблице 2 представлены параметры платы MF-01EM.

Таблица 2. Основные параметры MF-01EM

Table 2. Characteristics of MF-01EM

Максимальная частота дискретизации на входе, МГц	Максимальная частота дискретизации на выходе, МГц	Полоса пропускания АЦП, МГц	Разрядность данных приемника	Количество приемных каналов
До 100	3,125* 12,5**	300	16	4

Примечание: * максимальное значение, достигаемое при частоте тактового сигнала 100 МГц и работе одного канала; ** максимальное значение, достигаемое при частоте тактового сигнала 100 МГц и объединении 4 каналов в один тракт.

Особенностью микросхемы является то, что это полностью цифровое устройство, требующее использования внешних аналоговых фильтров, усилителей и АЦП. Характеристики ИС 1288ХК1Т определяются ее разрядностью, частотой тактирования (до 100 МГц) и особенностями реализации цифровых генераторов и фильтров. С одной стороны, это требует установки дополнительных компонентов, а с другой – оставляет некоторую гибкость в проектировании. Зарубежные производители уже давно наладили производство 16-разрядных АЦП с частотами дискретизации 100 МГц и более. В РФ в настоящее время 16-разрядные АЦП производят с частотами до 80 МГц, хотя и ведутся перспективные разработки. Например, АО НИИМА «Прогресс»

² Системы SDR. АО «ИнСис». Режим доступа: <https://www.insys.ru/sdr> (дата обращения: 26.05.2022).

в середине 2022 года планирует завершить разработку высокоскоростного АЦП 5111НВ015 с частотой выходных отсчетов до 200 МВыб/с³. Так как на отладочной плате MF-01EM установлены 10-разрядные АЦП, то динамический диапазон входных сигналов 1288ХК1Т занижен.

Для взаимодействия с внешними устройствами имеются следующие интерфейсы:

1. SPI – последовательный интерфейс для установки значений регистров устройства.

2. 8-разрядный последовательный интерфейс LINK для передачи выходных отсчетов. Совместим с процессорами технологии SHARC.

3. 32-разрядный параллельный интерфейс для передачи выходных отсчетов и установки значений регистров устройства.

На рис. 4 представлена структурная схема отладочной платы MF-01EM.

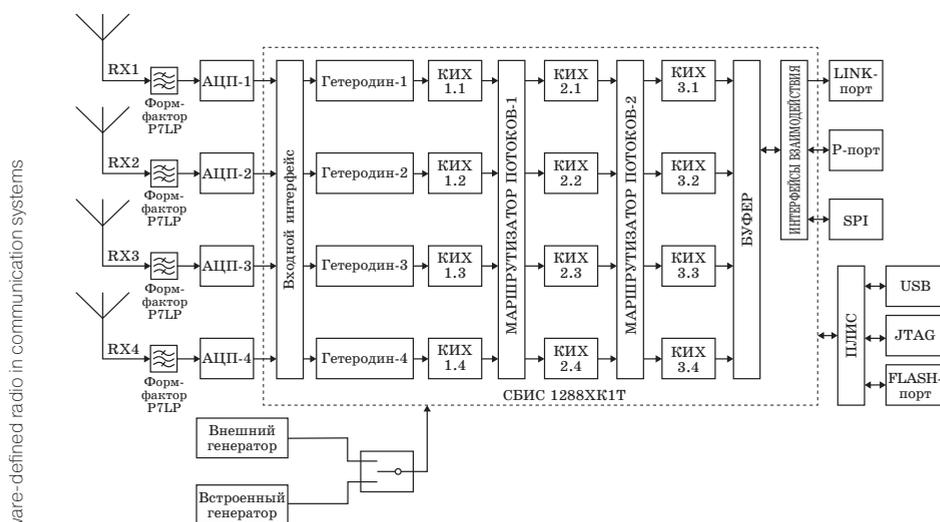


Рис. 4. Структурная схема устройства MF-01EM

Fig. 4. Block diagram of MF-01EM

На входе могут быть установлены аналоговые фильтры типа P7LP. Блоки КИХ 1.x представляют собой двухкаскадные цифровые фильтры с конечной импульсной характеристикой и фиксированными коэффициентами. Блоки фильтров КИХ 2.x и КИХ 3.x поддерживают программную настройку коэффициентов.

³ КАТАЛОГ продукции АО «НИИМА «Прогресс». Режим доступа: <https://optochip.org/docum/store/f/d/84/1496830697-17-11785.pdf> (дата обращения: 26.05.2022).

В комплекте поставки содержится демонстрационное ПО для обработки частотно-модулированных (ЧМ) сигналов и воспроизведения сигналов радиостанций в диапазоне 100–110 МГц с помощью MF-01EM. В отладочной плате предусмотрена возможность установки кварцевого генератора тактового сигнала. От значения частоты этого сигнала зависят настройки регистров частоты цифрового гетеродина и коэффициента децимации k_D КИХ фильтров. Прилагаемый пример работы с ПО содержит файл конфигурации для частоты тактирования системы 66 МГц. Нами был использован установленный по умолчанию генератор с тактовой частотой 100 МГц. Изменение файла конфигурации заключается в расчете коэффициента частоты цифрового гетеродина и k_D . Прием сигнала осуществляется при помощи принципа полосовой дискретизации, при котором полосовой сигнал расположен вне первой зоны Найквиста [16]. В результате дискретизации в первой зоне Найквиста возникает копия сигнала с несущей частотой $F_c' = F_c - F_s$, где F_c – несущая частота исходного сигнала; F_s – частота дискретизации АЦП. Далее цифровым методом эта копия переносится на нулевую частоту. Затем, после прореживания и фильтрации, полученные отсчеты квадратурного сигнала передаются в ПЭВМ для демодуляции и проигрывания сигнала. Частота гетеродина рассчитывается по формулам, представленным в документации к ИС.

Для нормальной работы демонстрационного ПО итоговая частота дискретизации принимаемого сигнала должна быть около 200 кГц. Понижение частоты выполняется встроенными фильтрами-дециматорами. Двухкаскадные фильтры КИХ 1.x (см. рис. 4) имеют фиксированный коэффициент децимации $k_{D1} = 2$ на каждом каскаде. При входной частоте дискретизации равной 100 МГц общий коэффициент децимации k_{D23} перестраиваемых фильтров КИХ 2.x и КИХ 3.x должен быть равен 125.

После замены параметров файла инициализации удалось адаптировать работу этого ПО с платой MF-01EM тактируемой на частоте 100 МГц.

Заключение

Результат обзора научных и практических работ, посвященных разработке проектов с использованием ПОР, показал, что эта технология активно применяется для решения самых различных задач радиосвязи и способствует улучшению технических характеристик изделий. Такие положительные результаты делают данное направление актуальным для изучения и развития, разработки новых проектов и освоения соответствующей элементной базы.

Анализ аппаратной реализации современных ПОР показал, что схема прохождения и предварительной обработки сигналов идентична для разных устройств. Однако имеются отличия в физической реализации некоторых элементов.

Полученные первичные представления о возможностях микросхемы 1288ХК1Т в результате работы с демонстрационным ПО и процессе подключения к процессорной плате говорят о том, что это устройство можно считать достойной альтернативой наиболее распространенным импортным решениям. Вопрос использования российской элементной базы особенно актуален в условиях ограничений на поставки импортной элементной базы. В настоящее время ведется разработка встроенного и вспомогательного ПО для реализации цифрового приемного тракта ПЧ на базе платы MF-01EM и отладочного модуля САЛЮТ ЭЛ-24ОМ с многоядерным процессором 1892ВМ14Я (также производства АО НПЦ «ЭЛВИС»). В дальнейшем планируется использовать результаты этих работ в радиолокационных задачах.

Список литературы

1. Johnson P. New research lab leads to unique radio receiver. *E-Systems Team*. 1985;5(4):6–7. Available at: <http://chordite.com/team.pdf>
2. Бойко О. В., Журавлев Д. В., Сафонов И. А. Система мониторинга подвижной радиосвязи 2G-4G сетей. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2018;14(4):117–121.
3. Кормильцев Н. В., Уваров А. Д. Имитация атаки на основе программно-определяемой радиосистемы в совместимых GSM сетях. В кн.: *Наука, образование и инновации в современном мире: Материалы национальной науч.-практ. конф., г. Воронеж, 20–21 марта 2018 г.* Воронеж: ВГАУ им. Императора Петра I; 2018. С. 170–177.
4. Бутусов А. *Миллиард устройств Интернета вещей к 2025 году – ключевая цель стратегии АНО «Цифровая экономика»*. Режим доступа: <https://iot.ru/promyshlennost/milliard-ustroystv-interneta-veshchey-k-2025-godu-klyuchevaya-tsel-strategii-ano-tsifrovaya-ekonomik> (дата обращения: 21.11.2021).
5. Lu X., Ni L., Jin S., Wen C.-K., Lu W. SDR implementation of a real-time testbed for future multi-antenna smartphone applications. *IEEE Access*. 2017;5:19761–19772. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2751622.
6. Ефимов С. Е., Степанов Н. В., Тюрликов А. М. Исследования LoRaWAN-коллизии сигналов с использованием SDR. В кн.: *Волновая электроника и инфокоммуникационные системы: материалы 24-й Междунар. науч. конф., г. Санкт-Петербург, 31 мая – 4 июня 2021 г.* СПб.: СПбГУАП; 2021. Ч. 3. С. 92–98.
7. Gavrilă C., Popescu V., Alexandru M., Murrone M., Sacchi C. An SDR-based satellite gateway for internet of remote things (IoRT) applications. *IEEE Access*. 2020;8:115423–115436. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004480.

8. Scalise S., Niebla C. P., De Gaudenzi R., Del Rio Herrero O., Finocchiaro D., Arcidiacono A. S-MIM: a novel radio interface for efficient messaging services over satellite. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(3):119–125. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6476875.

9. Ishioka T., Aiura K., Shiina R., Fukui T., Taniguchi T., Narikawa S. et al. Design and prototype implementation of software-defined radio over fiber. *IEEE Access*. 2021;9:72793–72807. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3079915.

10. Politis C., Maleki S., Duncan J.M., Krivochiza J., Chatzinotas S., Ottsten B. SDR implementation of a testbed for real-time interference detection with signal cancellation. *IEEE Access*. 2018;6:20807–20821. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2825885.

11. Lin C., Yan W., Zhang L., Wang W. A real-time modulation recognition system based on software-defined radio and multi-skip residual neural network. in *IEEE Access*. 2020;8:221235–221245. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043588.

12. Плохих О.В., Гусев А.В. Радиолокатор системы аэрологического радиозондирования атмосферы на базе SDR приемопередатчика. В кн.: *СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 31-й Междунар. науч.-техн. конф. КрыМиКо'2021, г. Севастополь, 5–11 сентября 2021 г.* Севастополь: СевГУ; 2021. Вып. 3. С. 359–360.

13. Lindseth B., Brown W. O. J., Jordan J., Law D., Hock T., Cohn S. A., Popovic Z. A New Portable 449-MHz Spaced Antenna Wind Profiler Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012;50(9):3544–3553. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184837.

14. Schmidt E., Inupakutika D., Mundlamuri R., Akopian D. SDR-Fi: Deep-Learning-Based Indoor Positioning via Software-Defined Radio. *IEEE Access*. 2019;7:145784–145797. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2945929.

15. Гаврилов Д. А., Добриков В. А. Программный прием и обработка сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского*. 2016;(652):16–22.

16. Кестер У. (ред.), Володин Е. Б. (пер.) *Мир электроники. Аналого-цифровое преобразование*. М.: Техносфера; 2007. 1015 с.

References

1. Johnson P. New research lab leads to unique radio receiver. *E-Systems Team*. 1985;5(4):6–7. Available at: <http://chordite.com/team.pdf>

2. Boyko O. V., Zhuravlev D. V., Safonov I. A. Monitoring system of mobile radio communication of 2G-4G networks. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(4):117–121. (In Russ.)

3. Kormiltsev N. V., Uvarov A. D. Attack simulation based on software-defined radio system in compatible GSM networks. In: *Science, education and innovation in the modern world: Proceedings of the national scientific and practical conference, Voronezh, 20–21 March 2018*. Voronezh: Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great; 2018, pp. 170–177. (In Russ.)

4. Butusov A. *A billion devices of the Internet of Things by 2025 is the key goal of the strategy of ANO "Digital Economy"*. (In Russ.) Available at: <https://iot.ru/promyshlennost/milliard-ustroystv-interneta-veshchey-k-2025-godu-klyuchevaya-tsel-strategii-ano-tsfrovaya-ekonomik> (accessed: 21.11.2021).

5. Lu X., Ni L., Jin S., Wen C.-K., Lu W. SDR implementation of a real-time testbed for future multi-antenna smartphone applications. *IEEE Access*. 2017;5:19761–19772. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2751622.

6. Efimov S. E., Stepanov N. V., Turlikov A. M. Research LoRaWAN collide signals with used SDR. In: *Wave Electronics and Infocommunication Systems: Proceedings of the 24th International Scientific Conference, Saint Petersburg, 31 May – 4 June 2021*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; 2021, part 3, pp. 92–98. (In Russ.)

7. Gavrilă C., Popescu V., Alexandru M., Murrioni M., Sacchi C. An SDR-based satellite gateway for internet of remote things (IoRT) applications. *IEEE Access*. 2020;8:115423–115436. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3004480.

8. Scalise S., Niebla C. P., De Gaudenzi R., Del Rio Herrero O., Finocchiaro D., Arcidiacono A. S-MIM: a novel radio interface for efficient messaging services over satellite. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(3):119–125. DOI: 10.1109/MCOM.2013.6476875.

9. Ishioka T. et al. Design and prototype implementation of software-defined radio over fiber. *IEEE Access*. 2021;9:72793–72807. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3079915.

10. Politis C., Maleki S., Duncan J. M., Krivochiza J., Chatzinotas S., Ottesten B. SDR implementation of a testbed for real-time interference detection with signal cancellation. *IEEE Access*. 2018;6:20807–20821. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2825885.

11. Lin C., Yan W., Zhang L., Wang W. A real-time modulation recognition system based on software-defined radio and multi-skip residual neural network. in *IEEE Access*. 2020;8:221235–221245. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043588.

12. Plokhikh O. V., Gusev A. V. Radar system for aerological radio sounding of the atmosphere based on SDR transceiver. In: *Microwave & Telecommunication Technology: Proceedings of the 31st International Scientific and Technical Conference CrimeaMiCo'2021, Sevastopol, 5–11 September 2021*. Sevastopol: Sevastopol State University; 2021. Iss. 3, pp. 359–360. (In Russ.)

13. Lindseth B., Brown W. O. J., Jordan J., Law D., Hock T., Cohn S. A., Popovic Z. A New Portable 449-MHz Spaced Antenna Wind Profiler Radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2012;50(9):3544–3553. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2184837.

14. Schmidt E., Inupakutika D., Mundlamuri R., Akopian D. SDR-Fi: Deep-Learning-Based Indoor Positioning via Software-Defined Radio. *IEEE Access*. 2019;7:145784–145797. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2945929.

15. Gavrilov D. A., Dobrikov V. A. Software-defined receiving and processing of signals of global navigation satellite systems. *Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy*. 2016;(652):16–22. (In Russ.)
16. Kester W. (ed.) *Analog-Digital Conversion*. Analog Devices, Inc.; 2004.

Информация об авторах

Кувшинов Олег Александрович, студент-магистрант Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: okuvshinov@inbox.ru

Плохих Олег Васильевич, старший преподаватель Института радиоэлектроники и телекоммуникаций – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: o.v.plohih@urfu.ru

Information about the authors

Oleg A. Kuvshinov, Master's Degree Student, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsi, Ekaterinburg, Russia; e-mail: okuvshinov@inbox.ru

Oleg V. Plokhikh, Senior Lecturer, Institute of Radio Electronics and Telecommunications-RTF, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsi, Ekaterinburg, Russia; e-mail: o.v.plohih@urfu.ru

Поступила / Received: 25.03.2022

Принята в печать / Accepted: 31.05.2022